NCDT 2025

National Conference on Defense Technology

การประชุมวิชาการเทคโนโลยีด้านการป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

วันที่ 16-17 ธันวาคม 2568

CONFERENCE PROCEEDINGS

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

The 2rd National Conference on Defense Technology

<u>หัวข้อ</u>

สาขาวิศวกรรมเพื่อการป้องกันประเทศ

- วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมสนามบิน วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมสำรวจ และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
- วิศวกรรมไฟฟ้า การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล และอิเล็กทรอนิกส์
- วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์
- วิศวกรรมการบินและอวกาศ
- วิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการป้องกันประเทศ

- นิวเคลียร์ ชีวะ เคมี เคมีวัตถุระเบิด และวิทยาศาสตร์ทางการทหาร
- วัสดุศาสตร์ทางการทหารและอากาศยาน
- ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์
- ความมั่นคงทางทะเล
- การจัดการสิ่งแวดล้อม และการจัดการด้านพลังงาน

สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทางด้านมั่นคงและการป้องกันประเทศ

- รัฐประศาสนศาสตร์ จิตวิทยาชุมชน บริหารและพัฒนาสังคม สังคมวิทยาและมานุษยวิทยาประยุกต์
- หลักนิยม ยุทธศาสตร์ และความมั่นคง
- การพัฒนาการเรียนการสอนด้านความมั่นคง

16-17 ธันวาคม 2568

ณ อาคารรณนภากาศ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จังหวัดสระบุรี

จัดทำโดย

- ❖ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

- ❖ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

หอสมุดแห่งชาติ

ถนนสามเสน ดุสิต กรุงเทพฯ 10300

โทรศัพท์ : 02-2809846

โทรสาร : 02-2809846

วันที่อนุมัติ 18 มีนาคม 2569

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

การประชุมวิชาการเทคโนโลยีด้านการป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2
.-- กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2569.
484 หน้า.

1. ไทย -- การป้องกันประเทศ. 2. เทคโนโลยี -- แง่การทหาร. I. ชื่อเรื่อง.

355.4
ISBN 978-616-91987-8-9

คำนำจากผู้บัญชาการโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

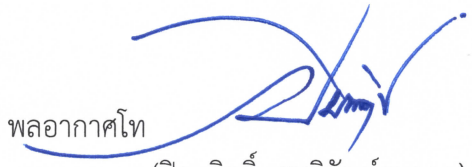
ความมั่นคงของชาติเป็นรากฐานสำคัญของการพัฒนาประเทศ ทำให้ประชาชนสามารถดำรงชีวิตได้อย่างปลอดภัยและมีเสถียรภาพ ทว่าในปัจจุบัน ภัยคุกคามด้านความมั่นคงมีความหลากหลายและซับซ้อนยิ่งขึ้น นับเป็นความท้าทายร่วมกันของประชาคมโลก โดยทุกภาคส่วน ทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และสถาบันการศึกษาจำเป็นต้องบูรณาการองค์ความรู้ ทรัพยากร และศักยภาพ เพื่อร่วมกันพัฒนาวิธีการรับมือภัยคุกคามรูปแบบใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตระหนักถึงภัยคุกคามด้านความมั่นคง จึงได้ร่วมมือกับสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย จัดการประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ ๒ ภายใต้หัวข้อ “นวัตกรรมเทคโนโลยีป้องกันประเทศเพื่อการทำสงครามแบบผสมผสาน (Defense Technology Innovation for Hybrid Warfare)” โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ การแลกเปลี่ยนเรียนรู้งานวิจัยและงานวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ รวมทั้งด้านความมั่นคงของสถาบันการศึกษาทางทหารและพลเรือน รวมถึงเพื่อส่งเสริมและพัฒนาการเรียนการสอนหลักสูตรเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และหลักสูตรที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงของสถาบันการศึกษาภายในประเทศ ตลอดจนเพื่อพัฒนางานวิจัยด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ สู่การพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืน

การประชุมวิชาการในครั้งนี้ นอกจากเป็นความร่วมมือระหว่าง โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กับสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทยแล้ว ยังได้รับความร่วมมือจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า โรงเรียนนายเรือ และโรงเรียนนายร้อยตำรวจ

สำหรับผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการประกอบด้วย คณาจารย์ นักวิชาการ ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ นักศึกษา นักเรียนนายร้อย นักเรียนนายเรือ นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนนายร้อยตำรวจ ตลอดจนผู้สนใจทั่วไปที่มาร่วมกันแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็นและประสบการณ์ รวมทั้งนำเสนอบทความวิจัยซึ่งล้วนแต่เป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมในด้านดังกล่าว นับเป็นก้าวสำคัญที่จะนำไปสู่การสร้างความมั่นคงที่ยั่งยืนให้แก่ประเทศ

ในนามของคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ทุกท่านจะได้ประโยชน์ในการนำความรู้ที่ได้รับจากการประชุมวิชาการ ไปพัฒนาต่อยอดและสร้างสรรค์เทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ตอบสนองความต้องการของประเทศชาติได้อย่างแท้จริง



พลอากาศโท
(ปิยะกิตติ์ สุทธิวัฒน์ธนากูล)
ผู้บัญชาการโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

คำนำจากผู้บัญชาการทหารอากาศ

การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ ๒ ภายใต้หัวข้อ "นวัตกรรมเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เพื่อการทำสงครามแบบผสมผสาน" (Defense Technology Innovation for Hybrid Warfare) นับเป็นโอกาสอันดีสำหรับผู้เชี่ยวชาญ นักวิจัย ตลอดจนผู้ที่สนใจ ได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ แนวคิด และประสบการณ์ ตลอดจนนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ปัจจุบัน สถานการณ์ด้านความมั่นคงของโลกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและซับซ้อน ภูมิภาคเอเชีย-แปซิฟิกได้กลายเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญ ทั้งด้านเศรษฐกิจและความมั่นคง การแข่งขันของประเทศมหาอำนาจ ตลอดจนความตึงเครียดในภูมิภาคอินโด-แปซิฟิก ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อประเทศไทยโดยตรง ประเทศไทยจึงจำเป็นต้องดำเนินยุทธศาสตร์อย่างรอบคอบ ควบคู่ไปกับการรักษาสมดุลความสัมพันธ์กับทุกฝ่าย รวมถึงเสริมสร้างขีดความสามารถในการรับมือกับภัยคุกคามรูปแบบใหม่ที่มีลักษณะผสมผสาน ทั้งด้านไซเบอร์ ข้อมูลข่าวสาร อวกาศ และเศรษฐกิจ ซึ่งถือเป็นลักษณะสำคัญของ Hybrid Warfare

จากบริบทดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการพึ่งพาตนเองด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศมีความสำคัญอย่างยิ่ง ส่งผลให้การวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศในปัจจุบันมิได้จำกัดอยู่แค่เพียงการพัฒนาอาวุธหรือระบบป้องกันเท่านั้น ยังต้องครอบคลุมถึงการเสริมสร้างความมั่นคงในทุกมิติ ตั้งแต่ด้านพลังงาน การสื่อสาร ตลอดจนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์

การประชุมวิชาการในปีนี้ จึงนับเป็นเวทีแห่งความร่วมมือระหว่างกองทัพ ภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และสถาบันการศึกษา นอกจากนี้ยังเป็นโอกาสสำคัญในการสร้างเครือข่ายผู้เชี่ยวชาญ พร้อมทั้งแลกเปลี่ยนประสบการณ์จากทุกภาคส่วน เพื่อพัฒนานวัตกรรมและงานวิจัย อันจะช่วยลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศในระยะยาว และนำไปสู่การหลอมรวมให้เป็นทั้ง "พลังความรู้" และ "พลังความร่วมมือ" ในการยกระดับศักยภาพด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศของไทย ให้เท่าทันต่อความท้าทายของสงครามแบบผสมผสาน

ในโอกาสนี้ ผมขอขอบคุณโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช หน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่ได้ให้การสนับสนุนและร่วมดำเนินงานจนการประชุมวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

พลอากาศเอก

(เสกสรร คันธา)

ผู้บัญชาการทหารอากาศ

สารจากนายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

“การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2” เป็นความร่วมมือทางวิชาการระหว่างสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) ร่วมกับ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จัดขึ้น***ระหว่างวันที่ 16-17 ธันวาคม 2568 ณ อาคารรณนภากาศ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จังหวัดสระบุรี*** ภายใต้หัวข้อ “นวัตกรรมเทคโนโลยีป้องกันประเทศเพื่อการทำสงครามแบบผสมผสาน” โดยมีวัตถุประสงค์มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนเรียนรู้งานวิจัยและงานวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ รวมทั้งด้านความมั่นคงของสถาบันการศึกษาทางทหารและพลเรือน

ในการประชุมครั้งนี้สมาคมฯ ได้รับเกียรติวิทยากรจากหน่วยงานภาครัฐ บริษัทเอกชน และบริษัทก่อสร้างที่สำคัญภายในประเทศที่มีการทำงานเกี่ยวข้องกับงานด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศซึ่งเชื่อว่าผู้เข้าร่วมประชุมจะได้รับประโยชน์จากการประชุมครั้งนี้อย่างมาก

ในฐานะของคณะผู้จัดการประชุมครั้งนี้ ขอขอบคุณ องค์ปาฐกรับเชิญวิทยากรรับเชิญ ผู้เขียนบทความ ผู้นำเสนอบทความ ผู้เข้าร่วมประชุม บริษัทและห้างร้านต่าง ๆ ที่ได้สนับสนุนการประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2 เป็นอย่างดียิ่ง ทำให้การประชุมครั้งนี้ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช)
นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
วาระประจำปี 2567 - 2568

คณะกรรมการที่ปรึกษา วาระประจำปี 2567-2568

รศ.ดร.พิชัย	นิมิตยงสกุล	อดีตนายกสมาคมฯ
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเติมสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลิ้มสุวรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	บริษัท สยามอรุณ ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
คุณวรัช	กุศลมโนมัย	บริษัท ซิโน-ไทย เอ็นจีเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)
ดร.ชนะ	ภูมี	บริษัท เอสซีจี ซิเมนต์ จำกัด
ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.การุณ	จันทรางศุ	บริษัท เค.ซี.เอส แอนด์ แอสโซซิเอทส์ จำกัด
คุณสุเมธ	สุรบถโสภณ	บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด
คุณณรงค์	ทัศนนิพันธ์	บริษัท ซีฟโก้ จำกัด(มหาชน)
ศ.ดร.เป็นหนึ่ง	วานิชชัย	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

คณะกรรมการอำนวยการ วาระประจำปี 2567-2568

พล.อ.ต.ศ.ดร.ธนากร	พีระพันธุ์	ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์นายกสมาคมฯด้านกิจการต่างประเทศ
รศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	นายกสมาคม
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิวรกุล	อุปนายก ฝ่ายวิชาการ
คุณบุญรอด	คุปติทัษหิ	อุปนายก ฝ่ายวิชาชีพ และ เหรัญญิก
ดร.ยุทธ	ปณิธานวงศ์	อุปนายก ฝ่ายภาพลักษณ์และสื่อสารองค์กร
น.อ.ณัชฐ์	ลิ้มสุวรรณ์	เลขาธิการ
คุณนรินทร์	สายันต์วิสุทธิคาม	ปฏิคม
คุณปกรณ์	สุทธิวารี	ประชาสัมพันธ์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
พ.อ.ประกาศิต	จันทนะลิขิต	นายทะเบียน
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลัด	สาราณียกร
คุณธิติ	ศรีรัตนา	กรรมการกลาง

คณะกรรมการอำนวยการ วาระประจำปี 2567-2568 (ต่อ)

ดร.นนท์พัฒน	นิมิตยงสกุล	กรรมการกลาง
คุณธรรมรัตน์	บุญเสนอ	กรรมการกลาง
คุณสุวัฒชัย	ภูวพัฒนชาติ	กรรมการกลาง
คุณปิยะนันท์	ชูฤทธิ์	กรรมการกลาง
คุณมนสิช	สาริกะภูติ	กรรมการกลาง
คุณสุเมธ	เกียรติเมธา	กรรมการกลาง
ดร.เมธี	เชี่ยววณิชย์กร	ประธานกรรมการวิชาการ สาขาโครงสร้างคอนกรีต
รศ.ดร.พงษ์ธร	จุฬพันธ์ทอง	ประธานกรรมการวิชาการ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง
ผศ.ดร.จักรพันธ์	เทือกต๊ะ	ประธานกรรมการวิชาการ สาขาบำรุงรักษาฯ

สาขาบำรุงรักษาซ่อมแซมและเสริมกำลังคอนกรีต วาระประจำปี 2567-2568

รศ.ดร.พิชัย	นิมิตยงสกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเติมสิริกุล	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ธเนศ	วีระศิริ	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.บุญไชย	สถิตมั่นในธรรม	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.จักรพันธ์	เทือกต๊ะ	ประธานฯ
คุณธรรมชาติ	กุลประภา	รองประธานฯ
คุณกีรติ	นิติโชติ	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.ชยานนท์	หรรษภิญโญ	กรรมการวิชาการ
คุณชาตรี	พานิชอุดม	กรรมการวิชาการ
คุณณรเดช	ทักขพาณิชย์	กรรมการวิชาการ
คุณณัฐมนต์	กัมปนานนท์	กรรมการวิชาการ
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.ทวิช	พูลเงิน	กรรมการวิชาการ
คุณธนวรรธน์	มาประจง	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	กรรมการวิชาการ

สาขาบำรุงรักษาซ่อมแซมและเสริมกำลังคอนกรีต วาระประจำปี 2567-2568 (ต่อ)

คุณนนทฉัตร	กุลประภา	กรรมการวิชาการ
ดร.นรินทร์	เผ่าวณิช	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.นันทวัฒน์	ขมหวาน	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ปัญญาวุธ	จิรดิลก	กรรมการวิชาการ
ดร.พุทธิพงศ์	หะลีห์รัตนวัฒนา	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ฟองจันทร์	จิราสิต	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ภัควัฒน์	แสนเจริญ	กรรมการวิชาการ
ดร.เมธี	เชี่ยววณิชย์กร	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	กรรมการวิชาการ
อ.ดร.ศุภศิษฎ์	ศรีวรานันท์	กรรมการวิชาการ
คุณสดสวย	สุจริตธรรมกุล	กรรมการวิชาการ
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	กรรมการวิชาการ
คุณสมหมาย	คำมีวงษ์	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.สรัณกร	เหมะวิบูลย์	กรรมการวิชาการ
ดร.พชร์พจี	มากภิบาล	กรรมการวิชาการ

สาขาโครงสร้างคอนกรีต วาระประจำปี 2567-2568

คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	ประธานที่ปรึกษา
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	ที่ปรึกษา
คุณคมกฤช	สุทธิไวยกิจ	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ชยานนท์	หรรษภิญโญ	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิวรกุล	ที่ปรึกษา
ดร.ทรงเกียรติ์	มธุพยนต์	ที่ปรึกษา
ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	ที่ปรึกษา
คุณศิริชัย	วรรณบูรณ์	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สุชาติ	ลิ่มกตัญญู	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สุทัศน์	ลีลาทวีวัฒน์	ที่ปรึกษา

สาขาโครงสร้างคอนกรีต วาระประจำปี 2567-2568 (ต่อ)

คุณอรรถสิทธิ์	ศิริสนธิ	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลิ้มสุวรรณ	ที่ปรึกษา
ดร.เมธี	เชี่ยววณิชย์กร	ประธานกรรมการ
ดร.วรศักดิ์	จักราปิยะนันท์	รองประธานกรรมการ
น.อ.ณัชฐ์	ลิ้มสุวรรณ์	รองประธานกรรมการ
ดร.ฉัตร	สุจินดา	กรรมการ
รศ.ดร.ทนงศักดิ์	อิ่มใจ	กรรมการ
รศ.ดร.ธิดารัตน์	จิระวัฒนาสมกุล	กรรมการ
ดร.ธีระวุฒิ	มูฮำหมัด	กรรมการ
คุณปรีดี	งามสันติกุล	กรรมการ
ดร.ปั้นเจตน์	ธรรมรักษ์	กรรมการ
รศ.ดร.พงษ์ธร	จุฬพันธ์ทอง	กรรมการ
ผศ.ดร.มนเทียร	เสร็จกิจ	กรรมการ
ดร.วงศา	วรารักษ์สัจจะ	กรรมการ
คุณวิเชียร	แก้วคำปา	กรรมการ
ดร.สุกิจ	ยินดีสุข	กรรมการ
รศ.ดร.สุนิติ	สุภาพ	กรรมการ
คุณสุเมธ	เกียรติเมธา	กรรมการ
อ.ดร.เอกชัย	อยู่ประเสริฐชัย	กรรมการ
รศ.ดร.กริสน์	ชัยมูล	กรรมการสมทบ
รศ.ดร.ณัฐพงษ์	อารีมิตร	กรรมการสมทบ
รศ.ดร.นันทวัฒน์	ขมหวาน	กรรมการสมทบ
รศ.ดร.ปนัสย์ชัย	เชษฐ์โชติศักดิ์	กรรมการสมทบ
รศ.ดร.ปรีดา	ไชยมหาวัน	กรรมการสมทบ
อ.ดร.วรเทพ	แซ่ล่อง	กรรมการสมทบ
ผศ.ดร.วัจน์วงค์	กรีพละ	กรรมการสมทบ

สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง วาระประจำปี 2567-2568

รศ.ดร.พิชัย	นิมิตยงสกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเติมสิริกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	ที่ปรึกษา
พล.อ.ต.ศ.ดร.ธนากร	พีระพันธุ์	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	ที่ปรึกษา
คุณบุญรอด	คุปติทัษหิ	ที่ปรึกษา
คุณนรินทร์	สายันต์วิสุทธิคาม	ที่ปรึกษา
คุณอรรถสิทธิ์	ศิริสนธิ	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.พงษ์ธร	จุฬพันธ์ทอง	ประธานกรรมการวิชาการ
อ.ดร.เพ็ญพิชชา	สนิทอินทร์	รองประธานกรรมการวิชาการ
คุณกฤษณะ	เลขานุกิจ	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	กรรมการวิชาการ
คุณเฉลิมวุฒิ	สงวนญาติ	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ชนะชัย	ทองโฉม	กรรมการวิชาการ
คุณณรงค์เดช	เรืองบ้านโคน	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	กรรมการวิชาการ
คุณธนพล	ไคร้งาม	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ปิยพงษ์	สุวรรณมณีโชติ	กรรมการวิชาการ
ดร.ภควัต	พร้อมมูล	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	กรรมการวิชาการ
คุณศุภกร	เมาลีกุล	กรรมการวิชาการ
คุณสุบรรณ	สนิทอินทร์	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.อรรคเดช	อับดุลมาติน	กรรมการวิชาการ
คุณอัครพงศ์	ทัพใหญ่	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.อำพล	วงศ์ษา	กรรมการวิชาการ
คุณปาณิศา	แสงแก้ว	กรรมการวิชาการและเลขานุการ
คุณจุฑารัตน์	ทรัพย์ปฐวี	กรรมการวิชาการสมทบ
คุณปราณปริยา	พุทธเนตร	กรรมการวิชาการสมทบ

คณะกรรมการอำนวยการประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

รอง เสธ.ทอ.(สายงานยุทธการ)	ที่ปรึกษา
ผบ.รร.นนก.	ประธานกรรมการ
รอง ผบ.รร.นนก. (สายงานบริหาร)	รองประธานกรรมการ
รอง ผบ.รร.นนก. (สายงานการศึกษา)	รองประธานกรรมการ
เสธ.รร.นนก.	กรรมการ
ผอ.กกศ.รร.นนก.	กรรมการ
ผอ.สบฑ.รร.นนก.	กรรมการ
รอง เสธ.รร.นนก. (สายงานบริหาร)	กรรมการ
รอง เสธ.รร.นนก. (สายงานการศึกษา)	กรรมการ
รอง ผอ.กกศ.รร.นนก. (สายงานบริหาร)	กรรมการ
รอง ผอ.กกศ.รร.นนก. (สายงานการศึกษา)	กรรมการ
รอง ผอ.สบฑ.รร.นนก.	กรรมการ
น.อ. ศ.ประสาทพร วงษ์คำช้าง	กรรมการ
น.อ.หญิง ผศ.สัณสนีย์ เหมาคม	กรรมการและเลขานุการ
น.อ.หญิง รศ.สุภาวดี ลีลายุทธ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
หน.นขต.รร.นนก.	กรรมการ
หน.นขต.บก.รร.นนก.	กรรมการ

คณะกรรมการดำเนินการและพิจารณาบทความการประชุมวิชาการ
ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

รอง ผบ.รร.นนก. (สายงานการศึกษา)	ประธานกรรมการ
ผอ.กกศ.รร.นนก.	รองประธานกรรมการ
ผอ.สบฑ.รร.นนก.	รองประธานกรรมการ
รอง เสธ.รร.นนก. (สายการศึกษา)	กรรมการ
รอง ผอ.กกศ.รร.นนก. (สายงานบริหาร)	กรรมการ
รอง ผอ.กกศ.รร.นนก. (สายงานการศึกษา)	กรรมการ

คณะกรรมการดำเนินการและพิจารณาบทความการประชุมวิชาการ
ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

รอง ผอ.สบฑ.รร.นนก.	กรรมการ
ผบ.กรม นนอ.รอ.รร.นนก.	กรรมการ
ผอ.กวท.รร.นนก.	กรรมการ
น.อ. รศ.สมพงษ์ บุตรงาม	กรรมการ
น.อ.หญิง ผศ.สัณสนีย์ เหมาคม	กรรมการและเลขานุการ
น.อ. รศ.เจนวิทย์ คำพูล	กรรมการ
น.อ. รศ.ปัญญารักษ์ โกศัลวัฒน์	กรรมการ
น.อ. ศ.ประสาทพร วงษ์คำช้าง	กรรมการ
น.อ. ผศ.ชำนาญ เพชรโชติ	กรรมการ
น.อ. ผศ.อภิชาติ จิณแพทย์	กรรมการ
น.อ.ประเมิน กาฬภักดี	กรรมการ
น.อ. รศ.ประยูร กันอยู่	กรรมการ
หก.กรก.รร.นนก.	กรรมการ
ผอ.รพ.รร.นนก.	กรรมการ
นงป.รร.นนก.	กรรมการ
หก.กยข.บก.รร.นนก.	กรรมการ
หก.กกร.บก.รร.นนก.	กรรมการ
หก.กทส.บก.รร.นนก.	กรรมการ
น.อ. รศ.เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ	กรรมการ
น.อ. รศ.ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง	กรรมการ
น.อ.หญิง รศ.สุภาวดี สีลายุทธ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
น.อ.หญิง รศ.หฤทัยทิพย์ ตัณฑเทศ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
น.อ. รศ.เทียนสิริ เหลืองวิไล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
น.อ. รศ.เมษัณฑ์ ธรรมวิชัย	กรรมการ
น.อ. รศ.ฐาปนัต บัวภิบาล	กรรมการ
น.อ. รศ.วรากรณ์ พูลจันทร์	กรรมการ
หน.ผกง.บก.รร.นนก.	กรรมการ
หน.ผชย.กรก.รร.นนก.	กรรมการ

คณะกรรมการดำเนินการและพิจารณาบทความการประชุมวิชาการ
ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

น.ท.หญิง ผศ.เอื้อมพร รัตนสิงห์	กรรมการ
น.ท. รศ.พายัพ ศิรินาม	กรรมการ
น.ท.หญิง นุชจิรา ทับจันทร์	กรรมการ
น.ต.หญิง เฉลิมขวัญ ศิริพันธุ์	กรรมการ
ผบ.ร้อย.ทสห.รร.นนก.	กรรมการ
ผบ.ร้อย.ทย.รร.นนก.	กรรมการ
ร.อ.หญิง พัทธมน ปิ่นเพชร	กรรมการ
ร.อ.หญิง อัญชสา อภิชัยเจริญ	กรรมการ
ร.อ.หญิง พิชญ์ธิดา จิตตมาโร	กรรมการ
ร.อ.ณัฐพล เกษางาม	กรรมการ
ร.อ. ผศ.ปธิกร อันชื่น	กรรมการ
ร.อ.ธนานพ ลิ่มสุวรรณโรจน์	กรรมการ
ร.ท.หญิง พนิดา แก้วชนิด	กรรมการ
ร.ท.หญิง รุ่งนภา เรืองแจ่มจำรัส	กรรมการ
ร.ท.นัฐวัตร ถนอมชาติ	กรรมการ
ร.ท.ลิขิต ดีรักษา	กรรมการ
ร.ท.หญิง เบญจวรรณ ทองคำ	กรรมการ
พ.อ.อ.จีระศักดิ์ ศรีจันทร์	กรรมการ
จ.ต.ทรงกลด ตันรัตนะ	กรรมการ
นายพรพงษ์ จงสุวรรณ	กรรมการ
นางสาวศิริพร พลายเถื่อน	กรรมการ
นางสาวปลายฟ้า คำงาม	กรรมการ

กำหนดการและรายละเอียดการประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ ๒
“นวัตกรรมเทคโนโลยีป้องกันประเทศเพื่อการทำสงครามแบบผสมผสาน”
(Defense Technologies Innovation for Hybrid Warfare)
ระหว่าง ๑๖ - ๑๗ ธ.ค.๖๘
ณ อาคารรณนภากาศ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อ.มวกเหล็ก จว.สระบุรี

.....

<u>วันอังคารที่ ๑๖ ธ.ค.๖๘</u>

เวลา ๐๘๐๐ - ๐๘๑๕	ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการฯ ลงทะเบียน
เวลา ๐๘๐๐ - ๐๘๓๐	ผู้แทนผู้บัญชาการทหารอากาศ ชมนิทรรศการ
เวลา ๐๘๓๐ - ๐๘๔๕	พิธีเปิดการประชุมวิชาการฯ
เวลา ๐๘๔๕ - ๐๙๑๕	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “กองทัพอากาศในปัจจุบันและอนาคต กับการรับมือ Hybrid Warfare” โดย พล.อ.อ.บุญเลิศ อันดารา ที่ปรึกษาพิเศษกองทัพอากาศ ผู้แทน ผบ.ทอ.
เวลา ๐๙๑๕ - ๑๐๑๕	เสวนา หัวข้อ “บทบาทและภารกิจของกองทัพต่อสมรภูมิการรบด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่” โดย พล.ร.อ.ธาดาวุธ ทัดพิทักษ์กุล เสนาธิการทหารเรือ, พล.ต.ณัฏฐ์ ศรีอินทร์ รองแม่ทัพภาคที่ ๒ และผู้แทน ทอ. โดยมี พล.อ.ต.รศ.เฉลิมชัย ชูชาติพงษ์ ผอ.สบฑ.รร.นนก.เป็นผู้ดำเนินรายการ
เวลา ๑๐๑๕ - ๑๐๓๐	พักรับประทานอาหารว่าง
เวลา ๑๐๓๐ - ๑๑๐๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “อุตสาหกรรมป้องกันประเทศกับการพึ่งพาตนเอง” โดย พล.อ.อ.พิบูลย์ วรวรรณปรีชา กรรมการผู้จัดการ บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด
เวลา ๑๑๐๐ - ๑๒๐๐	เสวนา หัวข้อ “การสื่อสารในสถานการณ์วิกฤต” โดย พล.อ.ท.จักรกฤษณ์ ธรรมวิชัย รอง เสธ.ทอ.และโฆษกกองทัพอากาศ และคุณ วาสนา นาน่วม โดยมี น.ท.รศ.ดร.พายัพ ศิรินาม อจ.กกศ.รร.นนก.และคณะทำงานโฆษกกองทัพอากาศ เป็นผู้ดำเนินรายการ
เวลา ๑๒๐๐ - ๑๓๐๐	พักรับประทานอาหารกลางวัน
เวลา ๑๓๐๐ - ๑๔๓๐	การนำเสนอบทความวิจัย
เวลา ๑๔๓๐ - ๑๕๐๐	พักรับประทานอาหารว่าง
เวลา ๑๕๐๐ - ๑๖๐๐	การนำเสนอบทความวิจัย
เวลา ๑๖๐๐ - ๑๗๐๐	การประชุม คณก.จัดการประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
เวลา ๑๖๑๕ - ๑๗๐๐	NKRAFA Tour (ชมพื้นที่ รร.นนก.และสักการะพระบรมราชานุสาวรีย์ พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร)
เวลา ๑๗๓๐	งานเลี้ยงต้อนรับ (Welcome Dinner)
เวลา ๑๘๐๐	การแสดงของ นนอ.
เวลา ๑๘๑๐ - ๑๘๓๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “ความร่วมมือทางทหารกับการขับเคลื่อน SARABURI SANDBOX” โดย คุณบัญชา เชาวรินทร์ ผู้ว่าราชการจังหวัดสระบุรี
เวลา ๑๘๓๐ - ๑๘๕๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “Sustainability meets Security in SARABURI SANDBOX” โดย ดร.ชนะ ภูมี นายกสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA)
เวลา ๒๑๐๐	จบงานเลี้ยง Welcome Dinner

<u>วันพุธที่ ๑๗ ธ.ค.๖๘</u>

เวลา ๐๘๓๐ - ๑๐๐๐	การนำเสนอบทความวิจัย / การประชุมสร้างเครือข่ายถ่ายทอดประสบการณ์การออกแบบการจำลองเชิงคำนวณ และการทดสอบโครงสร้างรับแรงระเบิดสู่การพัฒนามาตรฐานการออกแบบโครงสร้างทนแรงระเบิดสำหรับประเทศไทย
เวลา ๑๐๐๐ - ๑๐๓๐	พักรับประทานอาหารว่าง
เวลา ๑๐๓๐ - ๑๒๐๐	การนำเสนอบทความวิจัย / การประชุมสร้างเครือข่ายความร่วมมือทางการวิจัยและทางวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
เวลา ๑๒๐๐ - ๑๓๐๐	พักรับประทานอาหารกลางวัน
เวลา ๑๓๐๐ - ๑๓๓๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “การพัฒนาเทคโนโลยีเรดาร์สำหรับการป้องกันประเทศเพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ” โดย ศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพงษ์ เลิศวิริยะประภา หัวหน้าศูนย์ปฏิบัติการเทคโนโลยีเรดาร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
เวลา ๑๓๓๐ - ๑๔๐๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “Ultra-High-Performance Concrete for military applications (UHPC Bunker)” โดย พล.ต.ณัฐพงศ์ พรหมศร ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาภาค ๕ หน่วยบัญชาการทหารพัฒนา และ ดร.กฤษฎา ศรีสมพร Group Leader - Innovative Construction Innovation and Technology, SCG
เวลา ๑๔๐๐ - ๑๔๓๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “แนวคิดและประสบการณ์ในการพัฒนาและขับเคลื่อนอุตสาหกรรมความมั่นคง: กรณีศึกษาบริษัทชัยเสรี” โดย คุณ กฤต กุลหิรัญ ผู้ช่วยผู้จัดการใหญ่ บริษัท ชัยเสรีเม็ททอล แอนด์ รับเบอร์ จำกัด
เวลา ๑๔๓๐ - ๑๕๐๐	พักรับประทานอาหารว่าง
เวลา ๑๕๐๐ - ๑๕๓๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “เทคโนโลยีดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการปฏิบัติการทางทหารและการนำไปใช้” โดย น.ท.ปริญญา อนันตชัยศิลป์ จาก EOS ORBIT Co., Ltd.
เวลา ๑๕๓๐ - ๑๖๐๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “UAV Center และ KAMIKAZE UAV” โดย น.อ.ศ.วันชัย เจียจันทร์ หน่วย UAV Center กองบิน ๓
เวลา ๑๖๐๐	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “๗๒ ปี นายเรืออากาศ” โดย พล.อ.ท.ปิยะกิตติ์ สุทธิวัฒน์ธนากูล ผบ.รร.นนก.
เวลา ๑๖๓๐	ปิดการประชุมวิชาการ

สารบัญบทความ

ลำดับ	ชื่อบทความ	หน้า
1	**การออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้าสำหรับระบบกล้องติดตามเป้าหมาย** **Design of an Aiming Device for Electro-Optical Tracking System** *เกดิษฐ์ ใจดี / สราวุธ บุญล้น / ณรงค์กร เดินหลักคำ*	1
2	**การพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกล ด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ** **The Development of the Smart Digital Platform for Distance Consulting in Self Adaptation for the Air Force Cadets** *ปัญญารักษ์ โกศัลวัฒน์ / ยศพล พงษ์แก้ว*	9
3	**วิศวกรรมระบบกับการวิจัยและพัฒนายุทโธปกรณ์** **Systems Engineering for Armaments Research and Development** *ธนาสิทธิ์ เสือล่าน / ณณัท ฐานทัดสกุล / พีระยุทธ สารตายน*	29
4	**Fluid-structure interaction analysis and fatigue life prediction of additively manufactured nickel-based superalloy centrifugal compressor impeller** *Nititorn Supharatchartphan / Vitoon Uthaisangsuk*	43
5	**การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการประมาณตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ออปติคอลโฟล์ว** **Deep Visual Odometry Using Optical Flow** *กิตติศักดิ์ ศานติประพันธ์ / พีรวิชญ์ พุกเปี่ยมบารมี / สุภัทรดิศ สารสิทธิ์ / น.อ.รศ.ดร.เมษัณฑ์ ธรรมวิชัย*	59
6	**ระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่ของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช บนฐานของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์** **A GIS-Based Spatial Data Search System for the Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy** *เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ / ปัญญารักษ์ โกศัลวัฒน์ / อานนท์ ศรีประเสริฐ / ชณิชา หมอยาดี*	69
7	**การพัฒนาต้นแบบระบบภูมิสารสนเทศเพื่อบัญชาการและควบคุมงานด้านบรรเทาสาธารณภัย** **Development of a GIS Prototype for Disaster Relief Operations Command and Control** *เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ*	82
8	**แนวทางการรับมือต่อผลกระทบของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์กองทัพอากาศ** **Guidelines for Addressing the Impact of Artificial Intelligence Technology on the Cybersecurity of the Royal Thai Air Force** *นาวาอากาศโท รองศาสตราจารย์ ดร.พายัพ ศิรินาม*	95
9	**การศึกษาผลกระทบของการจัดวางองศาและความหนาของชั้นต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของกระบวนการขึ้นรูปสามมิติด้วยเรซิน** **Influence of Build Orientation and Layer Height on the Mechanical and Thermal Properties of SLA 3D-Printed Resin** *ศุภวิชญ์ ทองอ่ำ / ชยทศ ขันชนะ / โชคชัย แจ่มอำพร / นพพล สมเศรษฐ์*	111
10	**สงครามรหัสลับ** **The Cryptographic War** *ปรเมศวร กุมารบุญ*	123
12	**การออกแบบ Packet format สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ด้วย ROS custom message** **Designing a packet format for robot control using ROS custom message** *ขันชัย กิ่งกังวาลย์*	146
13	**ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ** **Factors Related to and Impacts of Selecting Major Fields of Study for Air Cadets** *หฤทัยทิพย์ ตัณฑเทศ*	157

ลำดับ	ชื่อบทความ	หน้า
14	**ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช** **Factors Influencing Admission to Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy** *ธนานพ ลิ่มสุวรรณโรจน์*	172
15	**การวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดความร้อนในหลุมขยะชีวภาพแบบฝังกลบและความเสี่ยงการเกิดอัคคีภัย** **The behaviour analysis of heat-generation within biological landfills and fire accident risk** *เทียนสิริ เหลืองวิไล*	183
17	**การประเมินการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง จากข้อมูลดาวเทียมนภา-2 กรณีศึกษาพื้นที่ อ.มวกเหล็ก จ.สระบุรี** **Assessment of Machine Learning on Land-Use Classification using NAPA-2 Satellite Imagery: A Case Study in Muak Lek, Saraburi** *จิตรลดา เทียนสวัสดิ์ / เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ*	197
18	**การศึกษาการทดสอบระเบิดยานเกราะด้วยหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569** **A Study on Blast Testing of Armored Vehicles using Anthropomorphic Test Device in Accordance with NATO AEP-55 STANAG 4569** *สถาพร ไผ่แผน / กิตติธัช ถนอมพงษ์ชาติ / ณรงค์กร เดินหลักคำ / ณัฐภัทร คุ้มปรีดี*	213
19	**การประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ส าหรับหุ่นจ าลองการทดสอบ ATD Hybrid III** **Implementation of a LabVIEW Application for the Anthropomorphic Test Device (ATD) Hybrid III** *จิระพงษ์ มะกะ / กันต์ธร นาทอง / ณรงค์กร เดินหลักคำ / ณัฐภัทร คุ้มปรีดี*	226
20	**การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพ ด้วยขยะขวดพลาสติก (PET) และปูนไฮเดรตโดยวิธีมาร์แชลล์** **Investigation of PET and Hydrated Lime-Modified Asphalt Concrete by Marshall Test** *ณัฐชนน จันทร์แพง / ภัทรภณ สังข์แจ่ม / พงษ์ฤทธิ์ นิติวงศ์*	240
21	**ระบบเลเซอร์กำลังสูง: การออกแบบและการสร้างเพื่อการป้องกันระยะใกล้** **Short-Range Defense** *กมุทสุพ สังขเกษม / ภัคเดช ชาวนาวิก / สหชัย สำเภาเงิน*	248
23	**คอนกรีตจากเปลือกหอยนางรม** **Concrete form Oyster Shell Waste** *อริสมันต์ แสงธงทอง / วรพล ผิวแดง / สาธิต กลิ่นหอม*	254
24	**แนวทางทำนายระดับน้ำในพื้นที่ขาดข้อมูลดิบ โดยการใช้อัลกอริทึม S_TIDE** **A Method for Water Level Prediction in Data-Scarce Areas Using the S_TIDE Algorithm** *รณกร สร้อยศรี / วาริส บัวขาว*	263
26	**Resilient Leader-Follower Drone Swarm Simulation with Failure Recovery and Dynamic Re-election** *Dhanasak Bhumichai*	271
27	**การวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลอง CFD เพื่อยกระดับความแม่นยำในการคำนวณคุณสมบัติ ทางอากาศพลศาสตร์ของจรวด** **Enhancing Missile Aerodynamic Predictions through Comparative CFD Model Assessment** *วศิน เอียงสวาท / มงคล แก้วบำรุง / เวชพงศ์ ชุติชูเดช*	284
28	**การทบทวนงานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณของใบพัดอากาศยานไร้คนขับความเร็วต่ำ** **Literature Review of Computational Aeroacoustics of Low-Speed UAV Propellers** *วรนภ ใหลตระกูล / ชินภัทร ทิพโยภาส*	298
29	**การวิเคราะห์ด้านอากาศพลศาสตร์และเสียง ของใบพัดอสมมาตรสำหรับอากาศยานไร้คนขับ** **Aerodynamic and Acoustic Analysis of Asymmetrical Propeller for UAVs** *ผศ.ดร. ชินภัทร ทิพโยภาส / นาย ธัญเทพ อัศวบุญมี / นาย สิรภพ โชคชัยปัถมาพร / Julette Hermann / Nathan Da Rugna*	311

ลำดับ	ชื่อบทความ	หน้า
30	**การพัฒนาต้นแบบการปลูกผักไฮโดรโพนิกส์เพื่อการพึ่งพาตนเองในชุมชน กรณีศึกษา หมู่บ้านเทพประทาน จังหวัดนครนายก** **Development of a Hydroponic Vegetable Cultivation Model for Self-Sufficiency in Communities Case Study: Theppathan Village, Nakhon Nayok Province** *พ.อ.ผศ. สามารถ พรเจริญ / นนร.อัครวิชช์ ว่องวัฒนโรจน์ / นนร.สิทธิศักดิ์ พรมศรีธรรม / นนร.ปรินทร์ ภู่ตระกูล / นนร.สุรรัฐ ศรีวนิชย์ / นนร.ภาวพุทธิ์ โสจะ / นนร.ปุณญพัฒน์ สมานหมู่ / นนร.สิริวัฒน์ จำสอน*	327
31	**การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจวิเคราะห์ความเสียหายของพื้นผิวทางวิ่งและทางขับของสนามบิน** **Application of Artificial Intelligence for Runway and Taxiway Pavement Damage Inspection at Airports** *ประสาทพร วงษ์คำช้าง / พินิศ รัตนปรมากุล / อริสมันต์ แสงธงทอง / วาริส บัวขาว*	340
33	**การศึกษาการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับแท็กซี่ไฟฟ้าภายในเขตสนามบิน** **FEASIBILITY STUDY OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATION FOR ELECTRIC VEHICLE TAXI IN AIRPORT** *พงศ์ธัช ตันสกุล*	350
34	**Designing Guidelines for Steel Selection and Manufacturing of a Main Battle Tank Torsion Bar** *Parinya Kiatpachai / Anotai Suksangpanomrung / Chonlachart Cherdchoonuan / Vitoon Uthaisangsuk*	365
35	**การใช้การจดจำเสียงพูดในการควบคุมหุ่นยนต์ 4 ล้อ โดย ROS2 Kilted Kaiju บน Ubuntu 24.04** **Speech Recognition for 4-Wheeled Mobile Robot Control using ROS2 Kilted Kaiju on Ubuntu 24.04** *วุฒิพร มากมี / ดุลยวัต ปัญญารัตนศรีขจร / ชนมภัทร โตระสะ / เศรษฐกาล โปร่งนุช / อภิรักษ์ ธิตินฤมิต / กฤษฎา อิทธิโพธิรัตน์ / ปฏิญญา สมานุหัตถ์*	379
36	**การคำนวณเชิงควอนตัมเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการนำทางด้วยภาพ สำหรับอากาศยานไร้คนขับ** **Quantum Computing for Enhancing the Performance of Vision-Based Navigation Algorithms in Unmanned Aerial Vehicles** *ประสาทพร วงษ์คำช้าง / เฉลิมขวัญ ศิริพันธุ์ / ศิรภัสร์ เทียนพันธุ์*	387
37	**วิศวกรรมระบบและโมเดลดิจิทัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของกำลังพล ด้านวิศวกรรมในโปรแกรมพัฒนาขีดความสามารถขนาดใหญ่ของกองทัพอากาศ** **Integrating Model-Based Systems Engineering into the Royal Thai Air Force Capability Development Programs: A Practice for Enhanced Engineering Personnel Efficiency** *วรเชษฐ์ เจริญสวัสดิ์ / เชษฐพัฒน์ ไกรขาว / ณณัท ฐานทัดสกุล / วิภาวดี วงษ์สุวรรณ*	396
38	**A Proof-of-Concept Low-Cost SeaGlider with Syringe-Driven Buoyancy Control and 3D-Printed Structure** *Nutthawut Suchato / Sarawuth Srinakaew / Napadach Attachareanwong / Phupha Rungsuntia / Suppanut kalamphasut*	409
39	**การคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์เพื่อเตรียมความพร้อมด้านเทคโนโลยีสื่อสารโทรคมนาคม ของกองทัพอากาศ** **Strategic Foresight for Technological Preparedness of the Royal Thai Air Force's Telecommunication System** *สุรชัย เชี่ยวชาญ / ธันยวัต ชูส่งแสง*	422
40	**บูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ** *นาวาอากาศเอก ณัฐพล นิยมไทย*	434
41	**การพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศ ในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** **The Development of Surveillance and Reconnaissance for Electronic Intelligence of the RTAF in Air Domain and Space Domain to Counter Electromagnetic Threats** *นาวาอากาศเอก วัชรพงษ์ กลีบม่วง*	447

การออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้าสำหรับระบบกล้องติดตามเป้าหมาย
Design of an Aiming Device for Electro-Optical Tracking System

เกดิษฐ์ ใจดี[1*], สราวุธ บุญล้น[2] และ ณรงค์กร เดินหลักคำ[3]

[1,2,3] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

Kedit Jaidee[1*], Sarawut Boonlon[2] and Narongkorn Dernlugkam[3]

[1,2,3]Defence Technology Institute

Kedit.j@dit.or.th

บทคัดย่อ

ระบบกล้องติดตามเป้าหมาย (Electro-Optical Tracking System: EOTS) เป็นเทคโนโลยีสำคัญที่ใช้ในการตรวจจับและติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ในระยะไกล โดยเฉพาะในงานทดสอบอาวุธและระบบทางยุทธวิธี อย่างไรก็ตาม ระบบติดตามอัตโนมัติมักประสบปัญหาในการติดตามเป้าหมายอย่างต่อเนื่องเนื่องจากข้อจำกัดด้านกลไก สภาพแวดล้อม และประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ทำให้จำเป็นต้องพึ่งพาการควบคุมแบบแมนนวล (Manual Mode) ผ่านคอนโทรลสติ๊ก ซึ่งมีข้อจำกัดทั้งด้านความแม่นยำ ความเมื่อยล้าของผู้ใช้งาน และความไม่เป็นธรรมชาติของการควบคุม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวคิดการพัฒนา “อุปกรณ์ชี้เป้า (Aiming Device)” ที่ใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวแบบ Inertial Measurement Unit (IMU) เพื่อควบคุมทิศทางของกล้อง EOTS โดยตรง แทนการใช้คอนโทรลสติ๊กแบบดั้งเดิม ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้หลักการ Human-Centered Design โดยมุ่งให้ผู้ใช้สามารถชี้ก้านเล็งไปยังทิศทางของเป้าหมายได้อย่างเป็นธรรมชาติ เสมือนการชี้นิ้วไปยังวัตถุจริง ข้อมูลจาก IMU จะถูกประมวลผลแบบเวลาจริงเพื่อคำนวณมุม Pitch และ Yaw ก่อนส่งคำสั่งไปยังระบบควบคุมทิศทางของกล้อง ผลการวิเคราะห์เชิงแนวคิดแสดงให้เห็นว่าแนวทางนี้สามารถเพิ่มความเร็ว ความแม่นยำ และลดความล้าของผู้ควบคุมได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอนโทรลสติ๊ก การออกแบบดังกล่าวมีความเป็นไปได้ทางเทคนิคสูงและเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมกล้องติดตามเป้าหมายในอนาคต

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชี้เป้า, ระบบกล้องติดตามเป้าหมาย, ระบบควบคุมทิศทาง

Abstract

The Electro-Optical Tracking System (EOTS) is a crucial technology for detecting and tracking distant moving objects, particularly in weapon testing and tactical operations. However, automatic tracking systems often fail to maintain continuous target tracking due to mechanical limitations, environmental interference, and algorithmic constraints, necessitating manual operation via a joystick. Traditional joystick-based control is indirect, imprecise, and physically fatiguing, especially when tracking high-dynamic targets. This study proposes the conceptual design of a novel "Aiming Device" that utilizes a 9-DOF Inertial Measurement Unit (IMU) to directly control the camera's line of sight, replacing the conventional rate-control mechanism with a natural, position-based approach. Guided by "Human-Centered Design" principles, the proposed device allows operators to intuitively point toward the target, similar to natural hand pointing. The IMU's motion data are processed in real time to compute pitch and yaw angles, which are transmitted to the EOTS gimbal for smooth and continuous movement. Conceptual analysis indicates significant advantages in speed, precision, user comfort, and learning efficiency compared with joystick control. The proposed design demonstrates high technical feasibility and represents a promising direction for the next generation of intuitive, motion-based EOTS control systems.

Keywords: aiming device, electro-optical tracking system, directional control system

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและบทบาทของระบบกล้องติดตามเป้าหมาย

ระบบกล้องติดตามเป้าหมาย (Electro-Optical Tracking System: EOTS) แสดงดังรูปที่ 1 เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในหลากหลายภารกิจทางทหารและพลเรือน ถูกออกแบบมาเพื่อ ตรวจจับ, ติดตาม, และบันทึกภาพของเป้าหมายที่อยู่ระยะไกล โดยประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วนที่ทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ ได้แก่: 1) กล้องวิดีโอซึ่งเป็นอุปกรณ์ถ่ายและบันทึกภาพ 2) ระบบควบคุมทิศทางของกล้อง (Motion Control System) ซึ่งเป็นกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแกนมุมก้ม-เงย (Elevation) และมุมหมุนในแนวราบ (Azimuth) เพื่อหันกล้องไปยังทิศทางของเป้าหมาย, และ 3) ระบบสั่งการ (Command System) ซึ่งทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ควบคุมหรือระบบอัตโนมัติเพื่อควบคุมทิศทางของกล้อง

หนึ่งในบทบาทสำคัญของ EOTS คือการใช้งานในงานทดสอบอาวุธ โดยเฉพาะการทดสอบจรวด, ปืนใหญ่ต่อสู้อากาศยานและระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น ในการทดสอบอาวุธ EOTS ทำหน้าที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ การค้นหาและยืนยันเป้าหมาย (acquisition), การติดตามแบบต่อเนื่อง (tracking) ตลอดเส้นทางการบินเพื่อบันทึกภาพ ซึ่งหากระบบอัตโนมัติสามารถติดตามเป้าหมายได้ EOTS จะสามารถบันทึกภาพได้อย่างต่อเนื่อง แต่โดยทั่วไปแล้วระบบติดตามเป้าหมายของกล้อง EOTS ไม่สามารถติดตามเป้าหมายได้ตลอดเวลา เนื่องจากข้อจำกัดทั้งด้านกลไก สภาพแวดล้อม และสมรรถนะของอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมการติดตาม ในเชิงกลไกกล้องอาจไม่สามารถหมุนได้ทันเมื่อเป้าหมายเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงหรือออกนอกขอบเขตการหมุนของแท่นติดตั้ง ส่งผลให้การล็อกเป้าหมายขาดหาย ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมก็มีผลอย่างมาก เช่น การบดบังของเมฆ ควัน หรือวัตถุในแนวสายตา รวมถึงสภาพอากาศที่มีหมอกหรือแสงแดดรบกวน ทำให้คอนทราสต์ของภาพลดลงจนระบบตรวจจับทำงานได้ยาก ทั้งหมดนี้เป็นสาเหตุร่วมที่ทำให้ระบบ EOTS สูญเสียการติดตามในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะในการทดสอบอาวุธที่มีความเร็วสูงและสภาพแวดล้อมไม่แน่นอน ซึ่งในขณะที่ยังค้นหาและยืนยันเป้าหมายไม่ได้จำเป็นต้องใช้โหมดสั่งการจากผู้ควบคุม (Manual Mode)

รูปที่ 1 ระบบกล้องติดตามเป้าหมาย EOTS

1.2. ข้อจำกัดของโหมดสั่งการจากผู้ควบคุม (Manual Mode)

ในโหมดสั่งการจากผู้ควบคุม อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมคือเมาส์และคอนโทรลสติ๊ก ซึ่งทำหน้าที่แปลงการเคลื่อนไหวของมือผู้ควบคุมเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อสั่งการมอเตอร์ของระบบควบคุมทิศทางกล้อง อย่างไรก็ตาม การควบคุมด้วยคอนโทรลสติ๊กมีข้อจำกัดเชิงระบบหลายประการที่ส่งผลต่อความคล่องตัวและความแม่นยำในการปฏิบัติงาน โดยเฉพาะเมื่อต้องติดตามเป้าหมายที่มีพลวัตสูง (High dynamic target) ประการแรก การควบคุมด้วยคอนโทรลสติ๊กเป็นรูปแบบการควบคุมทางอ้อม (Indirect Control) กล่าวคือ ผู้ควบคุมไม่ได้ชี้ไปยังเป้าหมายโดยตรง แต่เป็นการควบคุม "ความเร็วเชิงมุม" (Angular Velocity) ของกล้องใน 2 แกน รูปแบบการควบคุมนี้ต้องการให้ผู้ควบคุมสร้าง "ความจำของกล้ามเนื้อ" (Muscle Memory) ที่ซับซ้อนเพื่อแปลงเจตนาในการเล็งให้เป็นการเคลื่อนไหวของข้อมือหรือนิ้วหัวแม่มือที่เหมาะสม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยการฝึกฝนและอาจไม่เป็นธรรมชาติ ประการที่สอง ข้อจำกัดทางกลไกและอิเล็กทรอนิกส์ของคอนโทรลสติ๊กเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการควบคุมที่ละเอียดอ่อน คอนโทรลสติ๊กส่วนใหญ่มี "โซนหยุดทำงาน" (Deadzone) ซึ่งเป็นช่วงการเคลื่อนไหวเล็กน้อยรอบจุดศูนย์กลางที่ไม่มีการส่งสัญญาณใดๆ ออกไป แม้ว่า Deadzone จะจำเป็นเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่โดยไม่ตั้งใจที่เกิดจากการสั่นหรือการสึกหรอของกลไก แต่ก็เป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อการปรับตำแหน่งกล้องอย่างละเอียด ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการรักษาการล็อกเป้าหมายที่อยู่ไกล นอกจากนี้ การตอบสนองของคอนโทรลสติ๊กมักถูกกำหนดโดย "เส้นโค้งความเร่ง" (Acceleration Curve) ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเมื่อโยกคันบังคับไปไกล และเคลื่อนที่ช้าเมื่อโยกเพียงเล็กน้อย หากเส้นโค้งนี้ไม่ได้รับการออกแบบมาอย่างเหมาะสม อาจทำให้การควบคุมรู้สึกกระตุก ไม่เป็นธรรมชาติ และยากต่อการคาดเดา ส่งผลให้ผู้ควบคุมมักจะเล็งเกินเป้าหมาย (Overshooting) และต้องคอยแก้ไขตำแหน่งอยู่ตลอดเวลา ประการสุดท้าย ปัจจัยด้านสรีรศาสตร์ (Ergonomics) และความเมื่อยล้าก็เป็นข้อจำกัดที่สำคัญ การใช้ข้อมือหรือนิ้วหัวแม่มือในการ "ผลัก" และ "ดึง" คันบังคับอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานสามารถนำไปสู่ความเมื่อยล้าของมือและแขนได้ นอกจากนี้ สรีรศาสตร์ของการเคลื่อนไหวของข้อมือหรือนิ้วหัวแม่มือยังไม่สมมาตร กล่าวคือ การดึงคันบังคับเข้าหาตัวมักจะมีแรงงัดและความรู้สึกที่แตกต่างจากการผลักออกไป ทำให้การควบคุมขาดความสม่ำเสมอและแม่นยำ ข้อจำกัดเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความไม่สอดคล้องกันระหว่างหลักการทำงานของคันบังคับหรือคอนโทรลสติ๊กกับความต้องการในการปฏิบัติงานของระบบกล้อง EOTS ระบบกล้อง EOTS ต้องการการควบคุมตำแหน่ง (Position Control) ที่ราบรื่น, โดยตรง, และตอบสนองทันที แต่คอนโทรลสติ๊กกลับให้การควบคุมความเร็วเชิงมุม ที่เป็นทางอ้อมและมีความไม่แม่นยำในระดับเล็กๆ จากข้อจำกัดในการออกแบบ ความบกพร่องที่ไม่สอดคล้องกันเหล่านี้จึงควรใช้รูปแบบการควบคุมทางเลือกใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า

1.3 แนวทางการพัฒนา: อุปกรณ์ชี้เป้าที่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวโดยตรง

แนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ชี้เป้า(Aiming Device) ที่อาศัยเทคโนโลยีเซนเซอร์ IMU ใช้ในการชี้เป้าโดยตรงแทนการใช้คอนโทรลสติ๊ก ทำให้ผู้ควบคุมสามารถใช้งานได้ง่าย ติดตั้งกับระบบ EOTS ได้เลยโดยไม่ปรับเปลี่ยนระบบควบคุมเดิม

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและวิเคราะห์ความต้องการของระบบกล้องติดตามเป้าหมาย (Electro-Optical Tracking System: EOTS) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้า

1.4.2 ออกแบบโครงสร้างเชิงแนวคิดของอุปกรณ์ชี้เป้า (Aiming Device) ที่สามารถเชื่อมต่อกับ EOTS และแทนการใช้คอนโทรลสติ๊กได้ โดยไม่ต้องปรับปรุงเปลี่ยนแปลงระบบเดิม

1.4.3 จัดทำแบบสรุปการออกแบบ (Design Summary) เพื่อเป็นต้นแบบเชิงแนวคิดสำหรับการสร้างอุปกรณ์จริงในขั้นตอนต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา: งานวิจัยมุ่งเน้นการออกแบบเชิงกลของอุปกรณ์ชี้เป้าเท่านั้น โดยไม่ครอบคลุมถึงการสร้างต้นแบบจริง (Prototype) หรือการทดสอบการทำงานในภาคสนาม

1.5.2 ขอบเขตด้านเทคนิคการออกแบบ: การออกแบบมุ่งเน้นในการนำอุปกรณ์ชี้เป้าทดแทนคอนโทรลสติ๊กได้ โดยไม่ต้องปรับปรุงเปลี่ยนแปลงระบบ EOTS เดิมแต่อย่างใด

1.5.3 ขอบเขตด้านการประเมินผล: การประเมินผลในขั้นนี้จะเป็นเชิงเปรียบเทียบด้วยหลักทฤษฎีและการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ จากแนวคิดยังไม่รวม การทดสอบประสิทธิภาพกับผู้ใช้ หรือการทดสอบในสภาพแวดล้อมปฏิบัติการจริง

1.5.4 ขอบเขตด้านเทคโนโลยี: งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบโดยใช้เซนเซอร์ IMU (Inertial Measurement Unit) ประเภท Commercial-off-the-Shelf (COTS) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด มีราคาย่อมเยา และสามารถจัดหาได้ง่าย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตำแหน่งแบบแม่นยำ ในงานของ A Trapezoidal Velocity Profile Generator for Position Control Using a Feedback Strategy (Heo et al.) [1] ได้เสนอวิธีการสร้างโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal velocity profile) โดยฝังอยู่ในวงควบคุมตำแหน่งแบบ P–PI พร้อมใช้ dynamic range limiter เพื่อจำกัดความเร่งและความเร็ว ผลลัพธ์แสดงว่าข้อผิดพลาดในช่วง steady-state ถูกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [1] ในอีกงานหนึ่งคือ Trapezoidal Motion Profile to Suppress Residual Vibration of Flexible Object Moved by Robot (Yoon et al.) [2] ศึกษาเรื่องการลด residual vibration ของวัตถุที่ถูกเคลื่อนย้ายโดยหุ่นยนต์ โดยการปรับช่วงเวลาเร่ง/เหยียบของโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมูให้สัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ ผลการทดลองพบว่าวิธีนี้สามารถลดการสั่นได้โดยไม่ต้องอาศัยการควบคุม feedback เพิ่มเติม [2] อีกหนึ่งงานคือ Angular Error Reduction of a Machine-Vision System Using a Trapezoidal Trajectory Velocity (Lindner et al.) [3] ได้แสดงให้เห็นการใช้งานโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมูในระบบ machine-vision ที่มีความแม่นยำสูง โดยเปลี่ยนจากการตอบสนองแบบสเต็ปเป็นการเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ ผลการทดลองลดข้อผิดพลาดเชิงมุมลงถึง ≤ 0.1 % และลดเวลาการกำหนดตำแหน่งได้เป็นอย่างมาก [3] สุดท้ายในงานของ Feedforward in Motion Control – Vital for Improving Positioning Accuracy (Lewin) [4] ได้กล่าวถึงเทคนิคการควบคุมแบบ feed-forward ที่ทำงานควบคู่กับวง PID โดยมุ่งเน้นการคาดการณ์และชดเชยแรงเสียดทาน แรงเฉื่อย และแรงบิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามเส้นทางในระบบความเร็วสูง [4] โดยรวม งานวิจัยเหล่านี้ให้ภาพชัดเจนว่า การสร้างโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูยังคงเป็นวิธีพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำมาใช้ในงานออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้านี้ได้

3. การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้าเป็นกระบวนการหลักของงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ความต้องการของระบบ

ศึกษาความต้องการของระบบกล้องติดตามเป้าหมาย ได้แก่ มุมการหมุนของกล้องในแนวราบและแนวดิ่ง การตอบสนองต่อสัญญาณที่รับจากคอนโทรลสติ๊ก และจุดติดตั้งอุปกรณ์ชี้เป้าและ IMU เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบขนาด, ตำแหน่งในการใช้งานและคุณลักษณะของอุปกรณ์ชี้เป้า

3.2 การออกแบบโครงสร้างเชิงแนวคิด

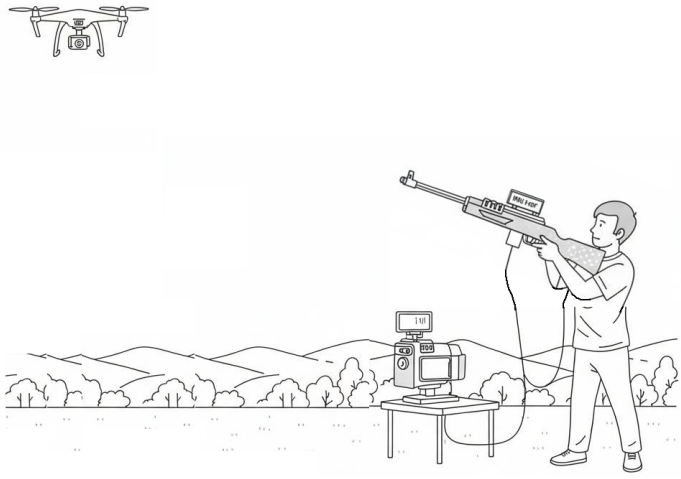
ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ ทั้งฮาร์ดแวร์ ได้แก่ อุปกรณ์ชี้เป้า, การติดตั้ง IMU และการเชื่อมต่อสัญญาณและซอฟต์แวร์ การประมวลผลสัญญาณจาก IMU และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอุปกรณ์ชี้เป้า

3.3 การจัดทำแบบสรุปการออกแบบ (Design Summary)

จัดทำเอกสารและภาพประกอบของแบบจำลองสามมิติ เพื่อแสดงส่วนประกอบ มุมการหมุน และโครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์ชี้เป้า รวมถึงสรุปข้อจำกัดและแนวทางการพัฒนาในขั้นต่อไป

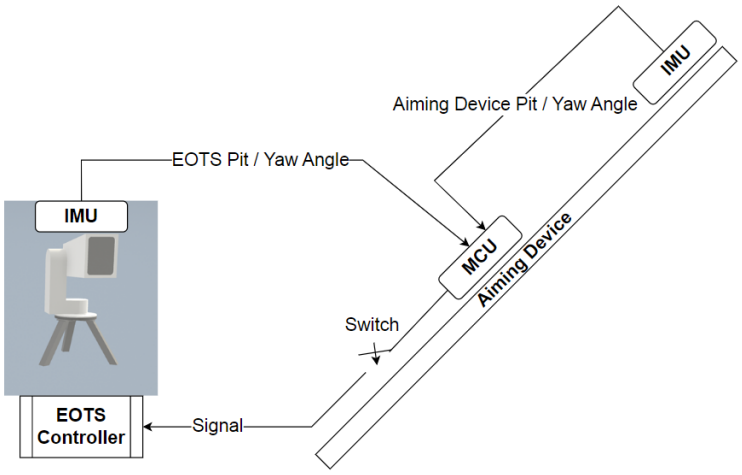
4. ผลการดำเนินการวิจัย

ผลจากการศึกษาระบบกล้องติดตามเป้าหมาย ทำให้ได้แนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ชี้เป้า ดังแสดงในรูปที่ 2 ผู้ควบคุมสามารถถืออุปกรณ์ซึ่งมีลักษณะคล้ายปืนยาว เมื่อต้องการใช้งานชี้เป้า สามารถเหนี่ยวไกปืนค้างไว้แล้วเล็งไปที่เป้าหมาย ไกปืนเป็นเสมือนปุ่มกดส่งสัญญาณควบคุม สามารถเลิกเหนี่ยวไกเมื่อพบเป้าหมายและต้องการให้ระบบอัตโนมัติทำงานต่อไป ซึ่งเป็นการใช้งานที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ช่วยให้ระบบติดตามเป้าหมายของ EOTS สามารถตรวจจับเป้าหมายได้เร็วขึ้น



รูปที่ 2 แนวคิดของการออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้า

จากรูปที่ 3 คือแบบสถาปัตยกรรมของระบบอุปกรณ์ชี้เป้าข้อมูลจาก IMU 2 ตัว ที่ติดไว้กับอุปกรณ์ชี้เป้าและ EOTS จะถูกประมวลผลในเวลาจริงโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อคำนวณความต่างของมุมก้ม-เงย (Pitch) และมุมหมุนในแนวราบ (Yaw) จากทั้งสองอุปกรณ์ จากนั้นเมื่อประมวลผลเสร็จสิ้น ระบบจะส่งคำสั่งไปยังระบบควบคุมทิศทางของกล้องให้เคลื่อนที่ไปตามทิศทางของอุปกรณ์ชี้เป้า การควบคุมรูปแบบนี้ช่วยลดภาระการเรียนรู้ของผู้ควบคุม เพิ่มความเร็วในการจับเป้าหมาย และเพิ่มความแม่นยำในการติดตามเป้าหมายที่เคลื่อนที่อย่างซับซ้อน ผลการวิเคราะห์ข้อได้เปรียบเชิงทฤษฎีเป็นไปตามตารางที่ 1



รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมระบบอุปกรณ์ชี้เป้า

4.1 ข้อได้เปรียบเชิงทฤษฎี

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบเชิงทฤษฎี

ด้านการประเมิน	คอนโทรลสติ๊กแบบดั้งเดิม	แนวคิดอุปกรณ์ชี้เป้า	ระดับการพัฒนาโดยประมาณ
ความเร็ว	ปานกลาง	สูง	40-60%
ความแม่นยำ	ขึ้นอยู่กับทักษะ	คงที่	30-50%
การเรียนรู้	ใช้เวลานาน	เรียนรู้เร็ว	70-80%
ความล้าของผู้ใช้	สูง	ต่ำ	50-60%

4.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านฮาร์ดแวร์ พบว่า ESP32-S3 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ควบคุมและประมวลผลข้อมูลจากIMU 9 แกน รุ่น MPU-9250 เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อผ่านบัส I²C หรือ SPI ได้โดยตรง และยังรองรับการสื่อสารแบบ USB-HID/USB-OTG เพื่อส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ในรูปแบบอุปกรณ์ควบคุมเสมือน (Virtual Joystick) การเชื่อมต่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ ทั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถประมวลผล Sensor Fusion ได้โดยตรงโดยไม่ต้องพึ่งพาคอมพิวเตอร์ภายนอก

4.3 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพพบว่า แนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้าที่ใช้การควบคุมด้วยการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์โดยตรงมีจุดเด่นหลายประการ ประการแรกคือการควบคุมที่เป็นธรรมชาติ ผู้ใช้สามารถสั่งการได้โดยการขยับอุปกรณ์ไปในทิศทางที่ต้องการโดยตรง ทำให้รู้สึกเชื่อมโยงกับการทำงานของกล้องมากขึ้น ประการต่อมาคือช่วยลดความล้าของผู้ใช้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องกดหรือบังคับคันควบคุมค้างไว้เหมือนการใช้คอนโทรลสติ๊กทั่วไป อีกทั้งยังมีความแม่นยำในการชี้เป้าที่คงที่ เพราะระบบอาศัยการประมวลผลจากเซนเซอร์ IMU ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับทักษะหรือความชำนาญของผู้ใช้แต่ละคน สุดท้ายคือผู้ใช้สามารถเรียนรู้การใช้งานได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากรูปแบบการควบคุมเข้าใจง่ายและสอดคล้องกับสัญชาตญาณการเคลื่อนไหวตามธรรมชาติของมนุษย์

4.4 ความท้าทายและข้อจำกัด

ความท้าทายของแนวคิดนี้อยู่ที่การจัดการกับ sensor drift และการ ชดเชยผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก

ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของมุมวัดจาก IMU อีกทั้งยังต้องมีขั้นตอนปรับเทียบระบบเริ่มต้นและรักษาความเสถียรของการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อให้ควบคุมได้ราบรื่น สำหรับข้อจำกัด แนวคิดนี้ ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบกับผู้ใช้จริง และ ความแม่นยำยังขึ้นกับคุณภาพของ IMUที่เลือกใช้ จึงจำเป็นต้องมีการสร้างต้นแบบจริง เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบก่อนนำไปใช้งานจริง

5. สรุปผล

แนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ชี้เป้าแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบที่ชัดเจนเหนือระบบคอนโทรลสติ๊กแบบดั้งเดิมทั้งในด้านความเร็ว ความแม่นยำ และประสบการณ์ผู้ใช้ การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแนวคิดนี้มีความเป็นไปได้ทางเทคนิคสูงและน่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีในการนำไปปฏิบัติ สำหรับในการพัฒนางานต่อไปคือการสร้างต้นแบบเบื้องต้นช่วยทดสอบแนวคิดและประเมินความเป็นไปได้ของระบบทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อระบุและแก้ไขปัญหาได้ตรงจุด จากผลการทดสอบจะนำไปสู่การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ (sensor fusion) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบ จากนั้นทดสอบกับผู้ใช้กลุ่มเล็กเพื่อรับข้อเสนอแนะและปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ก่อนเข้าสู่การทดสอบภาคสนามเพื่อยืนยันประสิทธิภาพและความพร้อมของระบบในสภาพแวดล้อมจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนเครื่องมือ รวมถึงอุปกรณ์ทางวิศวกรรมเฉพาะทางที่ใช้ในการพัฒนาระบบครั้งนี้ การสนับสนุนดังกล่าวไม่เพียงแต่ช่วยให้การเก็บข้อมูลและการทดสอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามมาตรฐานทางเทคนิคเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำให้กับผลการวิจัย ส่งเสริมให้งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] H.-J. Heo, Y. Son, and J.-M. Kim, "A trapezoidal velocity profile generator for position control using a feedback strategy," Energies, vol. 12, no. 6, p. 1222, Mar. 2019

[2] H. J. Yoon, S. Y. Chung, H. S. Kang, and M. J. Hwang, "Trapezoidal motion profile to suppress residual vibration of flexible object moved by robot," Electronics, vol. 8, no. 1, p. 30, 2019

[3] L. Lindner, J. C. Rodriguez-Quiñonez, W. Flores-Fuentes, O. Sergiyenko, and F. N. Murrieta-Rico, "Angular error reduction of a machine-vision system using a trapezoidal trajectory velocity," Journal of Applied Research and Technology, vol. 20, no. 6, pp. 668-678, Dec. 2022

[4] C. Lewin, "Feedforward in Motion Control – Vital for Improving Positioning Accuracy," Performance Motion Devices, Inc., 2023 [Online]. Available: https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/feedforward-in-motion-control-paper-pmdcorp

การพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกล ด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ

Development of a Smart Digital Platform for Distance Counseling Services on Military Cadet Adaptation in the Royal Thai Air Force

ปัญญารักษ์ โกศัลวัฒน์[1] ยศพล พงษ์แก้ว[2*] และ วัลลภา อันดารา[3]

[1, 2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[3]กองการศึกษา วิทยาลัยพยาบาลทหารอากาศ

Panyarak Kosanwat[1], Yossapol Pongkaew [2*] and Wallapha Undara[3]

[1, 2]Department of Industrial Engineering and Aviation Management, Division of Mechanical and Industrial Engineering, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

[3]Education Department, Royal Thai Air Force Nursing College

yossapol_pong@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาปัจจัยด้านสุขภาพจิตที่ส่งผลต่อการปรับตัวของนักเรียนในโรงเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ เพื่อพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ โดยมีเป้าหมายให้นักเรียนทหารสามารถตระหนักรู้ และมีการปรับตัวของระดับพฤติกรรมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ภายหลังจากการใช้ดิจิทัลแพลตฟอร์มการให้คำปรึกษา ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายด้านกำลังพลของผู้บัญชาการทหารอากาศ ประจำปีพุทธศักราช 2567 ด้วยการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเป็นเครื่องมือเพื่อสนับสนุนให้เกิดนวัตกรรม สร้างองค์ความรู้ใหม่ มุ่งเน้นการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และให้ความสำคัญกับการยกระดับคุณภาพชีวิตของกำลังพล มีวิธีการดำเนินงาน เริ่มจากการศึกษาและกำหนดเกณฑ์ระดับพฤติกรรมการปรับตัวของนักเรียนทหาร หลังจากนั้นผู้วิจัยจะออกแบบและพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร โดยใช้แอปพลิเคชันไลน์ที่ตั้งชื่อว่า “น้องแจ่มใจ” ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือ เพื่อประเมินระดับของพฤติกรรมด้านสุขภาพจิตของนักเรียนทหาร ซึ่งผลการวิจัยพบว่าแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลฯ นี้ สามารถเก็บข้อมูลส่วนตัวและข้อมูลพฤติกรรมที่ได้จากการประเมินของนักเรียนทหาร เพื่อนำไปสู่กระบวนการให้คำปรึกษาในรูปแบบทางไกลหรือออนไลน์ และหากผู้ประเมินมีระดับพฤติกรรมที่ต่ำกว่าเกณฑ์ยอมรับ สามารถนัดหมายนักจิตวิทยาขอคำปรึกษาแนะนำเป็นส่วนตัวเพื่อช่วยลดปัญหาด้านสุขภาพจิตที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ตัวต่อไป

คำสำคัญ: สมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์ม, ระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกล, การปรับตัวของนักเรียนทหาร

Abstract

This research aimed to examine mental health factors affecting the adaptation of military cadets in Royal Thai Air Force schools and to develop a smart digital platform for distance counseling services to support cadet adaptation. The objective was to enable military cadets to develop self-awareness and achieve satisfactory behavioral adaptation levels following platform utilization. This aligns with the Royal Thai Air Force Commander's personnel policy for the fiscal year 2024, which emphasizes utilizing digital technology to foster innovation, generate new knowledge, focus on human resource development, and prioritize quality of life enhancement for military personnel. The methodology commenced with establishing criteria and behavioral adaptation levels for military cadets. Subsequently, a smart digital platform for distance counseling services was designed and developed using a LINE application named "Nong Jamjai" a mobile-based platform for assessing cadets' mental health behavioral levels. The findings revealed that this distance counseling service platform effectively collected personal information and behavioral data from cadet assessments, facilitating online counseling processes. When assessors exhibited behavioral levels below acceptable thresholds, the system enabled appointments with psychologists for personalized consultation, thereby mitigating mental health issues arising from environmental circumstances.

Keywords: Smart Digital Platform, Distance Counseling, The Cadet Adaptation

1. บทนำ

ด้วยการเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตในช่วงวัยรุ่นจากบุคคลพลเรือนมาเป็นนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศนั้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง การใช้ชีวิตในโรงเรียนทหารซึ่งเป็นโรงเรียนประจำย่อมมีกฎระเบียบต่าง ๆ มากมาย เพื่อเป็นกรอบในการสร้างนักเรียนทหารที่กองทัพอากาศพึงประสงค์ซึ่งอาจส่งผลต่อการปรับตัว เช่น การปฏิบัติตัวที่ไม่ถูกต้องตามกฎระเบียบ และแบบธรรมเนียมทางทหาร รูปแบบการเรียนการสอนหรือการฝึกศึกษาที่มีความแตกต่างจากสถาบันการศึกษาของพลเรือนทั่วไป ประกอบกับนักเรียนทหารบางคนมีปัญหาส่วนตัวเรื่องการปรับตัวให้เข้ากับเพื่อนร่วมรุ่นและรุ่นพี่ รวมถึงปัญหาด้านสุขภาพ ส่งผลต่อความกดดันทั้งทางร่างกายและจิตใจเป็นสำคัญ ไม่ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นจะมาจากตัวบุคคลหรือเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกก็ตาม โดยทั่วไปแล้วบุคคลจะพยายามปรับตัวให้เข้ากับสภาพปัญหาที่กำลังเผชิญอยู่ เพื่อให้สภาวะความกดดัน ความเครียด และความกังวลค่อย ๆ คลี่คลายลง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของตนเองและสภาพแวดล้อมทางสังคม ซึ่งปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของนักเรียนทหารส่วนใหญ่นั้นเป็นผลมาจากการปรับตัวที่ไม่ดีของแต่ละบุคคล [1] เพราะทุกคนไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการทุกอย่างของตนเองได้ เนื่องจากความสามารถในการปรับตัวของแต่ละบุคคลมีความต่างกัน ผู้ที่มีความสามารถในการปรับตัวได้น้อยจะมีความรู้สึกขัดแย้ง และเกิดความเครียดจากการเผชิญปัญหาหรืออุปสรรคต่าง ๆ ในชีวิต ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมที่ไม่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้นั้นทำให้บางคนต้องลาออกจากการเป็นนักเรียนทหาร ส่วนบุคคลที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ได้ดีก็จะคลายความวิตกกังวล สามารถเรียนรู้เกี่ยวกับตนเอง ยอมรับ

และจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับตนเองขณะที่กำลังศึกษาอยู่ในโรงเรียนทหารได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนสามารถดำรงชีวิตอยู่ในสังคมได้อย่างมีความสุขโดยปราศจากความคับข้องใจ นอกจากนี้บุคคลที่สามารถปรับตัวได้ดีจะมิใช่แค่ผู้ที่ปราศจากปัญหาเท่านั้น แต่จะต้องเป็นผู้กล้าที่จะเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคในชีวิตอย่างมีสติ ตลอดจนเป็นผู้ที่เผชิญทั้งความสุขและความทุกข์ในชีวิตได้ [2] จะเห็นได้ว่าการปรับตัวมีความสำคัญยิ่งต่อการดำเนินชีวิตของบุคคล โดยที่เคล็ดลับความสุขนั้นขึ้นอยู่กับ“ความสามารถในการปรับตัว” และผลของการปรับตัวจะช่วยบรรเทาความยุ่งยากทางจิตใจให้เบาบางลงจนสามารถรักษาดุลยภาพของชีวิตได้

ปัจจุบันเทคโนโลยี AI (Artificial Intelligence) หรือปัญญาประดิษฐ์ เป็นระบบประมวล ผลที่มีต้นแบบมาจากโครงข่ายประสาทของมนุษย์ สามารถเรียนรู้ และเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลได้ตามจำนวนข้อมูลที่เพิ่มขึ้นผ่านกระบวนการเรียนรู้ด้วยตนเอง ซึ่งสามารถจดจำ คิด วิเคราะห์ เรียนรู้ และเชื่อมโยงข้อมูลต่าง ๆ ที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว (Deep Learning) เสมือนระบบสมองของมนุษย์ จึงอาจเรียกได้ว่าสมองกลอัจฉริยะ ดังนั้น AI จึงถือเป็นเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการใช้ชีวิต การทำงาน รวมถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การให้คำปรึกษา ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความช่วยเหลือด้วยการสื่อสารที่มีเป้าหมายชัดเจนในบรรยากาศของสัมพันธภาพที่ดี โดยใช้ทักษะและทฤษฎีของการให้คำปรึกษาเพื่อให้ผู้มีปัญหาหรือผู้รับคำปรึกษามีความรู้สึกไว้วางใจว่าได้รับการยอมรับ และพร้อมที่จะเปิดเผยความรู้สึกหรือปัญหาที่แท้จริงของตน เกิดการเรียนรู้ เข้าใจในสาเหตุของปัญหาที่ตนกำลังเผชิญอยู่ นำไปสู่ความสามารถในการตัดสินใจและแก้ไขปัญหาได้ด้วยตนเองอย่างเหมาะสม [3] การเลือกใช้ทฤษฎีการให้คำปรึกษาเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาให้กับผู้มาขอรับคำปรึกษานั้นจะต้องพิจารณาจากปัญหาที่ผู้มาขอรับคำปรึกษากำลังเผชิญอยู่ ทฤษฎีการให้คำปรึกษาตามแนวเผชิญความจริงเป็นทฤษฎีที่เหมาะสมสำหรับผู้ที่มีปัญหาระดับความรู้สึก และนำไปสู่การแก้ปัญหาระดับพฤติกรรม โดยจะให้อิสระแก่ผู้รับคำปรึกษาค่อนข้างมากเพื่อจะมองหาวิธีการในการแก้ไขปัญหาที่แท้จริง ส่งเสริมสัมพันธภาพที่สม่ำเสมอและจริงใจเพื่อให้ผู้รับคำปรึกษาได้เปิดเผยตนเอง ซึ่งผู้ให้คำปรึกษาจะพยายามหาทางช่วยให้ผู้รับคำปรึกษากล้าที่จะเผชิญกับความจริงที่เกิดขึ้นในชีวิต การให้คำปรึกษาช่วยให้นักเรียนทหารเข้าใจตนเองและสิ่งแวดล้อมรอบตัว ตลอดจนมีทักษะในการแก้ปัญหาและสามารถตัดสินใจแก้ปัญหาด้วยตนเองได้อย่างเหมาะสม นำไปสู่การพัฒนาตนเอง

จากปัญหาการปรับตัวของนักเรียนในโรงเรียนทหารที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยซึ่งเป็นอาจารย์โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และอาจารย์วิทยาลัยพยาบาลทหารอากาศ มีความสนใจที่จะทำวิจัยเรื่อง “การพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ” เพื่อประเมินระดับของพฤติกรรมการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ ภายหลังจากการใช้สมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษา ซึ่งงานวิจัยนี้สอดคล้องกับนโยบายด้านกำลังพลของผู้บัญชาการทหารอากาศ ประจำปีพุทธศักราช 2567 โดยการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเป็นเครื่องมือเพื่อสนับสนุนให้เกิดนวัตกรรม สร้างองค์ความรู้ใหม่ ลดกระบวนการและขั้นตอนในการปฏิบัติงาน โดยมุ่งเน้นการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และให้ความสำคัญกับการยกระดับคุณภาพชีวิตของกำลังพล พร้อมรองรับการปฏิบัติภายใต้ฐานวิถีชีวิตใหม่ (New Normal)

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยด้านสุขภาพจิตที่ส่งผลต่อการปรับตัวของนักเรียนในโรงเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ

2.2 เพื่อพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ

3. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหารสังกัดกองทัพอากาศนั้น สามารถสรุปและแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 ปัจจัยที่ส่งผลและแนวทางการส่งเสริมการปรับตัวของนักเรียนทหารใหม่

จากข้อมูลงานวิจัย [4] พบว่าประชากรและกลุ่มตัวอย่างของผู้ให้ข้อมูลประกอบด้วย นักเรียนนายร้อยโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ชั้นปีที่ 1 ปีการศึกษา 2560 จำนวน 241 คน นักเรียนนายร้อย ชั้นปีที่ 5 ที่เป็นนักเรียนบังคับบัญชา จำนวน 21 คน และผู้บริหาร โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 10 คน รวมทั้งสิ้น 272 คน โดยใช้แบบสำรวจข้อมูลทั่วไป แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง และแบบประเมินระบบนักเรียนนายร้อยใหม่ เป็นเครื่องมือในการทำวิจัย ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยการสำรวจ การสัมภาษณ์แบบเจาะลึก และการสัมมนาเชิงปฏิบัติการ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าความถี่ ค่าร้อยละการวิเคราะห์เนื้อหา และการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสร้างข้อสรุป นำเสนอผลการวิเคราะห์โดยวิธีพรรณนา ตาราง และภาพ ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับตัวของนักเรียนนายร้อยใหม่ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำแนกได้เป็น 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ปัจจัยด้านห้วงเวลาและลักษณะการปรับตัวของนักเรียนนายร้อยใหม่ และ 2) ปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ได้แก่ ปัจจัยด้านโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปัจจัยส่วนบุคคลด้านนักเรียนนายร้อยใหม่ และปัจจัยด้านครอบครัวของนักเรียนนายร้อยใหม่ แนวทางการส่งเสริมการปรับตัวของนักเรียนนายร้อยใหม่โรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้า มีดังนี้ 1) มุ่งเน้นการคัดเลือกนักเรียนนายร้อยที่มีความรัก ศรัทธา และมีอุดมการณ์ในการเป็นทหาร 2) การมีนักเรียนบังคับบัญชาที่ถูกหล่อหลอมมาแล้วเป็นอย่างดี 3) ไม่มีระบบการลงโทษที่นอกเหนือจากกฎเกณฑ์ที่กำหนด 4) มุ่งเสริมสร้างให้ นักเรียนนายร้อยทุกนายเป็นผู้มีคุณธรรมหลัก 4 ประการ ได้แก่ มีความกตัญญูรู้คุณต่อแผ่นดินและองค์การเป็นหลัก มีความยุติธรรม มีความแข็งแกร่งทั้งทางร่างกายและจิตใจ ยึดถือระบบเกียรติศักดิ์ และ 5) การมีส่วนร่วมของบุคลากรทุกฝ่ายที่ปฏิบัติหน้าที่ของตนเองอย่างเต็มที่ ประพฤติตนเป็นแบบอย่างที่ดีและการไม่เพิกเฉยต่อการกระทำความผิดของนักเรียนนายร้อย รวมทั้งการไม่เพิกเฉยต่อการชื่นชมในการทำความดีของนักเรียนนายร้อยด้วยเช่นกัน

ในขณะที่ [5] ได้ทำการสำรวจระดับความเข้มแข็งทางจิตใจของกำลังพล รร.นนก. ทั้งในส่วนของ นนอ. และข้าราชการ พนักงาน ลูกจ้าง รร.นนก. ในสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กำลังพล รร.นนก.ที่สมัครใจตอบแบบสำรวจ มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 727 คน ประกอบไปด้วย นนอ. ทั้ง 5 ชั้นปี จำนวน 391 คน และข้าราชการ พนักงาน ลูกจ้าง รร.นนก. จำนวน 336 คน ผลการสำรวจพบว่าปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดต่อกำลังพล รร.นนก. ในระดับมาก คือ ปัจจัยด้านชีวิตความเป็นอยู่โดยทั่วไปในเรื่องระเบียบข้อบังคับที่เข้มงวดขึ้น ส่วนปัจจัยในด้านอื่น ๆ ก่อให้เกิดความเครียดต่อกำลังพล รร.นนก. ในระดับปานกลาง ระดับความเครียดของ กำลังพล รร.นนก. โดยภาพรวมอยู่ในระดับเครียดปานกลาง โดยในกลุ่ม นนอ. มีความเครียดอยู่ในระดับปานกลาง ส่วนกลุ่ม ขรก.ฯ มีระดับความเครียดน้อย ระดับความเข้มแข็งทางจิตใจของกำลังพล รร.นนก. โดยภาพรวมอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ โดยเฉพาะในเรื่องของความทนทานทางอารมณ์ (อึด) และด้านกำลังใจ (ฮึด) แต่ด้านการจัดการกับปัญหา (สู้) ทำได้อยู่ในเกณฑ์ปกติซึ่งถือเป็นจุดแข็งของกำลังพล รร.นนก. รวมทั้ง เมื่อพิจารณาตามกลุ่มพบว่า ระดับความเข้มแข็งของ นนอ.ยังอยู่ในเกณฑ์ปกติ เพียงแต่มีคะแนนด้านกำลังใจ (ฮึด) อยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์เพียงด้านเดียว และในกลุ่มข้าราชการ พนักงาน ลูกจ้าง มีระดับความเข้มแข็งทางจิตใจต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ โดยเฉพาะในเรื่องของความทนทานทางอารมณ์ (อึด) และด้านกำลังใจ (ฮึด)

3.2 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดและการเผชิญความเครียดของนักเรียนทหาร

จากการทบทวนงานวิจัย [6] ศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดและการเผชิญความเครียดของนักเรียนพยาบาลกองทัพบก ซึ่งได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากการใช้แบบสอบถาม กลุ่มประชากรที่ใช้ศึกษาคือนักเรียนพยาบาล ปีการศึกษา 2559 จำนวน 236 คน ใช้การวิเคราะห์ข้อมูล ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันและสเปียร์แมน ผลจากการศึกษาพบว่านักเรียนพยาบาลมีระดับความเครียดน้อยและมีความสามารถในการเผชิญความเครียดระดับน้อย ความเครียดไม่มีความสัมพันธ์กับการเผชิญความเครียดของนักเรียนพยาบาลกองทัพบกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สิ่งอำนวยความสะดวกในการเรียนการสอนและสิ่งสนับสนุนทางสังคมอยู่ใน

ระดับมาก และมีความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับความเครียดของนักเรียนพยาบาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านอายุ ชั้นปี และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนไม่มีความสัมพันธ์กับความเครียดของนักเรียนพยาบาลกองทัพบกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยสอดคล้องกับผลการวิจัย [7] ได้ทำการศึกษาระดับความเครียดและวิธีการในการเผชิญความเครียดของพลทหารใหม่ ซึ่งการวิจัยนี้ใช้การศึกษาวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) กลุ่มตัวอย่าง คือ พลทหารใหม่ผลัด 2 ปี พ.ศ.2552 จำนวน 109 คน เก็บข้อมูลด้วยการใช้แบบสอบถาม และทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการหาค่าความถี่จำนวนและร้อยละ โดยผลการวิจัยพบว่ากลุ่มตัวอย่างโดยส่วนใหญ่ร้อยละ 82.6 มีสถานภาพโสด จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นมากที่สุด ร้อยละ 33.9 ซึ่งส่วนใหญ่ไม่มีโรคประจำตัว และมีระดับความเครียดเล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 51.4 รองลงมามีสุขภาพจิตปกติคิดเป็นร้อยละ 45.9 สำหรับวิธีในการเผชิญความเครียดในการแก้ไขปัญหา โดยส่วนมากใช้วิธีลดหรือขจัดความเครียดด้วยการพยายามวิเคราะห์ปัญหาเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดีขึ้นแบบใช้บ่อยมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 49.5 ด้านการยอมรับ ส่วนมากใช้วิธีการลดหรือขจัดความเครียดด้วยการยอมรับปัญหาที่เกิดขึ้นว่าไม่สามารถแก้ไขอะไรได้แบบใช้บ้างมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 51.0 ด้านการแสวงหาแหล่งสนับสนุนทางสังคม ส่วนมากใช้วิธีลดหรือขจัดความเครียดโดยการทำบุญตักบาตร ไปวัด ไปโบสถ์ ไปสุเหร่า หรือทำบุญทางศาสนา ฟังเทศน์สนทนาธรรม แบบใช้บ้างมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 57.8 ด้านการหลีกหนีส่วนมากใช้การลดหรือขจัดความเครียดด้วยการหลีกเลี่ยงสถานการณ์ที่ทำให้เกิดความไม่สบายใจหรือเป็นปัญหา เช่น ลาป่วยหรือขาดเรียน แบบใช้บ้างมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 46.8 ด้านการต่อต้าน ส่วนมากใช้การลดหรือขจัดความเครียดด้วยการแสดงอารมณ์โกรธหรือไม่พอใจต่อบุคคลนั้น แบบใช้บ้างมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 54.1 ด้านการเบี่ยงเบนความสนใจ ส่วนมากใช้การลดหรือขจัดความเครียด โดยพยายามทำสิ่งใหม่ที่ไม่เคยทำมาก่อน แบบใช้บ้างมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 56.0 รองลงมาคือการมีเพศสัมพันธ์ ด้านการผ่อนคลายความเครียด ส่วนมากใช้การลดหรือขจัดความเครียดด้วยการนั่งสมาธิ การสวดมนต์ไหว้พระ การอธิษฐาน การละหมาด แบบใช้บ้างมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 47.7

3.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะสุขภาพจิตและความเครียดของนักเรียนทหารใหม่

นอกจากนี้ [8] ได้ศึกษาปัจจัยส่วนบุคคล ภาวะสุขภาพจิต และความเครียดของนักศึกษาพยาบาล เพื่อเปรียบเทียบภาวะสุขภาพจิตและความเครียด จำแนกตามปัจจัยส่วนบุคคลได้แก่ ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ชั้นปีที่ศึกษา รายได้ที่ได้รับ รายได้ของครอบครัว และสถานภาพสมรสของบิดามารดา และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะสุขภาพจิตและความเครียดของนักศึกษาพยาบาล กลุ่มตัวอย่างคือนักศึกษาพยาบาล วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี นพรัตน์วชิระ จำนวน 178 คน โดยทำการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ แบบสอบถามข้อมูลส่วนบุคคล แบบสอบถามประเมินสุขภาพทั่วไป (General Health Questionnaire; GHQ–28) และแบบประเมินความเครียดสวนปรุง (Suanprung Stress Test 20; SPST–20) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติบรรยาย การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation)

3.4 การพัฒนาแอปพลิเคชันด้านสุขภาพจิตสำหรับการให้การปรึกษารายบุคคลแบบออนไลน์เพื่อลดความเครียด

พบว่างานวิจัย [9] นำการใช้แอปพลิเคชันเป็นเครื่องมือในการเพิ่มช่องทางการให้คำปรึกษาเพื่อช่วยบรรเทาอาการทางสุขภาพจิต และเพิ่มความสุขทางใจสำหรับวัยรุ่น นำมาสู่วัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้านสุขภาพจิตสำหรับการให้การปรึกษารายบุคคลแบบออนไลน์ และทำการเปรียบเทียบค่าคะแนนความเครียดก่อนและหลังการให้การปรึกษา รายบุคคลแบบออนไลน์ กำหนดกลุ่มผู้ให้ข้อมูลใช้วิธีเลือกแบบเจาะจง จำนวน 2 กลุ่ม รวม 15 คน ได้แก่ กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ 5 คน และกลุ่มทดลองซึ่งเป็นผู้สมัครใจ 10 คน โดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ โปรแกรมการให้การปรึกษารายบุคคลออนไลน์ แบบประเมินความเหมาะสม แอปพลิเคชันด้านสุขภาพจิตที่สร้างขึ้น โดยผ่านความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษา แบบวัดความเครียด SPST-20 ของกรมสุขภาพจิต และแบบสอบถาม ความคิดเห็นที่มีค่าเฉลี่ยความตรงเชิงเนื้อหาเท่ากับ 3.20 เก็บรวบรวมข้อมูลโดยให้กลุ่มผู้เชี่ยวชาญประเมิน ความเหมาะสม และกลุ่ม

ทดลองทำแบบวัด และการวิจัยกลุ่มเดี่ยวทดสอบก่อนและหลัง จำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 45 นาที และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และทดสอบความแตกต่างด้วยสถิติทดสอบ Z-test

สอดคล้องกับงานวิจัย [10] ได้ทำการพัฒนาและประเมินความเหมาะสมแอปพลิเคชันบันทึกพฤติกรรมนักเรียนในระบบดูแลช่วยเหลือนักเรียนด้วยแอปชีทและคู่มือการใช้งาน และประเมินความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันบันทึกพฤติกรรมนักเรียนในระบบดูแลช่วยเหลือนักเรียนด้วยแอปชีท กลุ่มตัวอย่างคือหัวหน้ากลุ่มสาระการเรียนรู้ของโรงเรียนในสังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาพังงา ภูเก็ต ระนอง จำนวน 141 คน ได้มาด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ 1) แบบสอบถามสภาพและความต้องการใช้แบบบันทึกพฤติกรรมนักเรียนในระบบดูแลช่วยเหลือนักเรียน 2) แอปพลิเคชันบันทึกพฤติกรรมนักเรียนในระบบดูแลช่วยเหลือนักเรียนด้วยแอปชีทและคู่มือการใช้งาน และ 3) แบบประเมินความเหมาะสมและประเมินความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันบันทึกพฤติกรรมนักเรียนในระบบดูแลช่วยเหลือนักเรียนด้วยแอปชีทและคู่มือการใช้งาน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้ [11] ได้นำเสนอเรื่องอิทธิพลของแอปพลิเคชันไลน์ในการสื่อสารของโลกยุคปัจจุบันในเรื่องของการติดต่อสื่อสารพื้นฐานในชีวิตประจำวันของมนุษย์ตลอดจนการส่งเสริมการทำงานด้วยการสื่อสารผ่านแอปพลิเคชันไลน์ที่ทั้งองค์กรภาครัฐและภาคเอกชนได้นำมาใช้ในการปฏิบัติงานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับองค์กรนั้นๆ ทั้งยังเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคมได้อีกด้วย โดยมีการนำแนวทาง ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนความคิดเห็นของผู้เขียนมาประกอบเพื่อเป็นแนวทางการอธิบายในประเด็นอิทธิพลของแอปพลิเคชันไลน์และประโยชน์และข้อจำกัดในการสื่อสารผ่านแอปพลิเคชันไลน์ในโลกยุคปัจจุบัน ซึ่งประเด็นที่กล่าวมาทำให้การสื่อสารในสังคมนั้นเกิดความรวดเร็วและประหยัดเวลาในการสื่อสารมากยิ่งขึ้น

3.5 การพัฒนารูปแบบการให้คำปรึกษาออนไลน์ทางจิตวิทยา

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า [12] การพัฒนารูปแบบการให้คำปรึกษาออนไลน์ทางจิตวิทยาวัยรุ่นสำหรับเยาวชนไทยให้มีประสิทธิภาพ 2) เพื่อศึกษาผลการใช้รูปแบบกาให้คำปรึกษาออนไลน์ทางจิตวิทยาวัยรุ่นสำหรับ เยาวชนไทย 3) เพื่อสอบถามความพึงพอใจของเยาวชนผู้ใช้รูปแบบการให้คำปรึกษาออนไลน์ทาง จิตวิทยาวัยรุ่น กลุ่มประชากรที่เลือกใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย คือ นักจิตวิทยา 3 คน และ เยาวชนไทยผู้เข้าใช้ระบบจำนวน 30 คน เครื่องมือวิจัย ได้แก่ แบบประเมินคุณภาพความเหมาะสม รูปแบบ แบบประเมินผลการใช้รูปแบบ และแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้รูปแบบ สถิติที่ใช้ใน การวิจัยครั้งนี้ คือ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้ [13] ได้พัฒนาเว็บไซต์ในการให้คำปรึกษาออนไลน์แก่ นักศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ และศึกษาผลของการให้คำปรึกษาออนไลน์ต่อการลดความเครียดของนักศึกษา ฯ ผ่านทางเว็บไซต์ www.healupedcmu.com โดยใช้วิธีวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-experimental research) โดยนำเอาทฤษฎีการปรับความคิดและพฤติกรรมมาใช้ในการให้การ ปรึกษาออนไลน์ เพื่อลดความเครียดของนักศึกษา จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 6 คน ได้เข้า ร่วมวิจัยเป็นระยะเวลา 2 เดือน เก็บรวบรวมข้อมูล ด้วยแบบบันทึกสนทนา (Chat log), แบบประเมินความรู้สึกหลังจากเข้ารับบริการ, แบบวัดความพึงพอใจ, แบบวัดความเครียด สวนปรุงและ การสนทนากลุ่ม

3.6 การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไลน์แอปพลิเคชัน (Line Application) เพื่อเป็นช่องทางการสื่อสาร

พบว่า [14] ทำการศึกษาถึงปัญหาผลกระทบและความพึงพอใจในการใช้ไลน์แอปพลิเคชัน (Line Application) เป็นช่องทางการสื่อสารการปฏิบัติงานในองค์กร โดยการแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้บริหารและกลุ่มพนักงาน โดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก ผลการวิจัยพบว่าปัญหาคือ การตีความที่ไม่ตรงกันของผู้รับสารและผู้ส่งสาร และการไม่ตอบสนองต่อการสื่อสาร ในส่วนของผลกระทบที่ได้รับจากการใช้ไลน์แอปพลิเคชัน คือ การเสียสมาธิจากการทำงานและการกระจายของข่าวสารอย่างรวดเร็วโดยขาด การคัดกรอง ประเด็นสุดท้ายเรื่องความพึงพอใจในการใช้ไลน์แอปพลิเคชัน คือ กลุ่มตัวอย่างส่วนมากพึงพอใจในการใช้ไลน์แอปพลิเคชัน เพื่อเป็นช่องทางการสื่อสารในการปฏิบัติงาน ในขณะที่งานวิจัย [15] ได้ศึกษาพฤติกรรมการใช้ไลน์กรุ๊ปของวัยทำงาน และความพึงพอใจในความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม

ของวัยทำงาน โดยใช้ การวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ด้วยวิธีการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) แบบเก็บข้อมูล ณ ช่วงเวลาใด เวลาหนึ่งเพียงครั้งเดียว (Cross-sectional Study) โดยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ วัยทำงานในเขตกรุงเทพมหานคร ที่มีบัญชีไลน์และมีกลุ่มไลน์ครอบครัว กลุ่มไลน์ที่ทำงาน และกลุ่มไลน์เพื่อน โดยใช้ขนาดตัวอย่าง 400 คน ผลการวิจัยพบว่า กลุ่มตัวอย่างมีความถี่ในการใช้งานไลน์กลุ่มเพื่อนมากที่สุด รองลงมา คือ ไลน์กลุ่มครอบครัว และไลน์กลุ่มที่ทำงาน ตามลำดับ กลุ่มตัวอย่างมีระยะเวลาในการใช้งานไลน์กลุ่มเพื่อนมากที่สุด รองลงมาคือ ไลน์กลุ่มที่ทำงาน และไลน์กลุ่มครอบครัว ตามลำดับ ประเภทของสื่อที่มีการส่งต่อ (Share)

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ นักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ จำนวน 525 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ จำนวน 256 คน และนักเรียนจ่าอากาศ จำนวน 505 คน ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 1,286 คน

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 202 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 68 คน และนักเรียนจ่าอากาศ ชั้นปีที่ 1 จำนวน 107 คน ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 377 คน ซึ่งมีฐานอ้างอิงจากการกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างแบบทราบจำนวนประชากร คำนวณจากสูตรของ ทาโร ยามาเน่ [16] ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยใช้ความคลาดเคลื่อนในการสุ่ม 5% ดังนี้

$$n = N / [\, 1 + N\,(e*e)\,] \qquad (1)$$

เมื่อ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

N = ขนาดประชากร

e = ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการสุ่มตัวอย่างโดยกำหนดเป็น .05

แทนค่าจากสูตร

ขนาดกลุ่มตัวอย่าง = 1,286 / [1 + 1,286 (0.05*0.05)]

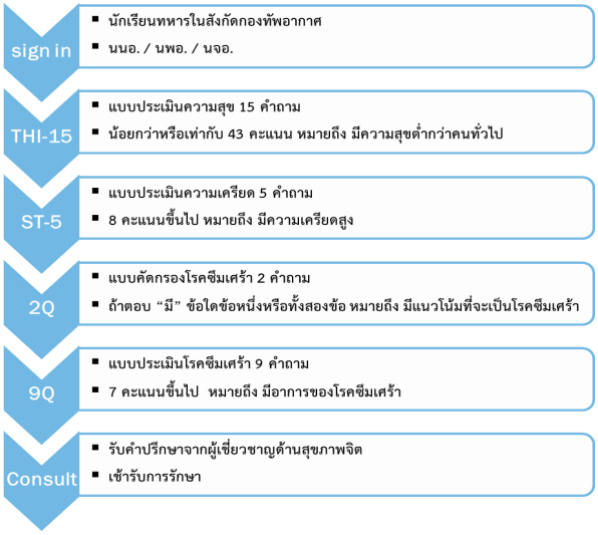
= 305 คน

จากการเก็บข้อมูลมีกลุ่มตัวอย่างให้ความสนใจรวมทั้งสิ้น 377 คน ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนด

4.2 แนวทางการใช้เครื่องมือเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล

หัวใจของการวิจัยอยู่ที่ข้อมูลที่ได้มาต้องมีความน่าเชื่อถือ มีความถูกต้อง และทันเวลา ข้อมูลที่ดีต้องได้จากเครื่องมือในการวิจัยที่มีคุณลักษณะที่ดี สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้ครบถ้วนตามต้องการ และสามารถตอบจุดมุ่งหมายของงานวิจัยที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัยนับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษางานวิจัยทุกชนิด โดยเครื่องมือในงานวิจัยจะใช้ในการวัดประเมินตัวแปรหรือสิ่งที่ต้องการศึกษาต่าง ๆ ในงานวิจัย เนื่องจากการวิจัยเป็นกระบวนการศึกษาตัวแปรงานวิจัยจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ผู้วิจัยใช้เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยเชิงปริมาณหรือผู้ให้ข้อมูลหลักในงานวิจัยเชิงคุณภาพ เมื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเรียบร้อยแล้วจึงนำข้อมูล มาทำการวิเคราะห์และสรุปผลตามวัตถุประสงค์การวิจัย และสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้

ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องและครบถ้วน ผู้วิจัยจึงมีแนวทางการใช้เครื่องมือเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลของนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศ ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวทางการใช้เครื่องมือการประเมินและคัดกรองเพื่อให้คำปรึกษา

จากรูปที่ 1 อธิบายขั้นตอนของการใช้เครื่องมือการประเมินและคัดกรองเพื่อให้คำปรึกษา ได้ดังนี้

4.2.1 ลงทะเบียน (sign in)

กลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศ ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ลงทะเบียนเพื่อเข้าสู่ระบบรับการประเมินและคัดกรอง จากนั้นเริ่มทำขั้นตอนที่ 4.2.2 ต่อไป

4.2.2 แบบประเมินความสุข (Thai Happiness Indicators: THI-15)

กลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ทำแบบประเมินความสุข 15 ข้อ โดยแบ่งการประเมินเป็น 4 ระดับ คือ

ไม่เลย หมายถึง ไม่เคยมีเหตุการณ์ อาการ ความรู้สึก หรือไม่เห็นด้วยกับเรื่องนั้น ๆ
เล็กน้อย หมายถึง มีเหตุการณ์ อาการ ความรู้สึก หรือเห็นด้วยกับเรื่องนั้น ๆ เล็กน้อย
มาก หมายถึง มีเหตุการณ์ อาการ ความรู้สึก หรือเห็นด้วยกับเรื่องนั้น ๆ มาก
มากที่สุด หมายถึง มีเหตุการณ์ อาการ ความรู้สึก หรือเห็นด้วยกับเรื่องนั้น ๆ มากที่สุด

และภายหลังจากทำแบบประเมินจะแปลผลเมื่อรวมคะแนนทุกข้อแล้วนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดดังนี้

51-60 คะแนน หมายถึง มีความสุขสูงกว่าคนทั่วไป
44-50 คะแนน หมายถึง มีความสุขเท่ากับคนทั่วไป
43 คะแนนหรือน้อยกว่า หมายถึง มีความสุขต่ำกว่าคนทั่วไป

หากกลุ่มตัวอย่างได้ 43 คะแนนหรือน้อยกว่า ให้ทำขั้นตอนที่ 4.2.3 ต่อไป

4.2.3 แบบประเมินความเครียด (ST-5)

กลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศ ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ทำแบบประเมินความเครียด 5 ข้อ โดยแบ่งการประเมินเป็น 4 ระดับ คือ

ระดับอาการแทบไม่มี หมายถึง ไม่มีอาการหรือเกิดอาการเพียง 1 ครั้ง
ระดับอาการเป็นบางครั้ง หมายถึง มีอาการมากกว่า 1 ครั้ง แต่ไม่บ่อย
ระดับอาการบ่อยครั้ง หมายถึง มีอาการเกิดขึ้นเกือบทุกวัน
ระดับอาการเป็นประจำ หมายถึง มีอาการเกิดขึ้นทุกวัน

และภายหลังจากทำแบบประเมินจะแปลผลเมื่อรวมคะแนนทุกข้อแล้วนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดดังนี้

0 - 4 คะแนน หมายถึง ไม่มีความเครียดในระดับที่ก่อให้เกิดปัญหากับตัวเอง ยังสามารถจัดการกับความเครียดที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันได้และปรับตัวกับสถานการณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

5 - 7 คะแนน หมายถึง สงสัยว่ามีปัญหาความเครียดหรือมีเรื่องไม่สบายใจและยังไม่ได้คลี่คลาย ซึ่งต้องใช้เวลาในการปรับตัวหรือแก้ปัญหา ควรให้คำปรึกษาหรือคำแนะนำในเรื่องการผ่อนคลายความเครียดด้วยการพูดคุยหรือปรึกษาหารือกับคนใกล้ชิด เพื่อระบายความเครียด หรือคลี่คลายที่มาของปัญหาและอาจใช้การหายใจเข้าออกหลายครั้ง (ประมาณ 5-10 ครั้ง) หรือใช้หลักการทางศาสนาเพื่อคลายความกังวล

8 คะแนนขึ้นไป หมายถึง มีความเครียดสูงในระดับที่อาจจะส่งผลเสียต่อร่างกาย เช่น ปวดหัว ปวดหลัง นอนไม่หลับ ฯลฯ ต้องได้รับคำปรึกษาจากบุคลากรสาธารณสุข เพื่อค้นหาสาเหตุที่ทำให้เกิดความเครียดและหาแนวทางแก้ไข และคัดกรองโรคซึมเศร้าด้วยแบบคัดกรองโรคซึมเศร้า 2 คำถาม (2Q) ในขั้นตอนที่ 4.2.4 ต่อไป

4.2.4 แบบคัดกรองโรคซึมเศร้า 2 คำถาม (2Q)

กลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศ ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ทำแบบคัดกรองโรคซึมเศร้า 2 คำถาม โดยมีการแปลผล ดังนี้

4.2.4.1 ถ้าคำตอบ “ไม่มี” ทั้งสองข้อ หมายถึง ปกติไม่เป็นโรคซึมเศร้า

4.2.4.2 ถ้าคำตอบ “มี” ข้อใดข้อหนึ่งหรือทั้งสองข้อ (มีอาการใด ๆ ในคำถามที่ 1 และ 2) หมายถึง เป็นผู้มีความเสี่ยงหรือมีแนวโน้มที่จะเป็นโรคซึมเศร้า ให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบประเมินในขั้นตอนที่ 4.2.5 ต่อไป

4.2.5 แบบประเมินโรคซึมเศร้า 9 คำถาม (9Q)

กลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศ ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ทำแบบประเมินโรคซึมเศร้า 9 คำถาม โดยมีการแปลผล ดังนี้

4.2.5.1 คะแนนรวม < 7 หมายถึง ไม่มีอาการของโรคซึมเศร้าหรือมีอาการ ระดับน้อยมาก

4.2.5.2 คะแนนรวม 7 – 12 หมายถึง มีอาการของโรคซึมเศร้า ระดับน้อย

4.2.5.3 คะแนนรวม 13 - 18 หมายถึง มีอาการของโรคซึมเศร้า ระดับปานกลาง

4.2.5.4 คะแนนรวม ≥ 19 หมายถึง มีอาการของโรคซึมเศร้า ระดับรุนแรง

เมื่อกลุ่มตัวอย่างทำแบบประเมินแล้วได้คะแนนรวมมากกว่า 7 คะแนนขึ้นไป ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนที่ 4.2.6 ต่อไป

4.2.6 การรับคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านสุขภาพจิต (Counseling)

กลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ และนักเรียนจ่าอากาศ ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 ที่มีอาการของโรคซึมเศร้า ต้องได้รับคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านสุขภาพจิต ดังนี้

4.2.6.1 แจ้งผลการประเมินโรคซึมเศร้า และให้สุขภาพจิตศึกษาเรื่องโรคซึมเศร้า

4.2.6.2 ประเมินว่ามีปัญหาด้านสังคมจิตใจหรือไม่ถ้ามีควรให้การปรึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและแนะนำทักษะในการแก้ปัญหาด้วยตัวเอง

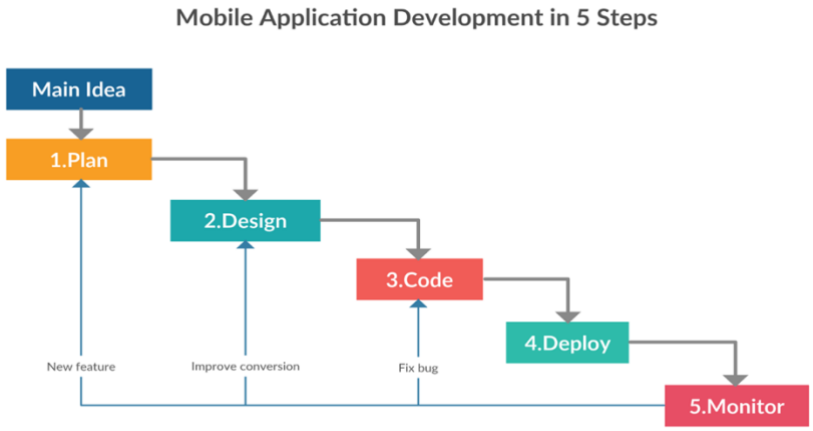
4.2.6.3 แนะนำให้ออกกำลังกาย 30 - 45 นาทีอย่างน้อยสัปดาห์ละ 3 ครั้ง ยกเว้นในผู้ที่มีข้อจำกัดห้ามออกกำลังกาย

4.2.6.4 แนะนำให้สำรวจ/ประเมินโรคซึมเศร้าด้วยตนเองด้วยแบบคัดกรองโรคซึมเศร้า 2 คำถาม (2Q) เมื่อพบว่าผลมีแนวโน้มป่วยเป็นโรคซึมเศร้า ให้มาพบบุคลากรสาธารณสุขเพื่อประเมินโรคซึมเศร้าอย่างละเอียด เพื่อเข้ารับการรักษาตามกระบวนการทางการแพทย์ต่อไป

4.3 การพัฒนาเครื่องมือเพื่อให้บริการคำปรึกษาทางไกล

ปัจจุบันแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะคนในสังคมมี การติดต่อสื่อสารกันอย่างแพร่หลาย ทุกคนต้องการความสะดวก ต้องการรับรู้ข่าวสารได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึงมากยิ่งขึ้น เป็นเหตุให้แอปพลิเคชันไลน์ได้รับความนิยมและถูกกล่าวถึงอย่างมากในตอนนี้ เพราะเป็นแอปพลิเคชันที่มีฟังก์ชันที่หลากหลาย สามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบการแชทการติดต่อสื่อสาร ส่งรูปภาพ VDO ตลอดจนการส่งสติกเกอร์ไลน์ที่บ่งบอกถึงความรู้สึกและอารมณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ตอบโจทย์ของคนในสังคมปัจจุบันทุกเพศ ทุกวัย ได้เป็นอย่างดี

ด้วยมูลเหตุข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มบนโทรศัพท์มือถือด้วยแอปพลิเคชันไลน์ สำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งมีกรอบแนวคิด กระบวนการพัฒนา Mobile Application [17] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการพัฒนาแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ [17]

5. ผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ นั้น ผู้วิจัยได้พัฒนาแอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มบนโทรศัพท์มือถือเพื่อความสะดวกในการใช้งาน และง่ายต่อการเข้าถึงสำหรับการให้คำปรึกษาทางไกล มีผลการวิจัยดังนี้

- กลุ่มตัวอย่างที่ใช้สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล

- ผลการประเมินสุขภาพจิตหลังการใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ
- ผลการตอบแบบสอบถามออนไลน์หลังการใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ

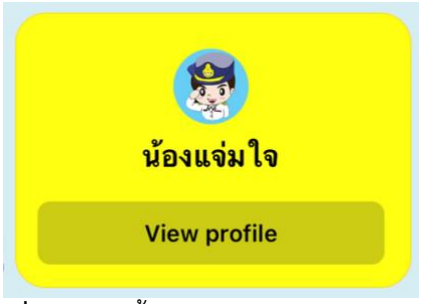
5.1 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ นักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ จำนวน 525 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ จำนวน 256 คน และนักเรียนจ่าอากาศ จำนวน 505 คน ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 1,286 คน โดยผู้วิจัยใช้กลุ่มตัวอย่างเพื่อเป็นตัวแทนประชากรในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักเรียนนายเรืออากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 202 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 68 คน และนักเรียนจ่าอากาศ ชั้นปีที่ 1 จำนวน 107 คน ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 377 คน ดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล

5.2 ผลการประเมินสุขภาพจิตหลังการใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ

ผู้วิจัยให้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 377 คน เป็นตัวแทนประชากรในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักเรียน นายเรืออากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 202 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 68 คน และนักเรียนจ่าอากาศ ชั้นปีที่ 1 จำนวน 107 คน ติดตั้งแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจบนโทรศัพท์มือถือ ดังรูปที่ 4

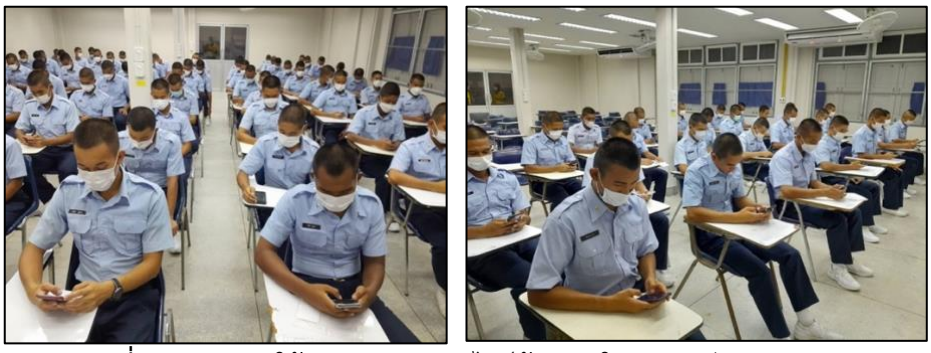


รูปที่ 4 การติดตั้งแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ

หลังจากที่กลุ่มตัวอย่างติดตั้งแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ให้กลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งาน โดยใช้ช่วงเวลาว่างระหว่างฝึกฝนตนเอง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่นักเรียนทหารผ่อนคลายมากที่สุด เพราะเสร็จสิ้นจากภารกิจการเรียนและการฝึกวิชาทหารเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 5 - 7

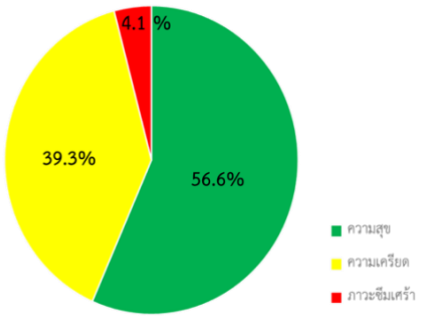
รูปที่ 5 การทดลองใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจของนักเรียนนายเรืออากาศ

รูปที่ 6 การทดลองใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจของนักเรียนพยาบาลทหารอากาศ



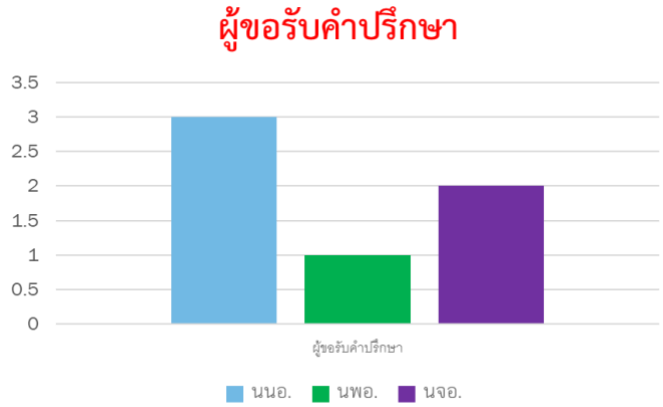
รูปที่ 7 การทดลองใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจของนักเรียนจ่าอากาศ

ผลการประเมินสุขภาพจิตหลังการทดสอบใช้งานแอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” ของ นนอ., นพอ. และ นจอ. จำนวนทั้งสิ้น 377 คน คิดเป็นร้อยละ 100 แสดงผลได้ดังรูปที่ 8



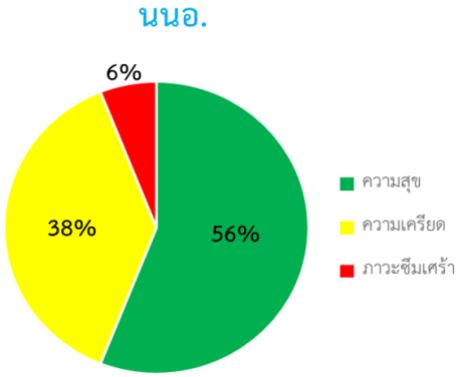
รูปที่ 8 ภาพรวมของผลการประเมินสุขภาพจิตนักเรียนทหาร

จากรูปที่ 8 สรุปได้ว่ากลุ่มตัวอย่างจำนวน 377 คน คิดเป็นร้อยละ 100 มีความสุขร้อยละ 56.6 มีความเครียดร้อยละ 39.3 และมีภาวะซึมเศร้าร้อยละ 4.1โดยผู้ที่มีภาวะซึมเศร้านั้นมีความต้องการขอรับคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านสุขภาพจิตแบ่งออกเป็น นนอ.จำนวน 4 คน, นพอ.จำนวน 1 คน และ นจอ.จำนวน 2 คน ดังรูปที่ 9



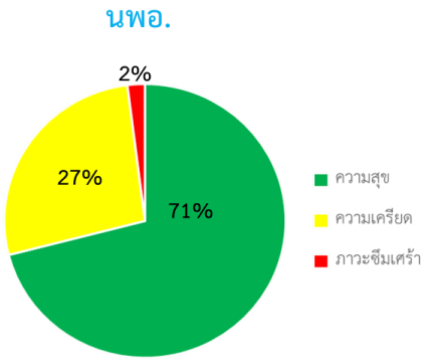
รูปที่ 9 จำนวนนักเรียนทหารที่ต้องการขอคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญ

เมื่อประเมินสุขภาพจิตหลังการทดสอบใช้งานแอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” ของ นนอ., นพอ. และ นจอ.ในภาพรวมแล้ว แอปพลิเคชันฯ นี้ ยังสามารถวิเคราะห์แบบแยกกลุ่มตัวอย่างได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 - 12



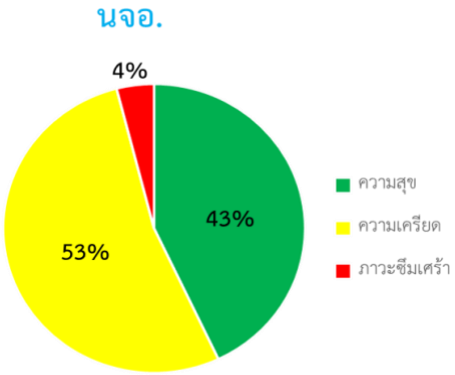
รูปที่ 10 ผลการประเมินสุขภาพจิตของนักเรียนนายเรืออากาศ

จากรูปที่ 10 สรุปได้ว่าผลการประเมินสุขภาพจิตหลังการทดสอบใช้งานแอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” ของนักเรียนนายเรืออากาศจำนวน 202 คน คิดเป็นร้อยละ 100 มีความสุขร้อยละ 56.6 มีความเครียดร้อยละ 38 และมีภาวะซึมเศร้าร้อยละ 6



รูปที่ 11 ผลการประเมินสุขภาพจิตของนักเรียนพยาบาลทหารอากาศ

จากรูปที่ 11 สรุปได้ว่าผลการประเมินสุขภาพจิตหลังการทดสอบใช้งานแอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” ของนักเรียนพยาบาลทหารอากาศจำนวน 68 คน คิดเป็นร้อยละ 100 มีความสุขร้อยละ 56.6 มีความเครียดร้อยละ 38 และมีภาวะซึมเศร้าร้อยละ 6



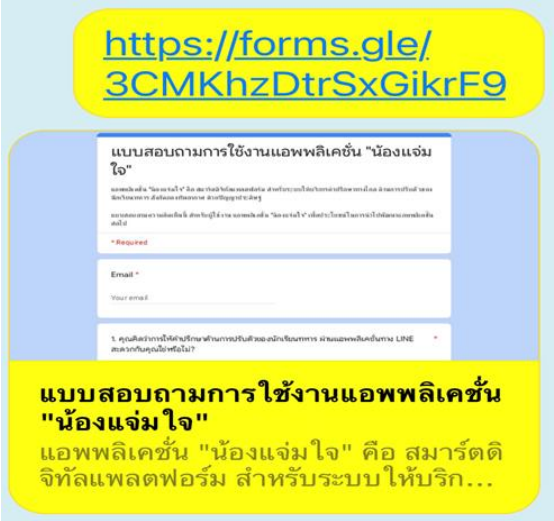
รูปที่ 12 ผลการประเมินสุขภาพจิตของนักเรียนจ่าอากาศ

จากรูปที่ 12 สรุปได้ว่าผลการประเมินสุขภาพจิตหลังการทดสอบใช้งานแอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” ของนักเรียนจ่าอากาศจำนวน 107 คน คิดเป็นร้อยละ 100 มีความสุขร้อยละ 43 มีความเครียดร้อยละ 53 และมีภาวะซึมเศร้าร้อยละ 4

5.3 ผลการตอบแบบสอบถามออนไลน์หลังการใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ

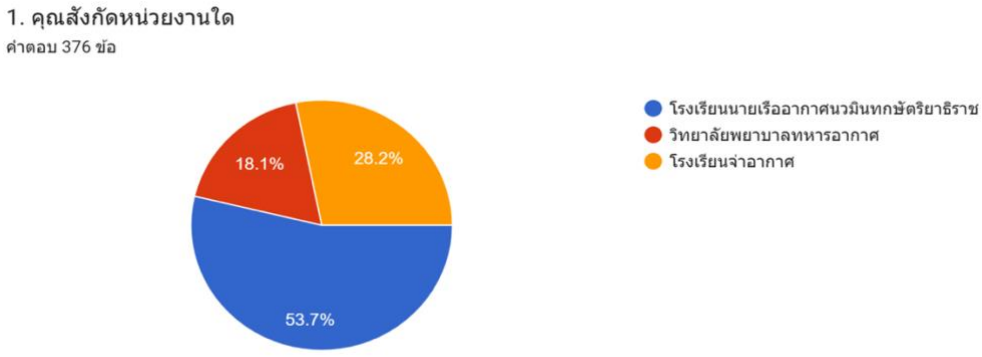
ผู้วิจัยให้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 377 คน เป็นตัวแทนประชากรในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักเรียนนายเรืออากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 202 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 68 คน และนักเรียนจ่าอากาศ ชั้นปีที่ 1 จำนวน 107 คน ตอบแบบสอบถามออนไลน์ (Google Form) หลังจากการใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจบนโทรศัพท์มือถือ ดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14 เพื่อประโยชน์ในการนำไปพัฒนาแอปพลิเคชันต่อไป โดยมี 5 ข้อคำถามดังนี้

- คุณสังกัดหน่วยงานใด
- คุณคิดว่าการให้คำปรึกษาด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร ผ่านแอปพลิเคชัน ทาง LINE สะดวกกับคุณใช่หรือไม่
- แอปพลิเคชันไลน์ "น้องแจ่มใจ" มีฟังก์ชันการใช้งานที่ง่าย และสะดวกใช่หรือไม่
- หลังจากการใช้งาน คุณคิดว่าจะแนะนำแอปพลิเคชันไลน์ "น้องแจ่มใจ" ให้กับผู้อื่นใช่หรือไม่
- ข้อแนะนำเพื่อการพัฒนา



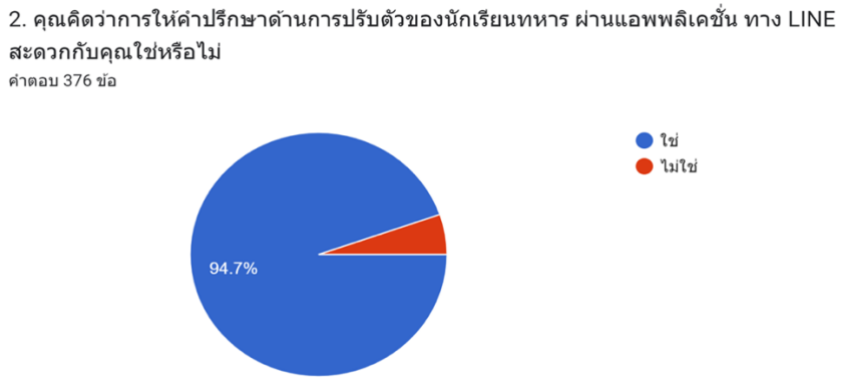
รูปที่ 13 แบบสอบถามออนไลน์การใช้งานแอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ

หลังจากที่กลุ่มตัวอย่างทดลองใช้แอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ให้กลุ่มตัวอย่างตอบแบบสอบถามออนไลน์ (Google Form) เพื่อนำไปพัฒนาแอปพลิเคชันต่อไป โดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟต์เอกซ์เซล (Microsoft Excel) เป็นฐานในการจัดเก็บข้อมูล โดยการตอบแบบสอบถามทั้ง 5 ข้อนี้ คำถามข้อที่ 1 ถามว่า คุณสังกัดหน่วยงานใด เพื่อต้องการทราบจำนวนของผู้ตอบแบบสอบถามในแต่ละหน่วยของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งผลของคำตอบมีจำนวนผู้ทำแบบสอบถามทั้งสิ้น 376 คน คิดเป็นร้อยละ 100 จำแนกเป็นผู้ตอบแบบสอบถามจากนักเรียนนายเรืออากาศร้อยละ 53.7 ผู้ตอบแบบสอบถามจากนักเรียนพยาบาลทหารอากาศร้อยละ 18.1 และผู้ตอบแบบสอบถามจากนักเรียนจ่าอากาศร้อยละ 28.2 ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 คำถามข้อที่ 1 คุณสังกัดหน่วยงานใด

คำถามข้อที่ 2 ถามว่า คุณคิดว่าการให้คำปรึกษาด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร ผ่านแอปพลิเคชัน ทาง LINE สะดวกกับคุณใช่หรือไม่ เพื่อต้องการทราบถึงความง่ายในการทดลองใช้แอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจบนโทรศัพท์มือถือ ซึ่งผลของคำตอบมีจำนวนผู้ทำแบบสอบถามทั้งสิ้น 376 คน คิดเป็นร้อยละ 100 จำแนกเป็นผู้ตอบแบบสอบถามที่ตอบว่า “ใช่” จำนวนร้อยละ 94.7 และผู้ตอบแบบสอบถามที่ตอบว่า “ไม่ใช่” จำนวนร้อยละ 5.3 ดังรูปที่ 15

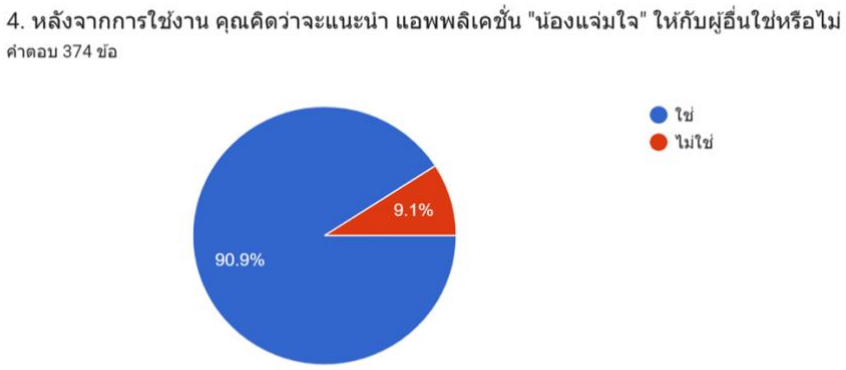


รูปที่ 15 คำถามข้อที่ 2 คุณคิดว่าการให้คำปรึกษาด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร ผ่านแอปพลิเคชั่น ทาง LINE สะดวกกับคุณใช่หรือไม่

คำถามข้อที่ 3 ถามว่า แอปพลิเคชันไลน์ "น้องแจ่มใจ" มีฟังก์ชันการใช้งานที่ง่าย และสะดวกใช่หรือไม่เพื่อต้องการทราบถึงความรู้สึกยากง่าย หรือความสะดวกหลังจากการทดลองใช้แอปพลิเคชันไลน์น้องแจ่มใจ ซึ่งผลของคำตอบมีจำนวนผู้ทำแบบสอบถามทั้งสิ้น 376 คน คิดเป็นร้อยละ 100 จำแนกเป็นผู้ตอบแบบสอบถามที่ตอบว่า “ใช่” จำนวนร้อยละ 91.2 และผู้ตอบแบบสอบถามที่ตอบว่า “ไม่ใช่” จำนวนร้อยละ 8.8 ดังรูปที่ 16

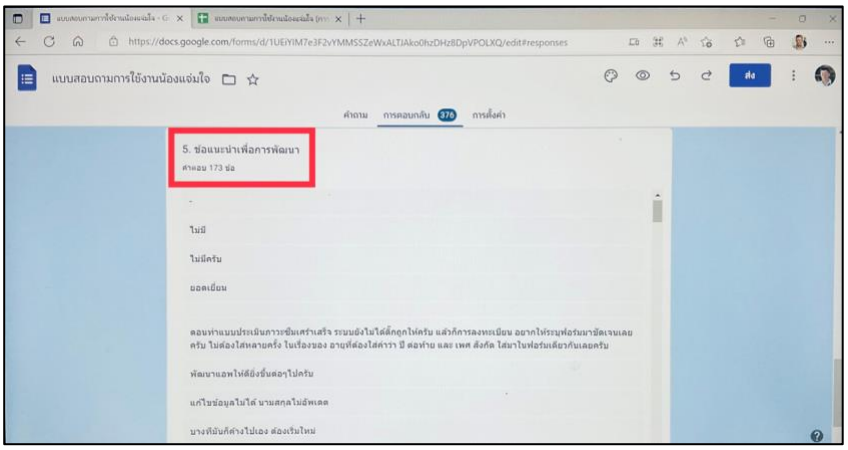
รูปที่ 16 คำถามข้อที่ 3 แอปพลิเคชันไลน์ "น้องแจ่มใจ" มีฟังก์ชันการใช้งานที่ง่ายใช่หรือไม่

คำถามข้อที่ 4 ถามว่า หลังจากการใช้งาน คุณคิดว่าจะแนะนำแอปพลิเคชันไลน์ "น้องแจ่มใจ" ให้กับผู้อื่นใช่หรือไม่ เพื่อต้องการทราบถึงความรู้สึกเชิงบวกว่าแอปพลิเคชันฯ นี้ คือเพื่อนที่ช่วยบรรเทาความรู้สึกกดดันทางจิตใจของผู้ใช้ได้ ซึ่งผลของคำตอบมีจำนวนผู้ทำแบบสอบถามทั้งสิ้น 374 คน คิดเป็นร้อยละ 99.2 จำแนกเป็นผู้ตอบแบบสอบถามที่ตอบว่า “ใช่” จำนวนร้อยละ 90.9 และผู้ตอบแบบสอบถามที่ตอบว่า “ไม่ใช่” จำนวนร้อยละ 9.1 ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 คำถามข้อที่ 4 หลังจากการใช้งาน คุณคิดว่าจะแนะนำแอปพลิเคชันไลน์ "น้องแจ่มใจ" ให้กับผู้อื่นใช่หรือไม่

คำถามข้อที่ 5 เป็นข้อแนะนำเพื่อการพัฒนา ต้องการทราบถึงความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่เข้ามาทดลองใช้เพื่อนำไปปรับปรุงและพัฒนาแอปพลิเคชัน ฯ ให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้ให้มากที่สุดซึ่งผลของคำตอบมีจำนวนผู้ทำแบบสอบถามทั้งสิ้น 173 คน คิดเป็นร้อยละ 45.8 ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 คำถามข้อที่ 5 ข้อแนะนำเพื่อการพัฒนา

6. อภิปรายผล

6.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับตัวของนักเรียนในโรงเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ ประชากรที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ นักเรียนทหารในสังกัดกองทัพอากาศ ประกอบด้วย นักเรียนนายเรืออากาศ จำนวน 525 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ จำนวน 256 คน และนักเรียนจ่าอากาศ จำนวน 505 คน ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 1,286 คน โดยผู้วิจัยใช้กลุ่มตัวอย่างนี้ เพื่อเป็นตัวแทนประชากรในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักเรียนนายเรืออากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 202 คน, นักเรียนพยาบาลทหารอากาศ ชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 68 คน และนักเรียนจ่าอากาศ ชั้นปีที่ 1 จำนวน 107 คน ที่กำลังศึกษาในปีการศึกษา 2565 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 377 คน โดยผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากจากงานวิจัยต่าง ๆ เช่น การสำรวจความเข้มแข็งทางจิตใจของกำลังพล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กรณีศึกษาสถานการณ์การระบาดของโรค ติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ก่อให้เกิดความเครียดและความกดดัน

ทางจิตใจกับนักเรียนทหารมากที่สุด รวมถึงขั้นตอนและวิธีการประเมินสุขภาพจิต ของกรมสุขภาพจิต กระทรวงสาธารณสุข เป็นแนวทางเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เป็นปัจจัยต่อการปรับตัวของนักเรียนในโรงเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดต่อนักเรียนทหารในระดับมาก คือ ปัจจัยด้านชีวิตความเป็นอยู่โดยทั่วไป ในเรื่องระเบียบข้อบังคับที่เข้มงวด ส่วนปัจจัยในด้านอื่น ๆ เช่น การเรียนทฤษฎีในห้องเรียน การฝึกภาคปฏิบัติในเรื่องการทหาร ก่อให้เกิดความเครียดต่อนักเรียนทหารในระดับปานกลาง ระดับความเครียดของนักเรียนทหารโดยภาพรวมอยู่ในระดับเครียดปานกลาง ระดับความเข้มแข็งทางจิตใจของนักเรียนทหารโดยภาพรวมอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ โดยเฉพาะในเรื่องของความทนทานทางอารมณ์ และด้านกำลังใจ แต่ด้านการจัดการกับปัญหา ทำได้อยู่ในเกณฑ์ปกติ ซึ่งถือเป็นจุดแข็งของนักเรียนทหาร

6.2 การพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ เนื่องจากกลุ่มเป้าหมายผู้ใช้งานเป็นนักเรียนทหาร มีระเบียบปฏิบัติประจำวันทั้งการเรียนทฤษฎีในห้องเรียน การฝึกภาคปฏิบัติในเรื่องการทหาร รวมถึงการดำเนินชีวิต รับประทานอาหาร และการพักผ่อนร่วมกันทั้งกับเพื่อนร่วมรุ่น และรุ่นพี่ ที่อาจส่งผลให้เกิดความเครียดอยู่แล้ว ดังนั้นเพื่อสร้างแนวคิดให้กลุ่มเป้าหมายใช้แอปพลิเคชันเสมือนได้คุยกับเพื่อนสนิทใกล้ชิด และนำไปสู่ความสบายใจที่จะให้ข้อมูลส่วนตัวซึ่งอาจนำไปสู่การให้คำปรึกษาทางไกลนั้น ผู้วิจัยจึงได้กำหนดชื่อแอปพลิเคชันการให้คำปรึกษาทางไกลมีศัพท์ที่ทันสมัยว่า “น้องแจ่มใจ” เพราะคำว่า “แจ่ม” หมายถึง ดี ฟิน เลิศ โดยมีลักษณะเป็น “App in App”

6.3 การประเมินสุขภาพจิตที่ส่งผลต่อการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ หลังการใช้ดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษา งานวิจัยการพัฒนาสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ โดยใช้แอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” นี้ สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการคัดกรองการประเมินสุขภาพจิตที่ส่งผลต่อการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาด้านสุขภาพจิตที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ตัว สอดคล้องกับนโยบายด้านกำลังพลของผู้บัญชาการทหารอากาศ ในการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเป็นเครื่องมือเพื่อสนับสนุนให้เกิดนวัตกรรม ลดกระบวนการและขั้นตอนในการปฏิบัติงาน โดยมุ่งเน้นการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และให้ความสำคัญกับการยกระดับคุณภาพชีวิตของกำลังพล พร้อมรองรับการปฏิบัติภายใต้ฐานวิถีชีวิตใหม่ (New Normal)

7. ข้อเสนอแนะ

การใช้สมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกล โดยใช้แอปพลิเคชันไลน์ “น้องแจ่มใจ” จะศึกษาเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับผลต่อการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศเท่านั้น เพื่อตรวจสอบระดับพฤติกรรมเป็นวงรอบอย่างต่อเนื่อง จะสามารถควบคุมและช่วยลดปัญหาด้านสุขภาพจิตที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ตัวของนักเรียนทหารได้ สำหรับแนวทางการนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ หรือการต่อยอดนั้น สามารถนำสมาร์ตดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับระบบการให้บริการคำปรึกษาทางไกลด้านการปรับตัวของนักเรียนทหาร สังกัดกองทัพอากาศนี้ไปประยุกต์ใช้กับนักเรียนทหารหน่วยอื่น ๆ ในสังกัดกระทรวงกลาโหมได้ เช่น กองทัพบก และกองทัพเรือ หรือนักเรียนตำรวจ ในสังกัดสำนักงานตำรวจแห่งชาติ

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจาก พล.อ.ต. ผศ.ชาติชาย คงเจริญสุข อดีตรองผู้บัญชาการโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช, พล.อ.ต. ศ.ดร.ประสงค์ ปราณีตพลกรัง อดีตผู้อำนวยการกองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และ น.อ.หญิง ผศ.วัลลภา อันดารา ผู้อำนวยการวิทยาลัย

พยาบาลทหารอากาศ กรมแพทย์ทหารอากาศ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อแนะนำ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] R. S. Lazarus, Patterns of Adjustment and Human Effectiveness, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1969, pp. 17–21.

[2] J. C. H. Coleman, Contemporary Psychology and Effective Behavior, 3rd ed., C. L. Hammen and L. J. Fox, Consulting Authors, New York, NY, USA: Scott, Foresman, 1974.

[3] ปนัดดา พิทยาภรณ์ และ มัลลวีร์ อดุลวัฒนศิริ, "ผลของการให้คำปรึกษารายบุคคลต่อความวิตกกังวลในผู้ป่วยที่ได้รับการผ่าตัดหัวใจ," วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (บัณฑิตศึกษา), ปีที่ 11, ฉบับที่ 3, หน้า 91–100, 2552.

[4] รุ่งอรุณ วัฒยากร, การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลและแนวทางการส่งเสริมการปรับตัวของนักเรียนนายร้อยใหม่โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, นครนายก: โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, 2560.

[5] หฤทัยทิพย์ ตัณฑเทศ และ น.ท.หญิง ผศ., การสำรวจความเข้มแข็งทางจิตใจของกำลังพลโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กรณีศึกษาสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019, กรุงเทพฯ: โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช, 2563.

[6] เบญจวรรณ วงศ์ปราชญ์, "ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดและการเผชิญความเครียดของนักเรียนพยาบาลวิทยาลัยพยาบาลกองทัพบก," วารสารพยาบาลทหารบก, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 201–210, 2561.

[7] กุนนที นวลสุวรรณ และคณะ, "ความเครียดและวิธีการเผชิญความเครียดของพลทหารใหม่," วารสารพยาบาลทหารบก, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, หน้า 72–81, 2555.

[8] พรรณภา เรืองกิจ และคณะ, "การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะสุขภาพจิตและความเครียดของนักศึกษาพยาบาลวิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี นพรัตน์วชิระ," วารสารมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศิลปะ มหาวิทยาลัยศิลปากร, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 72–81, 2562.

[9] คณิติน จรโคกกรวด และคณะ, "การพัฒนาแอปพลิเคชันด้านสุขภาพจิตสำหรับการให้การปรึกษารายบุคคลแบบออนไลน์เพื่อลดความเครียดของวัยรุ่น," วารสารชุมชนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, หน้า 222–235, 2565.

[10] พรอนันต์ ลือสกุล และคณะ, "การพัฒนาแอปพลิเคชันบันทึกพฤติกรรมนักเรียนในระบบดูแลช่วยเหลือนักเรียนด้วยแอปชีทของโรงเรียนในสังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาพังงา ภูเก็ต ระนอง," วารสารบัณฑิตวิจัย, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 123–135, 2564.

[11] ขวัญฤดี ฮวดหุ่น, "อิทธิพลของแอพพลิเคชั่นไลน์ในการสื่อสารยุคปัจจุบัน," วารสารศิลปการจัดการ, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, หน้า 75–88, 2560.

[12] ณัฏฐ์ชุดา สุภาพจน์ และคณะ, รายงานการวิจัยการพัฒนารูปแบบการให้คำปรึกษาออนไลน์ทางจิตวิทยาวัยรุ่นสำหรับเยาวชนไทย, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ, 2555.

[13] นันทกา ฟูสีกุล, ผลการให้คำปรึกษาออนไลน์ต่อการลดภาวะความเครียดในนักศึกษาระดับปริญญาตรีคณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, รายงานการวิจัย, เชียงใหม่: คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2560.

[14] ธีรพร สิริวันต์, “การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไลน์แอปพลิเคชันเพื่อเป็นช่องทางการสื่อสารการปฏิบัติงานในองค์กร,” [สารนิพนธ์], กรุงเทพฯ: วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2559.

[15] อภิชญา วิศาลศิริรักษ์, “การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไลน์แอปพลิเคชันเพื่อเป็นช่องทางการสื่อสารการปฏิบัติงานในองค์กร,” วารสารศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2559.

[16] T. Yamane, Statistics: An Introductory Analysis, 2nd ed., New York, NY, USA: Harper and Row, 1967.

[17] พิชยา ศรีฟ้า, “5 ขั้นตอนกระบวนการพัฒนา Mobile Application ตั้งแต่ต้นจนจบ,” [ออนไลน์], เข้าถึงเมื่อ 12 พฤษภาคม 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: https://www.hatyaiapp.co.th/contents/step-application/

วิศวกรรมระบบกับการวิจัยและพัฒนายุทโธปกรณ์
Systems Engineering for Armaments Research and Development

ธนาสิทธิ์ เสือส่าน[1*] ณณัท ฐานทัดสกุล[2] และ พีระยุทธ สารตายน[3]
[1] ส่วนวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
[2] ฝ่ายวิศวกรรมระบบ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
[3] ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
[*] ผู้แต่ง, อีเมล: thanasit.s@dti.or.th

บทคัดย่อ

การวิจัยและพัฒนายุทโธปกรณ์ทางทหาร มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาต้นแบบไปใช้งานด้านความมั่นคง ต้องมีความทนทาน ปลอดภัย สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมจริง และที่สำคัญต้องผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม (กมย.กห.) หรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง จึงจะสามารถนำไปใช้ประจำการในกองทัพได้ เพื่อให้ผลงานวิจัยมีคุณภาพ จำเป็นจะต้องมีกระบวนการวิจัยที่เป็นระบบสามารถสอบทวนได้ในแต่ละขั้นตอน จะช่วยควบคุมการดำเนินงานให้ได้ผลลัพธ์ออกมาได้อย่างมีคุณภาพ ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน ในการวิจัยและพัฒนาต้นแบบนี้ได้นำหลักการบริหารงานแบบ V-Shape Model ของกระบวนการทางวิศวกรรมระบบ (System Engineering) ระบบบริหารงานคุณภาพ (ISO 9001:2015) และมาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม มาประยุกต์ใช้ ช่วยให้การวิจัยและพัฒนามีขั้นตอนที่ละเอียด ชัดเจน สามารถควบคุมคุณภาพได้ เพื่อให้ต้นแบบผ่านการรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม และสามารถยกระดับไปสู่สายการผลิตเชิงอุตสาหกรรม หลักการดังกล่าวได้ถูกผนวกรวมกันมาเป็น**ขั้นตอนสำหรับกระบวนวิจัยยุทโธปกรณ์กลาโหม** แบ่งได้เป็น 13 ขั้นตอนประกอบด้วย 1. การรวบรวมโจทย์ความต้องการจากผู้ใช้งาน (User Requirement) 2. ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและพัฒนาระบบ (Design and Development Input) 3.การออกแบบรายละเอียด (Detail Design) 4.การจัดหาและสร้างชิ้นส่วน (Purchasing and Making Parts) 5.การทดสอบระบบย่อย (Subsystem Test) 6.การประกอบรวม (Assembly System) 7.การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) 8.การทดสอบภาคสนาม (Field Work Test) 9.การทดสอบร่วมกับผู้ใช้งาน (Improve Performance and Functionality Test) 10. การส่งมอบเพื่อใช้งานจริง (Validation and Deliver to Actual Use) 11. การติดตามการใช้งาน (Monitoring Usage) 12. การรับรองมาตรฐานทางทหาร (Ministry of Defense Standards Certification) 13. กระบวนการนำไปสู่การผลิตทางอุตสาหกรรม (Production Line)

ขั้นตอนกระบวนการวิจัยยุทโธปกรณ์กลาโหมดังกล่าว ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดของ สทป. ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยและพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้ต้นแบบที่สามารถผ่านการรับรองมาตรฐาน กมย.กห. และดำเนินการผลิตทางอุตสาหกรรมได้ ส่งผลให้เกิดการพึ่งพาตนเอง ลดการนำเข้า และเกิดความมั่นคงในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: วิศวกรรมระบบ, มาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม, กมย.กห., หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด, EOD Robot, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สทป., DTI

Abstract

Research and Development of Military Armaments aims to create prototypes for national security applications. These prototypes must be durable, safe, operable under real-world conditions, and, most importantly, must comply with the criteria of the Ministry of Defense Armament Standards or other relevant standards in order to be deployed in the armed forces.

To ensure research quality, the process must be systematic and verifiable at each stage. This helps control project execution and ensures that outcomes are reliable and meet user requirements. In developing these prototypes, the principles of the **V-Model Systems Engineering Process**, **Quality Management System (ISO 9001:2015)**, and **Defense Armament Standards** are applied. This integration provides clear, detailed steps that enable quality control, ensuring that prototypes meet military certification requirements and can be further scaled into industrial production.

These principles are combined into a **13-step defense research process**, consisting of: 1.Collecting user requirements 2.Design and development input 3.Detailed design 4.Purchasing and manufacturing parts 5.Subsystem testing 6.System assembly 7.Laboratory testing 8.Field testing 9.Joint testing with end users (improving performance and functionality) 10.Validation and delivery for actual use 11.Monitoring operational usage 12.Ministry of Defense standards certification 13.Transition to industrial-scale production.

The defense armament research process has been applied to the research and development project of the Explosive Ordnance Disposal (EOD) robot by DTI. This approach has enabled efficient R&D operations, resulting in a prototype that meets the certification standards of the Ministry of Defense and is ready for industrial production. Consequently, it supports self-reliance, reduces imports, and strengthens long-term sustainability in the defense industry.

Keywords : System Engineering, Defense Materiel Standard, EOD Robot, DTI

1. บทนำ

การวิจัยและพัฒนาเข้ามามีบทบาทและประโยชน์ต่อการพัฒนาอาวุธ ยุทโธปกรณ์ ของกระทรวงกลาโหมเป็นอย่างมาก ส่งเสริมให้เกิดความมั่นคงด้านการป้องกันประเทศในหลากหลายมิติ ดังนี้

- เสริมสร้างขีดความสามารถของกองทัพ ทำให้เกิดการพัฒนาอาวุธ ยุทโธปกรณ์ใหม่ๆ ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพยุทโธปกรณ์ ที่ใช้งานอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- ลดการพึ่งพาต่างประเทศ สร้างความมั่นคงทางด้านยุทโธปกรณ์ ที่ผลิตจากเทคโนโลยีภายในประเทศ ทำให้เกิดความมั่นคงด้านการป้องกันประเทศ ลดความเสี่ยงจากการถูกแทรกแซงหรือคว่ำบาตร ส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในประเทศ ทั้งในด้านภาครัฐและเอกชน ทำให้เกิดการหมุนเวียนทางเศรษฐกิจภายในประเทศ
- สร้างความได้เปรียบเชิงยุทธศาสตร์ ทำให้มีเทคโนโลยีล้ำหน้า มีอำนาจการต่อรองในเวทีโลกสูงขึ้น สงครามในอนาคตจำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีขั้นสูง มากกว่ากำลังพลหรืองบประมาณเพียงอย่างเดียว
- สนับสนุนความมั่นคงแบบองค์รวม เทคโนโลยีที่เกิดจากการวิจัยและพัฒนาทางทหารยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาคพลเรือนได้ ช่วยสร้างศักยภาพในการ รับมือภัยคุกคามสมัยใหม่ เช่น สงครามลูกผสม (Hybrid Warfare), สงครามข้อมูลข่าวสาร (Information Warfare)
- พัฒนาทักษะของบุคลากร และองค์ความรู้ในประเทศ ให้มีความรู้และทักษะทางวิศวกรรมขั้นสูงด้านระบบอัตโนมัติและปัญญาประดิษฐ์ ส่งเสริมการบูรณาการความร่วมมือภายในประเทศ ระหว่างกองทัพ ภาครัฐ มหาวิทยาลัย และภาคเอกชน
- กระตุ้นเศรษฐกิจเชิงยุทธศาสตร์ เทคโนโลยีด้านความมั่นคงสามารถพัฒนาไปสู่การผลิตเชิงอุตสาหกรรม ให้เป็นสินค้าส่งออก สร้างรายได้เข้าประเทศ ส่งเสริมการพึ่งตนเองด้านเทคโนโลยี สร้างนวัตกรรม และช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจภายในประเทศ

การดำเนินงานวิจัยและพัฒนายุทโธปกรณ์ให้ได้คุณภาพ จำเป็นต้องมีกระบวนการที่เป็นระบบตามหลัก **วิศวกรรมระบบ (Systems Engineering: SE)** เพื่อให้โครงการมีทิศทางชัดเจน ควบคุมคุณภาพ และลดความล้มเหลว โดยมีกรอบแนวทางหลัก 3 ส่วน ได้แก่ **(1) วิศวกรรมระบบ (SE)**, **(2) มาตรฐาน ISO 9001:2015**, และ **(3) การรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม**

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

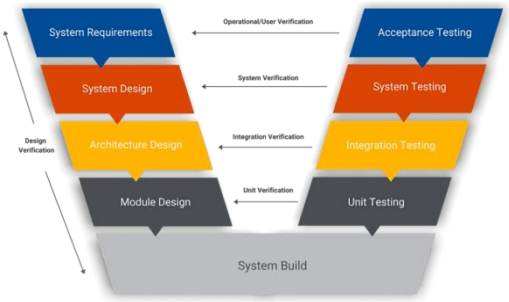
2.1 กระบวนการทางวิศวกรรมระบบ (Systems Engineering – SE)

กระบวนการทางวิศวกรรมระบบ (SE) มีบทบาทสำคัญต่อการยกระดับคุณภาพงานวิจัย โดยเน้นการวางแผนและบริหารวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์อย่างครบถ้วน ตั้งแต่การกำหนดความต้องการ (Requirement) การออกแบบ การทดสอบ จนถึงการนำไปใช้งานจริงแนวทางหลักได้แก่

- **การวางแผนอย่างเป็นระบบ:** กำหนดเป้าหมายและความต้องการของผู้ใช้อย่างชัดเจน ลดการทำงานซ้ำซ้อน
- **การบริหารวงจรชีวิต (Lifecycle Management):** วางแผนครอบคลุมทุกช่วงการพัฒนา เพื่อความคุ้มค่าตลอดอายุการใช้งาน
- **การบูรณาการสหวิทยาการ:** เชื่อมโยงความรู้จากหลายสาขา เช่น เครื่องกล ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ซอฟต์แวร์ และ สาขาที่เกี่ยวข้อง

- **การตรวจสอบและประเมินผล (Verification & Validation):** ตรวจสอบความถูกต้องตามแบบ และยืนยันผลตอบโจทย์ผู้ใช้จริง
- **การบริหารความเสี่ยงและการเปลี่ยนแปลง:** มีระบบจัดการความเสี่ยงตั้งแต่ต้น ลดผลกระทบและการสิ้นเปลืองทรัพยากร
- **การรองรับระบบที่ซับซ้อน:** ใช้เครื่องมือทาง SE วิเคราะห์และจำลองระบบขนาดใหญ่ เช่น ยานไร้คนขับหรือระบบควบคุมอาวุธ

V-Shape Model ในกระบวนการวิศวกรรมระบบ นำมาประยุกต์ใช้เพื่อเชื่อมโยงระหว่างขั้นตอน “การพัฒนา” กับ “การตรวจสอบและประเมินผล” อย่างเป็นระบบฝั่งซ้ายของ V คือกระบวนการออกแบบ (ตั้งแต่ User Needs ถึง Build) ส่วนฝั่งขวาคือกระบวนการทดสอบ (Verification & Validation) การประยุกต์ใช้โมเดลนี้ในการวิจัยยุทโธปกรณ์ช่วยให้ควบคุมคุณภาพได้ละเอียด มีความน่าเชื่อถือสูง ผ่านการรับรองมาตรฐานกลาโหม (กมย.กห.) และพร้อมเข้าสู่สายการผลิตจริง



รูปที่ 1 V-Shape Model [1]

2.2 มาตรฐาน ISO 9001:2015

มาตรฐาน ISO 9001:2015 เป็นมาตรฐานสากลด้านระบบบริหารคุณภาพ (QMS) ที่เน้นการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Improvement) และการบริหารแบบ PDCA (Plan–Do–Check–Act) ช่วยให้องค์กรส่งมอบผลงานได้อย่างมีคุณภาพสม่ำเสมอ เน้นความพึงพอใจของลูกค้า การบริหารความเสี่ยง และสามารถตรวจรับรองได้จากหน่วยงานภายนอก เพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถในการแข่งขันระดับสากล

2.3 การรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม

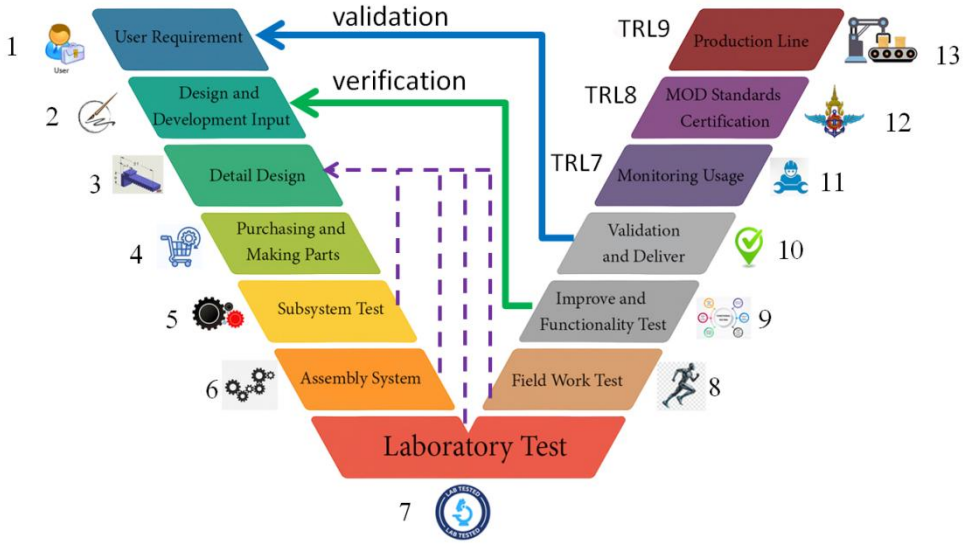
มาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมเป็นกระบวนการสำคัญในการยืนยันความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ด้านความมั่นคง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

- ยืนยันความเหมาะสมและปลอดภัยในการใช้งานทางทหาร
- กำหนดกรอบคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์
- เพิ่มโอกาสในการจัดหาใช้งานจริงในกองทัพ รองรับการส่งออกในอนาคต (เชื่อมโยงมาตรฐาน NATO, MIL-STD, ISO/IEC)
- ส่งเสริมการเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัยกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

3. การดำเนินการวิจัย

กระบวนการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม ได้ดำเนินงานวิจัยและพัฒนาต้นแบบให้สอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรมระบบ (Systems Engineering), ISO 9001:2015 และการขอรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม (กมย.กห.) เพื่อยกระดับคุณภาพงานวิจัยของ

โครงการให้มีคุณภาพสูง อยู่ในระดับ TRL ไม่น้อยกว่า 7 มีความพร้อมเข้าสู่การรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม (กมย.กห.) และสามารถต่อยอดไปสู่การผลิตอุตสาหกรรมเชิงพานิชได้ โดยมีการกำหนดขั้นตอนในกระบวนวิจัยไว้เป็น 13 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนสำหรับกระบวนวิจัยยุทโธปกรณ์กลาโหม

3.1 การรวบรวมโจทย์ความต้องการจากผู้ใช้งาน (User Requirement)

การรวบรวมความต้องการจากผู้ใช้งานเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญของการวิจัยและพัฒนายุทโธปกรณ์ เพื่อให้ระบบที่พัฒนามีประสิทธิภาพตรงตามปัญหาและภารกิจจริงของผู้ใช้ การรับฟังจากหน่วยปฏิบัติการภาคสนาม หน่วยซ่อมบำรุง หรือหน่วยรบพิเศษ ช่วยให้เข้าใจปัญหาที่แท้จริง นำไปกำหนดฟังก์ชันและคุณสมบัติของระบบได้ชัดเจน ข้อมูลเหล่านี้ช่วยกำหนดขอบเขตโครงการ ลดความเสี่ยงด้านเวลาและงบประมาณ และสร้างการยอมรับจากผู้ใช้งาน เนื่องจากผู้ใช้มีส่วนร่วมตั้งแต่ต้น ข้อมูล User Requirement ยังเป็นพื้นฐานของเอกสารสำคัญ เช่น System Requirement Specification และ System Diagram ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกระบวนการวิศวกรรมระบบ

3.2 ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและพัฒนาระบบ (Design and Development Input)

ข้อมูลต้นทางเป็นฐานในการกำหนดคุณลักษณะและขอบเขตการทำงานของยุทโธปกรณ์ ช่วยระบุทิศทางของการออกแบบได้อย่างแม่นยำ รวมถึงข้อจำกัดด้านเทคนิค เช่น ขนาด น้ำหนัก ความทนทาน หรือสภาพการทำงาน ข้อมูลจากผู้ใช้งานจริงจะช่วยให้เลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม ประเมินความเป็นไปได้ตั้งแต่ต้น และวางแผนทรัพยากรได้แม่นยำ อีกทั้งยังเป็นหลักฐานสำหรับการตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ในขั้นตอนการตรวจสอบและยืนยันแบบ (Design Review, Verification, Validation)

3.3 การออกแบบรายละเอียด (Detail Design)

เป็นขั้นตอนสำคัญที่เปลี่ยนแนวคิดสู่การผลิตจริง โดยต้องระบุขนาด วัสดุ ความคลาดเคลื่อน และการเชื่อมต่ออย่างละเอียด เพื่อลดข้อผิดพลาดในการผลิตต้นแบบการออกแบบนี้ต้องควบคู่กับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เช่น FEA, Thermal Simulation และ Vibration Analysis เพื่อยืนยันความแข็งแรงและความปลอดภัย แบบรายละเอียดที่ครบถ้วนช่วยให้ผลิตได้จริงในระดับอุตสาหกรรม และประเมินต้นทุนได้ถูกต้องแม่นยำ

3.4 การจัดหาและสร้างชิ้นส่วน (Purchasing and Making Parts)

เป็นการนำแบบรายละเอียดไปสู่การสร้างต้นแบบจริง ผ่านการจัดหาหรือผลิตชิ้นส่วนตามแบบที่ออกแบบไว้ ชิ้นส่วนที่ไม่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปต้องสั่งผลิตเฉพาะ การตรวจสอบคุณภาพและการรับมอบจึงเป็นขั้นตอนสำคัญ การเลือกวัสดุและมาตรฐานการผลิตมีผลโดยตรงต่อความทนทานและประสิทธิภาพของยุทโธปกรณ์ การวางแผนจัดหาที่ดีช่วยลดเวลาและต้นทุนได้ อีกทั้งการผลิตภายในประเทศยังช่วยสร้างความมั่นคงทางเทคโนโลยี และรองรับการปรับปรุงต้นแบบได้รวดเร็ว

3.5 การทดสอบระบบย่อย (Subsystem Test)

การทดสอบระบบย่อยเป็นขั้นตอนเพื่อลดความเสี่ยงก่อนทดสอบระบบรวม โดยตรวจสอบคุณสมบัติของแต่ละโมดูลให้ตรงตามข้อกำหนด เช่น ระบบขับเคลื่อนหรือระบบควบคุม การทดสอบย่อยช่วยระบุจุดบกพร่องได้ง่ายและรวดเร็ว เพิ่มความยืดหยุ่นในการพัฒนา และสนับสนุนการรับรองความน่าเชื่อถือของระบบก่อนประกอบรวม

3.6 การประกอบรวมระบบ (Assembly System)

เมื่อทดสอบระบบย่อยเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาประกอบรวมเป็นระบบใหญ่เพื่อทดสอบการทำงานร่วมกัน เช่น ระบบควบคุม ระบบขับเคลื่อน และระบบสื่อสาร การประกอบรวมต้องคำนึงถึงความแข็งแรง ความทนทาน และการระบายความร้อน เพื่อความปลอดภัยและความเสถียรของยุทโธปกรณ์ นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้ถอดเปลี่ยนง่ายเพื่อการซ่อมบำรุง และใช้เป็นฐานความรู้ในการถ่ายทอดเทคโนโลยีและฝึกอบรมการใช้งานต่อไป

3.7 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test)

เป็นการยืนยันความถูกต้องของการออกแบบก่อนออกสู่ภาคสนาม เพื่อยืนยันสมรรถนะและลดความเสี่ยง การทดสอบนี้ช่วยให้พบข้อบกพร่องตั้งแต่ต้น เข้าใจพฤติกรรมของระบบในสภาวะต่าง ๆ เช่น ความชื้น ความร้อน หรือการสั่นสะเทือน และช่วยเตรียมความพร้อมก่อนการทดสอบภาคสนามตามมาตรฐานทางทหาร เช่น MIL-STD หรือ NATO Standard

3.8 การทดสอบภาคสนาม (Field Work Test)

เป็นการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อประเมินความพร้อมใช้งาน ความทนทาน และความเหมาะสมเชิงยุทธวิธี การทดสอบนี้สะท้อนข้อมูลจริงที่ห้องปฏิบัติการจำลองไม่ได้ เช่น พฤติกรรมผู้ใช้หรือสภาพภูมิประเทศ ผลการทดสอบภาคสนามใช้ในการปรับปรุงระบบให้ตอบโจทย์ผู้ใช้งานจริง เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการยืนยันคุณภาพ (Validation) ว่าระบบพัฒนาขึ้นตรงตามความมองการจริงหรือไม่

3.9 การทดสอบร่วมกับผู้ใช้งาน (User Improve Performance and Functionality Test)

ขั้นตอนนี้เน้นการทดสอบโดยผู้ใช้งานจริง เพื่อปรับปรุงสมรรถนะและฟังก์ชันการทำงานให้เหมาะสมกับภารกิจ การทดสอบช่วยตรวจสอบส่วนเชื่อมต่อระหว่างคนกับเครื่อง (HMI) ให้ใช้งานง่ายและปลอดภัย นอกจากนี้ยังช่วยสร้างความเชื่อมั่นและการยอมรับจากผู้ใช้งาน ทำให้เกิดความรู้สึกเป็นเจ้าของระบบและนำไปสู่การใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.10 การส่งมอบเพื่อใช้งานจริง (Validation and Deliver to Actual Use)

เป็นการตรวจสอบครั้งสุดท้ายว่ายุทโธปกรณ์ตอบสนองต่อความต้องการผู้ใช้งานจริง ครอบคลุมด้านเทคนิค ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือ หลังจากผ่านการทดสอบครบทุกขั้นตอน การส่งมอบต้องมีเอกสาร คู่มือ การฝึกอบรม และระบบสนับสนุนหลังการใช้งาน เพื่อให้พร้อมประจำการจริงในกองทัพ รวมถึงเป็นขั้นตอนก่อนเข้าสู่การผลิตจำนวนมากและการรับรองมาตรฐานอย่างเป็นทางการ

3.11 การติดตามการใช้งาน (Monitoring Usage)

หลังส่งมอบแล้ว ต้องมีการติดตามประสิทธิภาพระยะยาวเพื่อเก็บข้อมูลการใช้งานจริง วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ (MTBF, Failure Rate) และรับฟังปัญหาจากผู้ใช้ เพื่อปรับปรุงรุ่นถัดไปข้อมูลจากการติดตามนี้ช่วยวางแผนการบำรุงรักษา สนับสนุนการตัดสินใจทางยุทธวิธี และเพิ่มความปลอดภัยของการปฏิบัติการทางทหาร

3.12 การรับรองมาตรฐานทางทหาร (Ministry of Defense Standards Certification)

เป็นการตรวจสอบว่ายุทโธปกรณ์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงกลาโหมกำหนด เพื่อให้มั่นใจว่าใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น MIL-STD-810 และ MIL-STD-15 การรับรองเป็นเงื่อนไขสำคัญก่อนเข้าประจำการ และสร้างความเชื่อมั่นให้กับหน่วยงานผู้ใช้ รวมถึงใช้เป็นมาตรฐานเทียบเคียงกับระบบต่างประเทศเพื่อรองรับการบูรณาการหรือส่งออกในอนาคต

3.13 กระบวนการนำไปสู่การผลิตทางอุตสาหกรรม (Production Phase)

เป็นการเปลี่ยนต้นแบบสู่การผลิตจริง โดยปรับแบบให้เหมาะกับการผลิตซ้ำ (DFM) จัดทำเอกสารการผลิตและตั้งสายการผลิตต้นแบบ การควบคุมคุณภาพ (QC/QA) ต้องได้มาตรฐานเดียวกันทุกชิ้นกระบวนการนี้ช่วยลดต้นทุนต่อหน่วย สร้างความเชื่อมั่นให้กองทัพในการจัดหา และเป็นพื้นฐานของการผลิตในระดับอุตสาหกรรม รวมถึงการส่งออกยุทโธปกรณ์ในอนาคต

4. ผลการวิจัย

โครงการหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด สทป. ได้นำหลักการบูรณาการแนวคิด **Systems Engineering, ISO 9001:2015 และการรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม** ช่วยให้การวิจัยและพัฒนาเป็นระบบ มีมาตรฐานสากล เพิ่มคุณภาพ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของผลงาน จนนำไปสู่การใช้งานจริงในกองทัพและการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน มีผลการดำเนินงานดังนี้

4.1 การรวบรวมโจทย์ความต้องการจากผู้ใช้งาน (User Requirement)

โครงการหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด สทป. เริ่มดำเนินโครงการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 โดยการจัดสัมมนาเชิงปฏิบัติการ ระหว่างผู้ใช้งานในเหล่าทัพ นักวิชาการจากภาคการศึกษาและมหาวิทยาลัย รวมทั้งภาคเอกชน เพื่อรับโจทย์ความต้องการจากผู้ใช้ ประเมินความพร้อมทางเทคโนโลยี และนำมาวางแผนบูรณาการความร่วมมือ ผลักดันให้ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง นอกจากนั้นโครงการ ฯ ยังได้ลงพื้นที่ไปพบกับหน่วยผู้ใช้งานใน 3 จังหวัดชายแดนใต้ เพื่อเก็บข้อมูลความต้องการใช้งานหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดจากผู้ใช้งาน โดยตรง อีกทั้งเข้าร่วมกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องด้านการเก็บกู้วัตถุระเบิดและการกู้ภัยอาทิเช่น งาน Raven Challenge เป็นต้น ทำให้ได้ข้อสรุปความต้องการหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดได้ดังนี้

รูปที่ 3 การเก็บรวบรวมโจทย์จากผู้ใช้งาน

ตารางที่ 1 แสดงความต้องการใช้งานตามภารกิจ

ลำดับ	รายละเอียด
1	มีขีดความสามารถใช้งานได้ตามสถานการณ์ เช่น สำรวจ ลาดตระเวน ยกเคลื่อนย้ายวัตถุ ทำลายวัตถุระเบิด เป็นต้น
2	สามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน
3	สามารถซ่อมบำรุงและแก้ไขได้เอง
4	มีแบตเตอรี่สำหรับการใช้งานได้ไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง และมีแบตเตอรี่สำรอง
5	มีน้ำหนักเบา
6	ควบคุมการทำงานแบบไร้สายระยะไกล
7	สามารถปีนทางลาด ผ่านอุปสรรค์สิ่งกีดขวางและบันไดได้
8	สามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมเช่น กล้องตรวจการณ์, เครื่อง X-Ray, เครื่องตรวจระเบิด และปืนยิงทำลายวงจรวัตถุระเบิด เป็นต้น

สรุปความต้องการใช้งานแบ่งตามขนาดของหุ่นยนต์ ไว้ 3 ขนาดดังนี้

1. หุ่นยนต์ขนาดพกพา (น้ำหนักไม่เกิน 10 กิโลกรัม) เป็นหุ่นยนต์ที่มีน้ำหนักเบา สามารถยกปฏิบัติงานได้เพียงคนเดียว ติดตั้งอุปกรณ์เสริมตามภารกิจ เช่น กล้อง มือหยับจับ และเซ็นเซอร์ต่างๆ ได้

รูปที่ 4 หุ่นยนต์ขนาดพกพา

2. หุ่นยนต์ขนาดเล็ก (น้ำหนักตั้งแต่ 10 แต่ไม่เกิน 100 กิโลกรัม)เป็นหุ่นยนต์ขนาดเล็ก สามารถยกไปปฏิบัติงานด้วยคนไม่เกิน 2 คน ติดตั้งอุปกรณ์เสริมตามภารกิจ เช่น กล้อง มือหยิบจับ เซ็นเซอร์ต่างๆ และปืนยิงทำลายวัตถุระเบิดได้ เคลื่อนที่ได้ในทุกสภาพพื้นที่

รูปที่ 5 หุ่นยนต์ขนาดเล็ก

3. หุ่นยนต์ขนาดกลาง (น้ำหนักตั้งแต่ 100 แต่ไม่เกิน 1,000 กิโลกรัม) เป็นหุ่นยนต์ขนาดใหญ่ ออกแบบมาเพื่อใช้งานเก็บกู้วัตถุระเบิด มีเครื่องมือตัดทำลายโลหะ ควบคุมการทำงานด้วยรีโมทระยะไกล ติดตั้งอุปกรณ์เสริมตามภารกิจ เช่น คีม มือหยิบจับ เซ็นเซอร์ต่างๆ และปืนยิงทำลายวัตถุระเบิดได้

รูปที่ 6 หุ่นยนต์ขนาดใหญ่

4.2 ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและพัฒนาระบบ (Design and Development Input)

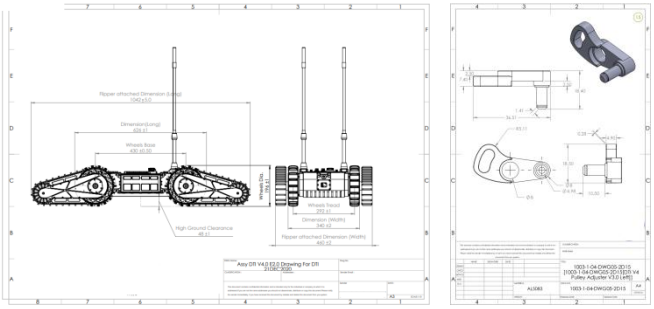
จากการรวบรวมความต้องการจากผู้ใช้งาน (User Requirement) สามารถนำมาสรุปเป็นคุณลักษณะของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับใช้ในการออกแบบระบบต่อไป ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงคุณลักษณะของหุ่นยนต์ที่จะเริ่มพัฒนามีรายละเอียดดังนี้

รายละเอียด	รุ่น (Version) D-EMPIR V.4
	คุณลักษณะที่กำหนด
ขนาด (ยาว×กว้าง×สูง)	626x340x196 มม. (ไม่ร่วม Flipper)
น้ำหนักหุ่นยนต์	ไม่เกิน 20 กิโลกรัม (ไม่รวม Payload)
น้ำหนักบรรทุกอุปกรณ์เสริม	20 กิโลกรัม
ระบบขับเคลื่อน	ชุดขับเคลื่อนผสมแบบล้อยางและสายพาน
แขนปีน (Flipper)	แขนปีนคู่ หน้าและหลัง
ความสามารถข้ามอุปสรรค์	ไต่ทางลาดชัน ปีนขึ้นลงบันได พื้นที่ต่างระดับและช่องว่าง
ระบบพลังงานไฟฟ้า	24 VDC เพียงพอต่อการใช้งาน
ระยะเวลาปฏิบัติการ	ไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง
ช่องสัญญาณ อุปกรณ์เสริม (Payload Ports)	Power 24 VDC จำนวน 1 พอร์ท, Ethernet จำนวน 2 พอร์ท หรือ Ethernet จำนวน 1 พอร์ท และพอร์ทที่จำเป็น
ระบบกล้อง	กล้องในตัวหุ่นยนต์ 2 กล้อง กล้องปลายแขนหุ่นยนต์ 1 กล้อง
ระบบจับยึดทางกล	Multipurpose rail for mounting accessories (Payload)
ระบบสื่อสาร	2.4 - 6GHz > 300 ม. (LOS) สัญญาณข้อมูลมีความต่อเนื่อง
ความทนต่อสภาวะแวดล้อม	IP54
การรับส่งข้อมูลควบคุม และการรับส่งข้อมูลภาพ	1. เวลาตอบสนองคำสั่งควบคุม (Command Latency) ≤ 250 ms 2. เวลาสัญญาณวีดีโอ (Video Latency) ≤ 350 ms 3. เวลาตอบสนองคำสั่งอุปกรณ์เสริม (Command Latency) ≤ 250 ms

4.3 การออกแบบรายละเอียด (Detail Design)

หลังจากที่ได้กำหนดคุณลักษณะของหุ่นยนต์ตามโจทย์จากผู้ใช้งาน เป็นขั้นตอนการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture) การออกแบบแบบเชิงแนวคิด (Conceptual Design) ควบคู่ไปกับการเลือกอุปกรณ์ต่างๆ ที่ชัดเจน จำเป็นต้องมีผลการคำนวณ และผลการจำลองทางวิศวกรรม (Engineering Analysis and Simulation) เพื่อเป็นการยืนยันว่าออกแบบได้มาตรฐานและมีความปลอดภัย แล้วจึงทำการออกแบบรายละเอียดชิ้นส่วน (Detail Design) เพื่อนำไปทำการผลิตและสร้างชิ้นส่วนต่อไป



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างแบบรายละเอียดหุ่นยนต์ D-Empir

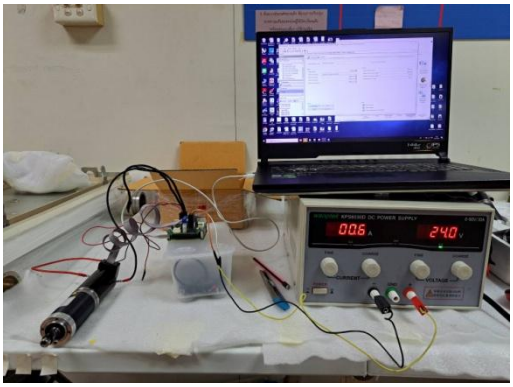
4.4 การจัดหาและสร้างชิ้นส่วน (Purchasing and Making Parts)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ได้มาซึ่งชิ้นส่วนและอุปกรณ์ตามการออกแบบระบบ เพื่อนำมาประกอบรวมและทดสอบการทำงานต่อไป

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนที่จัดหากับที่สั่งผลิต

4.5 การทดสอบระบบย่อย (Subsystem Test)

อุปกรณ์และชิ้นส่วนบางชิ้นจำเป็นต้องมีการทดสอบแยกส่วนก่อนนำไปประกอบรวมเป็นระบบใหญ่ เพื่อยืนยันคุณภาพของอุปกรณ์ตามที่ออกแบบระบบไว้



รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างการทดสอบระบบย่อย

4.6 การประกอบรวม (Assembly System)

หลังจากทำการทดสอบระบบย่อยแล้ว ก็จะถูกนำไปประกอบรวมเป็นระบบใหญ่ ในขั้นตอนนี้จะทำการติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์ พร้อมกับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงาน ให้หุ่นยนต์ทำงานได้ตามฟังก์ชั่นการใช้งานที่ออกแบบไว้

รูปที่ 10 แสดงการประกอบรวมระบบ

4.7 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test)

เมื่อประกอบรวมหุ่นยนต์สำเร็จ ก็จะนำไปทดสอบสมรรถนะการทำงานภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อยืนยันว่าสามารถทำงานได้ตามฟังก์ชั่นที่ออกแบบไว้ หากมีประเด็นที่ต้องแก้ไข จะได้ดำเนินการได้สะดวก รวดเร็ว

รูปที่ 11 แสดงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.8 การทดสอบภาคสนาม (Field Work Test)

ภายหลังจากประกอบ ทดสอบระบบ และปรับปรุงให้มีคุณภาพสูงเพียงพอที่จะนำไปใช้งาน ก็จะต้องนำหุ่นยนต์ไปทดสอบภาคสนาม โดยการจำลองพื้นที่การใช้งานให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง

รูปที่ 12 แสดงการทดสอบหุ่นยนต์ในภาคสนาม

4.9 การทดสอบร่วมกับผู้ใช้งาน (User-Centered Test หรือในบางบริบทเรียกว่า Improve Performance and Functionality Test)

การทดสอบร่วมกับผู้ใช้งาน จะต้องดำเนินการเมื่อหุ่นยนต์มีความพร้อม ผ่านการทดสอบภาคสนามมาแล้ว เพื่อประเมินความพึงพอใจของผลิตภัณฑ์จากลูกค้าโดยตรง หากมีประเด็นที่ต้องปรับปรุงแก้ไข จะได้ดำเนินการ ให้หุ่นยนต์มีพร้อมที่จะนำไปใช้งานจริงในภาคสนาม

รูปที่ 13 แสดงการทดสอบร่วมกับผู้ใช้งาน

4.10 การส่งมอบเพื่อใช้งานจริง (Validation and Deliver to Actual Use)

เมื่อได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาจนหุ่นยนต์มีสมรรถนะดีพอและมีความพร้อม ก็จะทำการส่งมอบให้เจ้าหน้าที่นำไปใช้งานจริงในภาคสนาม เพื่อประเมินความพร้อมก่อนจะนำไปสู่การใช้งานจริงและเข้าสู่สายการผลิตทางอุตสาหกรรมต่อไป

รูปที่ 14 แสดงการส่งมอบต้นแบบไปให้ใช้งาน

4.11 การติดตามการใช้งาน (Monitoring Usage)

ในระหว่างการส่งมอบให้ไปใช้งาน จำเป็นต้องมีการติดตามผลอยู่เป็นระยะ เพื่อรับข้อมูลกลับ (Feedback) จากผู้ใช้งาน ไว้สำหรับในการแก้ไขปรับปรุงให้หุ่นยนต์มีสมรรถนะดีที่สุดและตรงตามความต้องการของผู้ใช้งานอย่างแท้จริง

รูปที่ 15 แสดงการติดตามการใช้งาน

4.12 การรับรองมาตรฐานทางทหาร (Ministry of Defense Standards Certification)

เมื่อทำการวิจัยและพัฒนาต้นแบบจนมีประสิทธิภาพดีเพียงพอที่สามารถนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม จำเป็นต้องนำหุ่นยนต์ขอเข้ารับรองมาตรฐานทางทหาร เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประจำการในกองทัพได้อย่างมั่นใจ

รูปที่ 16 แสดงการตรวจรับรอง กมย.กห

4.13 กระบวนการนำไปสู่การผลิตทางอุตสาหกรรม (Production Line)

ปลายทางของกระบวนการวิจัยและพัฒนายุทโธปกรณ์ กลาโหม คือการนำผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการผลิตทางอุตสาหกรรม มีรายการและแบบชิ้นส่วนที่ชัดเจน มีมาตรฐานให้สามารถทำการผลิตได้จำนวนมากเพียงพอตามความต้องการ มีอะไหล่เปลี่ยนทดแทนในระหว่างการใช้งานและสามารถขยายผลไปสู่กลุ่มลูกค้าอื่นๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

5 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการวิจัยหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ได้บูรณาการแนวคิด **Systems Engineering, ISO 9001:2015 และการรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์กลาโหม มาเป็นขั้นตอนสำหรับกระบวนวิจัยยุทโธปกรณ์กลาโหม (13 ขั้นตอน)** ช่วยให้การวิจัยและพัฒนาเป็นระบบ มีมาตรฐานสากล เพิ่มคุณภาพ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของผลงาน จนนำไปสู่การใช้งานจริงในกองทัพและการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้อย่าง

ยั่งยืน สามารถยกระดับคุณภาพของต้นแบบให้สูงอยู่ในระดับ **TRL 7 ถึง 8** และสามารถต่อยอดสู่การผลิตเชิงอุตสาหกรรม ถือเป็นแนวทางการวิจัยและพัฒนาต้นแบบยุทโธปกรณ์กลาโหม ให้สามารถนำไปใช้ประจำการได้ในกองทัพ สร้างความมั่นคงให้กับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ช่วยกระตุ้นให้เกิดการหมุนเวียนทางเศรษฐกิจ สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศ และพึ่งพาตนเองได้อย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมวิจัยโครงการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด และทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เจ้าหน้าที่และผู้บริหาร สทป. ทุกท่าน รวมถึงเจ้าหน้าที่เก็บกู้วัตถุระเบิด (EOD) ในเหล่าทัพ (ทบ. ทร. ทอ. และ ตร.) กอ.รมน. ภาค 4 สน. และภาคเอกชนต่างๆ ที่มีส่วนผลักดันให้โครงการ ฯ สามารถดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ได้เป็นผลสำเร็จ ในระดับคุณภาพที่สูง สามารถนำไปใช้งานได้จริง และต่อยอดไปสู่ภาคอุตสาหกรรมได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kylie Brailsford “ V-Model Approach” [Online]. Available: https://www.synertec.com.au/engineering/services/systems-engineering/v-model-approach/ (Accessed: Sep. 15, 2025).

[2] Forsberg, K., and Mooz, H. (1992). “*The relationship of system engineering to the project cycle*” Proceedings of the National Council on Systems Engineering (NCOSE) Conference, page 57–65.

[3] Steven R.Hirshorn, *Nasa Systems Engineering Handbook*, Nasa Headquarters, Washington, DC, 2007, 297 pages.

[4] Hosame Abuamara, et.al, *Systems Engineering Jr. Handbook*, The International Council on Systems Engineering LA Chapter, 2015, 23 pages.

[5] *International Standard ISO/FDIS 9001:2015 (E),* Final Draft Edition, Switzerland, 2015, 38 pages.

[6] กองส่งเสริมและพัฒนาด้านการมาตรฐาน, *“การจัดการระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 : 2015”*, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม, 345 หน้า. [ออนไลน์]. Available: https://pr.tisi.go.th/wp-content/uploads/2021/09/ISO90012015.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 10 กันยายน 2568).

[7] United States Department of Defense. *MIL-STD-810H: Environmental engineering considerations and laboratory tests* Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2019, 1089 pages.

[8] Bostelman, R., & Messina, E. *“A-UGV Capabilities – Recommended Guide to Autonomy Levels”*, 3rd IEEE International Conference on Robotic Computing, 2019.

[9] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. *หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด รุ่น D-EMPIR v.4*. DTI. [ออนไลน์]. Available: https://www.dti.or.th/download/file/13227731.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 10 กันยายน 2568).

Fluid-structure interaction analysis and fatigue life prediction of additively manufactured nickel-based superalloy centrifugal compressor impeller

Nititorn Supharatchartphan and Vitoon Uthaisangsuk*

Center for Lightweight Materials, Design and Manufacturing, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: vitoon.uth@kmutt.ac.th

Abstract

A fluid–structure interaction (FSI) approach was developed in this study to evaluate fatigue life of a centrifugal compressor impeller fabricated from an additively manufactured nickel-based superalloy Inconel 718 and Ti-6Al-4V. First, pressure fields of impeller blades under a pre-defined service load obtained from computational fluid dynamics (CFD) simulations were calculated and applied as boundary conditions in another finite element (FE) model, incorporating temperature-dependent material properties. As a result, local stress and strain distributions on the impeller response were determined. For IN718 the highest stress concentration occurred near the root of trailing edge under all rotating conditions. In contrast, for Ti-6Al-4V, stress concentration shifted towards the root of the inducer leading edge as the rotational speed increased to 120% of design speed. This shift was primarily driven by the increase in aerodynamic loading, which corresponded to likely fatigue crack initiation site, whereas the largest deformation was observed along the inducer tip for speeds between design speed and 110% of the design speed. However, at 120% speed, the deformation shifted towards the trailing edge tip for both materials. Subsequently, fatigue analysis was performed to predict service life of the impeller blades using the Gerber criterion, in which influences of surface defects inherent to laser powder bed fusion (LPFB) additive manufacturing process were also considered. Hereby, as-built surface and ground surfaces, representing condition with reduced unmelt particles on the surface, were analyzed. The results demonstrated that fatigue life of the compressor impeller improved by 6.77% at design speed when the surface roughness (R_a) was reduced by 6%, while maintaining the same R_v value, highlighting the significant benefit of post-processing treatments to reduce unmelt particles.

Keywords: Nickel-based superalloy, Fluid–structure interaction (FSI), Fatigue life prediction, Additive manufacturing

1 Introduction

Centrifugal compressors are essential turbomachinery components widely utilized in high-performance sectors such as aerospace propulsion, combustion engines, and power generation. These dynamic machines convert mechanical energy into fluid pressure and kinetic energy through a high-speed rotating impeller.[1] A typical centrifugal compressor consists of an inducer, impeller, diffuser, and volute. Among these components, the impeller is the most critical rotating element, continuously subjected to intense aerodynamic pressure loads and centrifugal forces during operation. Ensuring its long-term structural integrity is therefore vital for maintaining overall system reliability and safety. The fatigue life of the impeller must be accurately predicted and evaluated under representative operating conditions to prevent catastrophic failures.

In recent years, additive manufacturing (AM), particularly the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) process, has emerged as a promising method for fabricating complex impeller geometries. LPBF enables high design flexibility and weight reduction compared with conventional machines or casting. However, the process inherently generates a characteristic surface roughness that can strongly influence the fatigue behavior of the impeller.[2] Understanding how this as-built surface condition affects the stress distribution and service life of the component is therefore essential for reliable design.

Traditionally, the design and performance evaluation of turbomachinery relied heavily on experimental testing, which is both costly and time-consuming. The advancement of Computational Fluid Dynamics (CFD) has significantly reduced these limitations, enabling detailed analysis of the complex aerodynamic and thermomechanical behavior within compressors. CFD has become an indispensable tool for understanding the flow field and pressure distributions acting on rotating components. However, accurate fatigue life prediction requires more than separate aerodynamic and structural analyses. The interaction between the aerodynamic pressure field and the resulting structural deformation, known as Fluid-Structure Interaction (FSI) [3-6], plays a key role in stress accumulation and fatigue damage. Incorporating FSI analysis provides a more realistic evaluation of the impeller's response under different loading conditions and helps identify critical operating points where aerodynamic and thermal effects have the greatest impact on fatigue life.

In this study, the GTCP36-300 load compressor impeller was analyzed to investigate the effects of rotating speed on its structural behavior and fatigue life. Steady-state CFD simulations were performed at various rotational speeds to obtain the corresponding pressure and temperature fields. These fields were subsequently imported into ABAQUS for the finite element (FE) analysis. Within the structural domain, the temperature field was applied to simulate heat transfer and evaluate the resulting temperature distribution across the impeller. The temperature-dependent material properties of IN718 and Ti-6Al-4V were then incorporated to account for the thermal degradation of mechanical strength, enabling an accurate prediction of stress, deformation, and fatigue life under realistic service conditions.

2 Fluid structure interaction (FSI) analysis

Fluid–Structure Interaction (FSI) analysis is a fundamental methodology in turbomachinery engineering and plays a crucial role in the design, performance assessment, and service life prediction of critical rotating components. In a centrifugal compressor impeller, the structure is simultaneously subjected to centrifugal forces arising from high rotational speeds, aerodynamic loading induced by the working fluid, and thermal stresses due to temperature gradients. These coupled loading conditions generate complex stress distributions and deformation patterns, which are key factors governing the initiation and progression of fatigue failure.

The primary objective of the present analysis is to accurately quantify the coupled interaction between the aerodynamic pressure field and the resulting structural response. Using a Fluid–Structure Interaction (FSI) framework, the aerodynamic and mechanical domains are solved in a coupled manner to represent the impeller's operating conditions with high fidelity. The workflow covers multiple rotational speeds ($\mathbf{N}$) ranging from design speed (100%) to 150% of the design operating speed, encompassing the design point as well as off-design cases (under-speed and over-speed), so that the combined effects of changing aerodynamic loading and centrifugal force on stress and deformation are captured consistently. This enables a reliable assessment of structural integrity across the operating envelope. The overall FSI procedure is illustrated in Fig. 1.

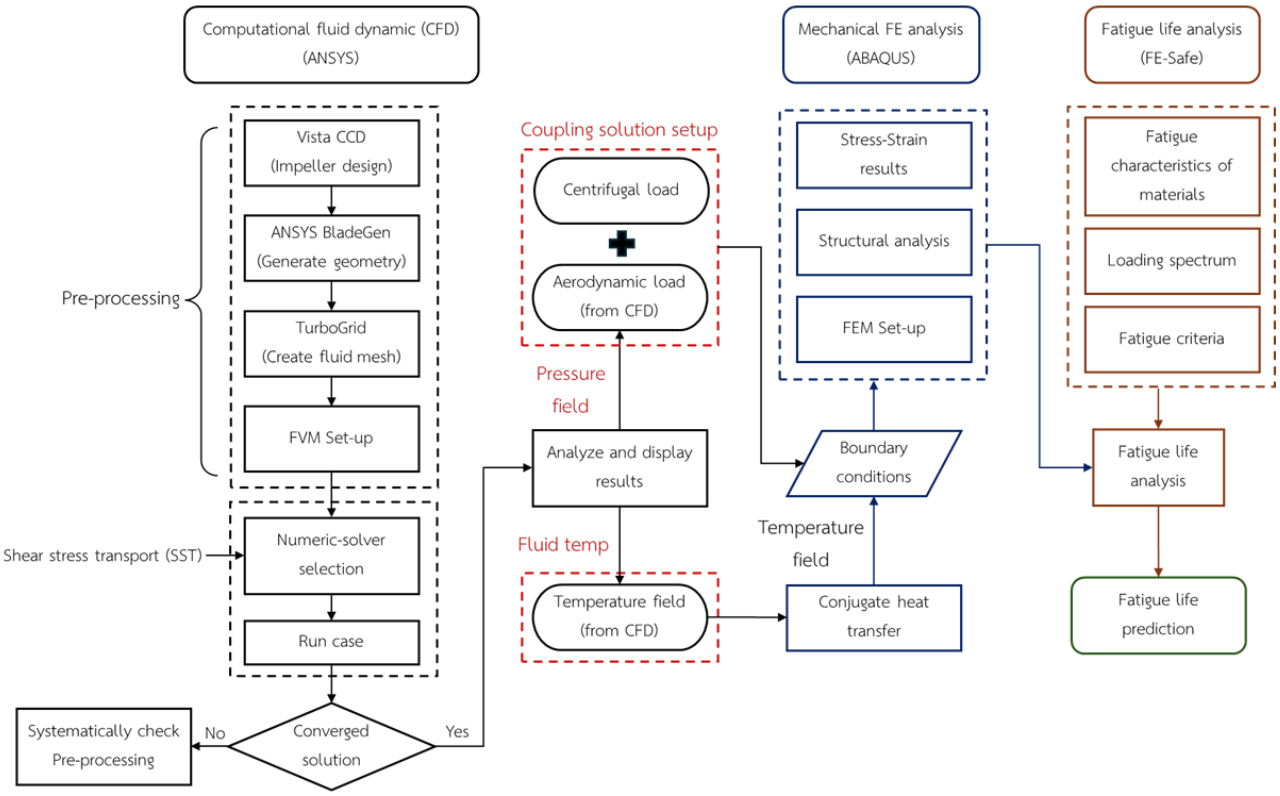


Fig. 1 Numerical schematic of FSI analysis of centrifugal compressor impeller.

2.1 Computational fluid dynamics (CFD)

The impeller geometry analyzed in this study is based on the GTCP36-300 load compressor impeller [7], the design parameters and operating condition are given in Table 1. The impeller model was parameterized and generated using ANSYS Vista CCD, and the three-dimensional solid model was created in ANSYS BladeGen. A high-quality structured mesh was then produced using ANSYS TurboGrid, ensuring smooth grid transitions and sufficient resolution within the boundary-layer regions. The overall computational domain and mesh configuration are shown in Fig. 2(a). To improve the accuracy of the flow prediction, mesh refinement was applied in the near-wall regions, maintaining a dimensionless wall distance of y^+<1, as illustrated in Fig. 2(b)

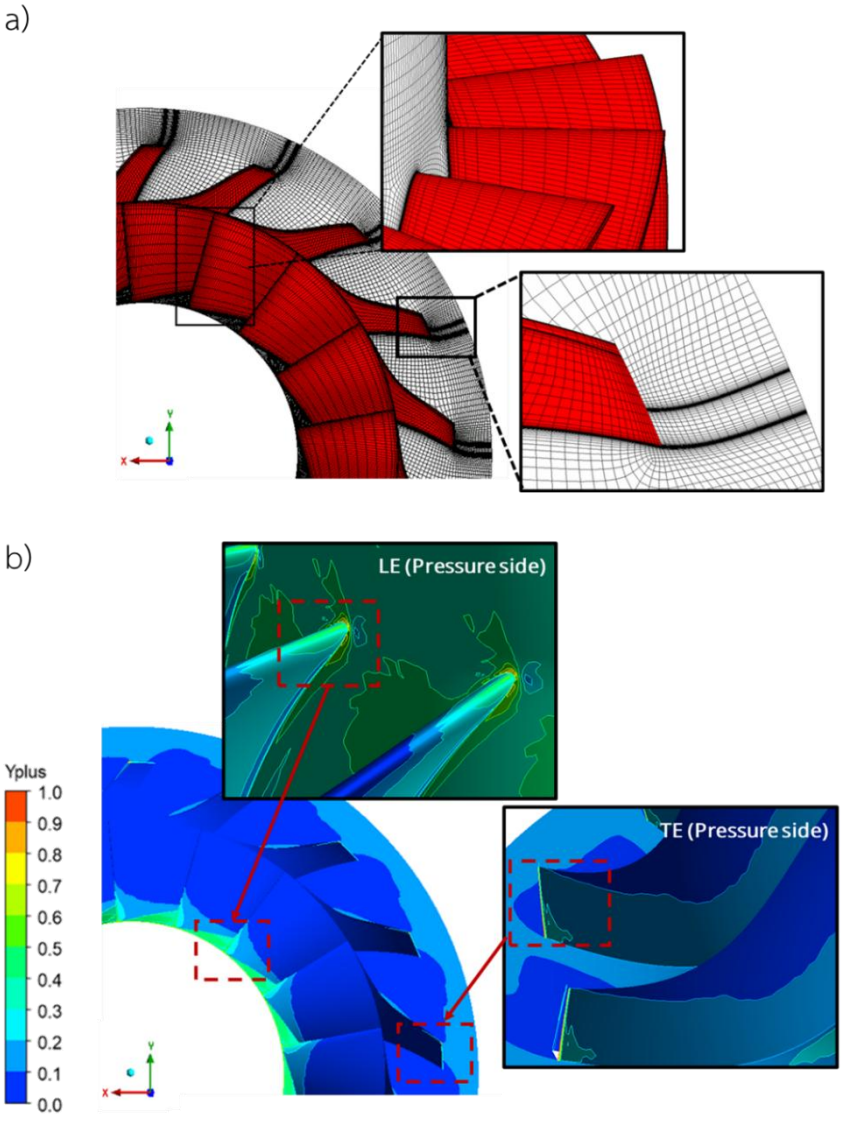


Fig. 2 a) Meshing configuration of fluid domain b) y^+ distribution at leading edge and tailing edge of blade

The aerodynamic field was simulated using ANSYS CFX, which numerically solves the Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equations based on the Finite Volume Method (FVM). The

simulation setup was defined in CFX-Pre, and the steady-state solution was obtained using CFX-Solver. The Shear Stress Transport (SST) $\mathbf{k-\omega}$ turbulence model was used to accurately capture the flow characteristics, particularly near the walls and in regions with adverse pressure gradients.[8] The working fluid was compressible air, with an inlet total pressure of 0.986 bar and an inlet total temperature of 38 °C. Since the operating conditions were within the thermodynamic range where the ideal gas law is valid, air was modeled as an ideal gas. At the outlet, the design pressure was imposed to represent steady-state operation. No-slip boundary conditions were applied to all solid walls of the impeller domain, while the overall fluid boundary conditions are illustrated in Fig. 3. The summarized design and operating parameters are presented in Table 1.

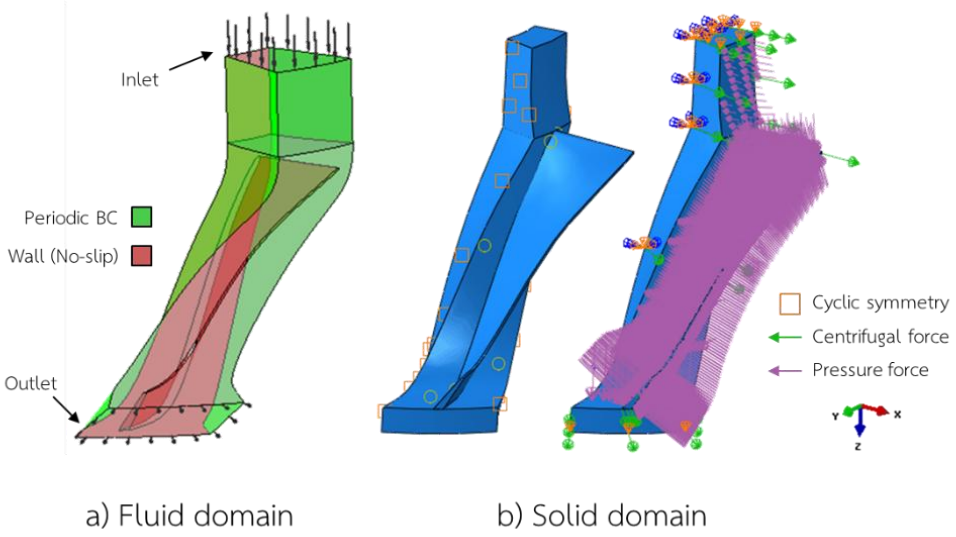


Fig. 3 Boundary conditions for Fluid-Structure interaction, a) fluid domain and b) solid domain.

Table 1 Design parameters and operating conditions (100%)

Parameters	Values
Impeller inlet (eye) hub diameter, D_{1h} (mm)	80
Impeller inlet (eye) Shroud diameter, D_{1s} (mm)	180
Rotational speed (rpm)	62214
Blade count	17
Inlet total pressure, $P_{t,\,in}$ (bar)	0.986
Inlet total temperature, $T_{t,\,in}$ (C)	38
Outlet average static pressure, $P_{s,\,out}$ (bar)	3.5

2.2 Static structure analysis

A three-dimensional solid model of a single impeller blade and its corresponding hub segment was imported into ABAQUS for the finite element (FE) analysis. The applied loads consisted of the combined effects of centrifugal force due to rotation and the aerodynamic pressure field obtained from the CFD simulation. The pressure distribution near the blade and hub surfaces was mapped

and applied as a surface pressure load. To efficiently represent the entire impeller, cyclic symmetry boundary conditions were imposed on the periodic faces, allowing the single-blade model to accurately replicate the behavior of the full impeller assembly as shown in Fig. 3(b).

The temperature field obtained from the steady-state CFD analysis was transferred to ABAQUS to solve the temperature distribution within the impeller, accounting for thermal conduction as shown in Fig. 4(a), from the fluid-exposed surfaces into the hub and blade interior. The resulting temperature field was then applied in the structural analysis step. Thermo-mechanical coupling was included by activating temperature-dependent material properties for both IN718 and Ti-6Al-4V, including material density was specified as 8.19 g/cm³ for IN718 and 4.43 g/cm³ for Ti-6Al-4V, which affects centrifugal forces. In particular, the elastic modulus and yield strength were defined as functions of temperature, as shown in Fig. 4(b), to capture the degradation of mechanical properties with increasing temperature.

The impeller structure, subjected to the FSI analysis, was then evaluated for stress and strain due to the combined effects of aerodynamic loading, temperature variation, and centrifugal forces at various rotational speeds. The analysis was conducted for a range of operating conditions, to capture the full spectrum of stress and deformation behavior across different RPM levels. The aerodynamic pressure field, thermal loads, and centrifugal forces were applied for each RPM case, allowing for a comprehensive evaluation of the impeller's structural response under varying operational conditions.

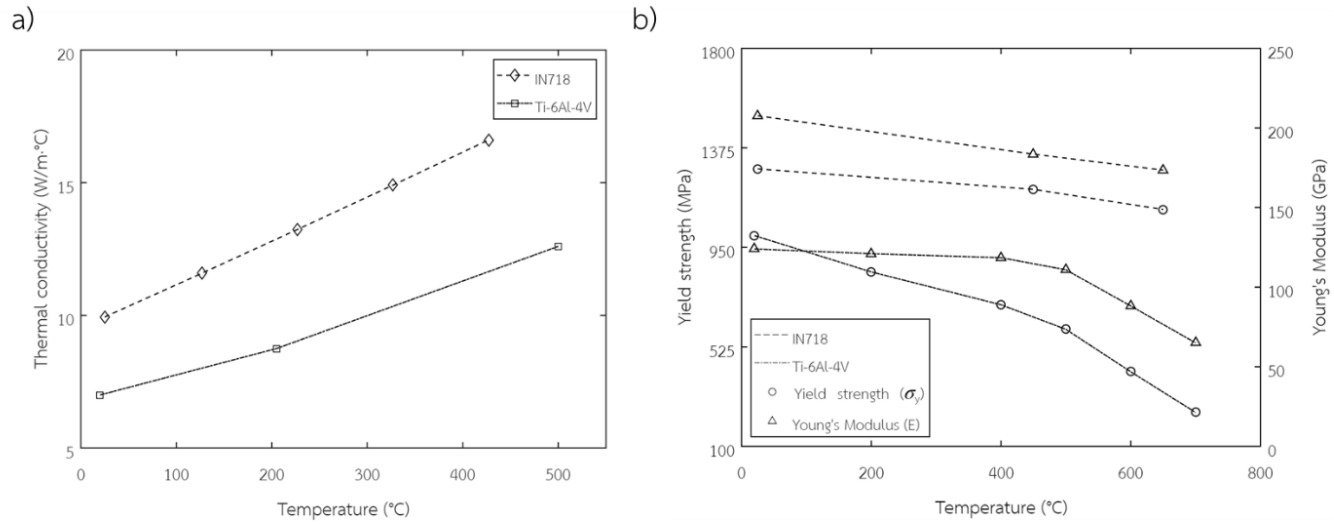


Fig. 4 a) Thermal conductivity. [9] b) Temperature-dependent material properties of IN718 and Ti-6Al-4V. [10, 11]

2.3 Fatigue life analysis

Rotating bending fatigue tests were conducted to obtain the S–N curve of the IN718 specimens the specimen dimension and printing conditions as shown in Fig. 5. Two types of surface conditions

were prepared for comparison. The first was the as-built specimen, representing the LPBF surface with unmelted particles, R_a = 8.96±1.86 μm and R_v = 22.86±4.8 μm. The second was the ground specimen, prepared by surface grinding using sandpaper with grit size #600, representing the condition with reduced unmelted particles, R_a = 5.51±2.05 μm and R_v = 21.88±10.24 μm.

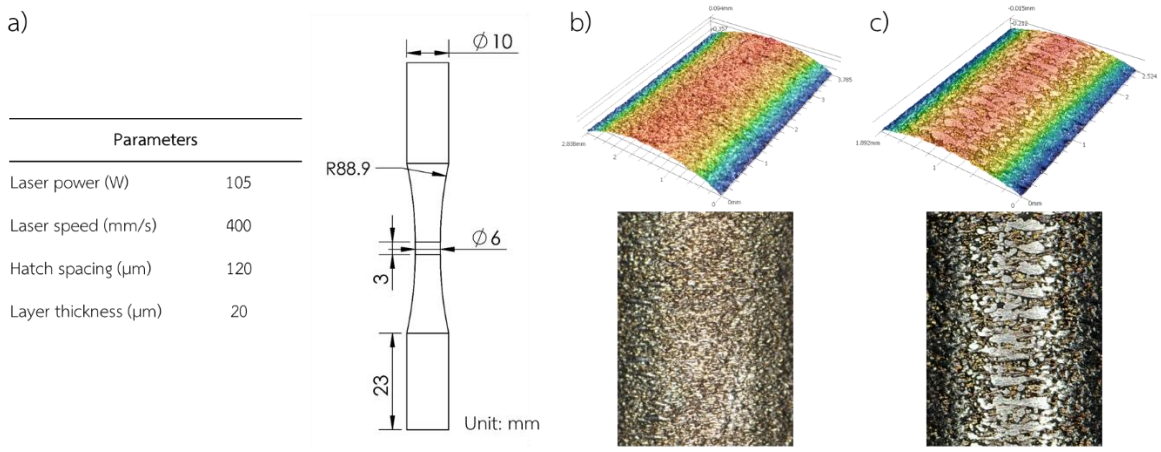


Fig. 5 a) Rotating bending fatigue specimen dimension and printing conditions, b) surface roughness of as-bult LPBF IN718 and c) surface roughness of as-bult LPBF IN718 with reduced unmelted particles.

Fatigue life prediction remains a critical challenge in the design and evaluation of centrifugal compressor impellers. To address this, the stress data obtained from the ABAQUS structural analysis were transferred to FE-safe, a specialized fatigue life prediction software. The Gerber criteria were employed to assess the fatigue damage based on the calculated stress history, which accounts for both mean stress and alternating stress components. This method enables the identification of critical fatigue hotspots and provides a reliable estimate of the impeller's service life under varying operational conditions. By combining stress data with the Gerber criterion (Eq. 1), the fatigue life of the impeller was evaluated across a range of rotational speeds (RPM), temperature gradients, and loading conditions.

$$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right) + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Where σ_a, σ_m, S_e and S_{ut} are alternating stress, mean stress, endurance limit and ultimate tensile strength respectively.

3 Results and Discussion

3.1 Aerodynamic performance

The pressure and temperature distributions at the operating conditions are shown in Fig. 6(a, b). The highest pressure and temperature were observed near the outlet region, which corresponds to the diffuser in the full compressor system. However, the present simulation only focuses on the impeller, and the data are cut off at the outlet region, which contains no moving parts. As the rotational speed increased, both the temperature and pressure ratio were affected, as illustrated in Fig. 6(c). This behavior arises from the intensified fluid compression and aerodynamic loading at higher speeds, resulting in elevated thermal and pressure gradients within the impeller passages.

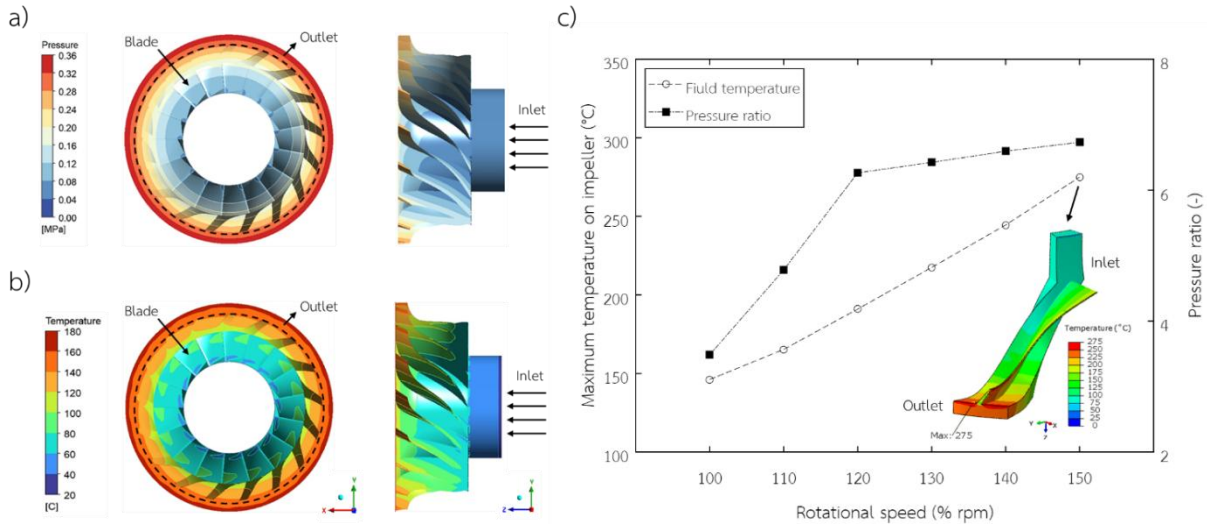


Fig. 6 a) pressure, b) temperature field distribution of impeller at operating condition and c) pressure ratio and maximum temperature at various rotating speed.

The critical pressure distribution was observed on the hub-side of the pressure surface, particularly near the trailing-edge region of the blade. As the rotational speed increased, the pressure became more concentrated in this area, indicating intensified aerodynamic loading and stronger flow impingement at the root region as illustrated in Fig. 7 and Fig. 9. The concentration of pressure at the hub pressure-side near the trailing edge is primarily attributed to the combined effects of flow deceleration, blade loading distribution, and secondary flow formation. At higher rotational speeds, the relative velocity between the impeller and the working fluid increases, leading to stronger centrifugal and Coriolis forces that drive the flow toward the shroud while inducing recirculation and separation near the hub. The deceleration of the boundary-layer flow on the pressure surface toward the trailing edge causes a local rise in static pressure, which becomes more pronounced with increasing rotational speed. Additionally, tip-leakage and passage vortices intensify at high speed, altering the local incidence angle and causing a redistribution of aerodynamic loading toward the hub region. These effects result in a more concentrated pressure field and sharper gradients near

the trailing-edge root, consistent with the typical flow behavior observed in high-speed centrifugal impellers[12]. This concentrated pressure field is transferred to the structural domain as the external load in the fluid–structure interaction analysis.

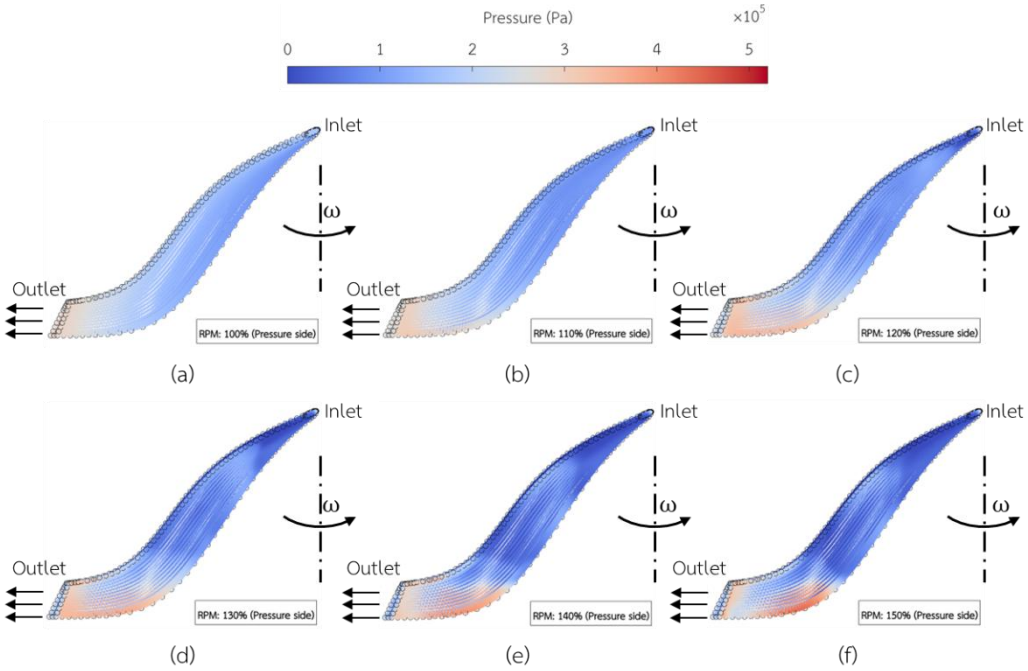


Fig. 7 Pressure distribution on blade surface (pressure side) at various rotational speed.

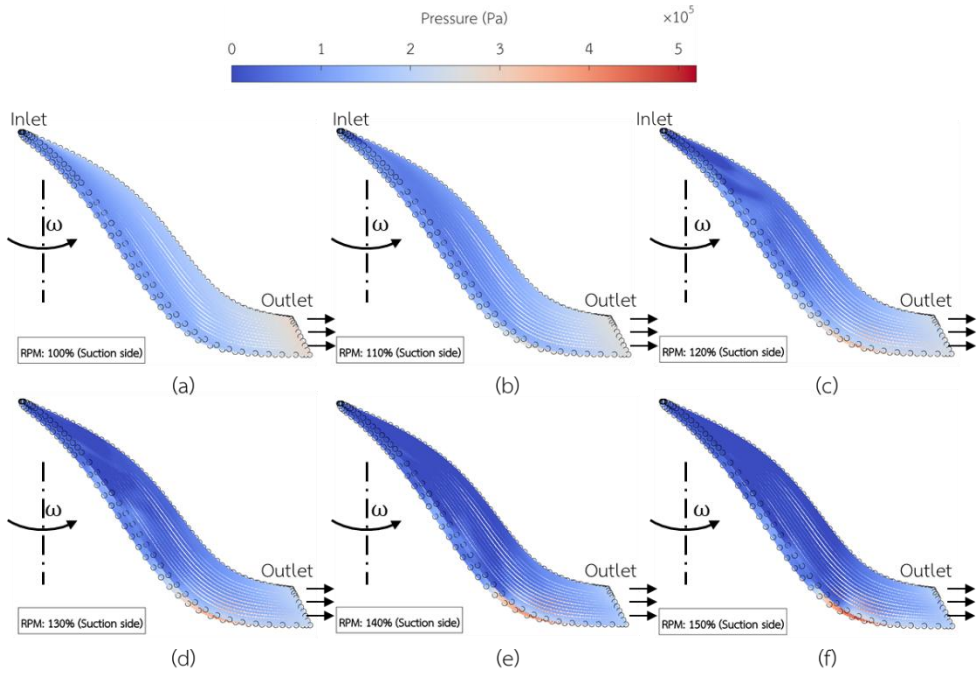


Fig. 8 Pressure distribution on blade surface (suction side) at various rotational speed.

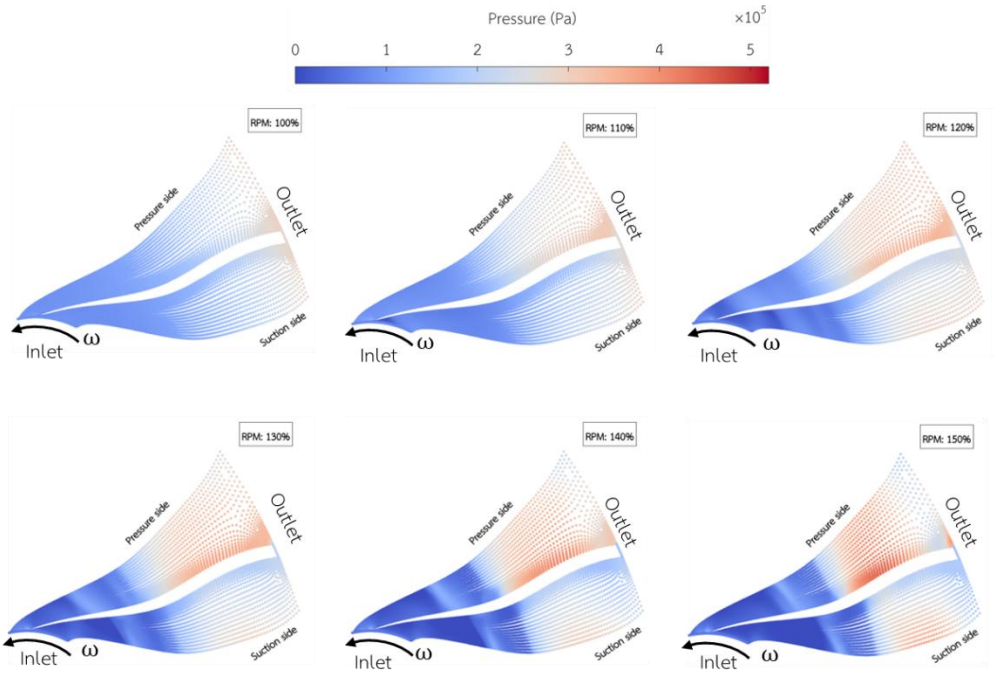


Fig. 9 Pressure distribution on hub surface at various rotational speed.

3.2 Equivalent stress distribution and fatigue life estimation

The equivalent (von Mises) stress distribution of the impeller under different rotational speeds was obtained from the fluid–structure interaction (FSI) analysis. The stress field reveals that the maximum equivalent stress occurs at the hub region near the trailing edge, which coincides with the area of highest-pressure loading identified in the fluid domain. Comparing materials, IN718 exhibits a higher peak stress than Ti-6Al-4V under identical operating points as shown in Fig. 10(b). This is chiefly because the centrifugal body force scales with density, the higher density of IN718 increases the inertial loading transmitted to the structure, raising stress even though IN718 possesses higher strength and stiffness. As the rotational speed increases, the magnitude of the von Mises stress rises almost proportionally, suggesting that the structural response is dominated by centrifugal and pressure-induced loading.

For Inconel 718, the highest stress concentration consistently occurred near the root of the trailing edge under all rotational conditions. In contrast, for Ti-6Al-4V, the stress concentration progressively shifted toward the root of the inducer leading edge as the rotational speed increased to 120 % of the design speed. This shift was primarily driven by the rise in aerodynamic loading, which corresponded to the most probable fatigue crack initiation site. The deformation distribution exhibited a similar dependency on rotational speed, for speeds between design speed and 110 % of the design speed, the largest deformation appeared along the inducer tip, while at 120 % speed, the deformation shifted toward the trailing-edge tip for both materials as shown in Fig. 10(a).

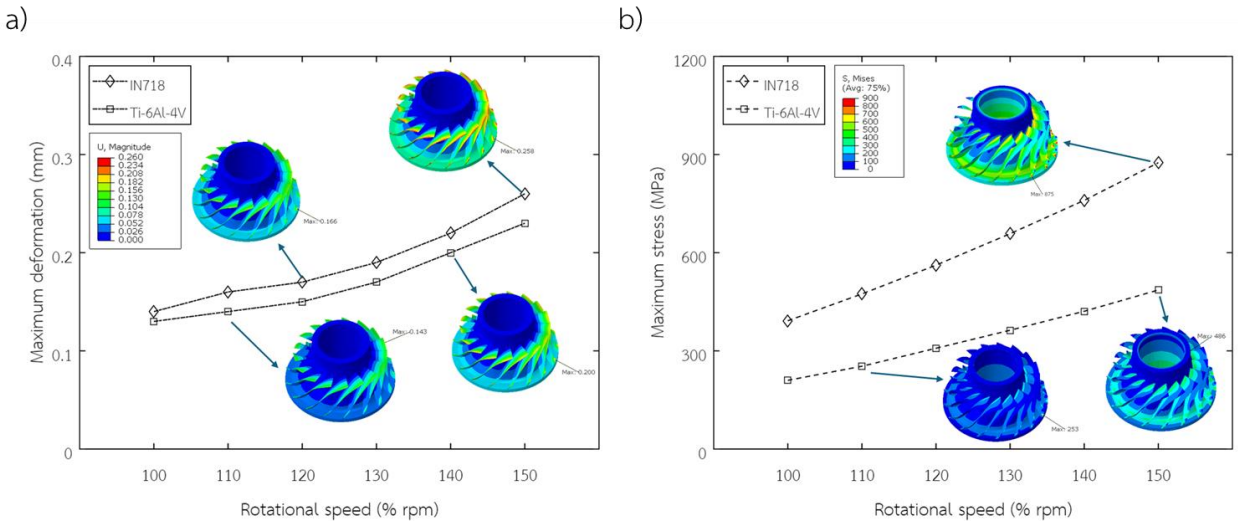


Fig. 10 a) maximum deformation and b) maximum equivalent (von Mises) stress of IN718 and Ti-6Al-4V impellers with rotational speed.

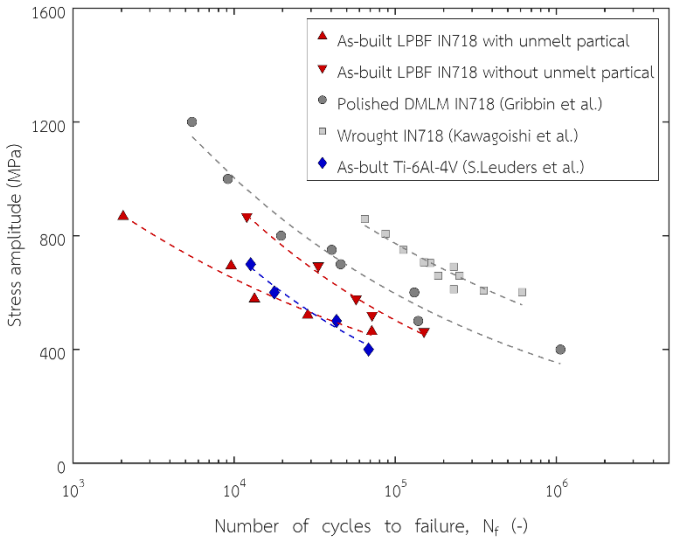


Fig. 11 S–N curves of LPBF IN718 specimens with and without unmelted particles compared with reference data from the literature.[13-15]

The fatigue results are presented as S-N diagrams for IN718 LPBF as-built with unmelted particles, LPBF as-built with reduced unmelted particles, polished DMLM, wrought and as-built Ti-6Al-4V conditions in Fig. 11. Removing unmelted unmelted particles shifts the LPBF curve upward, indicating a significant improvement in fatigue life relative to the as-built condition. Quantitatively, the Basquin fits (Eq. 2), show a 3.33× life increase at S_a = 600 MPa and a +18.4% fatigue-strength gain at N= 10^5 cycles for the ground surface. The fitting parameters are listed in Compared with polished DMLM IN718 (Gribbin et al.), the ground LPBF specimens still show slightly lower fatigue strength, indicating that complete removal of surface and near-surface defects is required to reach conventionally processed performance. Wrought IN718 (Kawagoishi et al.) retains the highest fatigue

life, as expected for material without porosity or melt-pool heterogeneity. Even so, the improvement in the ground LPBF condition shows that surface finishing can significantly reduce the fatigue gap between additive and wrought IN718 by delaying crack initiation through reduced defect severity and roughness.

Table 2.

$$N = A\sigma^{B} \quad (2)$$

Compared with polished DMLM IN718 (Gribbin et al.), the ground LPBF specimens still show slightly lower fatigue strength, indicating that complete removal of surface and near-surface defects is required to reach conventionally processed performance. Wrought IN718 (Kawagoishi et al.) retains the highest fatigue life, as expected for material without porosity or melt-pool heterogeneity. Even so, the improvement in the ground LPBF condition shows that surface finishing can significantly reduce the fatigue gap between additive and wrought IN718 by delaying crack initiation through reduced defect severity and roughness.

Table 2 Basquin regression parameters

Surface condition	$log_{10}(A)$	*B*
As-built with unmelted particle	3.546	-0.183
As-built with reduced unmelted particle	3.999	-0.259

The experimental S–N data obtained from the rotating-bending tests were subsequently used to predict the fatigue life of the impeller. The Basquin parameters derived for the LPBF IN718 were implemented as the material fatigue properties in the structural simulation. The complete steady-state FSI stress field on the impeller was mapped to the fatigue model, and the local stress amplitudes were used to estimate the number of cycles to failure using the stress–life (S–N) approach. The limited data on fatigue properties is a key factor affecting the accuracy of the simulation results. In this study, the fatigue properties of IN718 and Ti-6Al-4V were calculated without accounting for temperature effects. As a result, under actual conditions exceeding 150°C, fatigue may occur more rapidly than predicted.

From this field-based evaluation, the hub pressure-side trailing edge emerged as the critical region with the shortest predicted life. The resulting fatigue life distribution of the impeller reflects the combined effects of centrifugal and aerodynamic loading, enabling direct comparison between the as-built with unmelted particles and as-built with reduced unmelted particles conditions in terms of durability. The results indicate that reducing unmelted surface particles increases the impeller's fatigue life at all rotational speeds (see Fig. 12), fatigue life was increased 6.77% at design speed and

89.7% at 150% RPM. In contrast, the as-built Ti-6Al-4V impeller exhibits the highest fatigue life under equivalent operating conditions, primarily because it develops lower stress levels at the same rotational speeds. Consequently, the as-built Ti-6Al-4V impeller attains the greatest fatigue life at a given RPM, owing to its lower density and the correspondingly reduced centrifugal and pressure-induced stresses.

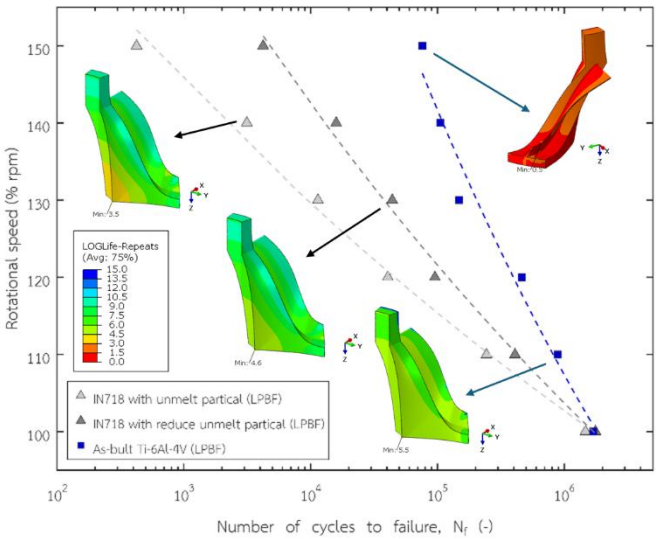


Fig. 12 Predicted fatigue life of impellers at different rotational speeds for LPBF IN718 with and without unmelted surface particles, and as-built LPBF Ti-6Al-4V.

4 Conclusions

This work developed and applied an FSI-based workflow to predict the structural response and fatigue life of a centrifugal compressor impeller fabricated by LPBF. The main findings are:

1. The aerodynamic field concentrates on the hub-side pressure surface near the trailing edge and is transmitted to the structure as the dominant load. The resulting maximum von Mises stress consistently localizes at the hub–trailing-edge root across operating speeds.
2. Under identical speeds, IN718 experiences higher peak stress than Ti-6Al-4V because centrifugal body force scales with density; despite its higher strength/stiffness, the denser IN718 carries larger inertial loading. For Ti-6Al-4V, the stress hot spot shifts toward the inducer leading-edge root by 120% speed, while deformation transitions from the inducer tip (≤110%) to the trailing-edge tip (120%) for both alloys.
3. Equivalent stress grows approximately proportionally with RPM, indicating combined dominance of centrifugal and pressure-induced loading on the impeller's elastic response.
4. Rotating-bending tests of LPBF IN718 show that removing unmelted particles shifts the S–N curve upward. Basquin fits give a 3.33× life gain at S_a =600 MPa and a +18.4% fatigue-strength gain at N = 10^5 compared with the as-built surface.
5. Using the measured S–N data with FSI hot-spot stresses, the IN718 impeller's predicted life increases at all RPMs when surface particles are reduced +6.77% at design speed and +89.7%

at 150% RPM. Among the studied cases, as-built Ti-6Al-4V attains the longest life under equal RPMs because its lower density yields lower stress levels.

5 Acknowledgments

The authors acknowledge the support provided by the King Mongkut's University of Technology Thonburi through and the Department of Mechanical Engineering.

6 References

[1] J. Wilkes *et al.*, "Centrifugal Compressors," in *Compression Machinery for Oil and Gas*, Elsevier, 2019, pp. 31–133. doi: 10.1016/B978-0-12-814683-5.00003-1.

[2] M. Radgolchin and M. Anbarsooz, "Fatigue failure of centrifugal compressor impellers: A comprehensive review," *Engineering Failure Analysis*, vol. 153, p. 107592, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107592.

[3] T. R. Jebieshia, S. K. Raman, and H. D. Kim, "Aerodynamic and Structural Characteristics of a Centrifugal Compressor Impeller".

[4] A. Danilishin, A. Petrov, Y. Kozhukhov, S. Kartashov, V. Ivanov, and A. Zuev, "Fluid - structure interaction analyze for the centrifugal compressor 3d impellers," *Materials Science and Engineering*, 2020.

[5] W. M. Faizal, N. M. Mazlan, C. Y. Khor, M. H. M. Hazwan, M. N. Misbah, and A. H. M. Haidiezul, "Fluid-structure interaction in turbine blade under different sustainable aviation fuel: a featured study of mechanical behavior," *Fuel*, vol. 406, p. 137027, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.fuel.2025.137027.

[6] D.-T. Vo, T.-D. Mai, B. Kim, J.-S. Jung, and J. Ryu, "Numerical investigation of crack initiation in high-pressure gas turbine blade subjected to thermal-fluid-mechanical low-cycle fatigue," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 202, p. 123748, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123748.

[7] L. M. Stohlgren and L. D. Werner, "The GTCP36-300, a Gas Turbine Auxiliary Power Unit for Advanced Technology Transport Aircraft," in *Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery*, Dusseldorf, West Germany: American Society of Mechanical Engineers, June 1986, p. V002T04A011. doi: 10.1115/86-GT-285.

[8] L. Gibson, L. Galloway, S. I. Kim, and S. Spence, "Assessment of turbulence model predictions for a centrifugal compressor simulation," *J. Glob. Power Propuls. Soc.*, vol. 1, p. 2II890, July 2017, doi: 10.22261/2II890.

[9] X. Lu *et al.*, "Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by Directed Energy Deposition: Modelling and experimental calibration," *Additive Manufacturing*, vol. 26, pp. 166–179, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.02.001.

[10] S. Ivanov, M. Gushchina, A. Artinov, M. Khomutov, and E. Zemlyakov, “Effect of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties of a Direct Laser Deposited Ti-6Al-4V,” *Materials*, vol. 14, no. 21, p. 6432, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14216432.

[11] W. B. Li, J. C. Pang, H. Zhang, S. X. Li, and Z. F. Zhang, “The high-cycle fatigue properties of selective laser melted Inconel 718 at room and elevated temperatures,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 836, p. 142716, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.142716.

[12] Japikse, David and Nicholas C. Baines. “Introduction to Turbomachinery.” (1994).

[13] S. Leuders, T. Lieneke, S. Lammers, T. Tröster, and T. Niendorf, “On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting – The role of ductility,” *J. Mater. Res.*, vol. 29, no. 17, pp. 1911–1919, Sept. 2014, doi: 10.1557/jmr.2014.157.

[14] Kawagoishi, Chen, and Nisitani, “Fatigue strength of Inconel 718 at elevated temperatures,” *Fatigue Fract Eng Mat Struct*, vol. 23, no. 3, pp. 209–216, Mar. 2000, doi: 10.1046/j.1460-2695.2000.00263.x.

[15] S. Gribbin, S. Ghorbanpour, N. C. Ferreri, J. Bicknell, I. Tsukrov, and M. Knezevic, “Role of grain structure, grain boundaries, crystallographic texture, precipitates, and porosity on fatigue behavior of Inconel 718 at room and elevated temperatures,” *Materials Characterization*, vol. 149, pp. 184–197, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.01.028.

การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการประมาณตำแหน่ง และทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ออปติคอลโฟล์ว
Deep Visual Odometry Using Optical Flow

กิตติศักดิ์ ศานติประพันธ์[1*], พีรวิชญ์ พุกเปี่ยมบารมี[2] , สุภัทรดิศ สารสิทธิ์[3] และ น.อ.รศ.ดร.เมษัณฑ์ ธรรมวิชัย[4]

[1, 2, 3, 4]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Kittisak Santiprapan[1*], Peeravish Phukpiembaramee [2] , Supattaradit Sarasit[3] and Gp.Capt. Assoc. Prof. Dr.Mason Thammawichai[4]

[1, 2, 3, 4] Electrical Engineering, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

kittisak_san@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และถูกนำมาใช้ในหลายสาขา เช่น การสำรวจพื้นที่ การเกษตรอัจฉริยะ และการเฝ้าระวัง โดยทั่วไป UAV จะพึ่งพาระบบระบุตำแหน่งผ่านดาวเทียม (GPS) สำหรับการนำทาง แต่เมื่ออยู่ในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณ GPS เช่น ภายในอาคาร จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นในการระบุตำแหน่ง หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมคือกระบวนการ Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) ซึ่งใช้เซ็นเซอร์อย่างกล้อง RGB และ LiDAR ร่วมกับโอโดเมทรี (Odometry) ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของ UAV อย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีคำนวณโอโดเมทรีโดยใช้ข้อมูลออปติคอลโฟล์ว (OF-Odometry) จากการเปลี่ยนแปลงของพิกเซลในภาพต่อเนื่อง เพื่อหาความเร็วและทิศทางของอากาศยานไร้คนขับ วิธีนี้ลดข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์และเหมาะกับสภาพแวดล้อมที่เซ็นเซอร์เชิงลึกทำงานไม่ได้ พร้อมใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพิ่มความแม่นยำและลดข้อผิดพลาดสะสม คณะผู้วิจัยได้พัฒนาและเปรียบเทียบแบบจำลอง 3 แบบ ได้แก่ (1) โครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (CNN) (2) Bi-LSTM สำหรับข้อมูลลำดับเวลา และ (3) DeepVO ซึ่งใช้ภาพ RGB ต่อเนื่อง ซึ่งแบบจำลองแต่ละแบบมีข้อดีในบริบทต่างกัน โดยเฉพาะการรักษาความต่อเนื่องของตำแหน่งในสภาพแวดล้อมท้าทาย

ผลการทดลองบนชุดข้อมูล KITTI ซึ่งเป็นมาตรฐานประเมิน Visual Odometry พบว่าแบบจำลอง CNN ร่วมกับข้อมูลออปติคอลโฟล์วโดยตรงให้ผลลัพธ์ดีที่สุดในด้านความแม่นยำและความเสถียร เมื่อเทียบกับแบบจำลอง DeepVO ที่มีข้อจำกัดในการแยกแยะการเคลื่อนไหวจากสัญญาณรบกวน และแบบจำลอง Bi-LSTM ที่บางกรณีมีผลลัพธ์ด้อยลงจากความซ้ำซ้อนของข้อมูลเชิงเวลา งานวิจัยนี้แสดงศักยภาพของการใช้ข้อมูลออปติคอลโฟล์วกับโครงข่าย CNN ในการประมาณการเคลื่อนที่ของกล้องได้อย่างแม่นยำและเสถียร โดยไม่ต้องพึ่งโครงสร้างเชิงลำดับเพิ่มเติม เหมาะสำหรับระบบนำทางอัตโนมัติหรือหุ่นยนต์อัจฉริยะในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสัญญาณ GPS

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, การหาตำแหน่งและสร้างแผนที่พร้อมกัน, การเรียนรู้เชิงลึก, การระบุตำแหน่งโดยไม่

ใช้ GPS, โอโดเมทรี, ออปติคอลโฟล์ว

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are used in surveying, smart agriculture, and surveillance. They usually depend on satellite-based GPS for navigation, but in GPS-denied environments such as indoors, methods like Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) combining RGB cameras, LiDAR, and odometry are needed to estimate position and orientation.

This research proposes an odometry method using Optical Flow data (OF-Odometry) from pixel changes in consecutive images to estimate UAV velocity and direction. The approach lowers hardware requirements and works where depth sensors fail. Deep learning is applied to improve accuracy and reduce cumulative errors. Three models are compared: Convolutional Neural Network (CNN), Bi-LSTM for sequential data, and DeepVO using consecutive RGB images.

Experiments on the KITTI dataset show that the CNN model with raw Optical Flow achieves the highest accuracy and stability, outperforming DeepVO, which struggles to separate motion from noise, and Bi-LSTM, which suffers from temporal redundancy. These results highlight the potential of combining Optical Flow with CNN for accurate and stable camera motion estimation without additional sequential structures, enabling reliable UAV navigation in GPS-denied environments.

Keywords: Simultaneous Localization and Mapping, Optical flow, GPS-free Positioning, Unmanned Aerial Vehicle, Deep Learning, Odometry

1. บทนำ

ในระบบนำทางของหุ่นยนต์และอากาศยานไร้คนขับ ส่วนใหญ่พึ่งพา GPS เพื่อระบุตำแหน่งและนำทาง แต่ระบบนี้มีข้อจำกัดในพื้นที่ปิด เช่น ภายในอาคาร อุโมงค์ หรือพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้ความแม่นยำลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะในภารกิจทหาร การกู้ภัย หรือการสำรวจพื้นที่ที่ขาดการสื่อสาร ทำให้เทคโนโลยี SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยระบุตำแหน่งและสร้างแผนที่พร้อมกันในสภาพแวดล้อมเหล่านี้

Odometry เป็นองค์ประกอบสำคัญของ SLAM สำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของยานพาหนะ ประกอบด้วยหลายแนวทาง เช่น Wheel Odometry แม้โครงสร้างง่ายแต่สะสมความผิดพลาดได้, Visual Odometry (VO) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพิกเซลระหว่างภาพต่อเนื่องและสามารถปรับปรุงด้วย Deep Learning เช่น CNN, และ LiDAR Odometry ให้ข้อมูลเชิงลึกสามมิติแม่นยำแม้ในที่แสงน้อย แต่ต้นทุนสูงและต้องประมวลผลซับซ้อน

เพื่อแก้ปัญหาการระบุตำแหน่งในพื้นที่ไร้ GPS งานวิจัยนี้เสนอ OF-Odometry ใช้ออปติคอลโฟล์วร่วมกับเทคนิค Deep Learning เพื่อคำนวณระยะทางและทิศทางของ UAV อย่างแม่นยำ ลดข้อผิดพลาดสะสม และสามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่ปิดหรือมีสิ่งกีดขวางต่อสัญญาณ GPS งานวิจัยมุ่งปรับปรุงความแม่นยำของโอโดเมทรีเพื่อสนับสนุนภารกิจหลากหลายและเสริมศักยภาพของกองทัพอากาศในอนาคต

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับจากข้อมูลภาพ โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก สำหรับการระบุตำแหน่งและติดตามการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมปิดหรือพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณ GPS ใช้ชุดข้อมูลการวัดการเคลื่อนที่ด้วยภาพถ่าย (KITTI Dataset) [1] จากชุดข้อมูลทั้งหมด 22 ลำดับ โดยเลือกใช้ลำดับหมายเลข 00 ถึง 10 รวมทั้งหมด 11 ลำดับ สร้างแบบจำลองการคำนวณตำแหน่งจากภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Pytorch และ Google Colab ทำการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยเมตริก RMSE และ RPE เพื่อประเมินความแม่นยำในการติดตามตำแหน่งและการเคลื่อนที่ โดยพิจารณาความผิดพลาดทั้งเชิงระยะทางและมุมหมุน และวิเคราะห์ผลลัพธ์ตามระยะทางและความเร็วของ UAV ในสถานการณ์ต่าง ๆ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้าน Visual Odometry (VO) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อลดข้อจำกัดของวิธีดั้งเดิมและเพิ่มความแม่นยำในการประมาณตำแหน่ง แนวทางหลักแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การใช้กล้องเดี่ยว การผสานข้อมูลจาก LiDAR และการใช้ออปติคอลโฟล์ร่วมกับโครงข่ายเชิงลึก งานวิจัย [2] นำเสนอ Monocular Visual Odometry แบบ end-to-end โดยใช้ RCNN ร่วมกับ CNN สำหรับดึงคุณลักษณะและ RNN สำหรับเรียนรู้ลำดับเวลา เพื่อคาดการณ์ตำแหน่งและการเคลื่อนไหวของกล้องจากภาพต่อเนื่องโดยไม่ต้องประมวลผลล่วงหน้า Pandey et al. [3] เสนอวิธี end-to-end ที่ใช้ออปติคอลโฟล์เป็นอินพุตหลัก โดยใช้ CNN สำหรับดึงคุณลักษณะจากออปติคอลโฟล์, LSTM สำหรับการเรียนรู้ลำดับเวลา และ Dense Layer เพื่อประมาณการเคลื่อนไหวแบบ 6-DOF โดยใช้ข้อมูลจาก FlowNet หรือ LiteFlowNet ผ่าน CNN 7 ชั้น

การใช้ LSTM ร่วมกับ FlownetS ช่วยในการจับความสัมพันธ์ระหว่างเฟรมในลำดับเวลา เนื่องจาก CNN ไม่สามารถจับพลศาสตร์การเคลื่อนไหวได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ LSTM เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณการเคลื่อนไหวและตำแหน่ง [4] Global-Bundle Adjustment (GBA) ใช้กลไก attention-based เพื่อลดการเลื่อนลอยจากข้อผิดพลาดสะสมและปรับปรุงความแม่นยำของการประมาณค่าการเคลื่อนไหว [5] LSTM แบบสองทิศทาง ยังช่วยเพิ่มความแม่นยำโดยการเรียนรู้จากข้อมูลทั้งลำดับไปข้างหน้าและข้างหลัง [6]

Costante and Ciarfuglia [7] แนะนำให้แยกการเรียนรู้คุณลักษณะและการเคลื่อนไหวออกจากกัน โดยใช้ auto-encoder เพื่อจับการฝังการไหลเชิงแสงและทำนายการวางตัวสัมพัทธ์ ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดในการคำนวณทั้งสองอย่าง [7] Costante et al. [8] แบ่งการไหลเชิงแสงเป็น 4 ส่วนเพื่อประมวลผลการเคลื่อนไหวในแต่ละทิศทาง ซึ่งลดการใช้หน่วยความจำและเพิ่มประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายในการคำนวณที่สูง

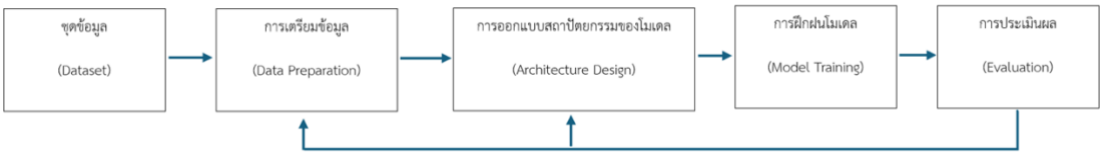
Muller and Savakis [9] ใช้ optical flow vector 2 มิติ ใน FlownetS แทนการใช้ RGB pairs เพื่อทำนายการวางตัวจากการไหลเชิงแสง ซึ่งช่วยให้ประมวลผลได้ง่ายขึ้นและมีความแม่นยำมากกว่าในการประมาณการเคลื่อนไหว [8] การใช้เวกเตอร์การไหลเชิงแสงในลักษณะนี้จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนา Visual Odometry ต่อไป

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกร่วมกับออปติคอลโฟล์ เพื่อประมาณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในสภาพแวดล้อมซับซ้อน โดยคำนวณทิศทาง ความเร็ว และการวางแนวของยานพาหนะอย่างแม่นยำ

รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการตั้งแต่การเตรียมชุดข้อมูล การประมวลผลภาพ การออกแบบและฝึกแบบจำลอง จนถึงการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ตัวชี้วัด ATE และ RPE เพื่อวัดความแม่นยำของตำแหน่งและการวางแนวของกล้อง



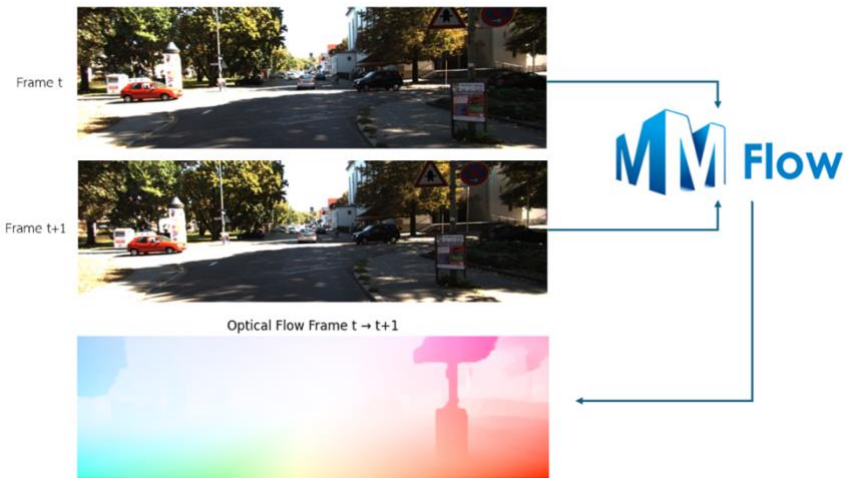
รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนในกระบวนการวิจัย

3.2 ชุดข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้ชุดข้อมูล KITTI Odometry Benchmark [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานในการศึกษาการนำทางและการประมาณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะอัตโนมัติ ประกอบด้วยภาพสเตอริโอ 22 ลำดับในรูปแบบ Lossless PNG ลำดับที่ 00–10 มีข้อมูล Ground Truth สำหรับฝึกและปรับแต่งโมเดล ส่วนลำดับที่ 11–21 ใช้สำหรับทดสอบแบบ Blind Evaluation ข้อมูลมีความหลากหลายของสภาพแวดล้อมทั้งเขตที่พักอาศัย พื้นที่เมือง และถนนใหญ่ที่มีการจราจรหนาแน่น ดังแสดงใน รูปที่ 3.2 ซึ่งทำให้ชุดข้อมูลนี้เหมาะสำหรับการฝึกและประเมินผลอัลกอริทึมการตรวจจับการเคลื่อนที่อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 การเตรียมข้อมูล

หลังจากสร้างออปติคอลโฟล์วจากสองภาพต่อเนื่อง ผลลัพธ์จะถูกเก็บเป็น NumPy Array (.npy) เพื่อนำไปใช้เป็นอินพุตในการฝึกสอนและประเมินโมเดล การไล่สีในแผนที่แสดงทิศทางและความเร็วของพิกเซล ช่วยให้โมเดลเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของภาพกับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการสร้างออปติคอลโฟล์วโดยใช้ LiteFlowNet2 ผ่าน MMFlow [10] ผลลัพธ์เป็นแผนที่ขนาด 192×624×2 พร้อมใช้งานต่อในกระบวนการเรียนรู้เชิงลึก

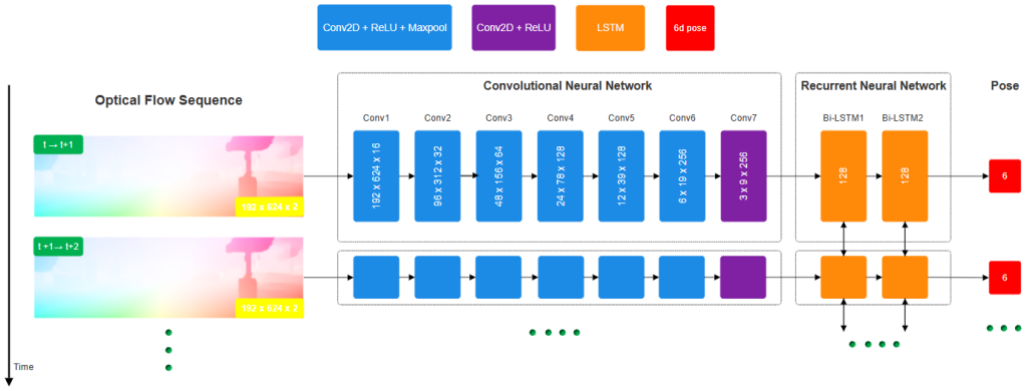


รูปที่ 3.2 กระบวนการสร้างออปติคอลโฟล์จากลำดับภาพสองภาพต่อเนื่องกัน

3.4 การออกแบบสถาปัตยกรรมของโมเดล

งานวิจัยนี้ออกแบบสถาปัตยกรรมโมเดลอิงแนวทางของ Pandey et al. [16] โดยผสาน CNN สำหรับดึงคุณลักษณะเชิงพื้นที่จากภาพ และ RNN สำหรับวิเคราะห์ลำดับข้อมูลตามเวลา ใช้ออปติคอลโฟล์เป็นอินพุตหลัก โมเดลปรับแต่งพารามิเตอร์เลเยอร์ ขนาด Kernel ช่องสัญญาณ และ Bi-LSTM เพื่อเรียนรู้ข้อมูลลำดับทั้งอดีตและอนาคต

รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างโมเดล โดยออปติคอลโฟล์ (192×624×2) ถูกป้อนเข้าสู่ CNN ทีละเฟรมเพื่อดึงคุณลักษณะเชิงพื้นที่ จากนั้นจัดลำดับเวลาเข้าสู่ Bi-LSTM เพื่อเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงเวลา ผลลัพธ์สุดท้ายคือพารามิเตอร์ 6-DoF ได้แก่ การหมุน (Roll, Pitch, Yaw) และการเคลื่อนที่เชิงเส้น (X, Y, Z)



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโดยรวมของโมเดลที่ประกอบด้วยโครงข่าย Convolutional Neural Network และ Bidirectional LSTM สำหรับการทำนายการเคลื่อนที่ของกล้องจากลำดับข้อมูลออปติคอลโฟล์

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างของเครือข่าย Convolutional Neural Network ที่นำเสนอ

Block	Layer	Kernel Size	Strides	Channels
Conv1	Conv2D	3	1	16
	MaxPool	2	2	2
Conv2	Conv2D	3	1	32
	MaxPool	2	2	2
Conv3	Conv2D	3	1	64
	MaxPool	2	2	2
Conv4	Conv2D	3	1	128
	MaxPool	2	2	2
Conv5	Conv2D	3	1	128

	MaxPool	2	2	2
Conv6	Conv2D	3	1	256
	MaxPool	2	2	2
Conv7	Conv2D	3	1	256

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดโครงสร้างของ CNN ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แต่ละแถวระบุชื่อเลเยอร์ ประเภทเลเยอร์ขนาด Kernel จำนวนช่องสัญญาณ และขนาด Output ซึ่งออกแบบ ให้สอดคล้อง กับข้อมูลออปติคอลโฟล์ ลดขนาดข้อมูลโดยไม่สูญเสียคุณลักษณะสำคัญ ทั้งยังสามารถ ฝึกสอนได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

3.5 การฝึกฝนโมเดล

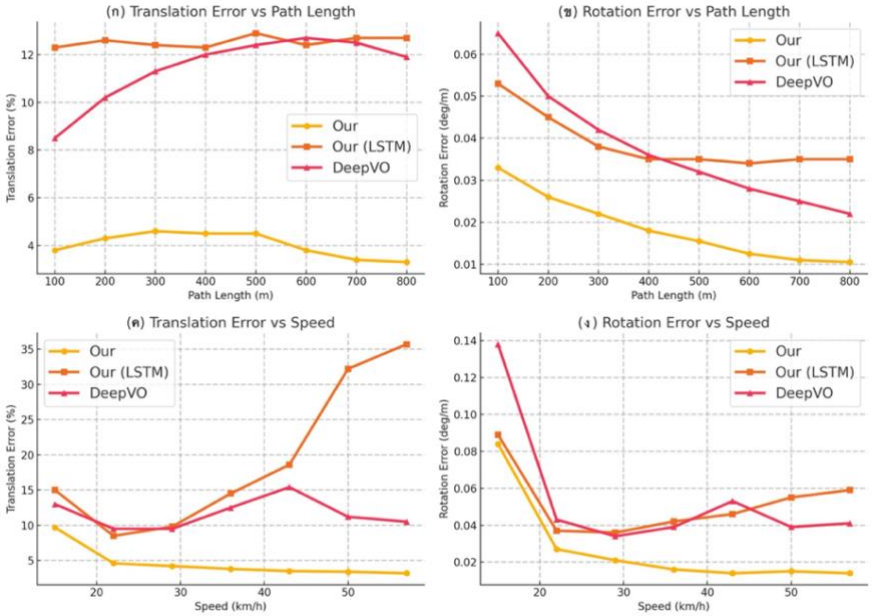
การฝึกสอนโมเดลดำเนินการบนแพลตฟอร์ม Google Colaboratory โดยใช้ GPU NVIDIA L4 และไลบรารี PyTorch เพื่อรองรับการประมวลผลข้อมูลเชิงลำดับจากออปติคอลโฟล์ของภาพต่อเนื่อง ข้อมูลถูกแบ่งเป็นชุดฝึกสอน (Sequences 00, 01, 02, 06, 08, 10) และชุดตรวจสอบ (Sequences 03, 05, 07, 09) เพื่อให้โมเดลเรียนรู้การเคลื่อนที่ที่หลากหลายและลดการเกิด Overfitting การฝึกใช้ Adam Optimizer และฟังก์ชันความสูญเสียแบบ MSE โดยกำหนดค่า Learning Rate เริ่มต้น 0.001, Batch Size 12 และ Epoch ทั้งหมด 100 รอบ การตรวจสอบผลด้วย Validation Set ในแต่ละรอบช่วยให้สามารถปรับแนวโน้มการเรียนรู้ให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

3.6 การประเมินผล

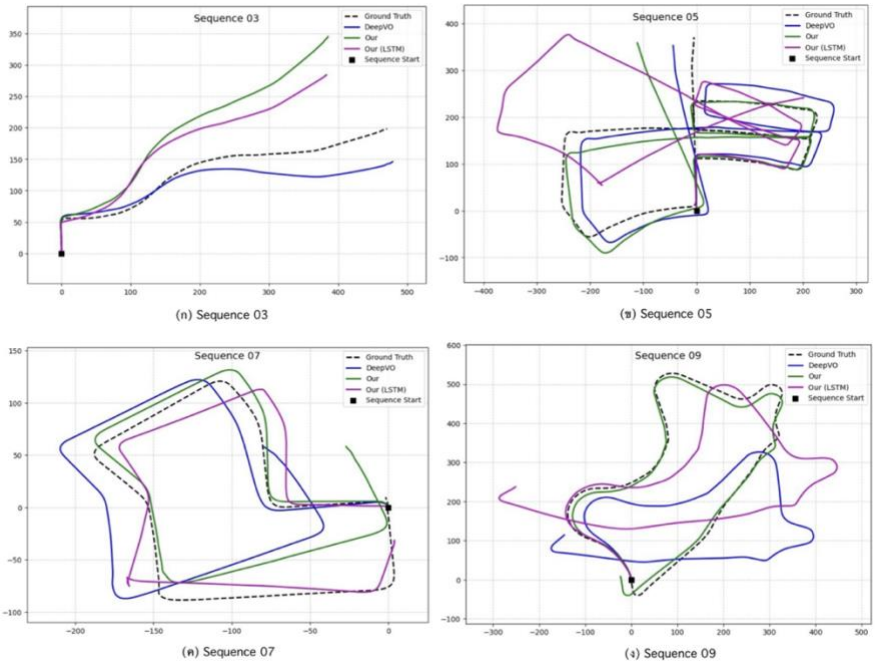
การประเมินความแม่นยำของโมเดลใช้ Relative Pose Error (RPE) ซึ่งวัดข้อผิดพลาด เชิงสัมพัทธ์ ของการแปลและการหมุนระหว่างตำแหน่งต่อเนื่องในช่วงย่อย (100–800 เมตร) โดยใช้ RMSE เป็นตัวชี้วัดหลัก วิธีนี้เหมาะสมกับการวัดความแม่นยำของการเคลื่อนที่ระยะสั้น และลดปัญหา การสะสมข้อผิดพลาดเมื่อเทียบกับ Absolute Trajectory Error (ATE)

4. ผลการวิจัย

การประเมินเชิงปริมาณด้วย RMSE และ RPE บนระยะทาง 100–800 เมตร เปรียบเทียบ Our (CNN), Our (LSTM) และ DeepVO (รูปที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่า โมเดลที่นำเสนอ Our (CNN) มีค่าความผิดพลาดต่ำและเสถียรแม้ความเร็วสูง Our (LSTM) ข้อผิดพลาดเพิ่มเมื่อเร็วเกิน 50 กม./ชม. ส่วน DeepVO ผันผวนและสูง การเปรียบเทียบเส้นทางกับ Ground Truth (รูป 4.2) พบว่าโมเดล Our ติดตามเส้นทางจริงได้ใกล้เคียงที่สุดทั้งเส้นทางตรง ซับซ้อน และความเร็วสูง โมเดล Our (LSTM) ไม่เสถียร ขณะที่ DeepVO เบี่ยงเบนชัดเจน Optical Flow ช่วยให้ CNN เรียนรู้ลักษณะการเคลื่อนที่ของกล้องได้แม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มความซับซ้อนของ LSTM



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทั้งในการแปลตำแหน่ง (Translation Error) และ การหมุน (Rotation Error) ของโมเดลทั้งสาม โดยพิจารณาทั้งในมิติของระยะทาง และความเร็วของ การเคลื่อนที่



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบเส้นทางที่ได้จากแบบจำลอง Our, Our (LSTM) และ DeepVO กับเส้นทาง จริง (Ground Truth) บนชุดข้อมูล Sequence 03, 05, 07 และ 09

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองที่เสนอ Our กับแบบจำลอง Our (LSTM) และ DeepVO โดย t หมายถึงค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในการแปลตำแหน่ง (%) บนช่วงระยะทาง 100–800 เมตร และ r หมายถึงค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในการหมุน (องศา/100 เมตร) บนช่วงระยะทางเดียวกัน

Seq.	DeepVO		Our (LSTM)		Our	
	t(%)	r(°)	t(%)	r(°)	t(%)	r(°)
03	10.43	4.39	9.17	**3.05**	**8.91**	4.18
05	8.66	2.79	10.50	3.70	**3.46**	**1.70**
07	12.21	7.35	9.74	5.09	**6.80**	**4.35**
09	15.36	5.21	17.73	4.44	**3.49**	**1.47**
Avg.	11.67	4.94	11.78	4.07	**5.67**	**2.92**

ผลการเปรียบเทียบเชิงตัวเลขในตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของ Translation Error (%) และ Rotation Error (°) ของโมเดลทั้งสาม พบว่าโมเดล Our (CNN) มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 5.67% สำหรับการแปลตำแหน่ง และ 2.92° สำหรับการหมุน ต่ำกว่า Our (LSTM) และ DeepVO โดย DeepVO มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 11.67% และ 4.94° ส่วน Our (LSTM) แม้ใช้ Bi-LSTM ก็ไม่ช่วยเพิ่มความแม่นยำ และบาง Sequence เช่น Sequence 09 มีความผิดพลาดสูงถึง 17.73% สรุปผลการทดลองทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณชี้ให้เห็นว่า การใช้ Optical Flow ร่วมกับ CNN ให้ผลลัพธ์แม่นยำและเสถียรที่สุด การเพิ่ม LSTM ไม่ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการเลือกชนิดอินพุตและโครงสร้างโมเดลให้เหมาะกับลักษณะข้อมูลจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ Visual Odometry

5. สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของกล้องในลักษณะ 6D Pose Estimation โดยใช้ข้อมูลออปติคอลโฟล์ว ซึ่งสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของพิกเซลระหว่างเฟรม อย่างชัดเจน แบบจำลองที่พัฒนามี 3 แนวทาง ได้แก่ โมเดล Our (CNN), Our (LSTM) และ DeepVO ผลการทดลองบน KITTI Dataset พบว่า Our ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด ทั้งความแม่นยำและความเสถียร สามารถ ติดตาม เส้นทางจริงได้ใกล้เคียง และมีค่าความผิดพลาดต่ำ

ที่สุด การใช้ Optical Flow เป็นอินพุตทำให้โมเดล เรียนรู้ลักษณะการเคลื่อนที่ของกล้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ DeepVO ที่ใช้ภาพ RGB แบบดิบมีข้อจำกัดในการแยกแยะสัญญาณจริงจาก noise ส่วน Our (LSTM) ไม่ได้ช่วยเพิ่มคุณภาพ การคาดการณ์และบางครั้งอาจทำให้โมเดลไม่เสถียร โดยเฉพาะเมื่อความเร็วหรือทิศทางเปลี่ยนอย่างฉับพลัน งานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่าการใช้ Optical Flow ร่วมกับ CNN เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในระบบนำทางอัตโนมัติ หรือหุ่นยนต์อัจฉริยะ การพัฒนาเพิ่มเติมสามารถทำได้หลายด้าน เช่น ใช้โครงข่ายลึกหรือ Attention Mechanism เพื่อเรียนรู้คุณลักษณะเชิงลึก, ประยุกต์ร่วมกับระบบ SLAM, ผสานข้อมูลหลายเซนเซอร์ เช่น LiDAR, IMU หรือ Depth, ปรับโมเดลให้ใช้งาน Real-Time บนอุปกรณ์ฝังตัว และฝึกบนชุดข้อมูลที่แตกต่างจาก KITTI เพื่อทดสอบความ generalize เป้าหมายคือเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับการใช้งานจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาและคำแนะนำอันทรงคุณค่าจาก นาวาอากาศเอกรองศาสตราจารย์ เมษัณฑ์ ธรรมวิชัย ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำด้วยความ เอาใจใส่อย่างเต็มที่ จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยความเรียบร้อย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขออุทิศผลดีจากการศึกษาวิจัยฉบับนี้แด่บิดา มารดา ครอบครัว และ กัลยาณมิตรทุกท่าน ที่ได้มอบกำลังใจและการสนับสนุนมาโดยตลอดจนประสบความสำเร็จ คณะผู้วิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Geiger, P. Lenz, and R. Urtasun, “Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite,” in Conference on Computer Vision and PatternRecognition (CVPR), 2012.

[2] S. Wang, R. Clark, H. Wen, and N. Trigoni, “Deepvo: Towards end-to-end visual odom etry with deep recurrent convolutional neural networks,” in 2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), pp. 2043–2050, IEEE, 2017.

[3] T. Pandey, D. Pena, J. Byrne, and D. Moloney, “Leveraging deep learning for visual odometry using optical flow,” Sensors, vol. 21, no. 4, 2021.

[4] Wang, S.; Clark, R.; Wen, H.; Trigoni, N. DeepVO: Towards End-to-End Visual Odometry with Deep Recurrent Convolutional Neural Networks. arXiv 2017, arXiv:1709.08429.

[5] Parisotto, E.; Chaplot, D.S.; Zhang, J.; Salakhutdinov, R. Global Pose Estimation with an Attention-based Recurrent Network. arXiv 2018, arXiv:1802.06857.

[6] Jiao, J.; Jiao, J.; Mo, Y.; Liu, W.; Deng, Z. MagicVO: An End-to-End Hybrid CNN and Bi-LSTM Method for Monocular Visual Odometry. IEEE Access 2019, 7, 94118–94127.

[7] Costante, G.; Ciarfuglia, T.A. LS-VO: Learning Dense Optical Subspace for Robust Visual Odometry Estimation. arXiv 2017, arXiv:1709.06019.

[8] Costante, G.; Mancini, M.; Valigi, P.; Ciarfuglia, T.A. Exploring Representation Learning With CNNs for Frame-to-Frame Ego-Motion Estimation. IEEE Robot. Autom. Lett. 2016, 1, 18–25.

[9] Muller, P.; Savakis, A. Flowdometry: An Optical Flow and Deep Learning Based Approach to Visual Odometry. In Proceedings of the 2017 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Santa Rosa, CA, USA, 24–31 March 2017; pp. 624–631.

[10] MMFlow Contributors, “MMFlow: OpenMMLab Optical Flow Toolbox and Bench mark,” Nov. 2021.

ระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่ของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช บนฐานของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

A GIS-Based Spatial Data Search System for the Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ[1*], ปัญญารักษ์ โกศัลวัฒน์[2], อานนท์ ศรีประเสริฐ[3] และชณิชา หมอยาดี[4]

[1,2,3]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[4]วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

Kiatkulchai Jitt-Aer[1*], Panyarak Kosanwat[2], Anon Sriprasert[3] and Chanicha Moryadee[4]

[1,2,3]Indusrial Engineering and Aviation Management, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

[4]College of Logistics and Supply Chain, Suan Sunandha Rajabhat University

kiatkulchai@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่สำหรับโครงสร้างพื้นฐานและบ้านพักบุคลากรภายในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยนำอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ขนาดเล็กมาผนวกกับเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศหลัก ได้แก่ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) กระบวนการวิจัยประกอบด้วย 1) การสร้างข้อมูล GIS จากภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จาก UAV 2) การเชื่อมโยข้อมูลสารสนเทศกับระบบ GIS และ 3) การพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่

การดำเนินงานเริ่มจากการบินสำรวจด้วย UAV เพื่อเก็บภาพถ่ายทางอากาศ จากนั้นประมวลผลเป็นภาพออร์โธโฟโต้เพื่อใช้เป็นแผนที่ฐานของระบบ จากนั้นจึงพัฒนาแอปพลิเคชัน GIS สำหรับแสดงผลแผนที่ดังกล่าว พร้อมทั้งจัดเตรียมฟังก์ชันการจัดการเชิงพื้นที่ต่าง ๆ ระบบที่ได้มอบความสามารถในการแสดงตำแหน่งโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนนและอาคาร รวมถึงการค้นหาข้อมูลรายละเอียดของบ้านพักบุคลากรได้โดยตรงจากแผนที่ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี UAV และ GIS อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการจัดการพื้นที่และการสืบค้นข้อมูล แพลตฟอร์มดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนี้ออกแบบมาเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บังคับบัญชาในการบริหารจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

คำสำคัญ: ข้อมูลเชิงพื้นที่, โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

This research aims to develop a spatial information retrieval system for infrastructure and personnel housing within the Royal Thai Air Force Academy. The study integrates small Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with core geospatial technologies, specifically Geographic Information Systems (GIS). The research process comprises: 1) creating GIS data from aerial photographs captured by UAV, 2) integrating information data with the GIS system, and 3) developing a spatial information retrieval system.

The implementation begins with UAV survey flights to collect aerial photographs, which are then processed into orthophoto maps to serve as the system's base map. Subsequently, a GIS application is developed to display these maps along with various spatial management functions. The resulting system provides capabilities for displaying infrastructure locations such as roads and buildings, as well as enabling direct searches for detailed information about personnel housing from the map. This research demonstrates an effective approach to applying UAV and GIS technologies for area management and information retrieval. The developed digital platform is designed to support command decision-making in managing spatial data at the Royal Thai Air Force Academy.

Keywords: Spatial Data, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Geographic Information Systems (GIS)

1. บทนำ

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ถือว่าเป็นที่ตั้งแห่งใหม่ และเป็นหน่วยงานสำคัญของกองทัพอากาศที่ต้องดำเนินการตามหลักยุทธศาสตร์ของกองทัพอากาศ โดยมุ่งเน้นการพัฒนาขีดความสามารถของบุคลากรเพื่อตอบสนองต่อภารกิจต่าง ๆ ของกองทัพอากาศได้ในอนาคต ดังนั้น แนวคิดการนำเทคโนโลยีด้านภูมิสารสนเทศ (Geo-informatics) มาพัฒนาระบบสารสนเทศของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เพื่อเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับใช้ในการบริหารการตกลงใจของผู้บังคับบัญชาเกี่ยวกับปัญหาเชิงพื้นที่ เช่น การจัดการเกี่ยวกับการวางผัง การสืบค้นข้อมูลต่าง ๆ ในที่ตั้ง เป็นต้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านภูมิสารสนเทศได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการวางแผนการบริหาร การวางนโยบาย รวมไปถึงการใช้เป็นข้อมูลเพื่อเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support) ซึ่งเทคโนโลยีด้านภูมิสารสนเทศเป็นวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับภูมิศาสตร์ คือ การรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographical Information Systems หรือ GIS) และระบบการนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System หรือ GNSS) โดยเทคโนโลยีด้านภูมิสารสนเทศเป็นวิทยาการที่กำลังเข้ามามีบทบาทในการประยุกต์ใช้ช่วยเหลือในการบริหารและการตัดสินใจเชิงพื้นที่ทุกชนิด ซึ่งโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชกำลังดำเนินการก่อสร้างและกำลังเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งการนำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมาประยุกต์ใช้กับโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชก็จะเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาหน่วยงานในกองทัพอากาศให้ทันสมัยได้

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับมาใช้งานในการถ่ายภาพทางอากาศได้ในภารกิจต่าง ๆ โดยอากาศยานไร้คนขับจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ (Sensor) เก็บข้อมูลภาพถ่ายที่มีคุณภาพและความละเอียดสูง และยังสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการนำทางด้วยดาวเทียมที่ทำให้ภาพถ่ายทางอากาศมีระบบพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลกที่ถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาแผนที่ที่มีระบบพิกัดที่ได้มาตรฐาน และสามารถประยุกต์ร่วมกับระบบฐานข้อมูลสารสนเทศของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งกำลังปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการพัฒนาพื้นที่ รวมถึงบ้านพักอาศัยที่บุคลากรของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชได้ลงทะเบียนเข้าพักนั้นยังไม่มีระบบดิจิทัลแพลตฟอร์มที่สามารถสืบค้นข้อมูลผู้เข้าพักอาศัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 1) การสร้างข้อมูล GIS จากภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จาก UAV 2) การเชื่อมโยข้อมูลสารสนเทศกับระบบ GIS และ 3) การพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยมีขอบเขตการพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญคือ ถนนและอาคารในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช รวมถึงการสืบค้นข้อมูลบุคลากรที่พักอาศัยในอาคารบ้านพักข้าราชการ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

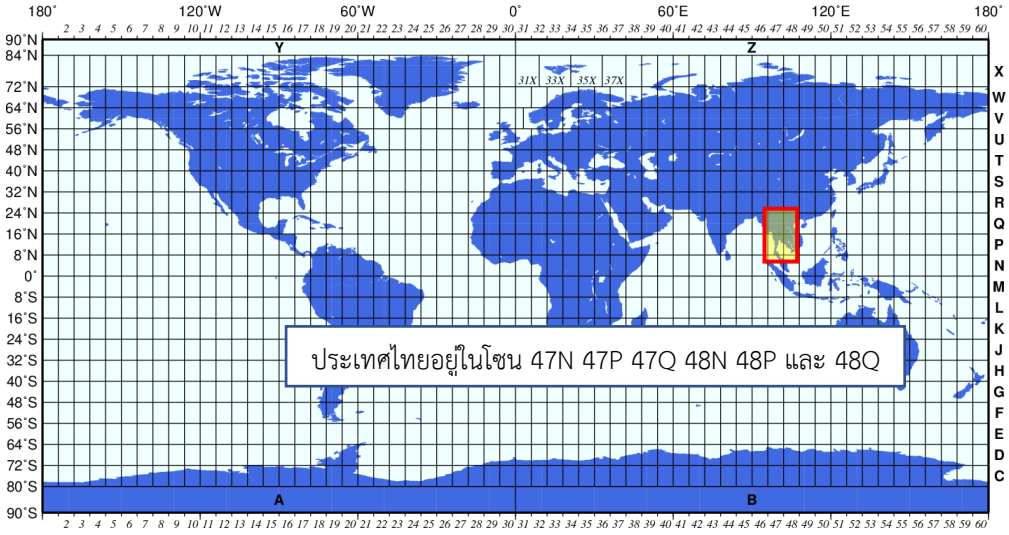
2.1 การรับรู้ระยะไกล

การรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) ประกอบด้วย 2 คำ คือ remote หมายถึง ระยะไกล และ sensing หมายถึง การสัมผัสหรือการรับรู้ หากตีความหมายตามคำศัพท์ หมายถึง การรับรู้ข้อมูลจากระยะไกลโดยผ่านเครื่องมือซึ่งผู้รับรู้ไม่สามารถสัมผัสกับวัตถุนั้นโดยตรง การรับรู้ระยะไกลต้องศึกษาพื้นฐานงานสำรวจ คือการวัดเพื่อหาตำแหน่งของจุดต่าง ๆ การแสดงตำแหน่งของจุดใด ๆ จะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับกับสัณฐานของโลก (Earth Surface) หรือพื้นผิวที่ใช้อ้างอิง โลกมีรูปทรงไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต เพียงแต่ใกล้เคียงทรงกลม และมีพื้นผิวขรุขระ รูปร่างจริงของโลกจึงไม่สามารถใช้เพื่อการอ้างอิงตำแหน่งของจุดต่าง ๆ บนพื้นโลก ดังนั้นการอ้างอิงตำแหน่งของจุดต่าง ๆ จึงใช้รูปทรงที่ห่อหุ้มด้วยผิวระดับ (Level Surface) ที่ต่อเนื่องกัน โดยวิชัย เยี่ยงวีรชน (2559) ได้อธิบายสัณฐานโลกไว้ 3 ลักษณะ คือ สัณฐานโลกทางกายภาพหรือภูมิประเทศจริง สัณฐานโลกยีออยด์ (Geoid) และสัณฐานโลกรูปทรงรีหรืออีลิปซอยด์ (Ellipsoid)

จากข้อมูลของกรมแผนที่ทหาร [1] ในส่วนของประเทศไทยนั้น ได้กำหนดให้ใช้พื้นหลักฐานท้องถิ่น (Local Datum) ที่ชื่อว่าอินเดียน 1975 (Indian 1975 Datum) โดยพื้นหลักฐานนี้ใช้รูปทรงรีเอเวอร์เรสท์ (Everest) เป็นรูปทรงรี ซึ่งจะมีปรากฏในส่วนท้ายของแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7017 ที่ถือเป็นแผนที่ฐาน (Base Map) และจากเทคโนโลยีด้านดาวเทียมที่ไม่ได้ใช้การอ้างอิงกับพื้นหลักฐานท้องถิ่น แต่ใช้พื้นหลักฐานสากลที่ทำให้สามารถอ้างอิงได้ทั่วโลก เรียกว่า พื้นหลักฐาน World Geodetic System 1984 (WGS 84) ส่งผลให้การสำรวจในยุคปัจจุบันต้องปรับเปลี่ยนมาใช้พื้นหลักฐาน WGS 84 ดังนั้น ค่าพิกัดที่ได้จากอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) ในพื้นที่ประเทศไทยจะเป็นค่าที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน WGS84

นอกจากนี้ การอ้างอิงและบอกตำแหน่งนี้บนโลกจะต้องอ้างอิงโดยอาศัยระบบพิกัด โดย [2] ได้อธิบายระบบพิกัดไว้ด้วยกัน 2 ระบบ คือ ระบบพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic Coordinate System: GCS) และระบบพิกัดแบบกริด (Universal Transverse Mercator: UTM) โดยที่ระบบพิกัดแบบ GCS เป็นระบบพิกัดที่กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวโลก ด้วยวิธีการอ้างอิงตำแหน่งเป็นค่าระยะเชิงมุมของละติจูด (Latitude) และลองจิจูด (Longitude) ส่วนระบบพิกัดแบบกริด UTM เป็นการอ้างอิงค่าพิกัดโดยอาศัยตารางกริดช่วยในการกำหนดตำแหน่งและใช้อ้างอิงในการบอกตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นโลก โดยตารางกริดนั้นได้จากการนำเอาเส้นโครงแผนที่แบบ UTM ของ Gauss-Krueger มา

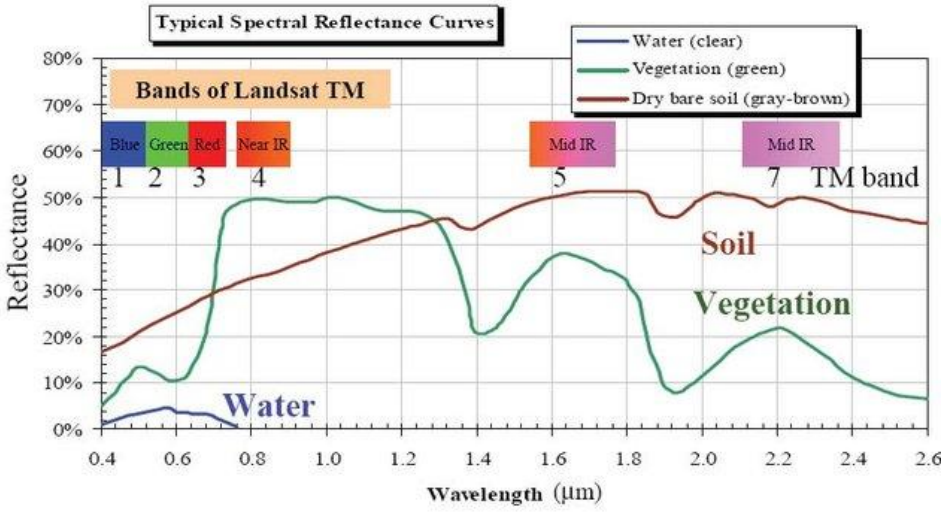
ดัดแปลงใช้ในการฉายรายละเอียดของพื้นผิวโลกลงบนระนาบ โดยสมมติให้แผ่นระนาบทรงกระบอกห่อหุ้มโลกระหว่างละติจูดที่ 84 องศาเหนือกับ 80 องศาใต้ ดังแสดงตามรูปที่ 1 และเมื่อคลี่แผ่นระนาบทรงกระบอกออกจะได้พื้นที่ครอบคลุมลองจิจูดที่ 180 องศาตะวันตกถึงลองจิจูดที่ 180 องศาตะวันออกแบ่งออกเป็น 60 โซน แต่ละโซนกว้าง 60 องศา



รูปที่ 1 ตารางกริดระบุตำแหน่งระบบพิกัดกริดแบบ UTM (เอกสารอ้างอิง [2])

2.2 การสะท้อนเชิงสเปกตรัมบนผิวโลก

วัตถุต่าง ๆ ที่ปกคลุมบนพื้นผิวโลก จะมีปฏิสัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสะท้อนการดูดกลืนและการส่งผ่านพลังงานที่แตกต่างกัน จากสมบัติดังกล่าวสามารถจำแนกวัตถุชนิดต่าง ๆ ออกเป็น 3 ประเภทคือ พืชพรรณ (Vegetation) ดิน (Soil) และน้ำ (Water) ดังแสดงตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะบ่งชี้เชิงสเปกตรัมของพืชพรรณ ดิน และน้ำ (เอกสารอ้างอิง [3])

2.2.1 ลักษณะบ่งชี้สเปกตรัมของพืชพรรณ

พืชพรรณมีลักษณะบ่งชี้เชิงสเปกตรัม (Spectral Signature) มีลักษณะขึ้น ๆ ลง ๆ ตามการสะท้อนและการดูดกลืนพลังงานในช่วงคลื่นต่าง ๆ ในกลุ่มคลื่นที่ตามองเห็น เส้นกราฟจะลดต่ำลงเมื่อพืชดูดกลืนพลังงานเอาไว้มากโดยรงควัตถุในใบพืช (Leaf Pigments) กล่าวคือ คลอโรฟิลล์ในใบพืชดูดกลืนพลังงานเพื่อการสังเคราะห์แสง โดยการดูดกลืนจะไม่เท่ากันในแต่ละช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะภายในของพืช คลื่นแสงสีน้ำเงิน (0.45 ไมครอน) และคลื่นแสงสีแดง (0.67 ไมครอน) ถูกดูดกลืนมากที่สุด และมีการสะท้อนมากที่สุดในช่วงคลื่นแสงสีเขียว (0.54 ไมครอน) จึงทำให้เห็นใบพืชที่มีสุขภาพสมบูรณ์เป็นสีเขียว ถ้าพืชมีอายุมากขึ้นและเป็นโรค หรือเกิดการเจริญเติบโตที่ผิดปกติ ใบพืชจะมีปริมาณคลอโรฟิลด์ลดลง ทำให้การดูดกลืนช่วงคลื่นแสงสีแดงและสีน้ำเงินลดลงด้วย หรือมีการสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่นดังกล่าวมากขึ้น จึงทำให้เห็นใบไม้เป็นสีเหลือง ส้ม หรือน้ำตาล สำหรับช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared) ขึ้นไป จะมีค่าการสะท้อนสูงสุดในช่วงคลื่นระหว่าง 0.7-1.3 ไมครอน ใบพืชจะสะท้อนพลังงานออกมาร้อยละ 40-50 และพลังงานที่เหลือจะถูกส่งผ่านออกไป เพราะโครงสร้างของพืชไม่มีการดูดกลืนพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

2.2.2 ลักษณะบ่งชี้สเปกตรัมของดิน

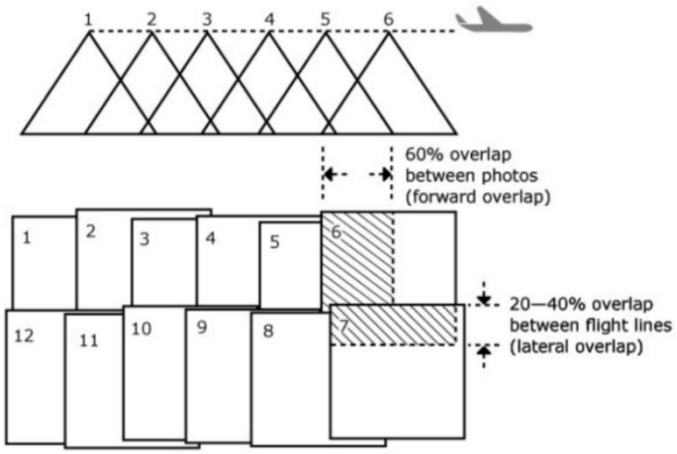
ดินส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักที่เหมือนกันคือ ออกซิเจน ซิลิกอน และอลูมิเนียม และมีองค์ประกอบลองที่ต่างกันออกไป เช่น เหล็ก แมกนีเซียม แคลเซียมโซเดียม โพแทสเซียม และธาตุอื่น ๆ ปฏิสัมพันธ์ของดินจะมีค่าการสะท้อนสูงกว่าน้ำและพืช โดยลักษณะบ่งชี้เชิงสเปกตรัมจะลักษณะขึ้น ๆ ลง ๆ แต่มีความแตกต่างกันไม่มากเหมือนกราฟของพืช ดินมีความสะท้อนต่ำในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นโดยเฉพาะแสงสีน้ำเงินและแสงสีเขียว ปัจจัยนี้มีผลต่อการสะท้อนของดิน ได้แก่ ความชื้นในดิน องค์ประกอบและความขรุขระของเนื้อดิน ปริมาณสนิมเหล็กและสารอินทรีย์ สีของดิน และปริมาณพืชปกคลุมดิน

2.2.3 ลักษณะบ่งชี้สเปกตรัมของน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงของน้ำกับสิ่งปกคลุมประเภทอื่น น้ำมีค่าการสะท้อนต่ำกว่าในทุกช่วงคลื่น เพราะน้ำเป็นของเหลวและสามารถดูดกลืนพลังงานเอาไว้ได้สูง หากเปรียบเทียบลักษณะบ่งชี้เชิงสเปกตรัมของน้ำในช่วงคลื่นต่าง ๆ จะพบว่า ค่าการสะท้อนของน้ำจะถูกดูดกลืนมากขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นมาก น้ำมักจะสะท้อนค่าสูงสุดในกลุ่มคลื่นที่ตามองเห็นที่มีขนาดน้อยกว่า 0.6 ไมครอน และจะถูกดูดกลืนมากขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ สั้น และกลาง (Near- Shortwave- and Mid Infrared) และช่วงคลื่นไมโครเวฟ ปัจจัยที่มีผลต่อการ

2.3 ภาพถ่ายทางอากาศ

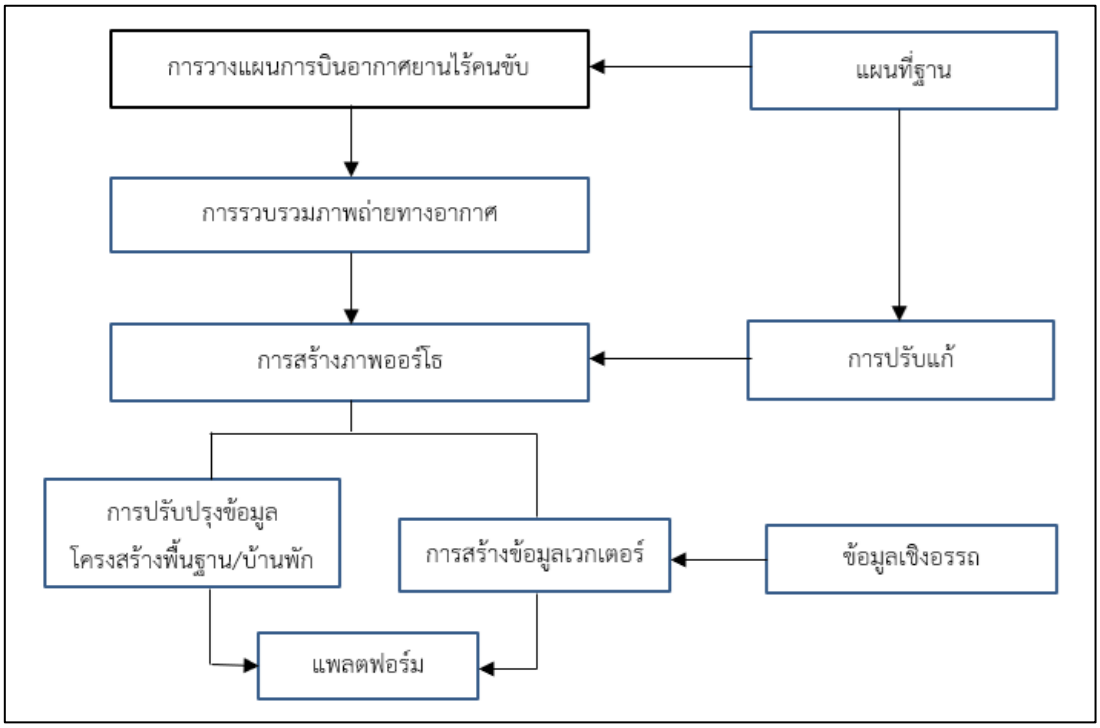
ภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial Photography) คือการถ่ายภาพนิ่งหรือภาพเคลื่อนไหวโดยมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพกับอากาศยานประเภทต่าง ๆ [4] ซึ่งการใช้ UAV ในการถ่ายภาพจากห้วงอากาศเพื่อให้ได้ภาพของพื้นที่ที่ต้องการบนพื้นโลกนั้น ภาพที่ได้จะเป็นภาพต่อเนื่องและแต่ละภาพจะมีการเหลื่อมกัน [5] ทั้งนี้ผู้ควบคุมสามารถที่จะกำหนดซึ่งเรื่องที่สำคัญในการวางแผนการบินของอากาศยานไร้คนขับ คือจะต้องกำหนดค่าการทับซ้อนของภาพอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ภาพถ่ายครอบคลุมทั่วพื้นที่ โดยแต่ละในแนวบินจะต้องถ่ายภาพที่มีส่วนทับซ้อน (Front Overlap) ไม่น้อยกว่า 60% และส่วนซ้อนของภาพในแนวบินข้างเคียงจะต้องมีส่วนซ้อนด้านข้าง (Side Overlap) อยู่ในช่วง 20-40% ดังแสดงตามรูปที่ 3 ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าทั้งภาพและส่วนของภาพที่มีส่วนซ้อนทับกันนี้จะต้องใช้ในการรังวัดและค่าพิกัดในสามมิติ (Point Cloud) ซึ่งจะส่งผลให้ได้แผนที่ทางอากาศที่นำไปผลิตแผนที่ฐาน (Base map) ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3 การซ้อนทับของภาพถ่ายทางอากาศในแนวบินและส่วนซ้อนทับระหว่างแนวบิน (เอกสารอ้างอิง [6])

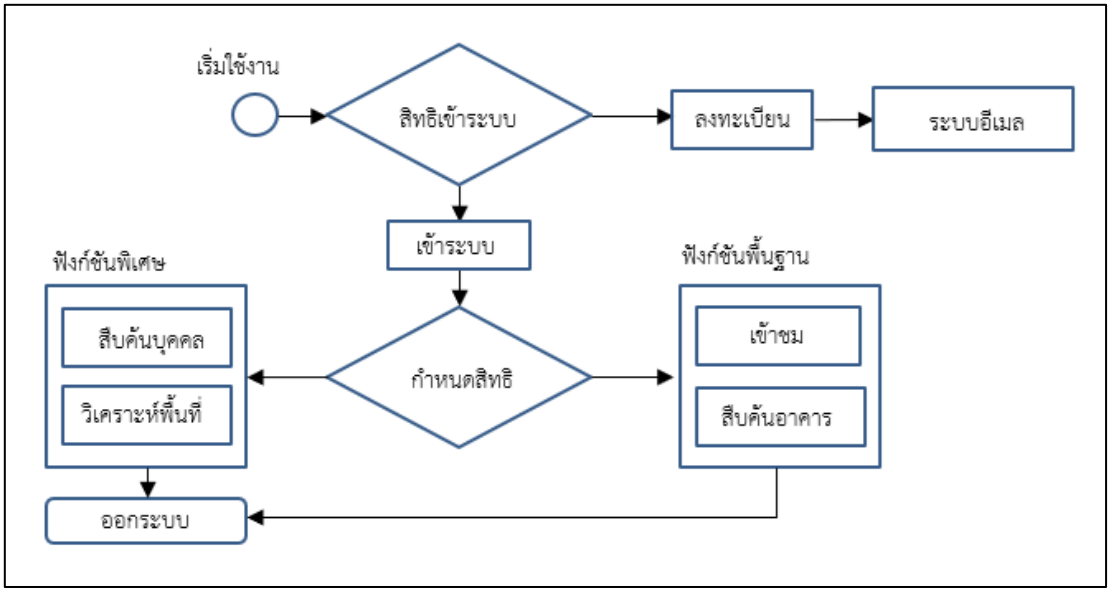
นอกจากนี้ ความสูงของอากาศยานก็ส่งผลต่อพื้นที่ต่อการถ่ายภาพ ยิ่งบินสูงก็ครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างมากกว่าการบินต่ำ [5] แต่ระยะการบินสูงต่ำก็มีผลต่อความละเอียดภาพ คือ ยิ่งบินต่ำยิ่งได้ภาพที่มีความละเอียดสูงมากขึ้น ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน และปัจจัยอื่น ๆ เช่น สภาพแวดล้อมของพื้นที่การบิน หากมีอาคาร ต้นไม้ เสาไฟ ก็ต้องระมัดระวังเรื่องการกำหนดระยะความสูงของการบินอากาศยานไร้คนขับ

3. การดำเนินการวิจัย



รูปที่ 4 การจัดเตรียมข้อมูล

การศึกษาเรื่องการพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชบนฐานของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ มีวิธีดำเนินการวิจัยทั้ง 2 ขั้นตอนนั้น มีกระบวนการดำเนินการวิจัยย่อย ๆ หลายขั้นตอน ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพวิธีดำเนินการวิจัยได้ ดังแสดงตามรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 5 การออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศ

3.1 การจัดเตรียมข้อมูล

3.1.1 การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศได้ดำเนินการจำนวนทั้งหมด 1 ครั้ง คือวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ.2567 โดยการรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ งานวิจัยนี้ใช้แอปพลิเคชัน Drone Deploy (www.dronedeploy.com) สำหรับเป็นเครื่องมือในการวางแผนการบินเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศรวมถึงการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยโดยการวางแผนการบินอากาศยานไร้คนขับสามารถทำผ่านแอปพลิเคชัน Drone Deploy โดยแอปพลิเคชัน Drone Deploy จะคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ เวลาในการบิน ขนาดพื้นที่ที่บินเก็บข้อมูลภาพ จำนวนภาพที่ถ่ายทั้งหมด และจำนวนแบตเตอรี่ที่ใช้ในการบิน นอกจากนี้ แอปพลิเคชัน Drone Deploy ยังมีฟังก์ชันให้นักวิจัยได้สามารถปรับขนาดการถ่ายภาพแบบให้มีระยะซ้อนด้านหน้า (Frontlap) และระยะซ้อนด้านข้าง (Sidelap) ได้ด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ปรับเป็น 75% และ 65% ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการประมวลผลภาพบนระบบคลาวด์ของแอปพลิเคชัน Drone Deploy จึงไม่ต้องใช้ทรัพยากรในรูปแบบคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพต่าง ๆ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดหาคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ราคาแพง โดยแอปพลิเคชัน Drone Deploy มีการบริการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติ ซึ่งผลการประมวลผลภาพจะอยู่ในรูปแบบข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อมูลภาพออร์โธ (Orthomosaic) ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) เป็นต้น

3.1.2 การสร้างข้อมูลเวกเตอร์

การสร้างข้อมูลเวกเตอร์เป็นการจัดเตรียมข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ประเภทที่จะต้องนำไปทับซ้อนกับภาพออร์โธ ซึ่งข้อมูลเวกเตอร์ประกอบไปด้วยจุด (Point) เส้น (Line) และรูปพื้นที่ปิด (Polygon) โดยการจัดเตรียมข้อมูลเวกเตอร์ในงานวิจัยนี้จะมีการวาดเวกเตอร์ (Vector Digitizing) ในรูปแบบเส้นแทนถนน และรูปปิดแทนอาคารสถานที่ในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งข้อมูลเวกเตอร์นั้นเป็นข้อมูลที่สามารถเชื่อมต่อกับข้อมูลสารสนเทศ (Information) ได้ในรูปแบบของตาราง ที่เรียกว่าตารางคุณสมบัติ (Attribute Table) ที่นำมาแสดงคุณสมบัติของเวกเตอร์นั้น ๆ เช่น ชื่อถนน และชื่อของอาคารสถานที่ โดยการสร้างข้อมูลเวกเตอร์นั้นจะต้องดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.7

3.2 การออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศ

3.2.1 การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบภูมิสารสนสนเทศนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือส่วนการเก็บข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลราสเตอร์ (ข้อมูลภาพออร์โธ) และข้อมูลเวกเตอร์ (ถนนและอาคารสถานที่) ที่จะต้องถูกเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ (Geo Server) และอีกส่วนที่สำคัญคือการเรียกสืบค้นข้อมูลโดยการเขียนโค๊ดคอมพิวเตอร์แบบจาวาสคริปต์ (Java Script) ที่จะเป็นส่วนที่กำหนดการเรียกใช้งานข้อมูลแผนที่ (Map Service) มาแสดงบนเว็บบราวเซอร์ (Web Browser) ในรูปแบบการให้ข้อมูลภูมิสารสนเทศ (Web Feature Service: WFS)

3.2.2 การพัฒนาระบบ

การพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การเข้าระบบ การใช้งานระบบ และการออกจากระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 การเข้าระบบ

การเข้าใช้งานร ะบบ (Log-in) ต้นแบบในระยะการพัฒนาของระบบนี้เป็นการลงทะเบียนด้วยอีเมล (Email) ซึ่งถ้าผู้ใช้งานระบบ (User)

3.3.2.2 การใช้งานระบบ

เมื่อทำการเข้าระบบแล้ว ระบบได้ครอบคลุมการใช้งานฟังก์ชั่นต่าง ๆ คือ 1) การใช้เครื่องมือขยายเข้าออก (Zoom-in, Zoom-out) เพื่อดูรายละเอียดเชิงพื้นที่ของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชจากภาพถ่ายออร์โธ ภาพแสดงความสูงต่ำพื้นที่ และภาพพื้นที่สีเขียวของพืชพรรณ 2) การใช้เครื่องมือสืบค้นชื่ออาคารสถานที่ 3) การใช้เครื่องมือสืบค้นชื่ออาคารบ้านพัก และข้อมูลของบุคลากรที่พักอาศัยตามชุดอาคารบ้านพักของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช 4) การใช้เครื่องมือวัดขนาดความยาวและพื้นที่ และ 5) การใช้เครื่องมือเปรียบเทียบพื้นที่ใน 2 ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

3.3.2.3 การออกจากระบบ

เมื่อผู้ใช้งานใช้งานระบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้งานสามารถทำการออกจากระบบได้โดยคลิ๊กที่ปุ่มออกจากระบบ (Log-out)

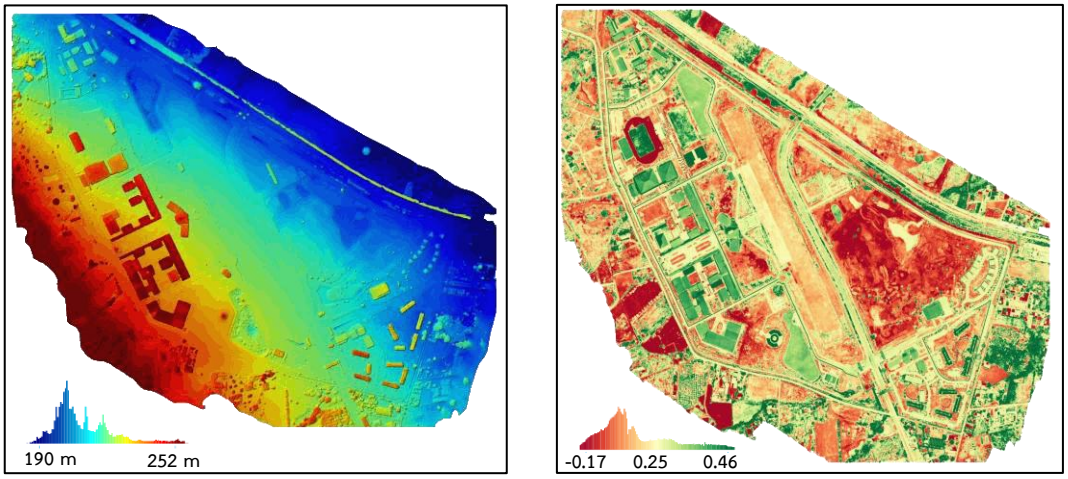
4. ผลการวิจัย

4.1 การจัดตรียมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศได้ดำเนินการจำนวนทั้งหมด 1 ครั้ง คือวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ.2567 ซึ่งผลการประมวลผลภาพบนระบบคลาวด์ของแอปพลิเคชัน Drone Deploy จะได้ข้อมูลภาพออร์โธของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมมินทกษัตริยาธิราชที่มีความละเอียดภาพ (Resolution) ที่ 3.6 เซนติเมตร/พิกเซล ดังแสดงตามรูปที่ 6

นอกจากภาพออร์โธแล้วผลการประมวลผลภาพจะได้ข้อมูลภาพแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) ที่แสดงความสูงต่ำของพื้นที่อยู่ระหว่าง 190 เมตถึง 256 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง รวมถึงภาพข้อมูลพื้นที่สีเขียว (แสดงค่าดัชนี NDVI ระหว่าง -1 ถึง +1) โดยค่าดัชนีที่มีค่าน้อยกว่า 0 ถือว่าเป็นพื้นที่ที่ไม่มีพืชพรรณอยู่ และค่าดัชนีเข้าใกล้ +1 นั้นหมายถึงพื้นที่ที่เป็นพืชพรรณ เช่น ต้นไม้ หรือ สนามหญ้าสีเขียว ดังแสดงตามรูปที่ 7

รูปที่ 6 ผลการประมวลผลภาพออร์โธ



รูปที่ 7 ผลการประมวลผลแบบจำลองความสูงและพื้นที่สีเขียว

4.2 การสร้างข้อมูลเวกเตอร์

งานวิจัยนี้จะมีการวาดเวกเตอร์ (Vector Digitizing) ในรูปแบบเส้นแทนถนน และรูปปิดแทนอาคารบ้านพักอาศัยในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งข้อมูลเวกเตอร์นั้นเป็นข้อมูลที่สามารถเชื่อมต่อกับข้อมูลสารสนเทศ (Information System) ได้ในรูปแบบของตารางที่เรียกว่า Attribute Table ที่นำมาแสดงคุณสมบัติของเวกเตอร์นั้น ๆ เช่น ชื่อถนน และชื่อของอาคารพักอาศัยโดยการสร้างข้อมูลเวกเตอร์นั้นจะต้องดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.7 ดังแสดงผลตามรูปที่ 8 และ 9

รูปที่ 8 ข้อมูลเวกเตอร์ถนน

รูปที่ 9 ข้อมูลเวกเตอร์อาคารพักอาศัย

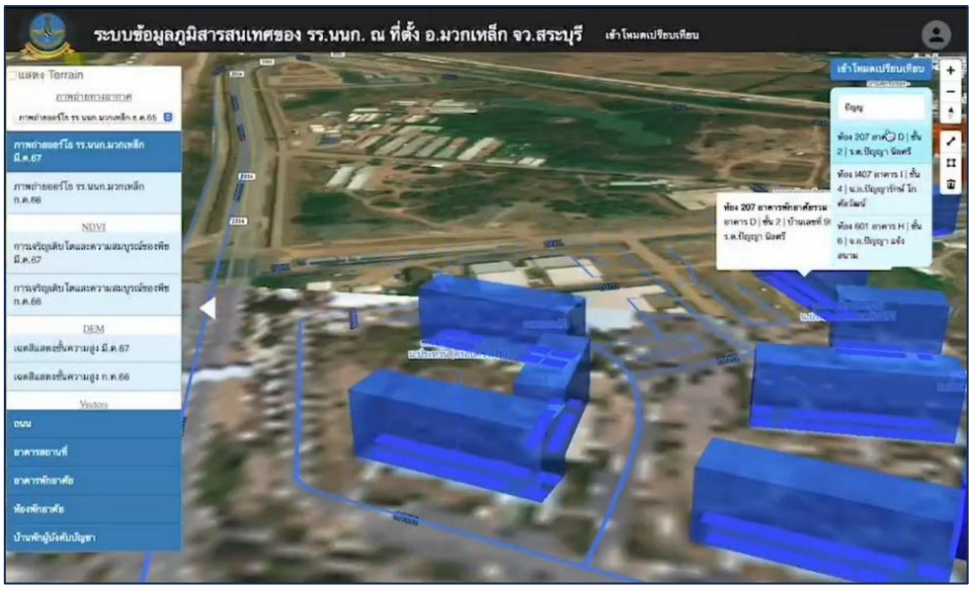
4.2 การพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่บนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

เมื่อผู้ใช้งานล็อกอินเข้าสู่ระบบผ่านอีเมล จะสามารถเข้าถึงข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ที่ครอบคลุมหลายประเภท เช่น แผนที่ภาพถ่ายออร์โธ แผนที่แสดงชั้นความสูง (DEM) สำหรับวิเคราะห์ภูมิประเทศ เส้นทางถนนที่อัปเดตเป็นประจำ และข้อมูลถนนและอาคารบ้านเรือนที่แม่นยำ โดยตัวอย่างการเรียกใช้ข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 10

รูปที่ 10 ระบบค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่บนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

4.2.1 การสืบค้นข้อมูลอาคารที่พักอาศัย

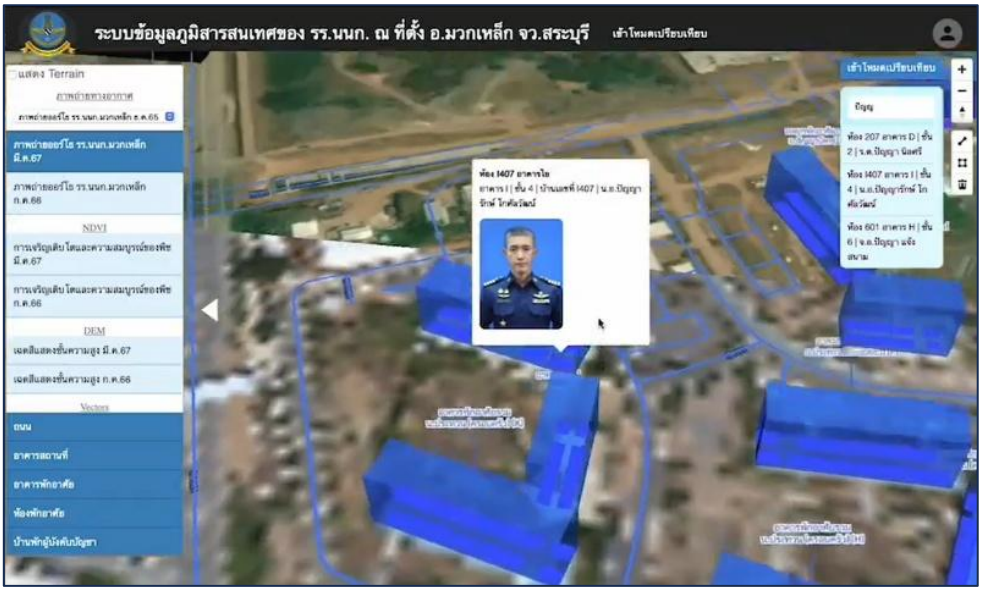
ผู้ใช้งานระบบสามารถทำการสืบค้นข้อมูลบ้านพักอาศัยของบุคลากรภายในอาคารบ้านพักที่ทำการขึ้นรูป 3 มิติจากข้อมูลเวกเตอร์ ผ่านเครื่องมือการสืบค้น ซึ่งเมื่อระบุเลขที่ของห้องพัก/ชื่ออาคารที่พัก ระบบจะนำทางและระบุตำแหน่งของห้องพัก/อาคารที่พัก พร้อมแสดงข้อมูลต่าง ๆ ที่ถูกบันทึกไว้ในตารางข้อมูล (Attribute Table) เช่น เลขที่ห้อง ชั้น ชื่ออาคาร ชื่อบุคลากร ผู้พักอาศัย เป็นต้น ดังแสดงตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 การสืบค้นข้อมูลอาคารที่พักอาศัย

4.2.2 การสืบค้นข้อมูลบุคลากร

ผู้ใช้งานระบบสามารถทำการสืบค้นข้อมูลบุคลากรที่อาศัยภายในอาคารบ้านพัก ซึ่งผลการสืบค้นจะแสดงผลโดยการระบุภาพและข้อมูลบุคคล พร้อมทั้งเลขที่ของห้องพัก/ชื่ออาคารที่พักของบุคคลนั้น ระบบจะนำทางและระบุตำแหน่งของห้องพัก/อาคารที่พัก พร้อมแสดงข้อมูลต่าง ๆ ดังแสดงตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 การสืบค้นข้อมูลบุคลากร

5. สรุป

การรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้ UAV เป็นที่มาของภาพถ่ายออร์โธ ทำให้สามารถระบุตำแหน่งและรูปร่างของโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ทำให้กระบวนการสร้างข้อมูลเวกเตอร์ต่าง ๆ เช่น ถนนและอาคารบ้านพักอาศัยในแผนที่ดิจิทัลมีความแม่นยำมากขึ้น การสร้างข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ประกอบไปด้วยภาพถ่ายทางอากาศให้เป็นเส้นถนนและขอบเขตอาคารบ้านพักอาศัยของบุคลากรแล้วนำมาซ้อนทับ (Overlay) กับแผนที่ภาพออร์โธ โดยข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ประเภทเวกเตอร์นี้สามารถฝังข้อมูลสารสนเทศ (Information) ในรูปแบบของตารางคุณสมบัติ (Attribute Table) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใส่ข้อมูลสารสนเทศของถนนและอาคารบ้านพักอาศัย รวมถึงข้อมูลบุคลากรที่พักอาศัยเก็บไว้ในรูปแบบตาราง และทำการเชื่อมข้อมูลดังกล่าวกับระบบแพลตฟอร์มค้นหาข้อมูลเชิงพื้นที่

การพัฒนาระบบนั้นกำหนดให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้งานโดยผ่านการเข้าออกระบบ (Log-in, Log-out) ด้วยอีเมล โดยฟังก์ชันหลักในการใช้งานนั้นประกอบไปด้วยการแสดงผลรายละเอียดเชิงพื้นที่ของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช สามารถขยายภาพเข้าออกดูรายละเอียดเชิงพื้นที่ได้ สามารถเปรียบเทียบสภาพพื้นที่ของ 2 ช่วงเวลาใด (อ้างอิงตามข้อมูลภาพออร์โธที่เก็บในระบบฐานข้อมูล) สามารถวัดระยะทางและขนาดพื้นที่บนพื้นที่ที่มีขนาดตามจริงบนพื้นโลกที่มีการปรับปรุงให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาระบบสืบค้นที่สามารถสืบค้นชื่ออาคารบ้านพัก ข้อมูลห้องพัก รวมถึงข้อมูลของบุคคลที่พักอาศัยในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ให้สามารถปรากฏแสดงผลออกมาในรูปแบบเชิงพื้นที่ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทัพอากาศและโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่มอบโอกาสและทุนวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาทุกท่านที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่สำหรับการศึกษาวิจัย รวมถึงขอขอบคุณบุคลากรที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย, *“วิวัฒนาการงานสำรวจของไทยจากอดีตถึงปัจจุบัน.”* [ออนไลน์]. จาก https://www.rtsd.mi.th/main/2015 (ค้นเมื่อ 14 มิถุนายน 2567).

[2] สิริพร เกรียงไรเพชร และ ชมชนก เลี้ยงวัณพร, *ภูมิศาสตร์เทคนิค: บทที่ 1 แผนที่*. กรุงเทพมหานคร: ด่านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, 2558.

[3] Brojan, V., Kannan, B., & Sivasamy, R., *“Geoinformatic tools in insect pest management.”* [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/ (Accessed: August 10, 2023).

[4] รัฐพล พรหมมาศ, “การถ่ายภาพทางอากาศ: ทางเลือกใหม่ในการสร้างสรรค์ผลงานโฆษณา,” ในการประชุมวิชาการระดับชาตินเรศวรวิจัยครั้งที่ 12, 2559, น. 2094-2105.

[5] ธราวุฒิ บุญเหลือ, “การประยุกต์ใช้เรื่องบินบังคับอัตโนมัติ เพื่อสร้างฐานข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับงานสถาปัตยกรรมผังเมือง กรณีศึกษาพื้นที่ อ.ธาตุพนม จ.นครพนม,” *วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สจล*, ปีที่ 62, ฉบับที่ 1, หน้า 137-148, 2561.

[6] National Resources Canada, *“Report on Plans and Priorities.”* [Online]. Available: https://natural-resources.canada.ca (Accessed: June 7, 2023).

การพัฒนาต้นแบบระบบภูมิสารสนเทศเพื่อบัญชาการและควบคุมงานด้านบรรเทาสาธารณภัย
Development of a GIS Prototype for Disaster Relief Operations Command and Control

เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
Kiatkulchai Jitt-Aer
Industrial Engineering and Aviation Management, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy
kiatkulchai@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบภูมิสารสนเทศ (Geographic Information System: GIS) สำหรับสนับสนุนการบัญชาการและควบคุม (Command and Control: C2) ด้านบรรเทาสาธารณภัยบนระบบดิจิทัลแพลตฟอร์มอย่างมีประสิทธิภาพ โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (Network-Centric Operations: NCO) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประสานงาน การแลกเปลี่ยนข้อมูล และการสร้างความตระหนักรู้สถานการณ์ร่วมกัน (Situational Awareness: SA) ในทีมปฏิบัติงานบรรเทาสาธารณภัยของกองทัพอากาศ

ระบบต้นแบบที่พัฒนาประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ แอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Mobile Application) สำหรับเจ้าหน้าที่ในพื้นที่ภัยพิบัติเพื่อรายงานสถานการณ์ รับคำสั่ง และสื่อสารกับส่วนกลาง และระบบการจัดการบนเว็บบราวเซอร์ (Web-Based System) สำหรับผู้บัญชาการในศูนย์ปฏิบัติการเพื่อติดตามสถานการณ์ สั่งการ วางแผน และจัดการทรัพยากร โดยใช้ฐานข้อมูลบนคลาวด์ (Cloud Database) ที่มีความปลอดภัยสูง เพื่อให้การสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลเป็นไปแบบเรียลไทม์ (Real-time) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถใช้ในการสนับสนุนการปฏิบัติงานด้านบรรเทาสาธารณภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้ผู้ใช้งานติดตามสถานการณ์แบบเรียลไทม์ รับทราบตำแหน่งของเจ้าหน้าที่ทุกฝ่าย สื่อสารและประสานงานได้รวดเร็ว เข้าถึงข้อมูลสำหรับการตัดสินใจได้แม่นยำ รวมถึงจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ได้ครอบคลุม งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยพัฒนาระบบสนับสนุนการจัดการภัยพิบัติที่มีประสิทธิภาพและเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติภารกิจบรรเทาสาธารณภัย

คำสำคัญ: ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, บรรเทาสาธารณภัย, การบัญชาการและควบคุม, เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง

Abstract

This research aims to develop a prototype Geographic Information System (GIS) to support Command and Control (C2) for disaster relief operations on a digital platform efficiently. It applies the concept of Network-Centric Operations (NCO) to enhance coordination efficiency, data exchange, and the creation of Situational Awareness (SA) among the Royal Thai Air Force disaster relief operation teams.

The developed prototype system consists of two main components: a Mobile Application for field personnel in disaster areas to report situations, receive commands, and communicate with headquarters, and a Web-Based System for commanders at the operations center to monitor situations, issue orders, plan, and manage resources. The system utilizes a highly secure Cloud Database to enable real-time communication and data exchange. The research results demonstrate that the prototype system can effectively support disaster relief operations. It enables users to monitor situations in real-time, track the positions of all personnel, communicate and coordinate rapidly, access accurate information for decision-making, and comprehensively manage spatial data. This research contributes to the development of an efficient disaster management support system that is beneficial for disaster relief mission operations.

Keywords: Geographic Information System, Disaster Relief, Command and Control, Network-Centric Operations

1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยต้องเผชิญกับความเสียหายจากภัยธรรมชาติอยู่เป็นประจำซึ่งมีระดับความรุนแรงและความเสียหายมากน้อยแตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะภูมิประเทศ ภัยพิบัติที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งได้สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนโครงสร้างพื้นฐานสภาพแวดล้อมและระบบนิเวศในพื้นที่นั้น ๆ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจทั้งในระดับท้องถิ่นจนถึงระดับภูมิภาค นอกเหนือจากความสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินแล้ว การสัญจรของประชาชน การขนส่งโลจิสติกส์ ก็เกิดปัญหาติดขัดหรือหยุดชะงัก ส่งผลต่อการดำรงชีวิตของประชาชน เกิดการขาดแคลนสินค้าและวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรม ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประชาชนและภาคธุรกิจอยู่ในระดับที่รุนแรงและยังมีผลต่อเนื่องไปถึงหน่วยงานภาครัฐและเอกชน รวมถึงการขนส่งช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติของหน่วยงานทหารด้วย

กองทัพอากาศจึงได้นำยุทธศาสตร์ ทอ.พ.ศ.2561-2580 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2568) เรื่อง แนวคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ในการปฏิบัติการช่วยเหลือบรรเทาสาธารณภัย โดยประยุกต์การใช้กำลังทางอากาศที่รองรับภัยคุกคามแบบเดิมเปลี่ยนเป็นการปฏิบัติงานเพื่อช่วยเหลือประชาชนเมื่อเกิดสถานการณ์วิกฤต ภายใต้องค์ประกอบของแนวคิด 6 องค์ประกอบ ได้แก่ การบัญชาการและควบคุม ระบบตรวจจับ หน่วยปฏิบัติเครือข่าย ระบบสนับสนุน และการบริการ และทรัพยากรบุคคลและองค์กร เพื่อเป็นการป้องกันเชิงรุกรับมือกับภัยพิบัติรูปแบบ

ต่าง ๆ ได้อย่างทันท่วงทีการเชื่อมระบบการตรวจจับและเครือข่ายเข้าด้วยกัน จะเพิ่มความรวดเร็ว ของวงรอบในการประเมินสถานการณ์ได้ด้วยความเที่ยงตรงของข้อมูลทั้งแบบเวลาจริง หรือใกล้เคียง เวลาจริง เพื่อประกอบการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสม ทำให้การบังคับบัญชาและสั่งการมี ความรวดเร็ว มีความอ่อนตัวในการวางแผนและความอ่อนตัวในการปฏิบัติการ

จากปัญหาและความจำเป็นดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบภูมิสารสนเทศสำหรับการบัญชาการและควบคุมภารกิจการบรรเทาสาธารณภัย เพื่อนำมาปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางกับการบรรเทาสาธารณภัย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกองทัพอากาศในภารกิจบรรเทาสาธารณภัย ถือเป็นจุดเริ่มต้นที่แสดงให้เห็นถึงความพร้อมของกองทัพอากาศไทยที่จะก้าวไปสู่ความเป็นกองทัพอากาศที่แข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

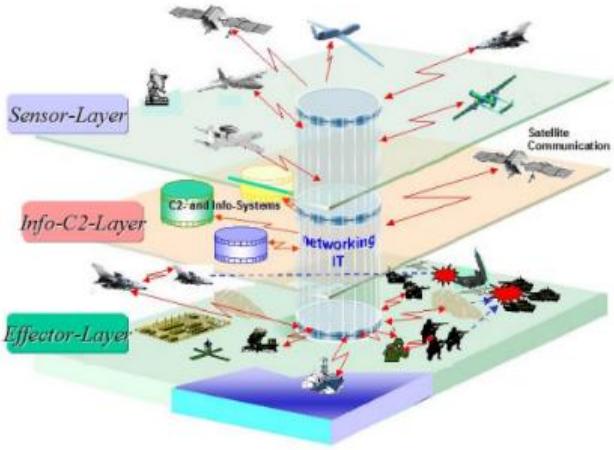
2.1 สถานการณ์สาธารณภัยของประเทศไทย

ภัยธรรมชาติและสาธารณภัยเป็นความท้าทายสำคัญที่ประเทศไทยและโลกกำลังเผชิญอยู่ โดยเฉพาะในยุคที่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทวีความรุนแรงขึ้น ส่งผลให้เกิดภัยพิบัติที่หลากหลาย ทั้งอัคคีภัย อุทกภัย ดินโคลนถล่ม แผ่นดินไหว สึนามิ ภัยแล้ง โรคระบาด ไฟป่าและหมอกควัน รวมถึงมลพิษทางอากาศประเภทฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) การเตรียมความพร้อมและจัดการกับภัยเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนเพื่อลดความสูญเสียและสร้างความยั่งยืนให้กับสังคม ซึ่งสถานการณ์สาธารณภัยดังกล่าวของประเทศไทยที่สร้างความเสียหายทั้งชีวิต ทรัพย์สิน และเศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น อุทกภัย เป็นภัยที่เกิดจากฝนตกหนักต่อเนื่อง ส่งผลให้น้ำป่าไหลหลาก น้ำท่วมฉับพลัน และน้ำล้นตลิ่ง แม้จำนวนผู้เสียชีวิตและมูลค่าความเสียหายจากอุทกภัยมีแนวโน้มลดลง แต่ความถี่และความรุนแรงของภัยยังคงเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ แผ่นดินไหวและสึนามิ เกิดจากการสั่นสะเทือนของเปลือกโลกตามแนวรอยเลื่อน โดยเหตุการณ์แผ่นดินไหวล่าสุดเมื่อเมื่อปี พ.ศ.2568 ที่ผ่านมาก็สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก และแผ่นดินไหวขนาดใหญ่อาจก่อให้เกิดสึนามิ ซึ่งเป็นคลื่นยักษ์ที่เคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงและสร้างความเสียหายรุนแรงต่อพื้นที่ชายฝั่ง เหตุการณ์สึนามิในปี พ.ศ.2547 ที่ภาคใต้ของไทยเป็นตัวอย่างที่ชัดเจนของภัยพิบัติร้ายแรงนี้ ซึ่งทำให้มีผู้เสียชีวิตถึง 5,395 ราย [1]

2.2 การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง

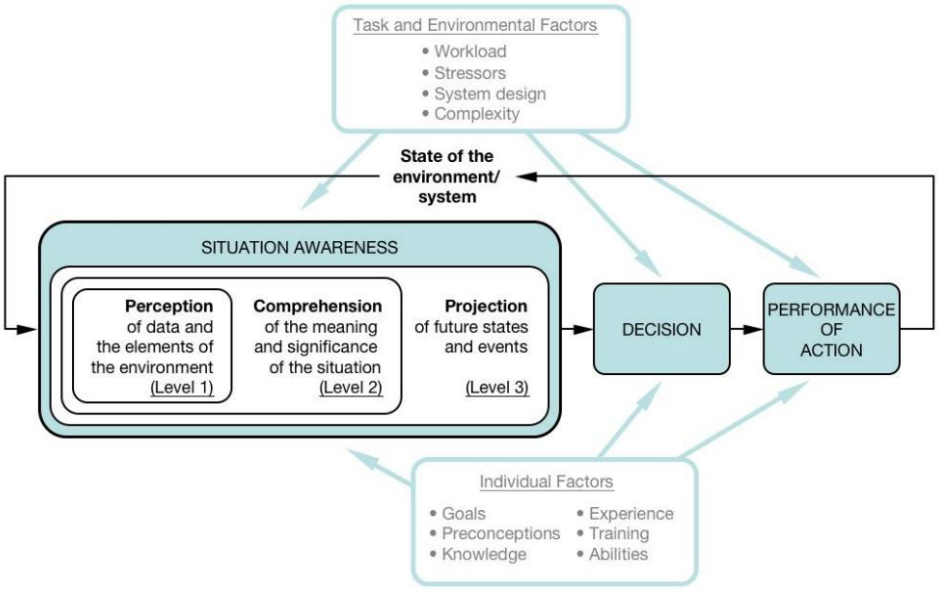
การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (Network Cenric Operation: NCO) เป็นการประยุกต์ใช้ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสารสนเทศและเครือข่ายการสื่อสาร สนับสนุนให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง ระบบตรวจจับ (Sensor) ระดับการตัดสินใจ (Decision Maker Layer) และส่วนของผู้ปฏิบัติ/หน่วยรบ (Shooter Layer) ผ่านระบบเครือข่าย ดังแสดงตามรูปที่ 1 เพื่อให้ข้อมูลข่าวสาร ภาพสถานการณ์ และคำสั่งผ่านการสื่อสารได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ และทั่วถึง สามารถตัดสินสั่งการไปยังผู้ปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง และทันต่อสถานการณ์ การตัดสินใจของผู้บังคับบัญชาที่รวดเร็วและถูกต้อง จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติภารกิจ อีกทั้งการปฏิบัติงานของหน่วยงานภาคปฏิบัติก็จะเกิดความเข้าใจและสามารถปฏิบัติได้ถูกต้องและเป็นทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้การปฏิบัติภารกิจมีประสิทธิภาพและเกิดความปลอดภัย นอกจากนั้นแล้ว หลักนิยมการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางยังสามารถประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติการทางด้านอื่น ๆ ที่มิใช่การรบด้วย [2]



รูปที่ 1 แนวคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO)

2.3 การตระหนักรู้ในสถานการณ์ร่วมกัน

การตระหนักรู้ในสถานการณ์ร่วมกัน (Situation Awareness: SA) คือ การเข้าใจในสภาพแวดล้อม หรือองค์ประกอบต่าง ๆ ในสถานการณ์ หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจที่เหมาะสม ภายในปริมาตรของเวลาและพื้นที่ ความเข้าใจในความหมายและคาดการณ์สถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นภายในอนาคตอันใกล้ [3] อันเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการตัดสินใจที่ประสบผลสำเร็จในสถานการณ์ต่างที่หลากหลายซึ่งเกี่ยวข้องกับการปกป้องชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ ตามทฤษฎีการรับรู้สถานการณ์ของ Endsley (Endsley's Cognitive Model of SA) [3] ที่ได้รับการพัฒนาโดย Dr. Mica Endsley ดังแสดงตามรูปที่ 2 ซึ่งได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง



รูปที่ 2 ทฤษฎีการรับรู้สถานการณ์ของ Endsley (Endsley's Cognitive Model of SA) (เอกสารอ้างอิง [3])

Dr. Mica Endsley ได้อธิบายถึงกระบวนการรับรู้สถานการณ์และกลไกในการประเมินสถานการณ์เพื่อการพัฒนา SA และปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับ SA ไว้ 3 ระดับ คือ

1) Perception (Level 1 SA) ระดับการรับรู้ ระดับที่ 1 เป็นขั้นตอนแรกที่จะทำให้การรับรู้สถานการณ์นั้นบรรลุความสำเร็จ ระดับการรับรู้เกี่ยวข้องกับกระบวนการเฝ้าติดตาม การตรวจจับและการจดจำเพื่อให้สามารถรับรู้ถึงองค์ประกอบของสถานการณ์ เช่น การจำแนกวัตถุ การรับรู้เหตุการณ์ เป็นต้น

2) Comprehension (Level 2 SA) ระดับความเข้าใจ ระดับที่ 2 เป็นขั้นตอนการสังเคราะห์องค์ประกอบจากขั้นตอนการรับรู้ การตีความ เพื่อแปรความหมายและทำความเข้าใจเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของสถาการณ์

3) Projection (Level 3 SA) ระดับที่ 3 เป็นขั้นตอนการคาดการณ์สถานการณ์ที่จะเกิดขึ้น โดยอาศัยการรับรู้และความเข้าใจของสถานการณ์ที่เกิดขึ้น เพื่อกำหนดว่าจะส่งผลต่อสถานะในอนาคตของสภาพแวดล้อมการปฏิบัติงานอย่างไร

2.4 เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ

เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ เป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการรวมรวมจัดเก็บการวิเคราะห์ประมวณผลตีความที่ได้จากการบูรณาการความรู้และเทคโนโลยี 3 ด้าน ซึ่งประกอบไปด้วยด้านการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing: RS) ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) และระบบดาวเทียมนำทางโลก (Global Navigation Satellite System: GNSS) เพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านเชิงพื้นที่ ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ [4] เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศจึงเป็นวิทยาการที่สำคัญที่หลายหน่วยงานได้นำมาพัฒนาประเทศในหลากหลายด้าน เช่น การจราจรและการขนส่ง ความมั่นคงทางการทหาร การใช้ประโยชน์ของการระบุพิกัดที่แน่ชัดสามารถทำให้เข้าไปช่วยเหลืออุบัติภัยทางกาอาศได้ทันท่วงที [5] ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศสามารถนำมาประกอบการวางแผนการตัดสินใจในเรื่องต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

2.4.1 การรับรู้จากระยะไกล

การได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่หรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยที่เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการได้มาของข้อมูลนั้น ๆ ไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับสิ่งที่สนใจในการศึกษา ยกตัวอย่าง ดวงตาของมนุษย์ ถือเป็นเครื่องมือในการบวนการ Remote Sensing อย่างหนึ่งที่เห็นเด่นชัดที่สุด โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์ที่เป็น Remote Sensing จะอยู่บนดาวเทียมสำรวจที่โคจรอยู่บนชั้นอวกาศ ตัวอย่างเช่น ดาวเทียม NAPA-1 และ NAPA-2 ซึ่งเป็นดาวเทียมของกองทัพอากาศไทย มีวัตถุประสงค์ในการสำรวจข้อมูลเพื่อใช้ในงานด้านบรรเทาสาธารณภัย เป็นต้น ทั้งนี้ข้อมูลได้จากจาก Remote Sensing จำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติ 3 ประการ คือ ลักษณะการสะท้อนช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Spectral characteristics) ลักษณะเชิงพื้นที่ของวัตถุบนพื้นผิวโลก (Spatial characteristics) และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวัตถุตามช่วงเวลา (Temporal characteristics) [6]

2.4.2 ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) เป็นเทคโนโลยีที่มีการระบวนการทำงานเกี่ยวข้องกับข้อมูลในเชิงพื้นที่ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ที่ใช้กำหนดข้อมูลและสารสนเทศที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งเชิงพื้นที่ เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของตารางข้อมูลและฐานข้อมูลที่มีส่วนสัมพันธ์กับข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) ซึ่งรูปแบบและความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่ทั้งหลาย จะสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วย GIS และทำให้สื่อความหมายในเรื่องการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับเวลาได้ เช่น การแพร่ขยายของโรคระบาด การเคลื่อนย้ายถิ่นฐาน

การบุกรุกทำลาย การเปลี่ยนแปลงของการใช้พื้นที่ ฯลฯ ข้อมูลเหล่านี้เมื่อปรากฏบนแผนที่ทำให้สามารถแปลและสื่อความหมาย ใช้งานได้ง่าย

2.4.3 ระบบนำทางด้วยดาวเทียมโลก

ระบบนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System: GNSS) เป็นระบบนำทางทำหน้าที่ให้ข้อมูลพิกัดบนผิวโลก โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อคำนวณ และแสดงพิกัดตำแหน่ง ณ จุดที่ตัวรับสัญญาณตั้งอยู่ จะรับสัญญาณจากดาวเทียมเพื่อหาตำแหน่ง ณ จุดใด ๆ บนโลกอ้างอิงกับระบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ ได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่จำกัดสภาพอากาศแต่อย่างใด จึงนับได้ว่าเป็นระบบนำทางที่ดีในปัจจุบัน ระบบดาวเทียมนำทางโลกทำงานได้ โดยอาศัยการรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 3 ดวง ซึ่งสามารถคำนวณ ตำแหน่งที่อยู่ในแบบ 2 มิติ คือ เฉพาะค่าในแนวราบ และหากระบบดาวเทียมนำทางโลกรับดาวเทียมได้ 4 ดวงขึ้นไป จะทราบตำแหน่งที่อยู่ในแบบ 3 มิติ คือ ตำแหน่ง และความสูง [7]

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ระบบ

การศึกษาความสามารถของระบบการบัญชาการและควบคุมที่มีใช้ในกองทัพอากาศในปัจจุบันเป็นการบัญชาการและควบคุมจากศูนย์กลางไปยังส่วนการปฏิบัติที่อยู่ส่วนหน้า โดยการส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายของกองทัพอากาศ ซึ่งทำให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างเรียบร้อย ระหว่างผู้ควบคุมสั่งการและผู้ปฏิบัติ ในบางภารกิจหน่วยปฏิบัติจำเป็นต้องมีมากกว่า 1 หน่วย อาทิเช่น การลาดตระเวน การค้นหาช่วยชีวิต การติดต่อสื่อสารระหว่างหน่วยมักใช้วิทยุสื่อสาร ซึ่งเป็นการสื่อสารทางเดียว ทำให้ความตระหนักรู้สถานการณ์ (SA) ร่วมกันขาดประสิทธิภาพ และยังมีข้อจำกัดในการแสดงผลหากเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์สมาร์ทโฟน ซึ่งถ้าหากระบบการบัญชาการและควบคุมนั้นสามารถแสดงข้อมูลได้แบบเวลาจริง (Real Time) บนอุปกรณ์สมาร์ทโฟนแล้วจะสามารถทำให้ผู้บังคับบัญชา มีข้อมูลในการตัดสินใจสั่งการได้อย่างรวดเร็วและทันท่วงทีผ่านส่วนติดต่อการใช้งานบนเว็บบราวเซอร์ (Web Browser)

3.2 การออกแบบระบบ

การกำหนดปัญหาและวิเคราะห์ความต้องการของระบบภูมิสารสนเทศเพื่อบัญชาการและควบคุมงานด้านบรรเทาสาธารณภัยบนอุปกรณ์สมาร์ทโฟน ผู้วิจัยได้นำเสนอสามารถแบ่งการออกแบบหลัก ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ส่วนเข้าสู่ระบบการใช้งาน ประกอบด้วย

1) ส่วน Sign In คือหน้าจอเข้าสู่การใช้งานโดยกำหนดว่า ก่อนที่เข้าไปใช้งานจำเป็นต้องมีขั้นตอนการยืนยันตัวตน ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูล Email และ Password

2) ส่วน Register คือหน้าจอสำหรับกรอกข้อมูลเพื่อลงทะเบียนเข้าใช้งานระบบ

3.2.2 ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ประกอบไปด้วย

1) ส่วน Join Group คือหน้าจอสำหรับให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าร่วมกลุ่ม ซึ่งถูกสร้างขึ้น สำหรับภารกิจให้สามารถแสดงตำแหน่งและการบัญชาการภารในกลุ่มที่เข้าร่วม ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูล Group Id และ Group Key

2) ส่วน Groups คือหน้าจอสำหรับให้ผู้ปฏิบัติงานเพื่อแสดงข้อมูลกลุ่มที่เข้าร่วมและรายชื่อสมาชิกภายในกลุ่ม

3) ส่วนแสดงผลในรูปแบบพิกัดตำแหน่ง คือ หน้าจอสำหรับแสดงพิกัดบนแผนที่ของผู้ปฏิบัติแต่ละคนภายในกลุ่ม รวมไปถึงการแสดงตำแหน่งพิกัดในขณะที่กำลังเคลื่อนที่

4) ส่วนควบคุมและสั่งการ คือหน้าจอสำหรับสื่อสารภายในกลุ่มเพื่อให้เกิดการตะหนักรู้สถาณการณ์ร่วมกัน

5) ส่วน Profile คือ หน้าจอสำหรับแสดงรายละเอียดของผู้ปฏิบัติรวมทั้งยังสามารถแก้ไขข้อมูลส่วนตัวได้ โดยจะแสดงข้อมูล คือ รูปภาพของผู้ปฏิบัติ (หากมี) ชื่อ อีเมล และปุ่มสำหรับออกจากระบบ (Sign Out)

3.2.3 ส่วนจัดเก็บข้อมูล

ส่วนจัดเก็บข้อมูล (Data Storage) มีหน้าที่ในการจัดการข้อมูลของส่วนตัวของผู้ปฏิบัติการ การสั่งการ การระบุตำแหน่ง โดยงานวิจัยนี้ได้ออบแบบการ การจัดเก็บ ข้อมูล บนอุปกรณ์คลาวด์คอมพิวเตอร์ที่ใช้สื่อสารผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

3.2.4 พจนานุกรมข้อมูล

พจนานุกรมข้อมูล (Data Dictionary) จาก User Diagram ที่ออกแบบไว้สามารถกำหนดรายละเอียดความสัมพันธ์ของข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 4

ตารางที่ 1 Relation : ข้อมูลการลงทะเบียน

Relation : ข้อมูล Auth					
Attribute	**Description**	**Type**	**PK**	**FK**	**Reference**
Identifier	Email	string			
Created	วันที่สร้าง	Date			
Signed In	วันที่เข้าใช้งาน	Date			
User UID	รหัสผู้ใช้งาน	string	Yes		

ตารางที่ 2 Relation : ข้อมูลผู้ปฏิบัติงาน

Relation : ข้อมูล users					
Attribute	**Description**	**Type**	**PK**	**FK**	**Reference**
Groups Joined	กลุ่มที่เข้าร่วม	string		Yes	
location	ตำแหน่งพิกัด	string			
User name	ชื่อใช้งาน	Date			
User UID	รหัสผู้ใช้งาน	string	Yes		

ตารางที่ 3 Relation : ข้อมูลกลุ่ม/ทีมปฏิบัติงาน

Relation : ข้อมูล groups					
Attribute	**Description**	**Type**	**PK**	**FK**	**Reference**
Admin UID	รหัสเจ้าของกลุ่ม	string		Yes	
Group Id	รหัสกลุ่ม	string	Yes		
Group name	ชื่อกลุ่ม	string			
members	ผู้ใช้งาน	object			

ตารางที่ 4 Relation : ข้อมูลการสื่อสาร

Relation : ข้อมูล message					
Attribute	**Description**	**Type**	**PK**	**FK**	**Reference**
Admin UID	รหัสเจ้าของกลุ่ม	string		Yes	
members	ผู้ใช้งาน	object			
message	ข้อความ	object			

3.3 การพัฒนาและทดสอบระบบ

ขั้นตอนการพัฒนาระบบ ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนการพัฒนาออกเป็น 2 ส่วนหนัก คือ ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานและส่วนของการจัดเก็บฐานข้อมูล โดยมีรายละเอียดการพัฒนาดังนี้

3.3.1 การพัฒนาในส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน ผู้วิจัยได้เลือกเครื่องมือสำหรับพัฒนา โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) เครื่องมือสำหรับการเขียนโปรแกรม VS Code ซึ่งเป็น Editor ที่มีความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มีส่วนเชื่อมต่อที่ทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างรวดเร็ว

2) เลือกใช้ React Native เป็นภาษาในการพัฒนา เนื่องจากมีโครงสร้างเดียวกับ JavaScript

3) เลือกใช้ Node JS Framework

4) เครื่องมือสำหรับการแสดงแผนที่ในระบบเป็นบริการของ Google Map API

3.3.2 การพัฒนาในส่วนฐานข้อมูล

งานวิจัยนี้ตัดสินใจเลือกใช้ Firebase Realtime Database จาก Google เป็นฐานข้อมูลหลักของระบบ เนื่องด้วยเหตุผลสำคัญหลายประการ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของงานวิจัยที่เน้นการพัฒนาอย่างรวดเร็ว (Rapid Development) และต้องการระบบ Backend ที่มีความเสถียร โดยการแสดงการจัดเก็บข้อมูลใน Firebase

Firebase เป็นฐานข้อมูล NoSQL แบบ Document-based ที่ใช้รูปแบบ JSON ในการจัดเก็บข้อมูล ทำให้สามารถจัดเก็บข้อมูลที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและหลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่จำเป็นต้องกำหนด Schema ที่เคร่งครัดล่วงหน้าเหมือนฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database) ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างข้อมูลได้ง่ายตามความต้องการ

3.3.3 การทดสอบระบบ

การทดสอบระบบ ผู้วิจัยได้แบงการทดสอบออกเป็น 2 สวน ดังนี้

1) ทดสอบเพื่อหาข่อผิดพลาดของโปรแกรมได้ทำการทดสอบด้วยยตนเองและผู้เชียวชาญทางด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์ ทำการทดสอบพรอมกับขั้นตอนการพัฒนาระบบ โดยทดสอบแต่ละฟงกชัน (Unit Testing) และการทำงานร่วมกันระหว่างฟังกชัน (Integration Testing) พร่อมทั้งทำการแกไข (Debug) ให้ถูกต่อง เพื่อให้โปรแกรมทำงานได้ถูกตองมากที่สุด

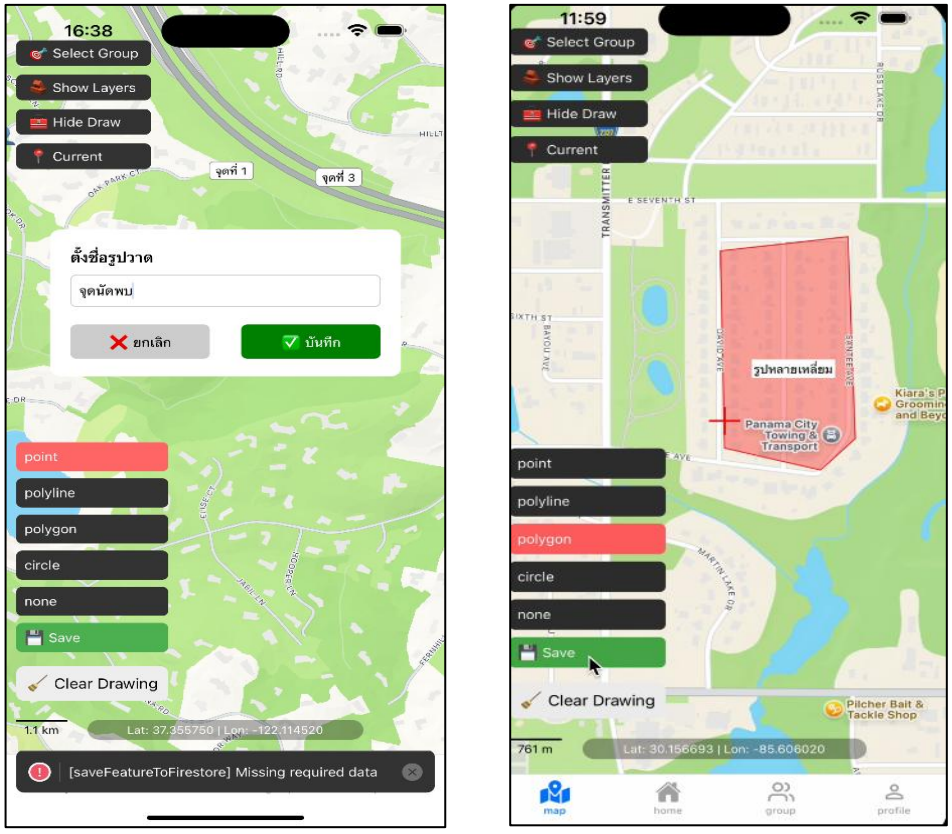
2) ทดสอบโดยกลุมผู้งาน (Acceptance Testing) โดยนำระบบระบบภูมิสารสนเทศเพื่อสนับสนุนระบบการบัญชาการและควบคุมในการปฏิบัติการโดยใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางของกองทัพอากาศ ให้ผู้ใช้งานจำนวน 5 คน ได้ทดลองใช้เพื่อหาข้อผิดพลาด

4. ผลการวิจัย

4.1 ระบบต้นแบบโมบายแอปพลิชัน

4.1.1 เมนูการจัดการกลุ่มและการแสดงผล

ส่วนบนของหน้าจอจะมีเมนูควบคุมการแสดงผลและการจัดการข้อมูล ประกอบด้วย "Select Group" ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกดูข้อมูลของกลุ่มต่าง ๆ ได้ตามสิทธิ์การเข้าถึง "Show Layers" ที่ใช้สำหรับการควบคุมการแสดงชั้นข้อมูล (Data Layers) ต่าง ๆ บนแผนที่ เช่น ข้อมูลพื้นฐาน หรือข้อมูลโครงสร้างพื้นฐาน และ "Hide Draw" ที่ใช้ในการซ่อนหรือแสดงเครื่องมือการวาดบนแผนที่ นอกจากนี้ยังมี "Current" ที่แสดงสถานะปัจจุบันของระบบหรือข้อมูลที่กำลังแสดงอยู่ ดังแสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ส่วนชุดเครื่องมือการจัดการเชิงพื้นที่

4.1.2 กล่องโต้ตอบการสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่

ในส่วนกลางของหน้าจอจะแสดงกล่องโต้ตอบ (Dialog Box) สำหรับการป้อนข้อมูลเชิงพื้นที่ที่กำลังสร้าง ประกอบด้วยช่อง "ตั้งชื่อรูปร่าง" สำหรับการตั้งชื่อให้กับองค์ประกอบทางภูมิศาสตร์ที่สร้างขึ้น เช่น พื้นที่เสี่ยง เส้นทางเสียหาย หรือ จุดอพยพ และช่อง "หมายเหตุ" สำหรับการเพิ่มรายละเอียดหรือคำอธิบายเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบนั้น ด้านล่างจะมีปุ่ม "ยกเลิก" และ "บันทึก" สำหรับการจัดการการดำเนินการ

4.1.3 ชุดเครื่องมือวาดและสร้างรูปร่าง

ในส่วนซ้ายล่างของหน้าจอจะมีแถบเครื่องมือ (Toolbar) ที่ประกอบด้วยเครื่องมือสำหรับการสร้างองค์ประกอบทางภูมิศาสตร์ต่าง ๆ ได้แก่ "point" สำหรับการสร้างจุดสำคัญ เช่น จุดเช็คพอยต์ ตำแหน่งเป้าหมาย หรือจุดรวมพล "polyline" สำหรับการสร้างเส้น เช่น เส้นทางการเดินทาง เส้นแบ่งพื้นที่ หรือแนวป้องกัน "polygon" สำหรับการสร้างพื้นที่หรือรูปหลายเหลี่ยม เช่น พื้นที่ปฏิบัติการ โซนอันตราย หรือพื้นที่ควบคุม และ "circle" สำหรับการสร้างพื้นที่รัศมี เช่น พื้นที่ความปลอดภัย พื้นที่แพร่กระจาย หรือพื้นที่ภัยพิบัติ

4.1.4 ฟีเจอร์การจัดการข้อมูล

ระบบมี "none" ที่ใช้สำหรับการยกเลิกการเลือกเครื่องมือใด ๆ และกลับสู่โหมดการดูแผนที่ปกติ ปุ่ม "Save" ที่ใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่สร้างขึ้นลงในฐานข้อมูล Firebase เพื่อให้สมาชิกอื่นในกลุ่มสามารถเห็นและใช้งานได้ร่วมกัน และ "Clear Drawing" ที่ใช้สำหรับการล้างหรือลบรูปร่างที่วาดไว้บนแผนที่ทั้งหมด

4.1.5 ข้อมูลตำแหน่งและการแสดงผลแผนที่

ด้านล่างสุดของหน้าจอจะแสดงข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของผู้ใช้งาน โดยแสดงค่าละติจูด (Lat: 37.785730) และลองจิจูด (Lon: -122.410920) ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถประมาณระยะทางบนแผนที่ได้อย่างแม่นยำ พร้อมด้วยถนนและโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ

4.2 ระบบจัดการบนเว็บบราวเซอร์

ระบบจัดการบนเว็บบราวเซอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบภูมิสารสนเทศที่ออกแบบมาเพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการโดยใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) ในงานบรรเทาสาธารณภัย ระบบนี้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการตัดสินใจ (Decision Hub) ที่ช่วยให้ผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่ระดับสูงสามารถเข้าถึงข้อมูลสถานการณ์แบบเรียลไทม์และสร้างการตระหนักรู้สถานการณ์ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

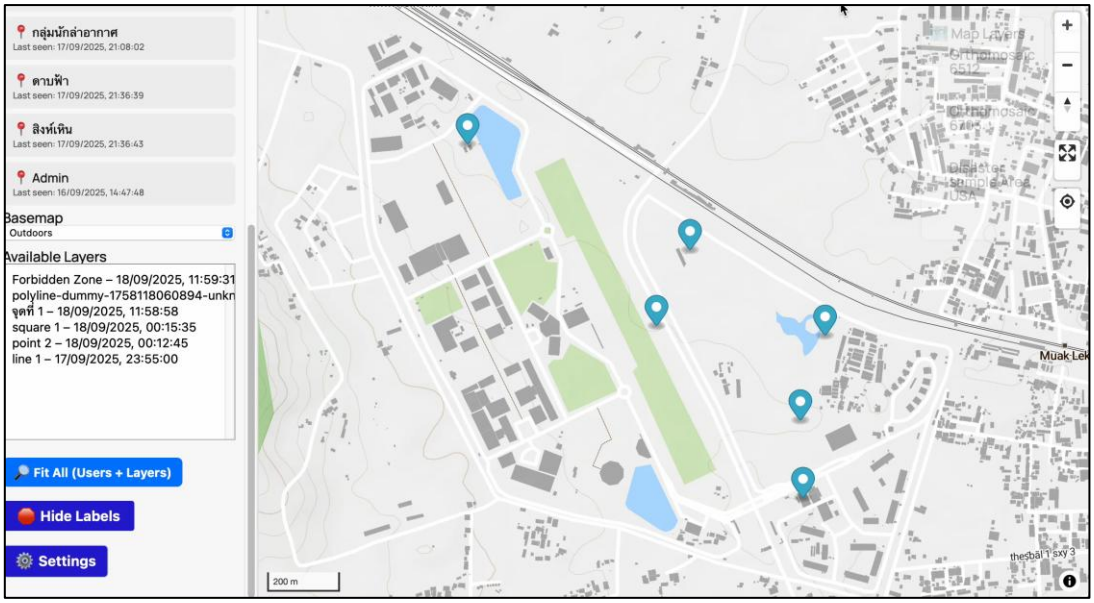
ระบบจัดการบนเว็บบราวเซอร์นี้จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยยกระดับความสามารถในการบัญชาการและควบคุมให้ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวคิดการปฏิบัติการโดยใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางที่เน้นการแบ่งปันข้อมูล การสร้างการตระหนักรู้ร่วมกัน และการตัดสินใจแบบกระจายอำนาจที่รวดเร็วและแม่นยำ โดยระบบจัดการบนเว็บบราวเซอร์มีการพัฒนาตามองค์ประกอบต่อไปนี้

4.2.1 การสนับสนุนการปฏิบัติการโดยใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง

ระบบเว็บบราวเซอร์นี้เป็นการประยุกต์ใช้แนวคิดการปฏิบัติการโดยใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) โดยการเชื่อมโยงหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ เข้าด้วยกันผ่านเครือข่ายข้อมูลเดียว ทำให้เกิดการไหลเวียนของข้อมูลแบบราบรื่นและการประสานงานที่มีประสิทธิภาพ ระบบช่วยให้การตัดสินใจเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเนื่องจากผู้บังคับบัญชาสามารถเข้าถึงข้อมูลจากหลายแหล่งพร้อมกัน ได้แก่ ข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการในพื้นที่ ข้อมูลจากระบบสำรวจ และข้อมูลจากหน่วยสนับสนุน

4.2.2 แผนที่สถานการณ์ร่วมกันแบบเวลาจริง

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าแผนที่ Springfield ที่แสดงในส่วนกลางเป็นแผนที่สถานการณ์ร่วมกัน (Common Operational Picture: COP) ที่อัปเดตข้อมูลแบบเรียลไทม์ แผนที่นี้แสดงข้อมูลจากหลายแหล่งที่รวมเข้าด้วยกัน ทำให้ทุกคนที่เข้าถึงระบบจะเห็นภาพสถานการณ์เดียวกัน ข้อมูลที่แสดงรวมถึงตำแหน่งของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ เส้นทางอพยพ พื้นที่เสี่ยงภัย และโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ การมีแผนที่ร่วมกันนี้ช่วยลดความเข้าใจผิดและเพิ่มประสิทธิภาพในการประสานงาน



รูปที่ 4 เว็บบราวเซอร์ในระบบบัญชาการและควบคุมงานด้านบรรเทาสาธารณภัย

4.2.3 การสนับสนุนการตระหนักรู้สถานการณ์ร่วมกัน

ระบบสร้างการตระหนักรู้สถานการณ์ร่วมกันผ่านการรวมข้อมูลจากหลายแหล่งและแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่าย ในส่วน "Field Operators" จะแสดงสถานะของเจ้าหน้าที่แต่ละคน รวมถึงเวลาที่ออนไลน์ล่าสุด ซึ่งช่วยให้ผู้บังคับบัญชาทราบว่าใครพร้อมปฏิบัติงานและใครอาจต้องการความช่วยเหลือ ส่วน "Communication Rooms" แสดงช่องทางการสื่อสารต่าง ๆ พร้อมจำนวนข้อความที่ยังไม่ได้อ่าน ทำให้สามารถติดตามการสื่อสารได้อย่างครอบคลุม

4.2.4 ระบบชั้นข้อมูลแบบไดนามิก

ในส่วน "Available Layers" ระบบแสดงชั้นข้อมูลต่าง ๆ ที่สามารถเปิด-ปิดได้ตามความต้องการ เช่น "escape route - 17/09/2023, 18:40:15" ที่แสดงเส้นทางหลบหนีพร้อมเวลาที่อัปเดต การมีข้อมูลเวลาที่ชัดเจนช่วยให้ผู้ใช้ทราบว่าข้อมูลมีความเป็นปัจจุบันเพียงใด ซึ่งสำคัญมากในสถานการณ์ฉุกเฉินที่สถานการณ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

4.2.5 การประสานงานแบบเครือข่าย

ระบบช่วยให้การประสานงานเกิดขึ้นในหลายระดับพร้อมกัน ระดับยุทธศาสตร์ (Strategic Level) ที่ผู้บังคับบัญชาสูงสุดใช้ในการตัดสินใจนโยบายและการจัดสรรทรัพยากรใหญ่ ระดับยุทธวิธี (Tactical Level) ที่หัวหน้าทีมใช้ในการวางแผนและสั่งการ และระดับเทคนิค (Technical Level) ที่เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการใช้ในการรายงานสถานการณ์และขอความช่วยเหลือ

4.2.6 การจัดการข้อมูลแบบบูรณาการ

ระบบรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ได้แก่ ข้อมูล GPS จากอุปกรณ์มือถือ ข้อมูลจากกล้องวงจรปิด ข้อมูลจากเซ็นเซอร์สิ่งแวดล้อม ข้อมูลจากสื่อสารมวลชน และข้อมูลจากประชาชน การบูรณาการข้อมูลเหล่านี้ช่วยสร้างภาพสถานการณ์ที่สมบูรณ์และน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ ระบบช่วยเพิ่มความเร็วในการตอบสนองฉุกเฉิน โดยการลดเวลาในการค้นหาข้อมูล ลดขั้นตอนการสื่อสาร และเพิ่มความแม่นยำในการตัดสินใจ เมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน ระบบสามารถแสดงทรัพยากรที่ใกล้ที่สุด กำหนดเส้นทางที่เหมาะสม และประสานงานระหว่างหน่วยต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

5. สรุป

การวิจัยนี้ได้สร้างต้นแบบระบบภูมิสารสนเทศที่สามารถสนับสนุนการปฏิบัติการแบบเครือข่ายเป็นศูนย์กลางของกองทัพอากาศในภารกิจบรรเทาสาธารณภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยการพัฒนา 2 ส่วนใหญ่สำคัญ คือ ระบบโมบายแอปพลิเคชันและระบบเว็บบราวเซอร์

ระบบโมบายแอปพลิเคชัน ประกอบด้วย 7 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วน Sign In สำหรับการยืนยันตัวตนก่อนเข้าใช้งานระบบ (2) ส่วน Register เพื่อลงทะเบียนผู้ใช้งานใหม่ (3) ส่วน Join Group สำหรับเข้าร่วมกลุ่มปฏิบัติการ (4) ส่วน Group Details เพื่อแสดงรายละเอียดกลุ่มและสมาชิก (5) ส่วนแสดงผลในรูปแบบพิกัดตำแหน่งด้วย GPS Tracking แบบเรียลไทม์บน Google Maps และภาพถ่ายทางอากาศ (ข้อมูลประเภท Raster) (6) ส่วนควบคุมและสั่งการผ่านระบบแชทที่รองรับทั้งข้อความและรูปภาพ และ (7) ส่วนชุดเครื่องมือการจัดการเชิงพื้นที่ที่สามารถสร้างจุด (Point) เส้น (Line & Polyline) และพื้นที่ (Polygon & Circle) บนแผนที่ฐาน

ระบบเว็บบราวเซอร์ ได้รับการพัฒนาเพื่อสนับสนุนผู้บังคับบัญชาระดับสูงในการบัญชาการและควบคุมสถานการณ์ โดยมีการแสดงแผนที่สถานการณ์ร่วมกันแบบเวลาจริง (Common Operational Picture: COP) การจัดการห้องสื่อสาร (Communication Rooms) การติดตามสถานะเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ (Field Operators) และระบบจัดการชั้นข้อมูลแบบไดนามิก (Dynamic Layer Management)

ความสำเร็จในการสนับสนุนการปฏิบัติการแบบเครือข่าย ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถสนับสนุนแนวคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเชื่อมโยงระบบตรวจจับ (Sensor Layer) ผ่านข้อมูลตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ และการรายงานสถานการณ์ ส่วนบัญชาการ (Decision Layer) ผ่านระบบเว็บบราวเซอร์ และส่วนปฏิบัติการ (Shooter Layer) ผ่านโมบายแอปพลิเคชันเข้าด้วยกันผ่านระบบเครือข่าย (Network) ที่ใช้ Firebase เป็นศูนย์กลาง

การสร้างการตระหนักรู้สถานการณ์ร่วมกัน ระบบสามารถสร้างการตระหนักรู้ร่วมกัน (SA) ได้สำเร็จตามทฤษฎี Endsley's Cognitive Model ทั้ง 3 ระดับ คือ การรับรู้ (Perception) ผ่านการแสดงตำแหน่งและข้อมูลแบบเรียลไทม์ ความเข้าใจ (Comprehension) ผ่านการแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนที่และการสื่อสาร และการคาดการณ์ (Projection) ผ่านเครื่องมือวิเคราะห์เชิงพื้นที่และการติดตามแนวโน้มของสถานการณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทัพอากาศและโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่มอบโอกาสและทุนวิจัย และที่สำคัญผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาและกลั่นกรองโครงการทุกท่าน ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา ตลอดจนมอบความกรุณาดูแลเอาใจใส่ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาทุกท่านที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่สำหรับการศึกษาวิจัยรวมถึงขอขอบคุณบุคลากรที่เกี่ยวข้อง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมบรรเทาและป้องกันสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย, *“แผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ พ.ศ.2564 – 2570”*, หน้า 38, 2565.

[2] กองทัพอากาศ, *“ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 - 2580) ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2568”*, หน้า 41, 2568.

[3] Endsley, M.R., “Toward a theory of situation awareness in dynamic systems.”, *Human Factors,* 37 (1), page 32–64, 1995.

[4] วาทินี ถาวรธรรม, *“เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 1).”*, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), 2552.

[5] ชัญญาวัจน์ สถิตภัทรสมบัติ และภูมิพัฒน์ ดวงกลาง, “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์ในการติดตามอากาศยานสำหรับการค้นหาและช่วยชีวิต.”, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 17, หน้า 60-70, 2564.

[6] อัญญา บูชายันต์, วนมพร พาหะนิชย์, และภูมิ สาทสินธุ์, “เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศกับการรู้เรื่องภูมิศาสตร์.”, *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 2, หน้า 385-397, 2561.

[7] Jeffrey Charles, *“An Introduction to GNSS.”*, Canada : NovAtel. 2510.

แนวทางการรับมือต่อผลกระทบของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์กองทัพอากาศ

Guidelines for Addressing the Impact of Artificial Intelligence Technology on the Cybersecurity of the Royal Thai Air Force

นาวาอากาศโท รองศาสตราจารย์ ดร.พายัพ ศิรินาม
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
Wing Commander Associate Professor Dr.Payap Sirinam
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy
payap_siri@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ โดยเป็นการวิจัยเชิงเอกสาร โดยผลการศึกษาพบว่า AI มีผลกระทบเชิงบวกที่ช่วยยกระดับศักยภาพในการตรวจจับและรับมือภัยคุกคามทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ รวมทั้งช่วยวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ และผลเชิงลบจากภัยคุกคามรูปแบบใหม่ เช่น มัลแวร์อัจฉริยะและสื่อปลอม (Deepfake) ที่ทำให้ขอบเขตภัยคุกคามทางไซเบอร์ขยายตัวมากขึ้น

ผลการวิจัยผ่านกระบวนการวิเคราะห์ SWOT และการจัดทำ TOWS Matrix แสดงให้เห็นว่า กองทัพอากาศมีจุดแข็งสำคัญคือ โครงสร้างพื้นฐาน IT ที่ค่อนข้างมีความพร้อมในงานด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ รวมถึงบุคลากรในระดับปฏิบัติการที่มีทักษะความสามารถ และได้รับการอบรมอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ยังพบจุดอ่อนที่สำคัญ ได้แก่ การไม่มีหน่วยงานเฉพาะทางที่รับผิดชอบด้าน AI Security อย่างชัดเจน รวมถึงยังขาดแผนยุทธศาสตร์ในการบูรณาการ AI และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ขณะที่ปัจจัยภายนอกพบว่า มีโอกาสสำคัญที่เกิดจากนโยบายสนับสนุนการพัฒนา AI ของรัฐบาล และแนวโน้มความร่วมมือระหว่างประเทศที่มากขึ้น ส่วนภัยคุกคามสำคัญได้แก่ ความเร็วในการพัฒนา AI ที่รวดเร็วจนอาจทำให้กองทัพอากาศปรับตัวไม่ทัน รวมถึงการแข่งขันด้านบุคลากรที่มีความรู้สูงด้าน AI และความเสี่ยงที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนข้อมูลในระดับระหว่างประเทศที่อาจกระทบต่อความมั่นคงของข้อมูลที่มีความอ่อนไหวทางทหาร ผู้วิจัยได้เสนอกลยุทธ์ทั้งกลยุทธ์เชิงรุก เช่น การพัฒนาและใช้งานระบบ AI เพื่อตรวจจับภัยไซเบอร์แบบเรียลไทม์ และสร้างเครือข่ายการวิจัยและพัฒนาร่วมกับองค์กรภายนอก รวมทั้งกลยุทธ์เชิงรับ เช่น การจัดทำแผนยุทธศาสตร์ด้าน AI และความมั่นคงไซเบอร์ การพัฒนาระเบียบและมาตรฐานภายในเพื่อรองรับความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของ AI พร้อมทั้งการจัดตั้งหน่วยงานเฉพาะด้าน AI Security และให้ความสำคัญกับการพัฒนาทักษะและความรู้ของกำลังพลทุกระดับ

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์, กองทัพอากาศ

Abstract

This research aims to investigate the impacts of Artificial Intelligence (AI) technology on cybersecurity within the Royal Thai Air Force (RTAF) through documentary research methodology. Findings indicate that AI has positive impacts by significantly enhancing real-time cybersecurity threat detection capabilities and improving big data analysis. However, it also introduces new types of cybersecurity threats, such as intelligent malware and deepfake content, resulting in an expanded cybersecurity threat landscape.

The analysis using SWOT and the TOWS Matrix reveals that the RTAF has notable strengths, including robust IT infrastructure well-equipped for cybersecurity operations and skilled operational personnel who receive continuous training. Nevertheless, critical weaknesses were identified, particularly the lack of a dedicated organizational unit responsible specifically for AI security and the absence of an integrated strategic plan addressing both AI and cybersecurity comprehensively. External analysis identified significant opportunities arising from supportive governmental policies promoting AI development and increasing international collaboration. Meanwhile, key external threats include the rapid pace of AI advancements potentially outstripping the RTAF's adaptation capacity, fierce competition for highly skilled AI professionals, and risks associated with international data exchanges potentially compromising sensitive military information. Consequently, the researcher proposed proactive strategies, such as developing and deploying AI-based systems for real-time cybersecurity threat detection and establishing research networks with external organizations. Additionally, defensive strategies were recommended, including the creation of a comprehensive AI-cybersecurity strategic plan, developing internal standards and procedures adaptable to rapid technological advancements, establishing a dedicated AI security unit, and emphasizing ongoing skills development and knowledge enhancement across all personnel levels.

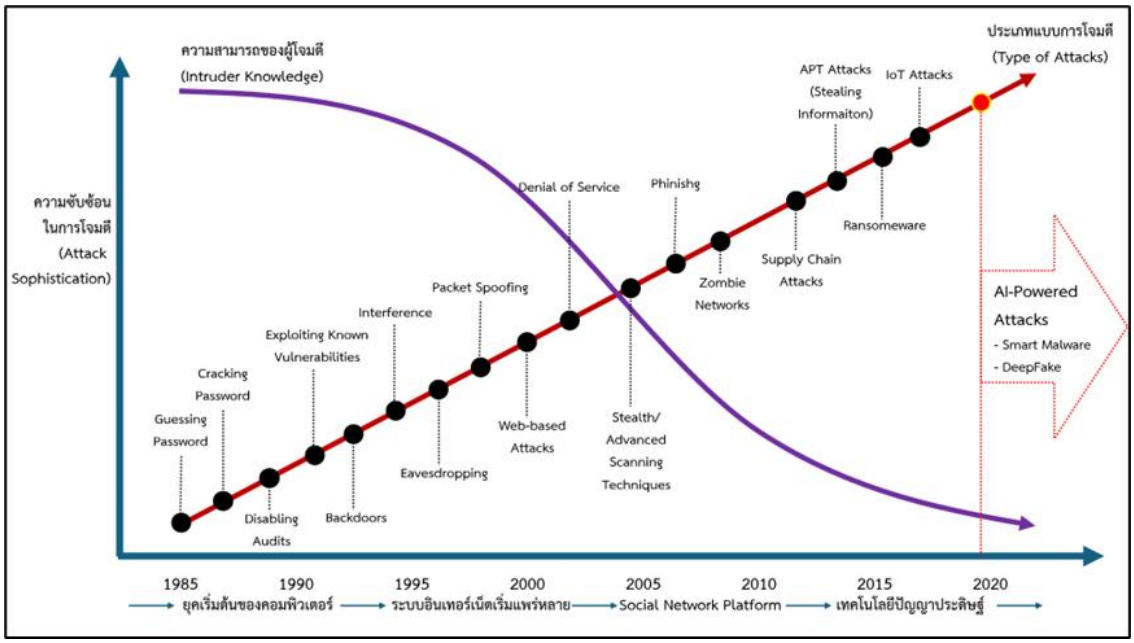
Keywords: Artificial Intelligence (AI), Cybersecurity, Royal Thai Air Force (RTAF)

1. บทนำ

กองทัพอากาศมุ่งมั่นสู่การเป็น “Unbeatable Air Force” [3] ผ่านการพัฒนาขีดความสามารถใน 3 มิติหลัก ได้แก่ มิติทางอากาศ มิติไซเบอร์ และมิติอวกาศ ซึ่งสอดคล้องกับหลักนิยมปฏิบัติการกองทัพอากาศ พ.ศ. 2566 [4], ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561 - 2580) [17], ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2568 [5] และนโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศประจำปี 2567 [6] ที่ล้วนให้ความสำคัญต่อการพัฒนาขีดความสามารถด้านไซเบอร์

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในหลายภาคส่วน [66] รวมถึงกระทรวงกลาโหม [19] และกองทัพอากาศ ซึ่ง AI ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เช่น การ

ตรวจจับและตอบสนองต่อภัยคุกคามที่รวดเร็วและแม่นยำขึ้น [79] อย่างไรก็ตาม การพัฒนาที่รวดเร็วของ AI กลับสร้างภัยคุกคามรูปแบบใหม่ เช่น การโจมตีทางไซเบอร์แบบอัตโนมัติ, มัลแวร์ที่ปรับตัวเองได้, และการผลิตข้อมูลข่าวสารปลอม (Deepfakes) ที่สามารถบ่อนทำลายความมั่นคงของชาติ [21, 32] ปัจจุบัน เทคนิคการโจมตีมีความรุนแรงและมีศักยภาพมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 [81]



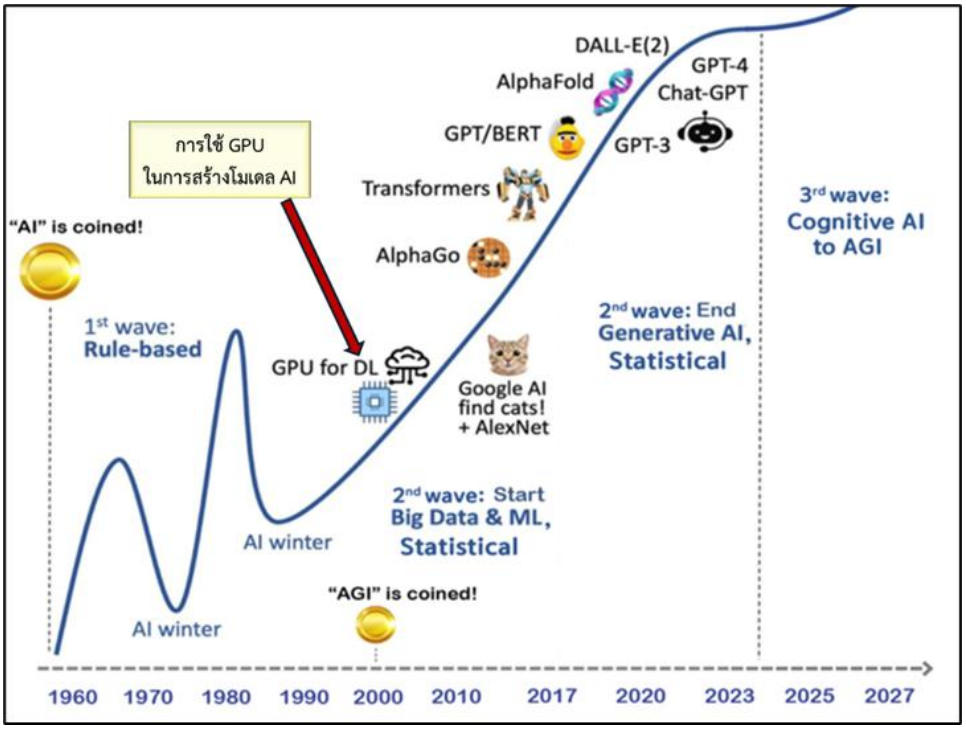
รูปที่ 1 แนวโน้มของการโจมตีทางไซเบอร์จากปี 1985 – 2020 [81]

ดังนั้น การศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางการรับมือต่อผลกระทบของเทคโนโลยี AI อย่างชาญฉลาด ผ่านการวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับใช้ให้เหมาะสมกับบริบทและสภาพแวดล้อมของกองทัพอากาศ ย่อมมีส่วนสำคัญในการเสริมสร้างความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศอย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI)

AI เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้อุปกรณ์ประมวลผลสามารถเรียนรู้จากข้อมูลเพื่อสร้างโมเดลการตัดสินใจที่ชาญฉลาด [68] โดยมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และเรียนรู้รูปแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [72] วิวัฒนาการของ AI เริ่มต้นจากการทดสอบทัวริง (Turing Test) [82] แต่ถูกจำกัดด้วยพลังการประมวลผล [55] จนกระทั่งการกำเนิดของหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) ได้ก้าวข้ามขีดจำกัดนี้ [57, 64] ดังรูปที่ 2 นำไปสู่การพัฒนาการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning: DL) [51] จนถึงปัจจุบันในยุคของ Generative AI และ ChatGPT ที่มุ่งสู่ปัญญาประดิษฐ์ทั่วไป (AGI) [53, 65, 70, 72, 83] อย่างไรก็ตาม AI ยังมีความท้าทายด้านจริยธรรม, ความเป็นส่วนตัว, อคติของอัลกอริทึม และการนำไปใช้ในทางที่ผิด [39, 50, 52]



รูปที่ 2 วิวัฒนาการและความก้าวหน้าของ AI ตามห้วงเวลา [83]

2.2 ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ (Cybersecurity)

ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งในยุคปัจจุบัน เนื่องจากการโจมตีทางไซเบอร์สามารถส่งผลกระทบร้ายแรงต่อความมั่นคงของชาติได้ [49, 78] ประเทศไทยจึงได้ออก พรบ.การรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ พ.ศ.2562 และจัดตั้งสำนักงานคณะกรรมการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์แห่งชาติ (สกมช.) [18]

ภัยคุกคามในปัจจุบันมีความซับซ้อนสูง [40, 54, 62] เช่น การโจมตีแบบ Advanced Persistent Threats (APTs) ซึ่งเป็นการโจมตีที่ซับซ้อนและมีเป้าหมายเฉพาะ มักใช้เวลาในการเจาะระบบเป็นเดือนหรือปี [76] (เช่น Stuxnet [27] หรือ SolarWinds [41]), การโจมตีข้อมูลผ่านการเรียกค่าไถ่ (Ransomware) (เช่น WannaCry [59]), และการโจมตีแบบ Distributed Denial of Service (DDoS) ซึ่งเป็นการโจมตีที่ทำให้ระบบเป้าหมายไม่สามารถให้บริการได้ [28] ในขณะที่การป้องกันก็พัฒนาเช่นกัน เช่น การข่าวกรองภัยคุกคามทางไซเบอร์ (CTI) [56] และการพัฒนาฮาร์ดแวร์/ซอฟต์แวร์ป้องกันใหม่ๆ [54, 84] แม้จะยังมีความท้าทายจากความซับซ้อนของระบบ [38] และการขาดแคลนบุคลากร [9]

2.3 ผลกระทบของ AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์

AI ส่งผลกระทบทั้งเชิงบวกและเชิงลบ [14] ผลกระทบเชิงบวก: AI ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับภัยคุกคาม [42, 73] การวิเคราะห์เชิงคาดการณ์เพื่อระบุจุดอ่อน [37], และลดภาระงานของมนุษย์ [16] ตัวอย่างเช่น การใช้ AI ในโครงการ MITRE ATT&CK ซึ่งเป็นฐานข้อมูลด้านภัยคุกคามที่รวบรวมยุทธวิธีและเทคนิคของแฮกเกอร์ [33, 75] หรือการที่ สกมช. ใช้ AI ตรวจจับ DDoS [22]

ผลกระทบเชิงลบ: AI ถูกใช้สร้างการโจมตีที่ทรงพลังขึ้น เช่น การสร้างบอทฟิชชิ่ง [46], มัลแวร์ที่หลบเลี่ยงการตรวจจับ (Adaptive Malware) [25, 74], การโจมตีระบบ AI ด้วยกันเอง (Adversarial Attacks) [43, 63] และความเสี่ยงด้านความเป็นส่วนตัว [48] โดยเฉพาะการใช้ Generative AI และ Large Language Models (LLMs) เพื่อ

สร้างเนื้อหาหลอกลวง [15, 44-45] เช่น Deepfake ปลอมเสียงผู้บริหาร [80] หรือผู้บังคับบัญชาทหาร [35] และการสร้างบอทโซเชียลมีเดียเพื่อเผยแพร่ข่าวปลอม [34, 71]

2.4 มาตรฐานและแนวทางที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน AI: ปัจจุบันมีมาตรฐานสากล เช่น ISO/IEC 22989 (คำศัพท์), ISO 42001 (การจัดการ) และ NIST AI Risk Management Framework (AI RMF) [61] สำหรับประเทศไทย มีแผนปฏิบัติการด้าน AI แห่งชาติ (พ.ศ. 2565 - 2570) [2] และแนวปฏิบัติจริยธรรมด้าน AI [24] มาตรฐาน Cybersecurity: มาตรฐานสากลที่สำคัญคือ ISO/IEC 27000 Series (เช่น 27001, 27002, 27005) [47] และ NIST Cybersecurity Framework [60]

สำหรับบริบทกองทัพอากาศ: ในประเทศไทยมี พรบ.การรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ พ.ศ. 2562 [18] ซึ่ง สกมช. ได้ออกประกาศและแนวทางปฏิบัติต่างๆ [21, 23] ในส่วนของกระทรวงกลาโหม มีแผนการพัฒนาด้านไซเบอร์เพื่อความมั่นคง [1] และกองทัพอากาศ มีระเบียบว่าด้วยการรักษาความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ พ.ศ. 2563 [7] อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กองทัพอากาศยังไม่มีแนวทางหรือระเบียบที่บูรณาการการรับมือผลกระทบของ AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์โดยตรง

2.5 แนวทางการรับมือผลกระทบ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบแนวทางการรับมือ 3 มิติหลัก ได้แก่ มิติด้านเทคโนโลยี: ลงทุนในเครื่องมือที่ขับเคลื่อนด้วย AI [29-30] เพื่อเพิ่มอัตราการตรวจจับการบุกรุก และพัฒนาระบบตอบสนองอัตโนมัติ (Automated Response) เพื่อกักกันภัยคุกคาม และใช้ AI ในศูนย์ปฏิบัติการความมั่นคงไซเบอร์ (SOC) เพื่อประมวลผลข้อมูล Log จำนวนมหาศาล [81] มิติด้านบุคลากร: ลงทุนกับการฝึกอบรมทักษะ AI ควบคู่กับไซเบอร์ [58, 67] เพื่อให้บุคลากรตระหนักถึงภัยคุกคามที่ขับเคลื่อนด้วย AI ดังตัวอย่างโครงการ AI Cyber Challenge (AIxCC) ของ DARPA [26] หรือหลักสูตรของ TDGA [20] และความร่วมมือระหว่าง สกมช. กับไมโครซอฟท์ [16] และมิติด้านนโยบาย: กำหนดกรอบนโยบายที่ชัดเจน เช่น NIST AI Risk Management Framework (AI RMF) [61] หรือแผนปฏิบัติการด้าน AI แห่งชาติของไทย [2] และแนวปฏิบัติจริยธรรม AI [24]

3. การดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) โดยใช้การวิจัยเอกสาร (Documentary Research) ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยใช้เกณฑ์การคัดเลือกเอกสารของ John Scott (1990) 4 ประการ คือ ความถูกต้อง (Authenticity), ความน่าเชื่อถือ (Credibility), ความเป็นตัวแทน (Representativeness) และความหมาย (Meaning) [69]

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากเอกสาร 2 ประเภท ได้แก่ 1) เอกสารปฐมภูมิ (เช่น มาตรฐานสากล, แผนของกระทรวงกลาโหม, ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ, หลักนิยม) และ 2) เอกสารทุติยภูมิ (เช่น บทความวิจัยและบทความวิชาการ) จำนวน 81 ฉบับ ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2557-2567)

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

3.1 การวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) ใช้วิธีเชิงปริมาณ (Quantitative) เพื่อนับความถี่คำสำคัญ และวิธีเชิงคุณภาพ (Qualitative) เพื่อตีความและจำแนกหมวดหมู่

3.2 การวิเคราะห์ SWOT ประเมินจุดแข็ง (Strengths), จุดอ่อน (Weaknesses), โอกาส (Opportunities) และอุปสรรค (Threats) โดยใช้ข้อมูลจากเอกสารภายในของกองทัพอากาศ ได้แก่ แผนแม่บท ICT [8], ยุทธศาสตร์การพัฒนาขีดความสามารถไซเบอร์ [10], เอกสารบรรยายสรุปศูนย์ไซเบอร์ [11], และเอกสารการแข่งขันด้านไซเบอร์และซอฟต์แวร์ [12-13]

3.3 การกำหนดกลยุทธ์ (TOWS Matrix): นำผลจาก SWOT มาสร้างแนวทางปฏิบัติที่เป็นรูปธรรม

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อหา

4.1.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาณจากเอกสารที่เกี่ยวข้องจำนวน 81 ฉบับ พบว่าคำสำคัญที่มีความถี่สูงสุดคือ คำว่า “AI/ปัญญาประดิษฐ์”, “ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์” และ “ภัยคุกคาม” รายละเอียดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความถี่การปรากฏของคำหลักที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ/ประเด็น	ความถี่	ลักษณะการปรากฏ
AI/ปัญญาประดิษฐ์	187	สูงมาก (ปรากฏในแทบทุกแหล่งข้อมูล)
ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์	152	สูงมาก (ปรากฏในแทบทุกแหล่งข้อมูล)
ภัยคุกคามไซเบอร์/การโจมตี	134	สูง (กล่าวถึงในหลายแหล่ง)
การพัฒนาบุคลากร/การฝึกอบรม	98	สูง (กล่าวถึงในหลายแหล่ง)
กฎหมาย/นโยบาย/มาตรฐาน	85	ปานกลาง (มีการกล่าวถึงกรอบกฎหมายและมาตรฐาน)
Deepfake (ดีพเฟค)	76	สูง (เป็นตัวอย่างภัยที่ถูกยกบ่อยครั้ง)
ความร่วมมือระหว่างหน่วยงาน	72	ปานกลาง (มีการยกตัวอย่างความร่วมมือภาครัฐ-เอกชน)
การฟิชชิ่งด้วย AI	63	ปานกลางถึงสูง (ถูกกล่าวถึงบ่อยเช่นกัน)
CI (โครงสร้างพื้นฐานสำคัญ)	57	ปานกลาง (เกี่ยวข้องกับกฎหมายและมาตรการรัฐ)
การโจมตีเชิงปรับตัวต่อระบบ AI	49	ปานกลาง (กล่าวถึงในบริบทงานวิจัยเฉพาะทาง)

นอกจากนี้ ยังพบแนวโน้มของหัวข้อวิจัยที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา โดยเปลี่ยนจากการใช้ ML พื้นฐาน (2015-2018) มาสู่การมุ่งเน้นความเสี่ยงจาก Generative AI (2022-2025) รายละเอียดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แนวโน้มของผลกระทบจากเทคโนโลยี AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์

ช่วงเวลา	แนวโน้มหัวข้อที่เน้น	จำนวนเอกสารอ้างอิง
2015 – 2018	Machine Learning พื้นฐานในการตรวจจับภัยคุกคาม	12
2019 – 2021	Deep Learning และ AI เชิงป้องกัน	18
2022 – 2025	Generative AI และความเสี่ยงจาก AI ในการโจมตี	27

จากผลการวิเคราะห์ความถี่ของคำสำคัญที่ปรากฏในแหล่งข้อมูล แสดงให้เห็นแนวโน้ม และสามารถกำหนดกรอบแนวทางการรับมือในภาพใหญ่ โดยแบ่งเป็น 4 ด้าน ได้แก่ การพัฒนาเทคโนโลยีความมั่นคงไซเบอร์ที่ใช้เทคโนโลยี AI การพัฒนาบุคลากรและการฝึกอบรม การกำหนดมาตรฐานและนโยบายที่เกี่ยวข้อง และการสร้างเครือข่ายความร่วมมือภายในและต่างประเทศ บนกรอบการรับมือต่อ Machine Learning/Deep Learning พื้นฐานในการตรวจจับภัยคุกคามเชิงป้องกัน รวมถึง Generative AI และความเสี่ยงจาก AI ในการโจมตี

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เนื้อหาเชิงคุณภาพในด้านกรอบแนวทางการรับมือ

กรอบแนวทางการรับมือ	รายละเอียดแนวทางจากผลการวิเคราะห์เนื้อหาเชิงคุณภาพ
การพัฒนาเทคโนโลยีความมั่นคงไซเบอร์ที่ใช้เทคโนโลยี AI	- การใช้ AI และ Machine Learning เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับและตอบสนองต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์ - การพัฒนาและปรับปรุงระบบ Automated Threat Response ที่ใช้ AI - การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสารสนเทศเพื่อรองรับเทคโนโลยี AI - Cyber - การใช้ Generative AI ในการจำลองการโจมตีเพื่อทดสอบความแข็งแกร่งของระบบ - การบูรณาการ AI กับฐานข้อมูลภัยคุกคาม เช่น MITRE ATT&CK เพื่อพัฒนาเครื่องมือเฝ้าระวังภัยคุกคามที่มีประสิทธิภาพสูงสุด - การพิจารณาความเสี่ยงจากการใช้ AI ในการป้องกันไซเบอร์ เช่น False Positives และการโจมตีที่ใช้ AI เชิงรุก (AI-Driven Cyber Attacks)
การพัฒนาบุคลากรและการฝึกอบรม	- การส่งเสริมการฝึกอบรมบุคลากรด้านไซเบอร์ให้มีความรู้และทักษะในการใช้ AI และ Machine Learning ในการป้องกันภัยคุกคาม - การจัดทำหลักสูตรเฉพาะทางเกี่ยวกับ AI ในความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับบุคลากร เช่น โครงการฝึกอบรมและหลักสูตรจากสถาบันการศึกษาชั้นนำ - การสร้างระบบฝึกจำลองเพื่อฝึกปฏิบัติจริงกับสถานการณ์ภัยคุกคามที่ซับซ้อน - การบูรณาการ AI เข้ากับ SOC เพื่อช่วยบุคลากรวิเคราะห์ภัยคุกคามได้อย่างมีประสิทธิภาพ - การจัดตั้งหน่วยเฉพาะกิจด้าน AI - ไซเบอร์ ภายในกองทัพอากาศเพื่อพัฒนาและบริหารจัดการเทคโนโลยี AI ด้านความมั่นคงไซเบอร์
การกำหนดมาตรฐานและนโยบายที่เกี่ยวข้อง	- การกำหนดกรอบนโยบายด้าน AI และความมั่นคงไซเบอร์ที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล เช่น ISO/IEC 27001, NIST เป็นต้น - การพัฒนากฎระเบียบเกี่ยวกับการใช้ AI ในด้านความมั่นคงไซเบอร์ เพื่อควบคุมการใช้ AI ในการเฝ้าระวังและป้องกันการโจมตีทางไซเบอร์ - การออกมาตรการด้านความปลอดภัยข้อมูลสำหรับระบบที่ใช้ AI โดยเฉพาะ เช่น การเข้ารหัสข้อมูล การป้องกันข้อมูลส่วนบุคคล และการลดความเสี่ยงจาก AI Bias - การกำหนดแนวทางปฏิบัติในการใช้ AI เชิงรุกและรับในกองทัพอากาศไทยให้สอดคล้องกับหลักจริยธรรมและกฎหมายความมั่นคงไซเบอร์ - การบูรณาการนโยบาย AI กับยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ และการวางแผนด้านความมั่นคงไซเบอร์ระดับชาติ
การสร้างเครือข่ายความร่วมมือภายในและต่างประเทศ	- การสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานในประเทศ เช่น สกมช., กระทรวงกลาโหม, และมหาวิทยาลัยชั้นนำ เพื่อพัฒนางานวิจัยและเทคโนโลยีด้าน AI-ไซเบอร์ - การเข้าร่วมเครือข่ายความร่วมมือระดับนานาชาติ เช่น ASEAN Cybersecurity, และ US Cyber Command เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ - การจัดตั้งโครงการแลกเปลี่ยนบุคลากรและองค์ความรู้ด้าน AI กับประเทศพันธมิตร เช่น สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และญี่ปุ่น เพื่อให้บุคลากรไทยสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีความมั่นคงไซเบอร์ที่ทันสมัย - การพัฒนาแพลตฟอร์มแบ่งปันข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ใช้ AI วิเคราะห์แนวโน้มภัยคุกคามระหว่างประเทศ - การส่งเสริมการวิจัยร่วมระหว่างหน่วยงานทหารและภาคเอกชน เช่น การพัฒนาโซลูชัน AI ด้านไซเบอร์ร่วมกับบริษัทเทคโนโลยีชั้นนำ

4.1.2 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพดังแสดงในตารางที่ 3 สรุปกรอบแนวทางการรับมือได้ 4 ด้านหลัก ได้แก่:

4.1.2.1 การพัฒนาเทคโนโลยีความมั่นคงไซเบอร์ที่ใช้ AI: เน้นการใช้ AI และ ML เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับ, พัฒนาระบบ Automated Threat Response, และบูรณาการ AI กับฐานข้อมูลภัยคุกคาม เช่น MITRE ATT&CK

4.1.2.2 การพัฒนาบุคลากรและการฝึกอบรม: ส่งเสริมการฝึกอบรมทักษะ AI และ ML, สร้างระบบฝึกจำลอง (Cyber Range) และพิจารณาจัดตั้งหน่วยเฉพาะกิจด้าน AI-Cyber

4.1.2.3 การกำหนดมาตรฐานและนโยบายที่เกี่ยวข้อง: กำหนดกรอบนโยบายที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล (ISO/NIST), พัฒนากฎระเบียบภายใน และบูรณาการนโยบาย AI เข้ากับยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ

4.1.2.4 การสร้างเครือข่ายความร่วมมือภายในและต่างประเทศ: สร้างความร่วมมือกับ สกมช., กระทรวงกลาโหม, มหาวิทยาลัย และเข้าร่วมเครือข่ายนานาชาติ (เช่น ASEAN, US Cyber Command) เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลภัยคุกคาม

4.2 ผลการวิเคราะห์ SWOT

จากการวิเคราะห์เอกสารภายในของกองทัพอากาศ [8, 10-13] สามารถสรุปผล SWOT ได้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ SWOT ของกองทัพอากาศในด้านจุดแข็ง (Strength)

มิติที่เกี่ยวข้อง	ผลการวิเคราะห์
มิติด้านเทคโนโลยี	- มีโครงสร้างพื้นฐานด้าน IT และ SOC ที่สามารถต่อยอดพัฒนา AI เข้ามาเสริมการป้องกันภัยคุกคามได้ (S1) - มีความพร้อมในการพัฒนา AI สำหรับระบบตรวจจับภัยคุกคามแบบเรียลไทม์ (S2) - มีศูนย์ข้อมูลที่สามารถนำ AI มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ภัยคุกคาม (S3)
มิติด้านบุคลากร	- มีความรู้ด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์และสามารถพัฒนาทักษะเพิ่มเติมได้ (S4) - มีแผนงานการฝึกบุคลากรด้านไซเบอร์อย่างต่อเนื่อง เช่น การฝึกอบรมสำหรับผู้ปฏิบัติงานด้านไซเบอร์ การแข่งขันทักษะทางไซเบอร์ การแข่งขันด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์ด้วย AI และการทดสอบความตระหนักรู้ทางไซเบอร์ของกำลังพล (S5)
มิติด้านนโยบายและมาตรฐาน	- มีมาตรฐานความปลอดภัยไซเบอร์ภายใน เช่น ระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการรักษาความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ (S6) - มีแนวทางปฏิบัติจาก สกมช., ISO, NIST ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ (S7)
มิติด้านความร่วมมือ	- มีความร่วมมือกับหน่วยงานภาครัฐ เช่น สกมช., TDGA, และมหาวิทยาลัย (S8) - มีเครือข่ายความร่วมมือระดับนานาชาติกับพันธมิตร เช่น US Cyber SMEE รวมถึงการฝึกร่วมกับชาติพันธมิตร (S9)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ SWOT ของกองทัพอากาศในด้านจุดอ่อน (Weakness)

มิติที่เกี่ยวข้อง	ผลการวิเคราะห์
มิติด้านเทคโนโลยี	- การจัดหาระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ มุ่งเน้นงานด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์เป็นหลัก และใช้ AI เป็นส่วนเสริม (W1) - ระบบโครงสร้างพื้นฐานเทคโนโลยีสารสนเทศในปัจจุบันยังไม่รองรับ AI ที่มีความซับซ้อนเช่น Generative AI (W2)
มิติด้านบุคลากร	- การฝึกอบรม AI สำหรับบุคลากรยังมีข้อจำกัดเฉพาะกลุ่มผู้ปฏิบัติงาน (W3) - ไม่มีแผนพัฒนาความรู้ด้าน AI อย่างชัดเจนสำหรับกำลังพลทั่วไป และไม่มีการทดสอบความตระหนักรู้ด้าน AI ของกำลังพล รวมถึงการแข่งขันด้านไซเบอร์และ AI ยังไม่มีการบูรณาการระหว่างกัน (W4) - ไม่มีหน่วยงานด้าน AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในกองทัพอากาศ (W5)
มิติด้านนโยบายและมาตรฐาน	- นโยบายที่เกี่ยวข้องกับการรับมือ AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ยังไม่มีการบูรณาการในระดับยุทธศาสตร์กองทัพอากาศในภาพรวม (W6) - ยังไม่มีระเบียบ/มาตรฐานการตรวจสอบและประเมินผลระบบ AI ด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ใช้ในกองทัพอากาศ (W7)
มิติด้านความร่วมมือ	- ความร่วมมือกับพันธมิตรในด้านการแลกเปลี่ยนข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์จากเทคโนโลยี AI ยังอยู่ในระดับเริ่มต้น (W8)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ SWOT ของกองทัพอากาศในด้านโอกาส (Opportunities)

มิติที่เกี่ยวข้อง	ผลการวิเคราะห์
มิติด้านเทคโนโลยี	- เทคโนโลยี AI ที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมทำให้มีแหล่งองค์ความรู้ ตัวอย่างแนวทางปฏิบัติที่ดีของหน่วยงานจากภายนอกที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ (O1) - เทคโนโลยี AI ในปัจจุบันมีศักยภาพและสามารถยกระดับความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ขององค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพ (O2)
มิติด้านบุคลากร	- การที่กองทัพอากาศเป็นหน่วยงานด้านความมั่นคง สามารถดึงผู้เชี่ยวชาญจากภายนอก เช่น นักวิจัยจากภายนอกเข้ามาพัฒนาโครงการด้าน AI Security (O3)
มิติด้านนโยบายและมาตรฐาน	- ในปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมในการพัฒนา AI ในงานด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะในหน่วยงานภาครัฐผ่านแผนแม่บท AI ระดับชาติ (O4)
มิติด้านความร่วมมือ	- หน่วยงานในระดับนานาชาติ และระดับชาติเกิดการตื่นตัวและให้ความสำคัญในเรื่อง AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ และช่วยส่งเสริมในการขยายความร่วมมือระหว่างประเทศในรูปแบบ Joint Training และการแลกเปลี่ยนข้อมูลภัยคุกคาม (O5)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ SWOT ของกองทัพอากาศในด้านภัยคุกคาม (Threats)

มิติที่เกี่ยวข้อง	ผลการวิเคราะห์
มิติด้านเทคโนโลยี	- เทคโนโลยี AI มีการพัฒนารุดหน้าอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อภัยคุกคามที่ทรงพลังมากขึ้น เช่น Generative AI ถูกนำมาใช้สร้างมัลแวร์อัจฉริยะและ Deepfake เพื่อโจมตีระบบกองทัพจากภายนอก (T1)
มิติด้านบุคลากร	- ความต้องการบุคลากรด้าน AI และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของหน่วยงานภายนอกที่สูงขึ้น อาจส่งผลให้เกิดภาวะสมองไหล (T2)
มิติด้านนโยบายและมาตรฐาน	- นโยบายที่เกี่ยวข้องกับการรับมือ AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในระดับสากล มีการปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการพัฒนา AI จึงอาจทำให้กองทัพอากาศไม่สามารถปรับระเบียบและมาตรฐานได้ทันต่อการเปลี่ยนแปลง (T3)
มิติด้านความร่วมมือ	- เนื่องจาก AI และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์เป็นงานด้านความมั่นคงของชาติ ดังนั้นการสร้างความร่วมมืออย่างไม่ระมัดระวังอาจนำไปสู่ความเสี่ยงด้านข้อมูลข่าวสาร รวมถึงการพึ่งพาเทคโนโลยีจากมิตรประเทศมากเกินไป (T4)

4.3 การวิเคราะห์ TOWS Matrix

การวิเคราะห์ TOWS Matrix เพื่อกำหนดแนวทางการขับเคลื่อนกลยุทธ์ ซึ่งเป็นผลการจับคู่ปัจจัย SWOT เพื่อกำหนดกลยุทธ์ 4 ด้าน มีรายละเอียดดังนี้:

4.3.1 กลยุทธ์เชิงรุก (SO Strategies: เพื่อใช้จุดแข็งเพื่อคว้าโอกาส)

- (SO1) การผลักดันการพัฒนา AI สำหรับระบบป้องกันภัยคุกคามแบบเรียลไทม์โดยใช้โครงสร้างพื้นฐาน IT ที่มีอยู่ (S1) ร่วมกับเทคโนโลยี AI ที่ทันสมัย โดยใช้องค์ความรู้จากภายนอก (O1, O2)
- (SO2) การส่งเสริมโครงการวิจัยร่วมกับนักวิจัยจากภายนอก โดยใช้ความร่วมมือที่มีอยู่ (S8, S9) เพื่อดึงผู้เชี่ยวชาญจากภายนอกเข้ามาร่วมพัฒนา (O3)
- (SO3) การใช้มาตรฐานความมั่นคงไซเบอร์ที่มีอยู่ (S7) ร่วมกับแผนพัฒนา AI แห่งชาติ (O4) เพื่อพัฒนาระเบียบและมาตรฐานที่เหมาะสมกับกองทัพอากาศ

4.3.2 กลยุทธ์เชิงแก้ไข (WO Strategies: เพื่อแก้ไขจุดอ่อนด้วยการใช้โอกาส)

- (WO1) การเร่งจัดทำแผนพัฒนาความรู้ AI สำหรับกำลังพลทั่วไป (แก้ไข W3, W4) โดยอาศัยโอกาสจากนโยบายส่งเสริม AI ของรัฐบาล (O4)
- (WO2) การจัดตั้งหน่วยงานเฉพาะทางด้าน AI Security (แก้ไข W1, W5) โดยศึกษาแนวทางผ่านความร่วมมือระหว่างประเทศ (O5) และแรงหนุนจากแผน AI ระดับชาติ (O4)
- (WO3) การพัฒนาและบูรณาการมาตรฐานตรวจสอบระบบ AI (แก้ไข W7) ตามแนวมาตรฐานสากล (O1, O4, O5)

4.3.3 กลยุทธ์เชิงป้องกัน (ST Strategies: ใช้จุดแข็งเพื่อป้องกันภัยคุกคาม)

- (ST1) การพัฒนาระบบตรวจจับมัลแวร์และ Deepfake ด้วย AI โดยใช้ศูนย์ข้อมูลและเทคโนโลยี AI ที่มีอยู่ (S2, S3) เพื่อตอบโต้ภัยคุกคามจาก Generative AI (T1)
- (ST2) การรักษาบุคลากรโดยใช้แผนพัฒนาทักษะและสร้างแรงจูงใจ (S4, S5) เพื่อลดความเสี่ยงจากภาวะสมองไหล (T2)

- (ST3) การเพิ่มความยืดหยุ่นด้านนโยบายความมั่นคงไซเบอร์ (S6, S7) โดยกำหนดวงรอบการทบทวนระเบียบปฏิบัติ เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานสากล (T3)

4.3.4 กลยุทธ์เชิงรับ (WT Strategies: ลดจุดอ่อนและหลีกเลี่ยงภัยคุกคาม)

- (WT1) การจัดทำแผนยุทธศาสตร์ AI และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ (แก้ไข W1, W6) เพื่อให้สามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของภัยคุกคาม AI (T1) และปัญหาบุคลากร (T2) ได้อย่างรอบด้าน
- (WT2) การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศที่รองรับการใช้งาน AI ขั้นสูง (แก้ไข W2) เพื่อรองรับภัยคุกคามจาก AI ที่ซับซ้อน (T1)
- (WT3) กำหนดนโยบายการแลกเปลี่ยนข้อมูลร่วมกับพันธมิตรอย่างรัดกุม (แก้ไข W8) เพื่อลดความเสี่ยงด้านการรั่วไหลของข้อมูล (T4)

5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของ AI ต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ ผลการวิจัยยืนยันว่า AI เป็น "ดาบสองคม" ด้านหนึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกัน ตรวจจับ และตอบโต้ภัยคุกคาม แต่อีกด้านก็สร้างภัยคุกคามใหม่ เช่น มัลแวร์อัจฉริยะ และ Deepfake ผลการวิเคราะห์ SWOT และ TOWS ชี้ว่า กองทัพอากาศมีจุดแข็งด้านโครงสร้างพื้นฐาน IT และบุคลากรที่พร้อมปรับตัว แต่มีจุดอ่อนสำคัญคือ การขาดหน่วยงานเฉพาะทางด้าน AI Security และขาดแผนยุทธศาสตร์บูรณาการ แม้จะมีโอกาสจากนโยบายสนับสนุนของรัฐบาล แต่ก็เผชิญภัยคุกคามจากการพัฒนา AI ที่รวดเร็ว ภาวะสมองไหล และความเสี่ยงจากการพึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ

5.2 อภิปรายผล

ผลการวิจัยยืนยันว่าเทคโนโลยี AI เป็นดาบสองคมในบริบทความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ สอดคล้องกับข้อกังวลของผู้เชี่ยวชาญก่อนหน้า จุดแข็งด้านโครงสร้างพื้นฐาน IT และทรัพยากรบุคคลที่พร้อมรองรับ AI สอดคล้องกับหลักการของ NIST และ ISO ที่ว่าเทคโนโลยีจะเกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อมีบุคลากรที่มีทักษะและโครงสร้างพื้นฐานที่เหมาะสมรองรับ อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนที่ถูกระบุ เช่น การขาดหน่วยงานเฉพาะด้าน AI โดยตรง หรือการไม่มีแผนพัฒนาความรู้ด้าน AI สำหรับกำลังพลทั่วไป สะท้อนว่ากองทัพอากาศยังจำเป็นต้องเร่งปรับปรุงด้านนโยบายและการจัดการภายใน รัฐบาลไทยมีนโยบายสนับสนุนการพัฒนา AI อย่างชัดเจน (โอกาส) ซึ่งกองทัพอากาศควรใช้เป็นแรงหนุนในการผลักดันข้อเสนอ ท้ายที่สุด ภัยคุกคามของ AI ที่มีต่อความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ยังส่งผลให้เกิดการบิดเบือนข้อมูลข่าวสาร (Misinformation) ในสงครามด้านกระบวนความคิด (Cognitive Warfare) เช่น การใช้ Deepfake เพื่อสร้างความเข้าใจผิด จึงจำเป็นต้องมีการให้การศึกษาด้าน AI (AI Literacy) แก่กำลังพลทุกระดับ

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.3.1 การพัฒนาระบบ AI: พัฒนาระบบ AI สำหรับตรวจจับและตอบโต้ภัยคุกคามไซเบอร์แบบเรียลไทม์ โดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ร่วมกับเทคโนโลยี AI สมัยใหม่ ทั้งในด้านการวิเคราะห์มัลแวร์และการตรวจ Deepfake

5.3.2 การเสริมทักษะกำลังพล: จัดทำแผนอบรมด้าน AI สำหรับกำลังพลทุกระดับ (AI Literacy) ไม่ใช่เฉพาะผู้ปฏิบัติงาน และกำหนดนโยบายรักษาบุคลากรที่มีศักยภาพ เช่น การกำหนดเส้นทางความก้าวหน้าในอาชีพ

5.3.3 การจัดตั้งหน่วยงาน: จัดตั้งหน่วยงานหรือคณะทำงานเฉพาะกิจ (Task Force) ที่รับผิดชอบการเฝ้าระวัง วิเคราะห์ และรับมือภัยคุกคาม AI โดยตรง

5.3.4 การจัดทำแผนยุทธศาสตร์: จัดทำแผนยุทธศาสตร์ด้าน AI - Cyber ระยะยาว และปรับปรุงระเบียบ/มาตรฐานการใช้งาน AI ให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี

5.3.5 การขยายความร่วมมือ: ขยายความร่วมมือ (MOU) กับหน่วยงานภายนอก และฝึกร่วมด้าน AI Security กับพันธมิตร

5.3.6 การลงทุนโครงสร้างพื้นฐาน: ลงทุนและวางแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน IT ให้พร้อมรองรับการใช้งาน AI ระดับสูง (เช่น Generative AI)

5.3.7 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป: ควรมีการเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ในอนาคต เช่น การลงพื้นที่ การสัมภาษณ์เชิงลึก หรือการสำรวจแบบสอบถามจากกำลังพลและเจ้าหน้าที่ด้านไซเบอร์ รวมถึงการศึกษาเชิงลึกในหัวข้อเฉพาะ เช่น การตรวจจับ Deepfake ในบริบทกองทัพ หรือการเปรียบเทียบนโยบายการใช้ AI ระหว่างเหล่าทัพ ท้ายที่สุด ควรมีการศึกษาผลลัพธ์ของการนำข้อเสนอจากงานวิจัยนี้ไปใช้จริง เช่น การประเมินประสิทธิภาพของหน่วย AI Security ที่จัดตั้งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการสนับสนุนและความอนุเคราะห์จากหลายภาคส่วน ผู้วิจัยจึงขอถือโอกาสนี้ในการขอบคุณ นาวาอากาศเอก บุรีรัตน์ เข็มทอง และ นาวาอากาศโท ฐานิตร์ สุวรรณมาลี ในฐานะที่ท่านทั้งสองเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และได้อนุเคราะห์ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นาวาอากาศเอก สุวิทย์ ไท้ทอง อาจารย์ผู้รับผิดชอบเอกสารวิจัย มากไปกว่านั้นขอขอบคุณคณะกรรมการสอบเอกสารวิจัย ได้แก่ นาวาอากาศเอก สมาน มูลกัน, นาวาอากาศเอก ณัฐ เกาะม่วงหมู่ และนาวาอากาศโท ศิรส สมานชาติ ที่ได้กรุณาตรวจสอบ ประเมินผล และให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาปรับปรุงงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงกลาโหม, แผนการพัฒนาด้านไซเบอร์เพื่อความมั่นคง กระทรวงกลาโหม (พ.ศ. ๒๕๖๖ - ๒๕๗๐), 2566.

[2] กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม และกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (อว.), แผนปฏิบัติการด้านปัญญาประดิษฐ์แห่งชาติเพื่อการพัฒนาประเทศไทย (พ.ศ. ๒๕๖๕ - ๒๕๗๐), 2565.

[3] กองทัพอากาศ, “วิสัยทัศน์และพันธกิจของกองทัพอากาศ.” [ออนไลน์]. Available: https://welcome-page.rtaf.mi.th/mission

[4] กองทัพอากาศ, หลักนิยมปฏิบัติการกองทัพอากาศ พ.ศ. ๒๕๖๖, กรมยุทธการทหารอากาศ, 2566.

[5] กองทัพอากาศ, ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ. ๒๕๖๑ - ๒๕๘๐) ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๘, 2568.

[6] กองทัพอากาศ, นโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศ ประจำปี ๒๕๖๗, 2567.

[7] กองทัพอากาศ, ระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการรักษาความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ พ.ศ. ๒๕๖๓, 2563.

[8] กองทัพอากาศ, แผนแม่บทเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกองทัพอากาศ พ.ศ. ๒๕๖๓ – ๒๕๗๐ ฉบับปรับปรุง ปี พ.ศ. ๒๕๖๗, 2567.

[9] ชนลดา อินบุตร, “ปัญหาความมั่นคงไซเบอร์และความร่วมมือในการแก้ปัญหา,” วารสารเมธีวิจัย Savant Journal of Social Sciences, ปีที่ 1, ฉบับที่ 5, หน้า 58 - 66, 2567.

[10] ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ, “ยุทธศาสตร์การพัฒนาเพื่อยกระดับขีดความสามารถด้านไซเบอร์ ปี ๖๘-๗๐,” [PowerPoint slides], 2568.

[11] ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ, “เอกสารบรรยายสรุปศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศเพื่อรับคณะตรวจเยี่ยมของผู้บัญชาการทหารอากาศ,” [PowerPoint slides], 2568.

[12] ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ, “รายละเอียดการแข่งขันปฏิบัติการด้านไซเบอร์กองทัพอากาศ ประจำปี ๒๕๖๘.” [ออนไลน์]. Available: https://cyber.rtaf.mi.th/

[13] ศูนย์ซอฟต์แวร์กองทัพอากาศ, “รายละเอียดการแข่งขันประกวดผลงานด้านซอฟต์แวร์กองทัพอากาศ ประจำปี ๒๕๖๘.” [ออนไลน์]. Available: https://software.rtaf.mi.th/

[14] ปาริตา ไพศาลรุ่งพนา, พัฒน์ศรัญย์ เลาหไพบูลย์, อรณิชา คงวุฒิ, และวุฒิรงค์ คงวุฒิ, “บทบาท ประโยชน์ และความท้าทายของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์,” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Online), ปีที่ 18, ฉบับที่ 3, หน้า 1 - 4, 2567.

[15] พายัพ ศิรินาม, และประสงค์ ปราณีตพลกรัง, “การพัฒนาโมเดลการเลียนเสียงเชิงลึกในการ ประยุกต์ใช้งานด้านสงครามไซเบอร์,” วารสารสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 162 - 178, 2566.

[16] ไมโครซอฟท์, “AI สำหรับการรักษาความปลอดภัยทางไซเบอร์คืออะไร,” Microsoft Security, 2567. [ออนไลน์]. Available: https://www.microsoft.com/th-th/security/business/security-101/what-is-ai-for-cybersecurity

[17] ราชกิจจานุเบกษา, ยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. ๒๕๖๑ - ๒๕๘๐), 2561. [ออนไลน์]. Available: https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2561/A/082/T_0001.PDF

[18] ราชกิจจานุเบกษา, พระราชบัญญัติการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ พ.ศ. ๒๕๖๒, 2562. [ออนไลน์]. Available: https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2562/A/069/T_0020.PDF

[19] รัฐบาลไทย, “นโยบายรัฐมนตรีว่าการกระทรวงกลาโหม,” 2567. [ออนไลน์]. Available: https://www.thaigov.go.th/news/contents/details/89751

[20] สถาบันพัฒนาบุคลากรภาครัฐด้านดิจิทัล (TDGA), “โครงการฝึกอบรมเทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับภาครัฐ.” [ออนไลน์]. Available: https://tdga.dga.or.th/knowledge/public-learning/detail/?content_id=58

[21] สำนักงานคณะกรรมการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์แห่งชาติ (สกมช.), นโยบายและแผนปฏิบัติการว่าด้วยการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ พ.ศ. ๒๕๖๕ - ๒๕๗๐, 2565.

[22] สำนักงานคณะกรรมการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์แห่งชาติ (สกมช.), รายงานสถานการณ์ภัยคุกคามไซเบอร์ประเทศไทย, 2567.

[23] สำนักงานคณะกรรมการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์แห่งชาติ (สกมช.), มาตรฐานและแนวปฏิบัติ, มปป.

[24] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), “แนวปฏิบัติจริยธรรมด้านปัญญาประดิษฐ์,” 2565. [ออนไลน์]. Available: https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/ita/20230331-guidelines-artificial-intelligence.pdf

[25] สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (สพธอ.), การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในวงการความมั่นคงทางไซเบอร์: ประโยชน์และความเสี่ยง, 2564.

[26] AI Cyber Challenge, “Artificial Intelligence Cyber Challenge (AIxCC).” [Online]. Available: https://aicyberchallenge.com/ (accessed March 4, 2025).

[27] A. Alshamrani, S. Myneni, A. Chowdhary, and D. Huang, “A survey on advanced persistent threats: Techniques, solutions, challenges, and research opportunities,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 2, pp. 1851-1877, 2019.

[28] Arbor Networks, Worldwide infrastructure security report, NETSCOUT, 2019.

[29] G. Apruzzese, M. Colajanni, L. Ferretti, A. Guido, and M. Marchetti, “On the effectiveness of machine and deep learning for cyber security,” in Proceedings of the 2018 10th International Conference on Cyber Conflict (CyCon), 2018, pp. 371–390.

[30] D. S. Berman, A. L. Buczak, J. S. Chavis, and C. L. Corbett, “A survey of deep learning methods for cyber security,” Information, vol. 10, no. 4, p. 122, 2019.

[31] J. M. Biju, N. Gopal, and A. J. Prakash, “Cyber attacks and its different types,” International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 6, no. 3, pp. 4849-4852, 2019.

[32] M. Brundage, et al., “The malicious use of artificial intelligence: Forecasting, prevention, and mitigation,” arXiv preprint arXiv:1802.07228, 2018.

[33] Center for Threat-Informed Defense, “Secure AI,” 2024. [Online]. Available: https://ctid.mitre.org/projects/secure-ai/

[34] H. C. H. Chang and E. Ferrara, “Comparative analysis of social bots and humans during the COVID-19 pandemic,” Journal of Computational Social Science, vol. 5, no. 2, pp. 1409-1425, 2022.

[35] R. Chesney and D. Citron, “Deep fakes: A looming challenge for privacy, democracy, and national security,” California Law Review, vol. 107, no. 6, pp. 1753–1819, 2019.

[36] R. A. Clarke and R. K. Knake, The fifth domain: Defending our country, our companies, and ourselves in the age of cyber threats, Penguin Press, 2019.

[37] Computer.org, “Artificial intelligence in cybersecurity,” 2020. [Online]. Available: https://www.computer.org/csdl/magazine/co/2020/03

[38] Cyber Elite, “Operational Technology Cybersecurity: Challenges and Future Trends,” 2024. [Online]. Available: https://www.cyberelite.co.th

[39] T. G. Dietterich and E. J. Horvitz, “Rise of concerns about AI: reflections and directions,” Communications of the ACM, vol. 58, no. 10, pp. 38-40, 2015.

[40] A. Djenna, S. Harous, and D. E. Saidouni, “Internet of things meet internet of threats: New concern cyber security issues of critical cyber infrastructure,” Applied Sciences, vol. 11, no. 10, p. 4580, 2021.

[41] FireEye, Sunburst: Behind the scenes of the SolarWinds Orion compromise, 2020.

[42] Fortinet, “AI in cybersecurity: Key benefits, defense strategies, & future trends,” 2024. [Online]. Available: https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/artificial-intelligence-in-cybersecurity

[43] I. J. Goodfellow, J. Shlens, and C. Szedy, “Explaining and harnessing adversarial examples,” in International Conference on Learning Representations (ICLR), 2015.

[44] M. Gupta, C. Akiri, K. Aryal, E. Parker, and L. Praharaj, “From chatgpt to threatgpt: Impact of generative ai in cybersecurity and privacy,” IEEE Access, vol. 11, pp. 80218-80245, 2023.

[45] R. Gürfidan, M. Ersoy, and O. Kilim, “AI-powered cyber attacks threats and measures,” in The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 434-444.

[46] J. Hong, “The state of phishing attacks,” Communications of the ACM, vol. 55, no. 1, pp. 74-81, 2012.

[47] International Organization for Standardization (ISO), “ISO/IEC 27000 family - Information security management systems.” [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/iso-iec-27000-family

[48] I. Jada and T. O. Mayayise, “The impact of artificial intelligence on organisational cyber security: An outcome of a systematic literature review,” Data and Information Management, vol. 8, no. 2, p. 100063, 2024.

[49] J. Jang-Jaccard and S. Nepal, “A survey of emerging threats in cybersecurity,” Journal of computer and system sciences, vol. 80, no. 5, pp. 973-993, 2014.

[50] Z. N. Khlaif, et al., “The potential and concerns of using AI in scientific research: ChatGPT performance evaluation,” JMIR Medical Education, vol. 9, p. e47049, 2023.

[51] Y. LeCun, Y. Bengio, and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition,” Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324, 1998.

[52] F. Li, N. Ruijs, and Y. Lu, “Ethics & AI: A systematic review on ethical concerns and related strategies for designing with AI in healthcare,” Ai, vol. 4, no. 1, pp. 28-53, 2022.

[53] Y. Li, X. Zhang, and J. Chen, “Applications and challenges of artificial intelligence in the modern world,” Applied Sciences, vol. 11, no. 17, p. 7977, 2021.

[54] Y. Li and Q. Liu, “A comprehensive review study of cyber-attacks and cyber security; Emerging trends and recent developments,” Energy Reports, vol. 7, pp. 8176-8186, 2021.

[55] J. Lighthill, “Artificial intelligence: A general survey,” in Artificial Intelligence: A Paper Symposium, Science Research Council, 1973, pp. 1-35.

[56] MDPI, “A systematic literature review on cyber threat intelligence,” MDPI, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7273

[57] S. Mittal and J. S. Vetter, “A survey of GPU-based machine learning,” IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 26, no. 1, pp. 153-168, 2015.

[58] A. Mohammed, “The Future of Cybersecurity Workforce Development,” Ajrsp, vol. 4, no. 45, pp. 37-48, 2023.

[59] S. Mohurle and M. Patil, “A brief study of WannaCry threat: Ransomware attack 2017,” International Journal of Advanced Research in Computer Science, vol. 8, no. 5, pp. 193–198, 2017.

[60] National Institute of Standards and Technology (NIST), “Cybersecurity framework,” 2024. [Online]. Available: https://www.nist.gov/cyberframework

[61] National Institute of Standards and Technology (NIST), “Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0),” 2023. [Online]. Available: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/nist.ai.100-1.pdf

[62] A. Nayyar, R. U. Rameshwar, and A. R. Solanki, “Internet of Things (IoT) and the digital business environment: a standpoint inclusive cyber space, cyber crimes, and cybersecurity,” in The evolution of business in the cyber age, Apple Academic Press, 2020, pp. 111-152.

[63] NCSC, “Artificial intelligence and cybersecurity,” 2024. [Online]. Available: https://www.ncsc.gov.uk/section/about-ai/ai-cyber-security

[64] J. Nickolls, I. Buck, M. Garland, and K. Skadron, “CUDA: A parallel programming model for GPU computing,” in 40th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2008, pp. 1-10.

[65] N. Patel, P. Desai, and M. Shah, “AI applications in industry and education: A comprehensive review,” Expert Systems with Applications, vol. 215, p. 119345, 2023.

[66] V. Pereira, E. Hadjielias, M. Christofi, and D. Vrontis, “A systematic literature review on the impact of artificial intelligence on workplace outcomes: A multi-process perspective,” Human Resource Management Review, vol. 33, no. 1, p. 100857, 2023.

[67] R. Ragunathan, “To Explore and Understand the Factors Influencing the Addition of Artificial Intelligence (AI) Skills to the US Cybersecurity Workforce,” Ph.D. dissertation, Capitol Technology University, 2024.

[68] SAS Institute Inc., “What is Artificial Intelligence?” [Online]. Available: https://www.sas.com/th_th/insights/analytics/artificial-intelligence.html

[69] J. Scott, A matter of record: Documentary sources in social research, Polity Press, 1990.

[70] A. Sharma, R. Gupta, and S. Kumar, “Artificial intelligence: Opportunities and challenges in general applications,” in 2022 IEEE International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2022, pp. 1-6.

[71] A. Shevtsov, C. Tzagkarakis, D. Antonakaki, and S. Ioannidis, “Identification of twitter bots based on an explainable machine learning framework: the US 2020 elections case study,” in Proceedings of the international AAAI conference on web and social media, vol. 16, 2022, pp. 956-967.

[72] S. K. Singh, S. K. Singh, R. K. Mishra, A. K. Singh, and R. K. Singh, “AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications,” Materials Today: Proceedings, vol. 80, no. 2, pp. 1027-1035, 2023.

[73] J. Smith and R. Patel, “AI in cybersecurity: Opportunities and challenges,” Journal of Cybersecurity, vol. 7, no. 2, pp. 45–60, 2021.

[74] SSL2Buy, “AI in cybersecurity,” 2024. [Online]. Available: https://www.ssl2buy.com/wiki/ai-in-cybersecurity

[75] B. E. Strom, et al., “Mitre att&ck: Design and philosophy,” Technical report, The MITRE Corporation, 2018. [76] Symantec, Internet security threat report, Symantec Corporation, 2020.

[77] L. Taddei and M. Conti, “AI and cyber-security: A new arms race,” Journal of Cyber Security Technology, vol. 4, no. 1, pp. 1-15, 2020.

[78] A. Tarter, “Importance of cyber security,” Community Policing-A European Perspective: Strategies, Best Practices and Guidelines, pp. 213-230, 2017.

[79] Terranova Security, “The role of AI in cybersecurity: Enhancing defense against modern threats.” [Online]. Available: https://www.terranovasecurity.com/blog/ai-in-cyber-security

[80] The Wall Street Journal (WSJ), “Fraudsters use AI to mimic CEO’s voice in unusual cybercrime case,” Dow Jones & Company, 2019.

[81] T. C. Truong, Q. B. Diep, and I. Zelinka, “Artificial Intelligence in the Cyber Domain: Offense and Defense,” Symmetry, vol. 12, no. 3, p. 410, 2020.

[82] A. M. Turing, “Computing Machinery and Intelligence,” Mind, vol. LIX, no. 236, pp. 433–460, 1950.

[83] P. Voss and M. Jovanovic, “Concepts is all you need: A more direct path to AGI,” arXiv preprint arXiv:2309.01622, 2023.

[84] Q. Zeng and Y. Hara-Azumi, “Hardware/Software Codesign of Real-Time Intrusion Detection System for Internet of Things Devices,” IEEE Internet of Things Journal, 2024.

การศึกษาผลกระทบของการจัดวางองศาและความหนาของชั้นต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของกระบวนการขึ้นรูปสามมิติด้วยเรซิน

Influence of Build Orientation and Layer Height on the Mechanical and Thermal Properties of SLA 3D-Printed Resin

ศุภวิชญ์ ทองอ่ำ[1], ชยทศ ขันชนะ[1], โชคชัย แจ่มอำพร[1] และ นพพล สมเศรษฐ์[1*]

[1]ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหาร, กองวิชาวิทยาศาสตร์, กองการศึกษา, โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Supawit Thong-um[1], Chayatos Khunchana[1], Chokchai Chamamporn[1] and Noppon Somsesta[1*]

[1]Department of Military Materials Science, Division of Science, Academic Faculty,

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Saraburi, Thailand.

*noppon_soms@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุจากกระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยเรซินโดยเทคนิค Stereolithography (SLA) ที่มีมุมองศาในการพิมพ์และความหนาของชั้นวัสดุที่แตกต่างกัน โดยมีการจัดวางองศารอบแกน X และ Y ด้วยมุม 0° 22.5° 45.0° 67.5° และ 90.0° และความหนาชั้นพิมพ์ที่ 0.025 0.050 และ 0.100 มิลลิเมตร โดยทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine : UTM) และเครื่องทดสอบเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer : DMA) จากผลการทดสอบพบว่ามุมการจัดวางองศาในการขึ้นรูปมีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยมุมในแกน Y ที่มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ในขณะที่มุมในแกน X มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงน้อยกว่า ในส่วนของสมบัติทางความร้อนพบว่าชิ้นงานที่มีความหนาชั้นมากกว่า จะมีค่ามอดุลัสกักเก็บสูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70 – 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางกล จึงสรุปได้ว่าการปรับมุมองศาและความหนาชั้นพิมพ์มีผลต่อความแข็งแรงและค่ามอดุลัสกักเก็บ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและขึ้นรูปชิ้นงานให้มีสมบัติเหมาะสมต่อสภาวะการใช้งานได้

คำสำคัญ: การขึ้นรูปสามมิติด้วยเรซิน, องศาในการพิมพ์, ความหนาชั้นพิมพ์, สมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน

Abstract

This study aims to evaluate the variations in the mechanical and thermal properties of Stereolithography (SLA) 3D-printed resin fabricated at different build orientation angles (0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, and 90.0° along the X and Y axes) and layer height (0.025, 0.050, and 0.100 mm). The printed specimens were subsequently characterized using a universal testing machine (UTM) and a dynamic mechanical analyzer (DMA). The experimental results show that the printing orientation angle plays a significant role in the mechanical performance of SLA 3D-printed resin. Increasing the orientation angle along both the X and Y axes enhances the tensile strength, with the Y-axis orientation exhibiting a greater influence than the X-axis orientation. In terms of thermal property, samples with greater layer thickness possessed higher storage modulus, particularly in the temperature range of 70–80 °C, where the resin begins to undergo changes in its mechanical behavior. Hence, the results indicate that the properties of SLA 3D-printed samples are significantly influenced by build orientation and layer height. These findings demonstrate the potential for tailoring material properties to meet specific application requirements.

Keywords: 3D-Printed Resin, Build orientation, Layer height, Mechanical property, Thermal property

1. บทนำ

ในปัจจุบันกองทัพอากาศให้ความสำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนอากาศยานอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านอากาศยานและการบิน ลดการพึ่งพาการนำเข้าวัสดุราคาแพงจากต่างประเทศ และเพิ่มขีดความสามารถในการปฏิบัติภารกิจขององค์กร [1] จึงส่งผลให้มีการศึกษาและวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาวัสดุที่เหมาะสำหรับความต้องการดังกล่าว โดยพอลิเมอร์และวัสดุคอมพอสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเนื้อหลักเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [2] โดยเฉพาะด้านวิศวกรรมการแพทย์ และยานพาหนะ เช่น อากาศยาน ยานอวกาศ และดาวเทียม เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง [3] กล่าวคือมีความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุประเภทโลหะหรือเซรามิกในน้ำหนักที่เท่ากัน อีกทั้งยังทนทานต่อการกัดกร่อนและสารเคมีได้ดี คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตเหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยานที่ต้องการวัสดุที่แข็งแรง [4] ทนความร้อนสูง น้ำหนักเบา และรับแรงกระทำจากการบินได้ดี โดยการลดน้ำหนักชิ้นส่วนยังช่วยเพิ่มสมรรถนะอากาศยาน เช่น ลดแรงต้านอากาศ เพิ่มน้ำหนักบรรทุก และลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง [5, 6]

ในขณะเดียวกันเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมีแนวโน้มการเติบโตอย่างรวดเร็วและเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น แบบแซนด์วิชหรือรวงผึ้ง [7] ได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ แข็งแรง และใช้วัสดุน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการเพิ่มขีดความสามารถและลดต้นทุนที่กล่าวไปข้างต้น โดยหนึ่งในเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติที่ได้รับความนิยมสูงคือ การพิมพ์สามมิติด้วยเรซินหรือเทคนิคสเตอริโอลิโทรกราฟี (Stereolithography: SLA) [8] ซึ่งใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการทำให้เรซินเหลวแข็งตัว ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง เหมาะกับงานต้นแบบงานวิศวกรรม และอุตสาหกรรมการบิน อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์สามมิติยังขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การพิมพ์ [9] เช่น ความหนาแน่นภายใน ระยะเวลาการฉายแสง ความเร็วในการขึ้นรูป การจัดวางมุมองศา และความหนาของชั้น ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุอย่างชัดเจนคือ การจัดวางมุมองศาและความหนาชั้นพิมพ์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของเรซินที่ผลิตด้วยเทคนิค SLA เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์การพิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านอากาศยานและอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อให้เกิดเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาการพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นส่วนของอากาศยานต่อไป เนื่องจากผู้ใช้เครื่องพิมพ์สามมิติมักจะไม่ตระหนักถึงการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของทั้งเครื่องมือและของวัสดุที่ใช้ ว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ เพื่อให้สามารถนำไปปรับปรุงและเลือกใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการนำไปใช้ประโยชน์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิตินั้นมีการเติบโตและพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปัจจุบันการพิมพ์สามมิติเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย ราคาของเครื่องพิมพ์และวัสดุลดต่ำลง ทำให้แม้แต่บุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงและใช้งานได้ [10] ด้วยความสามารถในการสร้างวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนและปรับแต่งได้ตามความต้องการ จึงทำเทคโนโลยีนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย รวมไปถึงมีความพยายามในการวิจัยและศึกษาเพื่อทำให้สามารถพิมพ์ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติดีขึ้นและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้ โดยนักวิจัยจำนวนมากมีความสนใจในการศึกษาผลของการปรับพารามิเตอร์การพิมพ์ต่อคุณสมบัติของวัสดุ และหนึ่งในผลจากการศึกษา

แสดงให้เห็นว่าการจัดวางมุมองศาและความหนาชั้นพิมพ์มีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยความหนาชั้นมีผลต่อทั้งความละเอียด ความเร็ว และพฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงาน [11] ซึ่งเทคนิค SLA สามารถปรับความหนาได้ตั้งแต่ 25 – 100 ไมครอน โดยชั้นที่บางให้รายละเอียดสูงและผิวเรียบแต่ใช้เวลานาน ในขณะที่ชั้นที่หนาให้ความเร็วมากกว่าแต่ผิวหยาบกว่า [12] โดยการวิจัยของ Park และคณะ [13] ได้ศึกษาผลของความหนาชั้น (Layer Thickness) ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเรซินเทอร์โมเซตที่ผลิตด้วยเทคนิค SLA และใช้เครื่องทดสอบเชิงกลพลวัต (DMA) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หลัก ผลจากการศึกษาพบว่าการลดความหนาชั้นจาก 50 ไมครอน เป็น 25 ไมครอน ทำให้ค่ามอดุลัสลดต่ำลง เนื่องจากการเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างชั้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้การถ่ายเทแรงในวัสดุลดลง และพบการเกิดลักษณะจุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสองช่วง (Bimodal T_g) ซึ่งสะท้อนถึงความหนาแน่นของโครงสร้างพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อน ในขณะที่การศึกษาของ Alshamrani และคณะ [14] ได้วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเรซินสำหรับงานทันตกรรม โดยเปรียบเทียบความหนาชั้นพิมพ์ที่ 25 50 และ 100 ไมครอน และศึกษาผลของกระบวนการหลังพิมพ์ (Post-curing) เช่น การแช่น้ำและการอบด้วยแสงยูวี ซึ่งผลการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point Bending) และการวัดความแข็งแบบวิคเกอร์ (Vickers Hardness) พบว่าชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยชั้นหนา 100 ไมครอน มีความทนต่อแรงโค้งงอและมีความแข็งสูงสุด และจากผลการทดลองยังบ่งชี้ได้อีกว่ากระบวนการอบแสงยูวีและการแช่น้ำสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุเรซินได้อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนการจัดวางมุมองศาการพิมพ์พบว่า มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน งานวิจัยของ Wang และคณะ [15] ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การพิมพ์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ ผ่านการทดสอบความทนแรงดึง แรงกด และแรงดัด โดยปรับองศาการพิมพ์ในแนวแกน X, Y และ Z ที่มุมระหว่าง 0° – 90° ผลจากการทดลอง พบว่าพารามิเตอร์ที่ให้สมบัติสูงสุดคือ มุม X = 45°, Y = 25°, Z = 90° สำหรับแรงดึง X = 0°, Y = 51°, Z = 85° สำหรับแรงกด และ X = 26°, Y = 0°, Z = 90° สำหรับแรงดัด ซึ่งช่วยเพิ่มสมรรถนะแรงดึง แรงกด และแรงดัดได้ถึง 80.52% 15.94% และ 48.85% ตามลำดับ ดังนั้นการเลือกศึกษาพารามิเตอร์ทั้งสองนี้จึงมีความสำคัญในการสร้างฐานข้อมูล เพื่อการปรับปรุงการพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิค SLA

3. การดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์การพิมพ์ต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิค SLA โดยทำการออกแบบรูปร่างชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ FREECAD กำหนดค่าตัวแปรสำหรับการพิมพ์สามมิติและแบ่งส่วนข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ CHITUBOX ได้กำหนดพารามิเตอร์ของชิ้นงาน โดยมีการจัดวางมุมองศา 5 มุม ได้แก่ 0° 22.5° 45.0° 67.5° และ 90.0° และความหนาของชั้น 3 ขนาด ได้แก่ 0.025 0.050 และ 0.100 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็นสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล 25 สูตร และสมบัติทางความร้อน 9 สูตร สรุปได้ดังตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง

ชื่อตัวอย่าง	**การจัดวางมุมองศา ตามแนวแกน X**	**การจัดวางมุมองศา ตามแนวแกน Y**	**ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร)**
0-0	0°	0°	0.050
0-1	0°	22.5 °	0.050
0-2	0°	45.0 °	0.050
0-3	0°	67.5 °	0.050
0-4	0°	90.0 °	0.050
1-0	22.5 °	0°	0.050
1-1	22.5 °	22.5 °	0.050
1-2	22.5 °	45.0 °	0.050
1-3	22.5 °	67.5 °	0.050
1-4	22.5 °	90.0 °	0.050
2-0	45.0 °	0°	0.050
2-1	45.0 °	22.5 °	0.050
2-2	45.0 °	45.0 °	0.050
2-3	45.0 °	67.5 °	0.050
2-4	45.0 °	90.0 °	0.050
3-0	67.5 °	0°	0.050
3-1	67.5 °	22.5 °	0.050
3-2	67.5 °	45.0 °	0.050
3-3	67.5 °	67.5 °	0.050
3-4	67.5 °	90.0 °	0.050
4-0	90.0 °	0°	0.050
4-1	90.0 °	22.5 °	0.050
4-2	90.0 °	45.0 °	0.050
4-3	90.0 °	67.5 °	0.050
4-4	90.0 °	90.0 °	0.050

ตารางที่ 2 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ชื่อตัวอย่าง	การจัดวางมุมองศา ตามแนวแกน X	การจัดวางมุมองศา ตามแนวแกน Y	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร)
1-0A	22.5 °	0°	0.100
1-0B	22.5 °	0°	0.050
1-0C	22.5 °	0°	0.025
2-2A	45.0 °	45.0 °	0.100
2-2B	45.0 °	45.0 °	0.050
2-2C	45.0 °	45.0 °	0.025
3-1A	67.5 °	22.5 °	0.100
3-1B	67.5 °	22.5 °	0.050
3-1C	67.5 °	22.5 °	0.025

ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบในการวิจัยนี้ได้จากการขึ้นรูปวัสดุเรซิน JAMG HE 10 K Standard Plus ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ Phrozen Sonic Mighty 12 K โดยกระบวนการหลังการขึ้นรูปเริ่มจากการล้างเรซินส่วนเกินออกด้วยการแช่ในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol : IPA) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปเป่าจนแห้งสนิทและฉายด้วยแสงยูวี (Curing) เพื่อทำให้เรซินแข็งตัวเป็นเวลา 10 นาที สุดท้ายจัดเก็บชิ้นงานตัวอย่างในกล่องดูดความชื้นและรอนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบต่อไป ดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงานโดยวิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) ชิ้นงานที่ออกแบบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Lloyd LD10 Universal Testing Machine (UTM) ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานโดยเครื่องทดสอบเชิงกลพลวัต Mettler Toledo Thermal Analysis System DMA 1 และนำเอาชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ผ่านการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการศึกษาภาพถ่ายแนวตัดขวาง (Cross section) ของชิ้นงาน ณ จุดที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบ

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

การศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนการจัดวางมุมองศาในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกล ผ่านการทดสอบแรงดึง ซึ่งจะให้ค่ามอดุลัส ความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดังแสดงในตารางที่ 3 โดยผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มมุมองศาของแกน Y จะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นตัวอย่างมีค่าสูงขึ้นทั้งในส่วนของค่าความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว อันเนื่องมาจากการปรับมุมจัดวางผ่านการหมุนตามแนวแกน X และ Y จะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานสามารถรับแสงยูวีได้มากขึ้น [16] ซึ่งส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงกันมากขึ้น รวมไปถึงมีความสมบูรณ์ในโครงสร้างภายในมากยิ่งขึ้น จึงทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การปรับมุมองศาในแนวแกน X ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการปรับเปลี่ยนในแนวแกน Y

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงการจัดวางองศา

ชื่อตัวอย่าง	การจัดวางมุมองศาตามแนวแกน X	การจัดวางมุมองศาตามแนวแกน Y	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร)	ค่ามอดุลัส (เมกะปาสคาล)	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	% การยืดตัว
0-0	0°	0°	0.050	535.877	26.085	4.877
0-1	0°	22.5 °	0.050	634.636	37.556	5.953
0-2	0°	45.0 °	0.050	466.871	36.898	7.977
0-3	0°	67.5 °	0.050	438.763	33.049	7.550
0-4	0°	90.0 °	0.050	487.480	35.684	7.504
1-0	22.5 °	0°	0.050	514.091	33.330	6.496
1-1	22.5 °	22.5 °	0.050	494.066	32.949	6.687
1-2	22.5 °	45.0 °	0.050	508.588	29.935	5.893
1-3	22.5 °	67.5 °	0.050	314.615	39.001	12.461
1-4	22.5 °	90.0 °	0.050	374.455	44.145	11.788
2-0	45.0 °	0°	0.050	532.520	36.286	6.997
2-1	45.0 °	22.5 °	0.050	512.878	32.014	6.298
2-2	45.0 °	45.0 °	0.050	490.561	40.135	8.203
2-3	45.0 °	67.5 °	0.050	439.640	41.131	9.382
2-4	45.0 °	90.0 °	0.050	451.785	41.659	9.301
3-0	67.5 °	0°	0.050	506.699	33.607	6.709
3-1	67.5 °	22.5 °	0.050	424.176	32.267	7.630
3-2	67.5 °	45.0 °	0.050	438.286	39.206	9.022
3-3	67.5 °	67.5 °	0.050	464.248	42.290	9.123
3-4	67.5 °	90.0 °	0.050	494.859	41.279	8.356
4-0	90.0 °	0°	0.050	256.935	32.900	15.048
4-1	90.0 °	22.5 °	0.050	539.169	30.354	6.745
4-2	90.0 °	45.0 °	0.050	425.449	43.227	10.324
4-3	90.0 °	67.5 °	0.050	457.796	39.470	8.621
4-4	90.0 °	90.0 °	0.050	487.480	35.684	7.504

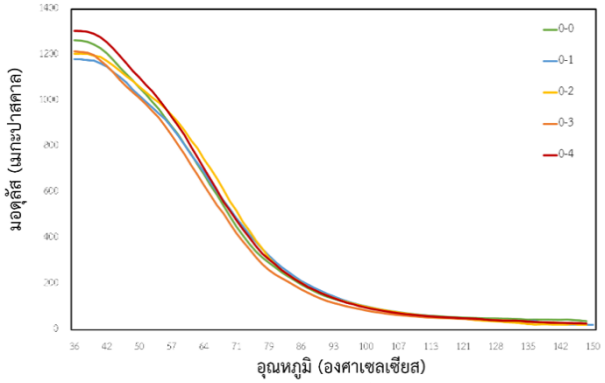
ในส่วนของการศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นต่อสมบัติเชิงกล โดยผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นตัวอย่างที่ผลิตได้ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่แสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า แม้ความหนาของชั้นวัสดุจะแตกต่างกัน แต่ค่าความทนแรงดึงและ % การยืดตัวของชิ้นตัวอย่างกลับมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น

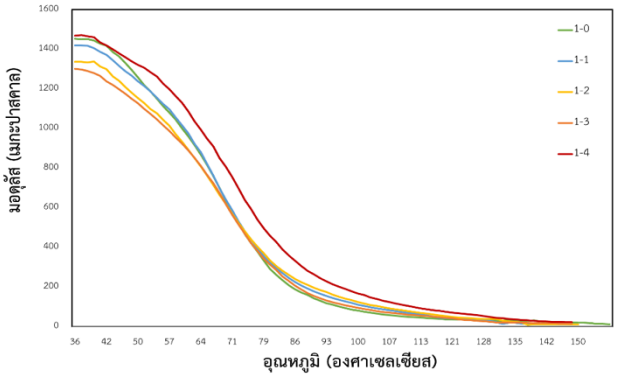
ชื่อตัวอย่าง	การจัดวางมุมองศาตามแนวแกน X	การจัดวางมุมองศาตามแนวแกน Y	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร)	ค่ามอดุลัส (เมกะปาสคาล)	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	% การยืดตัว
1-0A	22.5 °	0°	0.100	502.189	34.636	6.946
1-0B	22.5 °	0°	0.050	514.091	33.330	6.496
1-0C	22.5 °	0°	0.025	527.232	32.852	6.075
2-2A	45.0 °	45.0 °	0.100	476.168	40.159	8.505
2-2B	45.0 °	45.0 °	0.050	490.561	40.135	8.203
2-2C	45.0 °	45.0 °	0.025	442.826	40.441	9.402
3-1A	67.5 °	22.5 °	0.100	434.671	32.210	7.464
3-1B	67.5 °	22.5 °	0.050	424.176	32.267	7.630
3-1C	67.5 °	22.5 °	0.025	483.247	31.742	6.693

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

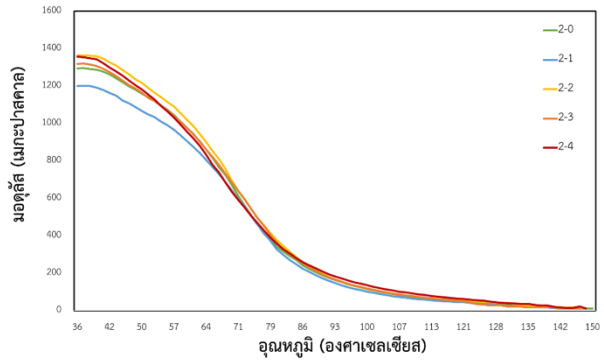
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเรซินที่ผลิตด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติแบบ SLA ด้วยเครื่องทดสอบเชิงกลพลวัต โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดกว้าง 11.64 มม. ยาว 10.50 มม. และหนา 2.03 มม. ในช่วงอุณหภูมิ 35 – 150 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 1 – 5 พบว่าการจัดวางมุมองศาของการพิมพ์ส่งผลต่อค่ามอดุลัสกักเก็บแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 18 แสดงให้เห็นว่า การจัดวางมุมองศาไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ



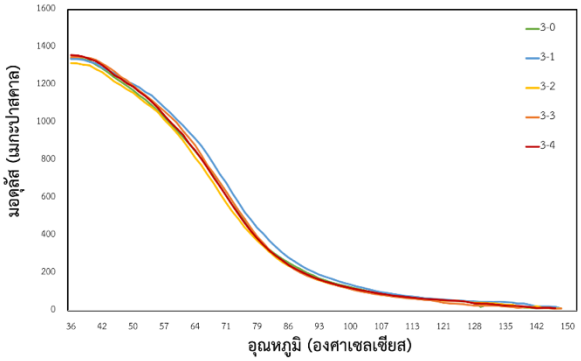
รูปที่ 1 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่แกน X = 0°, แกน Y = 0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0° และความหนาของชั้น 0.05 มิลลิเมตร



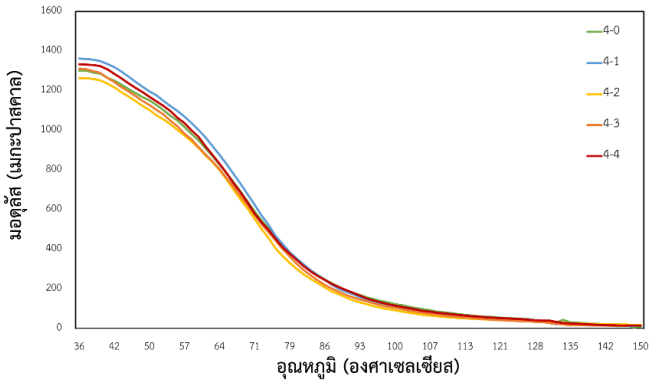
รูปที่ 2 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่แกน X = 22.5°, แกน Y = 0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0° และความหนาของชั้น 0.05 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่แกน X = 45.0°, แกน Y = 0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0° และความหนาของชั้น 0.05 มิลลิเมตร

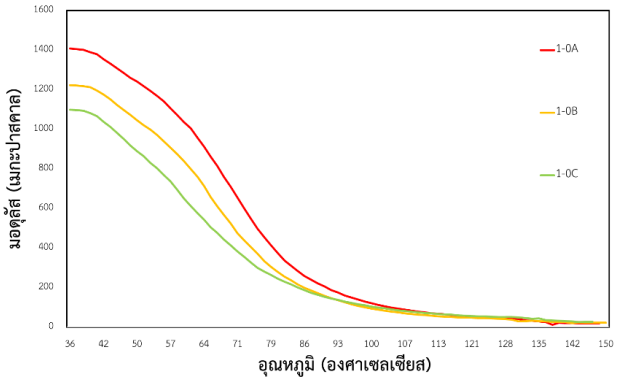


รูปที่ 4 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่แกน X = 67.5°, แกน Y = 0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0° และความหนาของชั้น 0.05 มิลลิเมตร

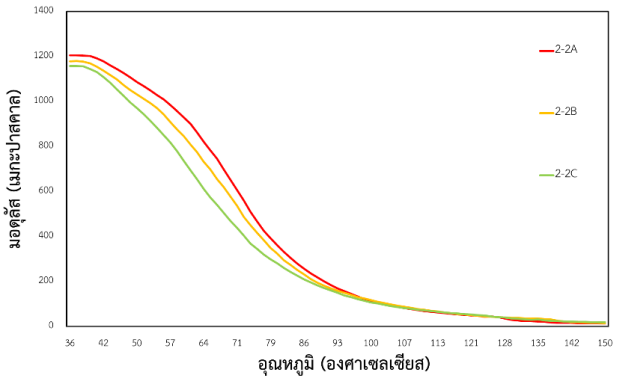


รูปที่ 5 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่แกน X = 90.0°, แกน Y = 0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0° และความหนาของชั้น 0.05 มิลลิเมตร

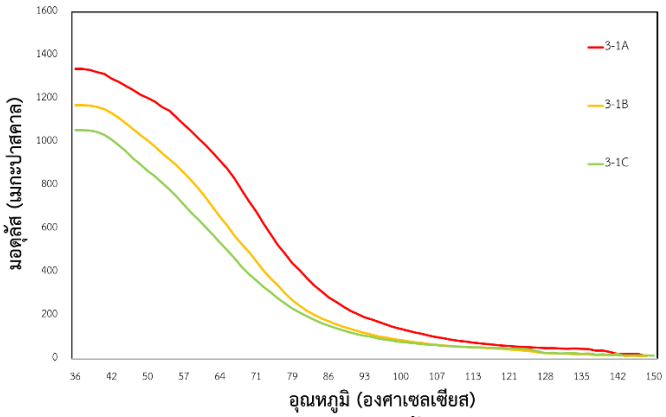
ในทางตรงกันข้ามความหนาของชั้นมีอิทธิพลชัดเจนต่อพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุ เมื่อเพิ่มความหนาชั้นจาก 0.025 มม. เป็น 0.050 และ 0.100 มิลลิเมตร พบว่า ค่ามอดุลัสกักเก็บเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยเฉพาะช่วง 70 – 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเริ่มเปลี่ยนพฤติกรรมเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 6 – 8 ความหนาชั้นที่มากขึ้นทำให้มีพื้นที่สำหรับการกระจายความร้อนมากขึ้น ช่วยให้การกระจายและการถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีเสถียรภาพทางความร้อนและความต้านทานการเสียรูปภายใต้อุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความหนาของชั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลเชิงบวกต่อสมบัติทางความร้อนของวัสดุเรซินและสามารถใช้เป็นตัวแปรควบคุมเพื่อปรับสมบัติของชิ้นงานให้เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือมีความเสี่ยงต่อการเสียรูปจากความร้อน เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นงานอากาศยาน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และต้นแบบทางวิศวกรรมขั้นสูง



รูปที่ 6 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่ความหนา ของชั้น 0.100 0.050 0.025 มิลลิเมตร และ แกน X = 22.5°, แกน Y = 0°



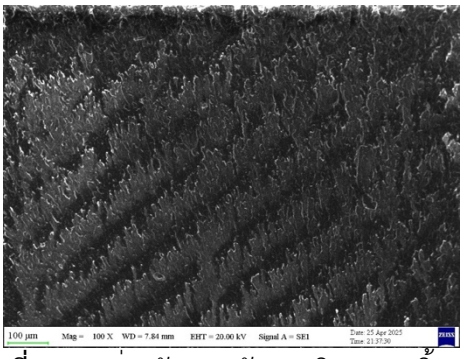
รูปที่ 7 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่ความหนา ของชั้น 0.100 0.050 0.025 มิลลิเมตร และ แกน X = 45.0°, แกน Y = 45°



รูปที่ 8 มอดุลัสกักเก็บของชิ้นงานที่ความหนา ของชั้น0.100, 0.050, 0.025 มิลลิเมตร และแกน X = 67.5°, แกน Y = 22.5°

4.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเผยให้เห็นรายละเอียดพื้นผิวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 9 จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายพบว่า ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานแสดงรอยแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) อย่างชัดเจน โดยสังเกตเห็นได้จากรอยแตกเล็ก ๆ ในรูปแบบของการฉีกเฉือน (Shear tearing) ดังปรากฏลักษณะริ้วคลื่นที่บ่งบอกถึงทิศทางการแพร่ขยายของรอยแตก แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมเชิงกลของชิ้นตัวอย่างที่มีความเปราะสูง



รูปที่ 9 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน

5. สรุป

การศึกษาผลกระทบของการจัดวางมุมองศาและความหนาของชั้นพิมพ์ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุเรซินที่ผลิตด้วยเทคนิค SLA พบว่า ทั้งสองปัจจัยส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานโดยตรง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มมุมในแกน Y จากแนวราบ (0°, 45°, 90°) ช่วยเพิ่มความทนต่อแรงดึงและการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากการปรับองศาจัดวางทำให้การรับแสงยูวีทั่วถึงมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างภายในมีความสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น ส่วนการปรับมุมในแกน X มีผลรองลงมา ในส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนบ่งชี้ว่า การเปลี่ยนมุมองศาจัดวางไม่ส่งผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปรับเพิ่มความหนาของชั้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างมีค่ามอดุลัสกักเก็บเพิ่มสูงขึ้น แสดงถึงเสถียรทางความร้อนที่มากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 70 – 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางกล นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับมุม X = 22.5° และ Y = 90° ที่ความหนาชั้น 0.050 มิลลิเมตร ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าความทนแรงดึงสูงสุด 44.145 เมกะปาสคาล ส่วนมุม X = 90° และ Y = 0° ที่ความหนาชั้น 0.050 มิลลิเมตร ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าการยืดตัวสูงสุดร้อยละ 15.048

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหาร โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ สถานที่ และทรัพยากรในการทดลอง จนทำให้งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมสรรพาวุธทหารอากาศที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] *ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ. ๒๕๖๑–๒๕๘๐)*, กองทัพอากาศ. [ออนไลน์]. Available: https://welcome-page.rtaf.mi.th/blog/e-ksaarephyaephr-11/yuththsaastrk-ngthaph-aakaas-20-pii-ph-s-2561-2580-38 (เข้าถึงเมื่อ: 3 ตุลาคม 2568).

[2] ศ. จรรยา, “พอลิเมอร์,” *ระบบคลังความรู้ SciMath*, ม.ป.ป. [ออนไลน์]. Available: https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/9631-1-9631 (เข้าถึงเมื่อ: 5 ตุลาคม 2568).

[3] “วัสดุน้ำหนักเบาและคอมโพสิต,” *Leitz Group*, ม.ป.ป. [ออนไลน์]. Available: https://www.leitz.org/th/industries/lightweight-composite-materials (เข้าถึงเมื่อ: 5 ตุลาคม 2568).

[4] กรมช่างอากาศ, *วัสดุใช้กับงานสร้างอากาศยาน*, กรุงเทพมหานคร: กรมช่างอากาศ, ม.ป.ป.

[5] ส. ม. กรุงเทพฯ, *วัสดุประกอบสำหรับการออกแบบปีกอากาศยานที่เบากว่า*, *Ku.ac.th*, ม.ป.ป. [ออนไลน์]. Available: https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/result/6748 (เข้าถึงเมื่อ: 6 ตุลาคม 2568).

[6] กรมช่างอากาศ, *โครงสร้างอากาศยาน*, กรุงเทพมหานคร: กรมช่างอากาศ, ม.ป.ป.

[7] หางโจว โฮลีคอร์ คอมโพสิต วัสดุ จำกัด, “แผงรังผึ้งมีกี่ประเภท? ข้อดีของแผงรังผึ้งคืออะไร?. Available: https://th.holycorecomposite.com/news/what-are-the-types-of-honeycomb-panels-59818924.html (เข้าถึงเมื่อ: 7 ตุลาคม 2568).

[8] J. Borrello, P. Nasser, J. C. Iatridis, and K. D. Costa, “3D printing a mechanically-tunable acrylate

resin on a commercial DLP-SLA printer," *Additive Manufacturing*, vol. 23, pp. 374–380, October 2018.

[9] *Phrozen3d.com*, "3D Printing Parameters," [Online]. Available: https://helpcenter.phrozen3d.com/hc/en-us/articles/6395912188697-3D-printing-parameters (Accessed: October. 7, 2025).

[10] Y. Cheng and C. Sun, *Stereolithography: Mechanisms and Applications*. Springer, 2018.

[11] L. Wang, Y. Jiang, and H. Zhou, "Influence of build orientation on the surface roughness and dimensional accuracy in SLA 3D printing," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, pp. 1215–1225, August 2020.

[12] H. S. Lee, J. S. Park, and S. W. Choi, "Parametric study on build orientation and layer thickness in SLA process," *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 270–279, 2017.

[13] S. Park, A. M. Smallwood, and C. Y. Ryu, "Mechanical and thermal properties of 3D-printed thermosets by stereolithography," Journal of Photopolymer Science and Technology, vol. 32, no. 2, pp. 227–232, June 2019.

[14] A. Alshamrani, R. Raju, and E. A. Ellakwa, "Effect of printing layer thickness and postprinting conditions on the flexural strength and hardness of 3D-printed resin," *BioMed Research International*, February 2022. (WILEY Online Library).

[15] E. Wang, F. Yang, X. Shen, Z. Li, X. Yang, X. Zhang, and W. Peng, "Investigation and optimization of the impact of printing orientation on mechanical properties of resin sample in the low-force stereolithography additive manufacturing," *Materials*, vol. 15, pp. 6743, September 2022.

[16] L. Beníček, M. Vašina, and P. Hrbáček, "Influence of 3D printing conditions on physical-mechanical properties of polymer materials," *Polymers*, vol. 17, no. 1, pp. 43, December 2024.

สงครามรหัสลับ

The Cryptographic War

ปรเมศวร์ กุมารบุญ
ศูนย์วิจัยและพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล
Poramez Kumarnboon
Research and Development Center, The Office of Personal Data Protection Committee
poramez@live.com

บทคัดย่อ

สงครามคณิตศาสตร์ของอัลกอริทึมเพื่อปิดบังอำพรางข้อมูลในระบบการสื่อสารนับตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่หนึ่งถึงปัจจุบันอยู่ในมิติมืดที่ไม่ได้รับความสนใจในวงกว้าง แต่มีความสำคัญสูงสุดในสงครามแบบผสมผสานด้วยเดิมพัน การเข้าควบคุมเทคโนโลยีป้องกันประเทศของฝ่ายตรงข้าม ข่าวกรอง และการทำลายล้าง บทความวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงสถานการณ์งานวิศวกรรมคอมพิวเตอร์เพื่อการป้องกันประเทศในด้านวิทยาการรหัสลับ โดยคู่ต่อสู้ระหว่างภัยคุกคามจากควอนตัมคอมพิวเตอร์และอัลกอริทึมของ ชอร์ กับหลักการทางคณิตศาสตร์แลตทิซและแฮชที่ไม่อาจคำนวนย้อนกลับหาต้นฉบับได้ อันเป็นเครื่องมือสำคัญในปัจจุบันที่สถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติสหรัฐอเมริกาประกาศให้คำแนะนำใช้งาน (FIPS 203, 204, and 205) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์วิเคราะห์สถานการณ์สงครามคณิตศาสตร์ในปัจจุบัน

คำสำคัญ: วิทยาการรหัสลับ, แลตทิซ, สงครามแบบผสมผสาน

Abstract

The mathematical warfare of algorithms designed to conceal and protect information in communication systems—from World War I to the present—has long existed in an overlooked yet critical dimension of conflict. This hidden domain plays a decisive role in hybrid warfare, where the stakes involve dominance over national defense technologies, intelligence networks, and destructive capabilities. This research article examines the evolution of computer engineering for national defense through the lens of cryptologic science, highlighting the modern confrontation between quantum-computing threats powered by Shor's algorithm and the mathematical defenses based on lattice and hash functions, which resist reverse computation. These

cryptographic principles underpin the current U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST) Post-Quantum Cryptography standards (FIPS 203, 204, and 205). Using artificial intelligence to analyze ongoing trends, this study elucidates the contemporary state of “mathematical warfare,” where computation, encryption, and national security converge.

Keywords: Cryptography, lattice-based, hybrid warfare

1.บทนำ

คณิตศาสตร์กับสงคราม อยู่คู่กันมาตั้งแต่มนุษย์เริ่มทำลายล้างกัน โดยคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญในการกำเนิดกลยุทธ์สำคัญในการรบและแฝงกายอยู่ในทุกอณูของงานวิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยสมองของอัจฉริยะที่แต่ละกองทัพได้ครอบครอง แต่ปัจจุบันกำลังเข้าสู่จุดเปลี่ยนแห่งศตวรรษ แม้สมองของมนุษย์อาจจะไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้คำนวณ กลับเป็นคอมพิวเตอร์ยุคควอนตัมที่กำลังเข้าประจำการทำหน้าที่แทน แต่สิ่งที่คืบคลานเข้ามาเป็นมหาภัยคุกคามทุกกองทัพ หากควอมตัมคอมพิวเตอร์ไปเสริมอำนาจให้กับผู้ร้ายที่ไม่มีคุณธรรม อย่างไรก็ตามวิศวกรคอมพิวเตอร์เพื่อการป้องกันประเทศ ก็ยังเป็นผู้กำหนดกลยุทธ์อยู่ดี โดยค้นหาหลักการทางคณิตศาสตร์ให้คอมพิวเตอร์ที่มีพลังประมวลผลมหาศาลทำการ เจาะระบบ ถอดรหัส และปกปิดความลับ

16 มกราคม ค.ศ.1917 นายอาเธอร์ ซิมแมร์มันน์ (Arthur Zimmermann) รัฐมนตรีว่าการกระทรวงการต่างประเทศของเยอรมนี ส่งโทรเลขที่เข้ารหัสลับถึงเอกอัครราชทูตเยอรมนีประจำเม็กซิโก เพื่อให้ส่งข้อเสนอไปยังรัฐบาลเม็กซิโกในการร่วมทำสงคราม [3]

เนื้อหาหลักของโทรเลขฉบับสำคัญ คือ *เยอรมนีตั้งใจทำสงครามเรือดำน้ำแบบไม่จำกัดพื้นที่ ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 1917 และหากสหรัฐฯ ประกาศสงครามกับเยอรมนี ให้เอกอัครราชทูตเสนอเม็กซิโกทำพันธมิตรทางทหารกับเยอรมนี ถ้าหากเยอรมนีได้รับชัยชนะ เม็กซิโกจะได้รับความช่วยเหลือทางการเงิน และจะสามารถยึดดินแดนที่เคยสูญเสียไปให้กับสหรัฐอเมริกากลับคืนมา ได้แก่ รัฐเท็กซัส นิวเม็กซิโก และแอริโซนา ฯลฯ*

หน่วยข่าวกรองของอังกฤษ “Room 40” สามารถถอดรหัสลับโทรเลขของ อาเธอร์ ซิมเมอร์มันน์ ในครั้งนั้นได้ ทำให้สหรัฐฯ ตัดสินใจเข้าสู่สงครามโลกครั้งที่หนึ่ง ซึ่งถือเป็นเหตุการณ์สำคัญที่พลิกผลของสงคราม เรียกเหตุการณ์ถอดรหัสลับครั้งนั้นว่า ซิมเมอร์มันน์ โทรเลข (Zimmermann Telegram)

สงครามในประวัติศาสตร์ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงในสนามรบ และคณิตศาสตร์มิได้เป็นเพียงเครื่องมือทางวิศวกรรมป้องกันประเทศที่มีไว้สร้างอาวุธสงคราม หากแต่เกิดขึ้นบนอากาศล่องลอยอยู่ในสนามข่าวสารที่การสื่อสารมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นเป็นวิชาการเข้ารหัสลับเพื่อไม่ให้ข้าศึกฝ่ายตรงข้ามล่วงรู้แผน ขณะเดียวกันก็ต้องพยายามเจาะระบบถอดรหัสเพื่อทำลายล้างแผนการข้าศึกไปพร้อมกันเรียกว่าวิชา วิทยาการรหัสลับ (Cryptology) [1] ซึ่งครอบคลุมทั้งวิธีการเข้ารหัสลับ (Cryptography) และวิชาการถอดรหัสลับ (Cryptanalysis)

สหรัฐอเมริกากลายเป็นมหาอำนาจในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ส่วนหนึ่งก็ด้วยความสามารถในการดักฟังและถอดรหัสสัญญาณโทรเลขข้อมูลทางการทหาร โดยบุคคลสำคัญทางประวัติศาสตร์ คือ วิลเลียม เฟรเดอริก ฟรีดแมน (William Frederick Friedman) เป็นนักรหัสศาสตร์ผู้บุกเบิกวิชาวิทยาการรหัสลับทางด้านการทหาร และได้วางรากฐานทางทฤษฎีให้กับการเข้ารหัสสมัยใหม่ในยุคนั้น ในช่วงสงครามเขาก่อตั้ง U.S. Army’s Signals Intelligence Service (SIS) ในช่วงปี 1930s และที่ SIS เขาและทีมได้เริ่มต้นพัฒนาเทคนิคการถอดรหัสลับขั้นสูง

และเป็นผู้ฝึกนักถอดรหัสรุ่นใหม่ที่มีบทบาทสำคัญในสงครามโลกครั้งที่ 2 ฟรีดแมนและทีม SIS มีส่วนสำคัญในการถอดรหัสรหัสลับของญี่ปุ่น โดยเฉพาะรหัส “PURPLE” [9]

“PURPLE” เป็นชื่อที่กองทัพสหรัฐฯ ตั้งให้กับเครื่องเข้ารหัสทางการทูตของญี่ปุ่น เทียบเท่า “Enigma” ของเยอรมนี โดยฟรีดแมนและทีมของเขาใน SIS ใช้เวลาเกือบสองปีในการสร้างเครื่องถอดรหัสเลียนแบบ PURPLE ได้สำเร็จ โดยไม่เคยเห็นเครื่องต้นฉบับเลย ความสำเร็จนี้ทำให้สหรัฐฯ สามารถอ่านข้อความทางการทูตของญี่ปุ่นได้ตั้งแต่ก่อนการโจมตีเพิร์ลฮาร์เบอร์ และการถอดรหัส PURPLE มีผลต่อยุทธศาสตร์ของฝ่ายสัมพันธมิตร เช่น การรู้แผนการเคลื่อนไหวของญี่ปุ่นล่วงหน้า และการเตรียมการตอบโต้ในสมรภูมิต่าง ๆ

ฟรีดแมนมีส่วนในการก่อตั้ง National Security Agency (NSA) ในช่วงแรก [9] เขาพัฒนาแนวคิดทางคณิตศาสตร์สำหรับ “Index of Coincidence” (ค่าความน่าจะเป็นที่ตัวอักษรสองตัวที่สุ่มเลือกจากข้อความเดียวกันจะเป็นตัวอักษรเดียวกัน) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความถี่อักษรในรหัส งานของเขากลายเป็นรากฐานของ cryptanalysis สมัยใหม่ ทั้งทางทหารและพลเรือน

วิทยาการรหัสลับนับวันกลายเป็นอาวุธสำคัญที่ชี้ขาดผลแพ้ชนะของการสงคราม เพราะมิใช่เพียงการดักฟังข้อมูลข่าวสาร แต่รวมถึงการเข้ายึดอาวุธยุทโปกรณ์ของกองทัพด้วยเจาะระบบถอดรหัสเข้าควบคุมการทำงานของเทคโนโลยีป้องกันประเทศทั้งหมดของฝ่ายตรงข้าม อีกทั้งยังสามารถฝังมัลแวร์ทำลายล้างด้วยการก่อวินาศกรรมโครงสร้างพื้นฐานสำคัญของอริราชศัตรู [2]

“สงครามรหัส” หมายถึงการต่อสู้ระหว่างนักคณิตศาสตร์และนักวิทยาการข้อมูล ที่พยายามสร้างรหัสซึ่งไม่มีวันถอดได้ กับผู้พยายามทำลายมัน

2. วิธีวิจัย

งานวิจัยทางวิศวกรรมนี้ ใช้วิธีวิจัยแบบเอกสาร (Document-Based Research) ด้วยการเก็บเอกสารทั้งแบบออนไลน์และสิ่งพิมพ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูล โดยทำการรวบรวมเอกสาร อาทิ NIST Post-Quantum Cryptography (PQC) standardization documents เอกสารทางประวัติศาสตร์ Cryptography บทความวิชาการเกี่ยวกับคณิตศาสตร์ Lattice-based cryptography และ Shor’s algorithm

เนื่องด้วยผู้วิจัย ไม่เข้าใจฟิสิกส์ของกลศาสตร์ควอนตัมและคณิตสาสตร์ชั้นสูง แต่จำเป็นต้องเข้าใจหลักคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้เป็นกลยุทธ์ในการกำหนดอัลกอริทึมเพื่อเข้ารหัสข้อมูล จึงใช้ Generative AI เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิจัย (AI Tutoring) ด้วยการตั้งคำถาม (คำสั่ง Prompt) ต่อ ChatGPT และนำคำตอบมาศึกษาเพื่อทำการวิเคราะห์สถานการณ์สงครามคณิตศาสตร์ระหว่างฝั่งผู้เจาะระบบที่ใช้ควอนตัมคอมพิวเตอร์กับอัลกอริทึมของ ชอร์ (Shor’s Algorithm) และฝั่งป้องกันการถอดรหัสลับยุคหลังมีควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า Post-Quantum Cryptography (PQC) หรือ อัลกอริทึมต้านทานควอนตัม (Quantum-resistant encryption

algorithms) ปัจจุบันเป็นมาตรฐานของ NIST ที่ใช้อัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard “ฝั่งใดได้เปรียบ”จึงเป็นคำถามวิจัยในบทความวิจัยนี้

โดย ChatGPT จะเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ว่า ควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่ใช้อัลกอริทึมของ ชอร์ ใช้หลักคณิตศาสตร์ใดในการถอดรหัส และใช้ ChatGPT เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ว่า เหตุใด อัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ Lattice-Based ตามมาตรฐาน PQC ของ NIST ใช้ป้องกันการถอดรหัสเจาะระบบด้วยควอนตัมคอมพิวเตอร์และอัลกอริทึมของ ชอร์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

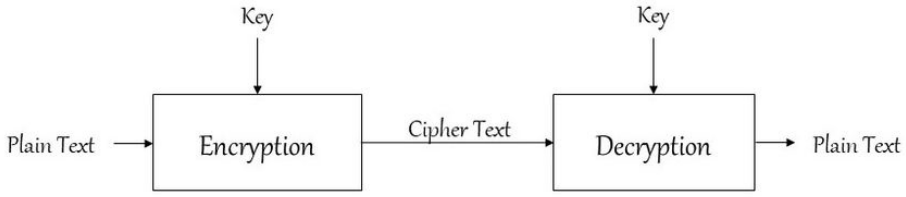
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศาสตร์แห่งการเข้ารหัสข้อมูลข่าวสารเริ่มต้นจาก จูเลียส ซีซาร์ (Julius Caesar) ซึ่งเมื่อต้องให้ม้าใช้คนเร็วส่งจดหมายสื่อสารระหว่างกองทัพ แต่จดหมายต้นฉบับ (Plain text) ซีซาร์ ให้เลื่อนตัวอักษร ในจดหมายไปข้างหน้า 3 ตำแหน่ง เช่น D แทนด้วย A และ E แทนด้วย B เป็นต้น เรียกว่า Caesar Cipher เพื่อซ่อนความหมาย แม้ข้าศึกจับม้าใช้คนเร็วแย่งจดหมายไปอ่าน ก็ไม่สามารถแปลออก ไม่อาจทราบแผนการได้ เพราะไม่ทราบว่าต้องเลื่อนตัวอักษรไปข้างหน้า 3 ตำแหน่ง

ตารางที่ 1 การเข้ารหัสข้อมูลแบบ จูเลียส ซีซาร์

อักษรจดหมายต้นฉบับ	เลื่อนตัวอักษรไปข้างหน้า 3 ตำแหน่ง
D	A
E	B
F	C
G	D

แม้ดูเรียบง่าย แต่นั่นเป็นจุดเริ่มต้นของแนวคิด “การปกปิดข้อมูลผ่านการแปลงเชิงคณิตศาสตร์” เมื่อสงครามโลกครั้งที่หนึ่งปะทุขึ้น การสื่อสารผ่านโทรเลขและคลื่นวิทยุทำให้ความลับทางทหารเสี่ยงต่อการถูกดักฟังทุกประเทศ จึงเริ่มตั้ง “หน่วยรหัสลับ” ทำการเข้ารหัสข้อมูลข่าวสาร



รูปที่ 1 หลักพื้นฐานการเข้ารหัสข้อมูล (Cryptography)

องค์ประกอบพื้นฐานของกระบวนการเข้ารหัสเป็นดังรูปที่ 1 เริ่มจากจดหมายต้นฉบับที่ยังไม่ได้เข้ารหัส เรียกว่า Plaintext เมื่อนำมาเข้ากระบวนการเข้ารหัสเรียกว่า Encryption โดยการผสมกุญแจการเข้ารหัสเรียกว่า Key เป็นความลับที่รู้กันเฉพาะกลุ่มว่าสลับตัวอักษรในจดหมายอย่างไร และข้อความที่เข้ารหัสแล้ว ถูกส่งออกอากาศผ่านเครือข่ายวิทยุหรืออินเทอร์เน็ตเรียกว่า Cipher text เมื่อถึงปลายทางผู้รับ Cipher text จะถูกนำมาเข้ากระบวนการถอดรหัสเรียกว่า Decryption ย้อนกลับเพื่อคืนข้อมูลต้นฉบับให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และ Ciphe rtext ที่วิ่งอยู่ในระบบการสื่อสาร ข้าศึกหรือแฮ็กเกอร์จะดักรับข้อมูลและพยายามหากุญแจถอดรหัส

2.1 ประเภทของการเข้ารหัส (Types of Cryptography)

2.1.1 Symmetric Cryptography (เข้ารหัสแบบสมมาตร) เป็นการใช้กุญแจเดียวกัน ในการเข้ารหัสและถอดรหัสรวดเร็ว เหมาะกับการเข้ารหัสข้อมูลจำนวนมาก ตัวอย่างอัลกอริทึม

- AES (Advanced Encryption Standard)
- DES (Data Encryption Standard)

เขียนเป็นสมการการเข้ารหัสได้ว่า $E_k(M) = C, \quad D_{k(}C) = M$

2.1.2 Asymmetric Cryptography (เข้ารหัสแบบอสมมาตร) เป็นการใช้คู่กุญแจ (Key Pair) ได้แก่ Public Key (เผยแพร่ได้) แต่ Private Key (เก็บเป็นความลับ) ใช้ในระบบ Digital Signature และ Key Exchange ตัวอย่างอัลกอริทึม

- RSA (Rivest–Shamir–Adleman)
- ECC (Elliptic Curve Cryptography)

เขียนเป็นสมการการเข้ารหัสได้ว่า $E_{pub}(M) = C, \quad D_{priv}(C) = M$

2.1.3 Hash Function (ฟังก์ชันแฮช) คือวิธีการอย่างหนึ่งซึ่งทำให้ข้อมูลส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดให้กลายเป็นจำนวนเล็ก ๆ อันหนึ่งอย่างมีปฏิสัมพันธ์ ซึ่งจำนวนดังกล่าวเปรียบได้ว่าเป็น "ลายนิ้วมือ" ของข้อมูล ไม่ใช่การเข้ารหัสแบบถอดกลับได้ แต่แฮชเป็น one-way function ไม่สามารถย้อนข้อมูลส่งออกให้เป็นข้อมูลนำเข้าได้

เขียนเป็นสมการการเข้ารหัสได้ว่า $H(M) = h$

ตารางที่ 2 ตัวอย่างแฮชอัลกอริทึมยอดนิยม

ชื่ออัลกอริทึม	ความยาวผลลัพธ์	สถานะความปลอดภัย	หมายเหตุ
MD5	128 บิต	ไม่ปลอดภัย	ใช้ง่ายแต่มี collision มาก
SHA-1	160 บิต	ไม่ปลอดภัย	ใช้ในอดีต เช่น SSL รุ่นเก่า
SHA-256	256 บิต	ปลอดภัย (ปัจจุบัน)	ใช้ใน Blockchain, TLS
SHA-512	512 บิต	ปลอดภัยสูง	ใช้ในระบบที่ต้องการ hash ยาว
SHA-3 (Keccak)	224–512 บิต	ปลอดภัยที่สุด (ใหม่กว่า SHA-2)	ออกแบบโดยทีม Keccak
BLAKE2 / BLAKE3	ยืดหยุ่นได้	ปลอดภัยสูง + เร็ว	ใช้ในแอปสมัยใหม่
RIPEMD-160	160 บิต	ปลอดภัยปานกลาง	เคยใช้ใน Bitcoin address

2.2 วิทยาการรหัสลับ: จากสมองคนสู่เครื่องมือกลเข้ารหัส

หลังสงครามโลกครั้งที่สอง การเข้ารหัสถูกยกระดับด้วยกลศาสตร์และอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่อง Enigma ของนาซีเยอรมัน ซึ่งถูกถอดรหัสโดย อลัน ทัวริ่ง (Alan Turing) และทีม เบล็ตช์ลีย์ พาร์ค (Bletchley Park) เป็นจุดกำเนิดของ “คณิตศาสตร์เชิงอัลกอริทึม” ที่กลายเป็นรากฐานของคอมพิวเตอร์และการเข้ารหัสยุคใหม่ ในศตวรรษที่ 20 วิทยาการรหัสลับได้พัฒนาเป็นศาสตร์ทางคณิตศาสตร์เต็มรูปแบบ โดยแบ่งเป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่ การเข้ารหัสสมมาตร (Symmetric Cryptography) เช่น AES และการเข้ารหัสแบบกุญแจคู่ (Asymmetric Cryptography) เช่น RSA และ ECC แต่ทุกระบบยังคงพึ่งพา “ความยากในการคำนวณ” ของคณิตศาสตร์คลาสสิก เช่น การแยกตัวประกอบของจำนวนเฉพาะหรือการหาคำตอบของสมการโมดูลาร์

2.3 สงครามครั้งใหม่: จากเครื่องมือกลเข้ารหัสถึงควอนตัมคอมพิวเตอร์

ในทางวิทยาการรหัสลับความปลอดภัยของกระบวนการเข้ารหัส ขึ้นอยู่กับ “ปัญหาที่ยากต่อการแก้” (Computational Hardness) เพราะความยากในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์หรืออัลกอริทึม จะใช้เวลาหรือทรัพยากรมากในการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์คลาสสิกทำให้ไม่สามารถถอดรหัสได้ในช่วงกาลเวลานั้น หากโจมตีระบบต้องใช้เวลาเป็น Exponential เช่น 2^{128} ขั้นตอน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ในช่วงอายุคน

ความยากในการแยกตัวประกอบจำนวนขนาดใหญ่ช่วยให้มั่นใจในความปลอดภัยของข้อมูล ดังนั้น การพัฒนาวิธีการแยกตัวประกอบที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นความท้าทายที่ยาวนานในวิทยาการรหัสลับ กระบวนการแยกตัวประกอบ (Factorization) เกี่ยวข้องกับการค้นหาจำนวนเฉพาะที่นำมาคูณกันเพื่อสร้างจำนวนที่กำหนด มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ (Exponentially) เมื่อขนาดของตัวเลขเพิ่มขึ้น คอมพิวเตอร์คลาสิกแบบดั้งเดิมประสบปัญหาไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการแยกตัวประกอบจำนวนขนาดใหญ่

ในปี ค.ศ. 1994 นักคณิตศาสตร์ชื่อ ปีเตอร์ ชอร์ (Peter Shor) แสดงถึงความสำเร็จที่ก้าวล้ำอัลกอริทึมในการแยกตัวประกอบ เนื่องจากพลังการประมวลผลของควอนตัมคอมพิวติ้งในการแยกตัวประกอบได้เร็วกว่าคอมพิวเตอร์แบบคลาสสิกอย่างมาก คอมพิวเตอร์แบบคลาสสิกอาศัยวิธีการแบบ Brute force (เดารหัส) ในการแยกตัวประกอบจำนวนขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูงและใช้เวลานาน ในทางตรงกันข้ามอัลกอริทึมของ ชอร์ ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติเฉพาะของควอนตัม เช่น การวางซ้อน (Superposition) และ การพัวพันเชิงควอนตัม (Entanglement) เพื่อดำเนินการแยกตัวประกอบได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

แนวคิดพื้นฐานอัลกอริทึมของ ชอร์ คือการใช้ การแปลงฟูเรียร์แบบควอนตัม (Quantum Fourier transform) และ การประมาณเฟสแบบควอนตัม (Quantum phase estimation) เพื่อค้นหา คาบ (period) ของฟังก์ชันเชิงมอดูลาร์ การค้นหาคาบทำให้อัลกอริทึมของ ชอร์ สามารถอนุมานตัวประกอบของจำนวนประกอบได้ อัลกอริทึมนี้ปฏิวัติการแยกตัวประกอบโดยการลดความซับซ้อนจากระดับเลขชี้กำลังเป็นระดับ พหุนาม (Polynomial) ทำให้เร็วกว่าวิธีการแบบคลาสสิกมาก พลังของอัลกอริทึมของ ชอร์ อยู่ที่ความสามารถในการใช้ประโยชน์จากการประมวลผลแบบขนาน (Parallelism) และความสามารถในการวางซ้อนของควอนตัมคอมพิวเตอร์ ในขณะที่คอมพิวเตอร์แบบคลาสสิกจะต้องตรวจสอบแต่ละหมายเลขทีละรายการเพื่อค้นหาตัวประกอบ ควอนตัมคอมพิวเตอร์สามารถสำรวจความเป็นไปได้หลายอย่างพร้อมกันได้ การประมวลผลแบบขนานนี้ช่วยเพิ่มความเร็วในกระบวนการแยกตัวประกอบได้อย่างมาก [8]

ผลกระทบ อัลกอริทึมของ ชอร์ ต่อวิชาการเข้ารหัสไม่สามารถละเลยความกังวลไปได้ การเข้ารหัสหลายเทคนิค เช่น อัลกอริทึม RSA ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาศัยความยากลำบากในการคำนวณของการแยกตัวประกอบ และหากมีควอนตัมคอมพิวเตอร์ (Quantum Computer) ที่ใช้งานได้จริงและสามารถใช้อัลกอริทึมของชอร์ ได้ จะทำให้ระบบการเข้ารหัสเหล่านี้มีความเสี่ยงที่ถูกเปิดเผย กลายเป็นข้อกังวลเร่งด่วนเพื่อตอบสนองต่อภัยคุกคามที่อาจเกิดขึ้นจากอัลกอริทึมของ ชอร์ ที่สามารถแยกตัวประกอบจำนวนมหาศาลได้ในเวลาอันสั้น ซึ่ง

หมายความว่า RSA หรือ ECC ที่ใช้กันมานานกว่า 40 ปี การเข้ารหัสที่เคยมั่นคงกลับกลายเป็นเปราะบาง อาจถูกถอดรหัสได้ภายในไม่กี่นาที

วิศวกรคอมพิวเตอร์เพื่อการป้องกันประเทศกำลังสำรวจวิธีการเข้ารหัสทางเลือก เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการเข้ารหัสที่รับมือกับควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานได้จริงและสามารถใช้อัลกอริทึมของ ชอร์ ซึ่งวิศวกรเรียกว่าอัลกอริทึมต้านทานควอนตัม (Quantum-Resistant Encryption Algorithms) ที่สามารถต้านทานการโจมตีจากควอนตัมคอมพิวเตอร์ และอัลกอริทึมของ ชอร์ นี่คือจุดเริ่มต้นของ Post-Quantum Cryptography (PQC) หรือการเข้ารหัสลับยุคหลังควอนตัม

National Institute of Standards and Technology (NIST) ได้ประกาศให้คำแนะนำอัลกอริทึมต้านทานควอนตัม Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard เพื่อใช้เป็นแนวทาง

4. การดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยดำเนินการศึกษาข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบทั้งฝั่ง ควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่ใช้อัลกอริทึมของ ชอร์ และมาตรฐาน Post-Quantum Cryptography (PQC) ของ NIST ที่ประกาศฉบับสมบูรณ์ (Finalized) ชุดแรกและเป็นมาตรฐานล่าสุดในขณะนี้ มีทั้งหมด 3 ฉบับ ซึ่งเผยแพร่เมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2024 [5],[6] และ [7] ได้มีการศึกษาวิจัยดังนี้

4.1 คณิตศาสตร์การเข้ารหัสคอมพิวเตอร์ปัจจุบัน

ผู้วิจัยใช้ ChatGPT เป็นเครื่องมือในการวิจัย โดยตั้งคำถามเป็น คำสั่ง Prompt โดยเริ่มต้นดังนี้

คำสั่ง (Prompt 1): “ขอทราบหลักการถอดรหัส RSA/ECC”

คำตอบ: RSA ใช้ “ความยากของการแยกตัวประกอบจำนวนเต็มขนาดใหญ่” เวลาเข้ารหัส–ถอดรหัสจริง เรา ไม่ได้แยกตัวประกอบเอง แต่ระบบอาศัย “คีย์ลับ” ที่ผูกกับคณิตศาสตร์ของจำนวนเฉพาะ

โครงสร้างสำคัญ

- เลือกจำนวนเฉพาะสองตัว: p และ q (สุ่มจากจำนวนมาก)
- คำนวณ $N = pq$ (modulus)
- คำนวณค่า $\phi(N) = (p - 1)(q - 1)$
- เลือกเลข e ที่หารร่วมกับ $\phi(N)$ เป็น 1
- หาค่า d ซึ่งเป็น inverse ของ e mod $\phi(N)$

$$ed \equiv 1 \pmod{\phi(N)} \quad (1)$$

โดยที่

Public key = (e, N)

Private key = (d, N)

การเข้ารหัส

ข้อความ M

$$C = M^e \bmod N \quad (2)$$

การถอดรหัส

$$M = C^d \bmod N \quad (3)$$

กุญแจสำคัญคือ

ถึงจะรู้ e และ Nแต่ก็หา d ไม่ได้ หากไม่รู้ p,q จึงต้อง "แยกตัวประกอบ N" ซึ่งยากมาก

จุดอ่อนของ RSA

หากใคร “แยกตัวประกอบ N ได้” จะรู้ p,q คำนวณ d **ถอดรหัสได้!**

หลักการทำงานของ ECC (Elliptic Curve Cryptography)

ECC ใช้คณิตศาสตร์ของ “จุดบนเส้นโค้งวงรี” ความยากที่ใช้ป้องกันคือ Elliptic Curve Discrete Logarithm Problem – ECDLP

เส้นโค้งวงรีทั่วไปมีสมการประมาณว่า

$$y^2 = x^3 + ax + b \mod p \quad (4)$$

บนเส้นโค้ง เราสามารถทำ การบวกจุด (Point Addition) และ คูณจุดด้วยสเกลาร์ (Scalar Multiplication)

ถ้าให้

- จุดฐาน G
- เลขลับ k (private key)

ให้คีย์สาธารณะเป็น $Q = kG$ (5)

แต่ปัญหาสำคัญคือ

หากรู้ G และ Q ก็ยัง หา k ไม่ได้ เพราะเป็น Discrete Logarithm Problem (ต้องไล่ทีละค่าใช้เวลานานมากมหาศาล)

ตัวอย่างหลักการการเข้ารหัสแบบ ECIES

- ฝั่งส่งสร้างค่าสุ่ม r
- คำนวณจุด $R = rG$ (แนบไปกับ ciphertext)
- คำนวณ shared key: $K = rQ$
- ใช้ *K* เข้ารหัสข้อความแบบ symmetric

ฝั่งรับ

ใช้ private key k คำนวณ shared key เดิม

$$K = kR = k(rG) = r(kG) = rQ \quad (6)$$

ใช้ K ถอดรหัสข้อความ

จุดสำคัญคือ shared key เกิดจากเลขลับคนละฝั่งแต่ได้ค่าตรงกัน เพราะกฎคณิตศาสตร์ของ elliptic curve

ทำไมควอนตัมคอมพิวเตอร์จึงเป็นปัญหา RSA/ECC?

Shor's Algorithm สามารถ

- แยกตัวประกอบ N ได้เร็วมากเพื่อทำลาย RSA
- แก้ discrete log ได้เร็วมากเพื่อทำลาย ECC

เพราะฉะนั้นทั้ง RSA และ ECC ไม่ปลอดภัยเมื่อโลกเข้าสู่ยุคควอนตัมคอมพิวเตอร์

4.2 คณิตศาสตร์ควอนตัมคอมพิวเตอร์ และอัลกอริทึมของ ชอร์

อัลกอริทึมของ ชอร์ [6] แสดงให้เห็นว่าคอมพิวเตอร์ควอนตัมสามารถแก้ปัญหาการแยกตัวประกอบจำนวนเต็ม (Integer factorization) และการหาลอการิทึมเชิงไม่ต่อเนื่อง (Discrete logarithm) ได้ในเวลาพหุนาม (Polynomial time) ซึ่งตรงข้ามกับอัลกอริทึมแบบคลาสสิกที่ต้องใช้เวลาเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential time)

หัวใจทางคณิตศาสตร์อัลกอริทึมของ ชอร์ อยู่ที่การลดปัญหาการแยกตัวประกอบให้กลายเป็นปัญหาการหาคาบของฟังก์ชันเชิงคาบ (Period-finding problem) และการใช้ Quantum Fourier Transform (QFT) เพื่อหาคาบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผู้วิจัยใช้ ChatGPT เป็นเครื่องมือในการวิจัย โดยตั้งคำถามเป็น คำสั่ง Prompt โดยเริ่มต้นดังนี้

คำสั่ง (Prompt 2): “ขอทราบหลักการถอดรหัส อัลกอริทึมของ ชอร์”
คำตอบ: อัลกอริทึมของ ชอร์ มีลักษณะสำคัญดังนี้

4.1.1 การลดรูปปัญหา (Reduction to Period Finding)

ให้จำนวนเต็ม N และเลือก a โดยมีเงื่อนไข:

$$1 < a < N, \qquad gcd\,(a,N) = 1$$

นิยามฟังก์ชันเชิงคาบ

$$f(x) = a^x \bmod N \tag{8}$$

ฟังก์ชันนี้มีคาบ r ที่ทำให้

$$a^r \equiv 1 \pmod N \tag{9}$$

ถ้าหาค่าคาบ r ได้ จะสามารถใช้คณิตศาสตร์ของทฤษฎีจำนวนเพื่อแยกตัวประกอบของ N ได้ว่า

$$a^r - 1 = (a^{r/2} - 1)(a^{r/2} + 1) \tag{10}$$

และการหาค่า gcd $(a^{r/2} \pm 1, N)$ มักจะให้ตัวประกอบที่ไม่เป็นเอกลักษณ์ของ N

4.1.2 การหาคาบด้วย Quantum Fourier Transform (QFT)

ก.สร้างสถานะซ้อนทับ (Superposition) การหาค่าคาบ *r* เป็นขั้นตอนที่ใช้ Quantum Mechanics ในระดับคณิตศาสตร์เชิงเชิงเส้นเชิงซ้อน (complex linear algebra)

เตรียมคิวบิตสองชุด (registers)

$$\frac{1}{\sqrt{Q}}\sum_{x=0}^{Q-1} |\, x\rangle \; |\, f(x)\rangle \qquad (11)$$

โดย *Q* เป็นจำนวนเต็มที่ใหญ่กว่า N^2

ข.การวัดผลคาบ: เมื่อวัดค่าช่องที่สอง (function register) ระบบจะยุบเหลือสถานะที่มีค่า f(x) เดียวกัน ซึ่งค่าของ *x* ที่เหลือจะห่างกันตามคาบ *r*

$$\frac{1}{\sqrt{m}}\sum_{k=0}^{m-1} |\, x_0 \; + \; kr\rangle \qquad (12)$$

ค.การใช้ Quantum Fourier Transform (QFT):

ใช้การแปลงฟูเรียร์เชิงควอนตัมกับสถานะนี้:

$$|\, x\rangle \longmapsto \frac{1}{\sqrt{Q}}\sum_{y=0}^{Q-1} e^{2\pi i x y}/Q \; |_y \qquad (13)$$

ผลลัพธ์คือการรวมเชิงซ้อนที่มีค่าสูงสุดเมื่อ

$$y = \frac{kQ}{r} \qquad (14)$$

การวัดจะได้ค่า y ซึ่งสามารถนำไปประมาณค่าคาบ r ได้โดยใช้ continued fraction expansion ของ $\frac{y}{Q}$

ง. ความสำคัญของการแยกตัวประกอบของ n^2 ในอัลกอริทึมของ ชอร์

อัลกอริทึมของ ชอร์ ไม่ได้แยกตัวประกอบของ n^2 โดยตรง แต่สร้าง “ฟังก์ชันเชิงคาบ” ที่คณิตศาสตร์ภายในมัน หมุนรอบการยกกำลังและโมดูลาร์ของ n เช่น

$$f(x) = a^x \bmod N \quad (15)$$

โดยที่ N คือจำนวนที่ต้องการแยกตัวประกอบ (เช่น 15, 21, 221 ฯลฯ) และ a คือจำนวนที่สุ่มขึ้นมาโดย 1<a<N และ gcd (a,N) = 1

ความสำคัญคือ ต้องหาค่า “คาบ” r ที่ทำให้

$$a^r \equiv 1 \pmod N \quad (16)$$

เมื่อพบค่าที่ทำให้ $a^r \equiv 1 \pmod N$ จะได้

$$a^r - 1 \equiv 0 \pmod N$$

หรือ

$$N \text{ หาร } (a^r - 1) \quad (17)$$

สามารถเขียนได้ว่า

$$a^r - 1 = (a^{r/2} - 1)(a^{r/2} + 1) \quad (18)$$

ถ้า r เป็นจำนวนคู่และ $a^{r/2} \not\equiv -1 \pmod N$,

สามารถใช้ คณิตศาสตร์ของ gcd (greatest common divisor) เพื่อแยกตัวประกอบของ N ได้ว่า

$$\gcd(a^{r/2} - 1, N) = p, \ \gcd(a^{r/2} + 1, N) = q \quad (19)$$

การที่ $a^r \equiv 1 \pmod N$

แปลว่ากำลังหาจำนวนเต็ม r ที่ทำให้ $a^r - 1$ เป็น “พหุนามที่หารด้วย N” ได้ลงตัว

ซึ่งในทางทฤษฎีจำนวน การแยกตัวประกอบของ $a^r - 1$ เป็นการแยกตัวประกอบ “ลักษณะคล้าย $n^2 - 1$” เพราะมีสูตรการแยกตัวประกอบแบบเดียวกัน:

$$a^{2k} - 1 = (a^k - 1)(a^k + 1) \quad (20)$$

หัวใจอัลกอริทึมของ ชอร์ คือการใช้คณิตศาสตร์ของการแยกตัวประกอบเชิงรูปแบบ $n^2 - 1$ เพื่อดึงตัวประกอบที่ซ่อนอยู่ของ N ออกมา ผ่านคาบเชิงควอนตัม r

4.2 คณิตศาสตร์ Post-Quantum Cryptography (PQC)

หลักการสำคัญของอัลกอริทึมต้านทานควอนตัม คือ Hard mathematical problem เลือกปัญหาที่ควอนตัมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถแก้ปัญหาได้ในเวลา polynomial เป็นการคิดย้อนกลับวิธีถอดรหัสของ ชอร์

NIST (National Institute of Standards and Technology) ของสหรัฐอเมริกา ได้จัดโครงการแข่งขันเพื่อคัดเลือกระบบรหัสที่ทนทานต่อควอนตัมตั้งแต่ปี 2016 จนถึงปัจจุบัน NIST ได้ดำเนินการคัดเลือกและประกาศมาตรฐาน Post-Quantum Cryptography (PQC) เพื่อทดแทนระบบเข้ารหัสที่เปราะบางต่อการโจมตีด้วยคอมพิวเตอร์ควอนตัม โดยในเดือนสิงหาคมปี ค.ศ. 2024 ได้ประกาศมาตรฐานชุดแรก (FIPS 203, 204, 205) ซึ่งรวมถึงอัลกอริทึมที่ได้รับการคัดเลือกสำหรับการเข้ารหัสและลายเซ็นดิจิทัล มีดังนี้

- CRYSTALS-Kyber: สำหรับการแลกเปลี่ยนกุญแจ (Key Exchange)
- CRYSTALS-Dilithium: สำหรับการสร้างลายเซ็นดิจิทัล (Digital Signature)
- SPHINCS+: สำหรับการสร้างลายเซ็นดิจิทัลที่ไม่ขึ้นกับโครงสร้างคีย์ส่วนตัว (Stateless Signature)

อัลกอริทึมเหล่านี้ถูกออกแบบมาเพื่อทนทานต่อการโจมตีจากคอมพิวเตอร์ควอนตัมและมีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อเทียบกับระบบเข้ารหัสแบบดั้งเดิม

ผู้วิจัยสั่ง ChatGPT ทำการวิเคราะห์และสรุปหลักการมาตรฐานชุดแรก FIPS 203, 204 และ 205

คำสั่ง (Prompt 3): “ขอทราบหลักการทำงานของมาตรฐาน FIPS 203, 204 และ 205 ของ NIST”

คำตอบ: ดังนี้

4.2.1 ML-KEM (FIPS 203) - ใช้สำหรับการเข้ารหัส

ML-KEM (Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism) คือมาตรฐานสำหรับ กลไกการห่อหุ้มกุญแจ (KEM) ซึ่งทำหน้าที่แทนการเข้ารหัสแบบ Public-Key และการแลกเปลี่ยนกุญแจที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (เช่น RSA และ Diffie-Hellman)

หลักการทำงาน: ความปลอดภัยของมันขึ้นอยู่กับความยากของการแก้ปัญหา Module Learning with Errors (MLWE) บน Lattice (แลตทิซ)

บทบาท: ใช้เพื่อ สร้างกุญแจลับร่วม (shared secret key) ระหว่างสองฝ่ายผ่านช่องทางสาธารณะได้อย่างปลอดภัย แม้ว่าจะมีควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็ตาม

ชุดพารามิเตอร์: มาตรฐานกำหนดชุดพารามิเตอร์ 3 ระดับความปลอดภัย ได้แก่ ML-KEM-512, ML-KEM-768, และ ML-KEM-1024

4.2.2. ML-DSA (FIPS 204) - ใช้สำหรับลายเซ็นดิจิทัลหลัก

ML-DSA (Module-Lattice-Based Digital Signature Algorithm) คือมาตรฐานหลักสำหรับลายเซ็นดิจิทัล

หลักการทำงาน: ความปลอดภัยของมันขึ้นอยู่กับปัญหาบน Lattice ที่คล้ายคลึงกับ ML-KEM

บทบาท: ใช้สำหรับ ยืนยันตัวตนและความสมบูรณ์ของข้อมูล (authentication and data integrity) ในการสื่อสารและเอกสารต่างๆ เช่น ใบรับรอง X.509

หมายเหตุ: อัลกอริทึม FALCON ซึ่งเป็น Lattice-Based Digital Signature อีกตัวหนึ่งที่มีขนาดลายเซ็นเล็กกว่า ก็ได้รับการพิจารณาในขั้นตอนสุดท้ายเช่นกัน แต่ ML-DSA ถูกเลือกเป็นมาตรฐานหลัก (Primary)

4.2.3. SLH-DSA (FIPS 205) - ใช้สำหรับลายเซ็นดิจิทัลสำรอง

SLH-DSA (Stateless Hash-Based Digital Signature Algorithm) คือมาตรฐานสำรองสำหรับลายเซ็นดิจิทัล

หลักการทำงาน: อัลกอริทึมนี้มาจาก Hash-Based Cryptography ซึ่งมีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างอย่างสิ้นเชิงจาก Lattice

บทบาท: ถูกเลือกเพื่อเป็น ทางเลือกสำรอง (alternative) ในกรณีที่มีการค้นพบช่องโหว่ทางคณิตศาสตร์ในอนาคตกับอัลกอริทึมที่ใช้ Lattice (ML-DSA) ซึ่งช่วยให้เกิดความหลากหลายทางคณิตศาสตร์ในการเข้ารหัส

ตารางที่ 3 NIST กำหนด 3 อัลกอริทึมหลักที่ใช้เป็นมาตรฐานในฉบับล่าสุด

มาตรฐาน NIST	อัลกอริทึมที่ถูกกำหนด	การใช้งานหลัก	อัลกอริทึมพื้นฐาน (เดิม)	ปัญหาทางคณิตศาสตร์
FIPS 203	**ML-KEM** (Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism)	**การเข้ารหัสทั่วไปและการแลกเปลี่ยนกุญแจ (Key Exchange)**	CRYSTALS-Kyber	**Lattice-Based** (Module Learning with Errors)

FIPS 204	**ML-DSA** (Module-Lattice-Based Digital Signature Algorithm)	**ลายเซ็นดิจิทัล (Digital Signatures)** หลัก	CRYSTALS-Dilithium	**Lattice-Based**
FIPS 205	**SLH-DSA** (Stateless Hash-Based Digital Signature Algorithm)	**ลายเซ็นดิจิทัลสำรอง** (Backup Digital Signatures)	SPHINCS+	**Hash-Based**

มาตรฐานเหล่านี้คือแนวป้องกันใหม่ในสงครามไซเบอร์ของยุคข้อมูล ซึ่งจะกลายเป็นฐานสำคัญของการสื่อสารในระบบธนาคาร รัฐบาล และโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลทั่วโลก และในปี 2025 มีการเลือกอัลกอริทึมเพิ่มเติม เช่น HQC (Hamming Quasi-Cyclic) เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในกลุ่ม KEM / Encryption

4.3 วิเคราะห์

คำสั่ง (Prompt 4): “ขอทราบหลักคณิตศาสตร์มาตรฐาน FIPS 203, 204 และ 205 ของ NIST”

คำตอบ: ดังนี้

มาตรฐาน NIST PQC FIPS 203 และ 204 “มีพื้นฐานเหมือนกัน” (อยู่ในตระกูล Module-Lattice) แต่ต่างกันที่วัตถุประสงค์และวิธีสร้างข้อมูล ส่วน FIPS 205 “แตกต่างโดยสิ้นเชิง” เพราะอิงกับ “Hash functions” แทนสมการเชิงพีชคณิตใน lattice

Lattice (แลตติซ) คือ “โครงข่ายจุดในปริภูมิเวกเตอร์” ที่สร้างขึ้นจากการรวมเชิงเส้นของเวกเตอร์ฐานด้วยสัมประสิทธิ์จำนวนเต็ม

$$L = \{a_1b_1 + a_2b_2 + \cdots + a_nb_n \mid a_i \in Z\} \quad (21)$$

เช่น ถ้า

$$b_1 = (1,0),\ b_2 = (0,1)$$

จะได้ lattice เป็นจุดเต็มในระนาบ 2 มิติ (จุดกริด)

แต่ใน lattice-based cryptography เรามักอยู่ในมิติสูงมาก เช่น

n=256,512,1024 เป็นต้น

ปัญหาความยากในการเข้ารหัสแบบ lattice-based ตั้งอยู่บน “ปัญหาที่ยากต่อการแก้” (Hard Problems) ในคณิตศาสตร์ ดังตารางที่ 4 สรุปดังนี้

ตารางที่ 4 สรุปปัญหาความยากในการแก้ปัญหาในการเข้ารหัสแบบ lattice-based

ปัญหา	คำอธิบาย
SVP (Shortest Vector Problem)	หาจุดใน lattice ที่ใกล้จุดศูนย์ที่สุด
CVP (Closest Vector Problem)	หาจุด lattice ที่ใกล้จุดเป้าหมายมากที่สุด
SIS (Short Integer Solution)	หาค่าเวกเตอร์จำนวนเต็มขนาดเล็กที่ทำให้ A·x ≡ 0 (mod q)
LWE (Learning with Errors)	แก้สมการเชิงเส้นที่มี “noise” ปนอยู่ เช่น A·s + e = b (mod q)

ตระกูล Module-Lattice คือระบบเข้ารหัสที่อิงกับ ปัญหา LWE/SIS แต่ทำงานในโครงสร้าง “โมดูล ของวงแหวนพหุนาม” เพื่อให้ได้ ความปลอดภัยระดับ LWE + ประสิทธิภาพระดับ Ring-LWE หรือ

Module-Lattice = ความยากระดับ LWE + ความเร็วระดับ Ring-LWE

จะเห็นได้ว่าไม่มีมาตรฐานใดที่อิงกับ “การแยกตัวประกอบ” หรือ “logarithm” แต่ใช้ “สมการเชิงเส้นที่มี Noise (error)” และ “ฟังก์ชันแฮช” แทน

ส่วนอัลกอริทึมของ ชอร์ มีประสิทธิภาพกับ “กลุ่มเชิงคูณ (multiplicative groups)” เช่น Z_n หรือ elliptic curves เพราะใช้หลักการ Quantum Fourier Transform (QFT) เพื่อหาคาบ (period) ของฟังก์ชัน เป็นวิธีหลักของการแก้ปัญหาเหล่านี้

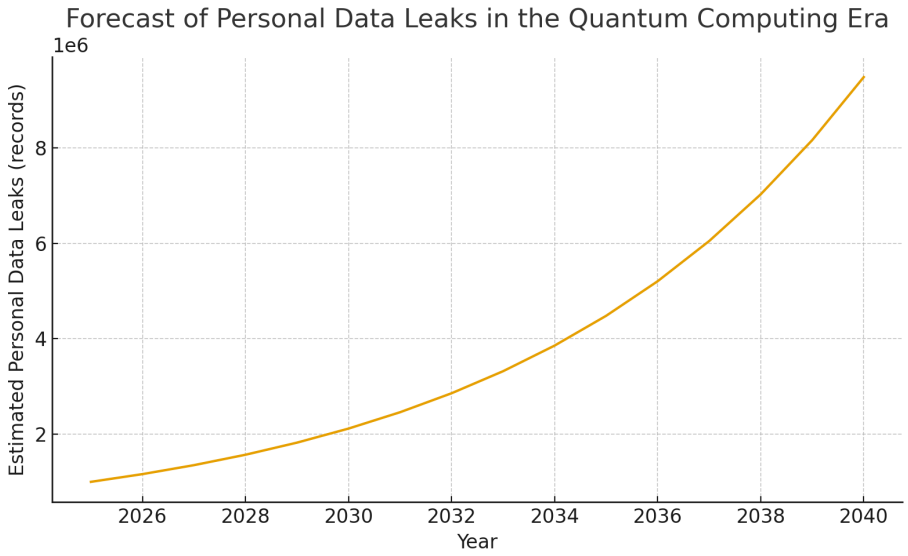
ดังนั้นสามารถสรุปเหตุผลได้ว่า อัลกอริทึมของ ชอร์ ใช้ไม่ได้กับ Lattice Problems (LWE, SIS, ฯลฯ)

4.4 การพยากรณ์ข้อมูลส่วนบุคคลรั่วไหลในช่วงกำเนิดควอนตัมคอมพิวเตอร์

ผู้วิจัยต้องการเห็นภาพรวมการพยากรณ์หรือคาดการณ์ (forecast / projection) ที่อาจจะไม่ใช่ การคำนวณทางสิถิติที่ได้ตัวเลขแน่นอน เพียงแต่พยายามให้เห็นภาพรวม จึงได้ใช้คำสั่ง ChatGPT ทำการทดลองดังนี้

คำสั่ง (Prompt 5): “สร้างลักษณะกราฟ พยากรณ์ยุคกำเนิดควอนตัมคอมพิวเตอร์ แกนตั้งเป็นค่าเฉลี่ยข้อมูลส่วนบุคคลรั่วไหล แกนนอนเป็นเวลา”

คำตอบ: ดังนี้



รูปที่ 2 การคาดการณ์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการกำเนิดของควอนตัมคอมพิวเตอร์กับข้อมูลส่วนบุคคลรั่วไหลด้วย ChatGPT

คำสั่ง (Prompt 6): ปรับให้เป็นข้อมูลจริง ขออ้างอิงที่มาของข้อมูลที่ใช้พยากรณ์ และวิธีพยากรณ์

คำตอบ: ถ้าจะสร้าง “กราฟพยากรณ์” ที่มีน้ำหนักวิชาการ อาจใช้ method hybrid ดังนี้

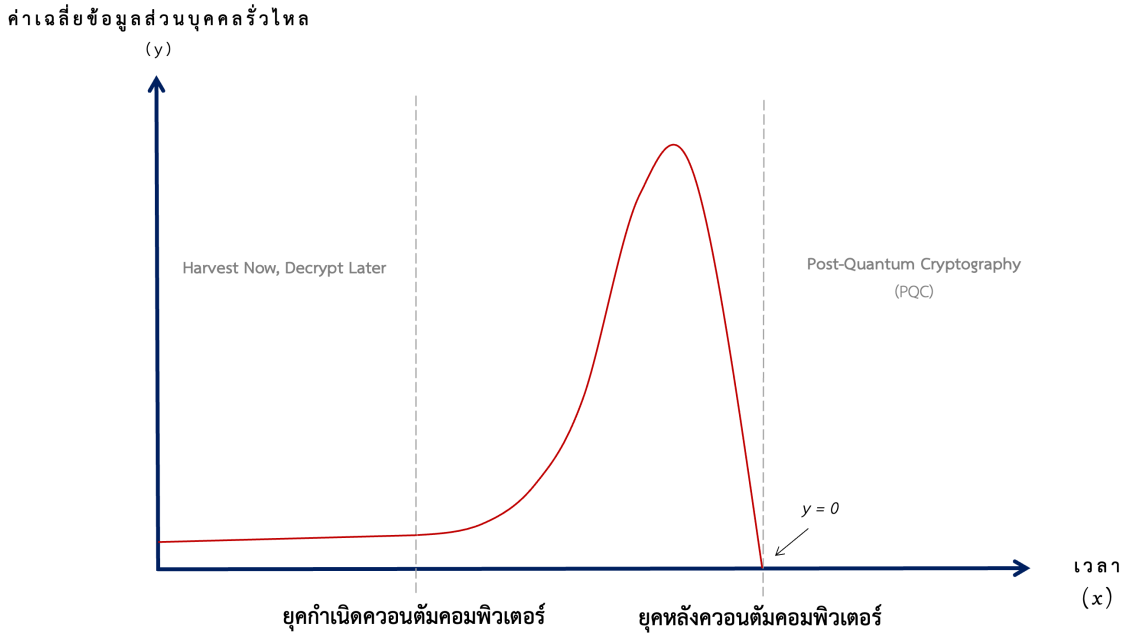
- ใช้ฐาน breach จาก 2004–2024 (รอบ 20 ปี) เป็น data points
- Fit distribution heavy-tailed (Pareto / power-law) เพื่อ estimate ความน่าจะเป็นของ “mega-breach” ต่อปี

ข้อจำกัดสำคัญ

- ผลพยากรณ์เป็น การคาดการณ์ (forecast / projection) ไม่ใช่ “การคาดหมายแน่นอน”
- ตัวเลขอาจเบี่ยงเบนมาก ถ้ามีเหตุการณ์ใหญ่ (เช่น breach ขนาดยักษ์, quantum breakthrough)
- ไม่สามารถบอกได้ว่า “ข้อมูลใคร จะรั่วเมื่อไร” แค่บอก “ความเสี่ยงโดยรวม”

ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและจากประสบการณ์พบว่า ข้อมูลการรั่วไหลที่ผ่านมา (Data breach) มีปัจจัยหลายประการ เช่น ความผิดพลาดของระบบ ความผิดพลาดของมนุษย์ การตั้งพาสเวิร์ดอ่อน การถูก Ransomware ซึ่งไม่ได้ขึ้นกับความแข็งแกร่งของการเข้ารหัสเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นผู้วิจัยจึงคาดการณ์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการกำเนิดของควอนตัมคอมพิวเตอร์กับข้อมูลส่วนบุคคลรั่วไหล โดยมีช่วง Quantum breakthrough จะเป็นจุดเปลี่ยนแห่งศตวรรษที่ข้อมูลส่วนบุคคลรั่วไหล เมื่อระบบคอมพิวเตอร์ทั่วไปยังไม่เข้าสู่การเข้ารหัสยุคลหลังควอนตัม ซึ่งจะทำให้องค์กรต่างๆ ตื่นตัวเปลี่ยนมาเข้ารหัสแบบ PQC ทำให้ข้อมูลส่วนบุคคลที่รั่วไหลลดลงอย่างรวดเร็ว ภาพจะเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การคาดการณ์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการกำเนิดของควอนตัมคอมพิวเตอร์กับข้อมูลส่วนบุคคลรั่วไหล

เพื่อให้เกิดการตื่นตัวขององค์กรต่างๆ โดยเฉพาะหน่วยงานความมั่นคงให้หันมาพิจารณาใช้ PQC ตั้งแต่บัดนี้ เพราะแนวคิดของแฮ็กเกอร์และหน่วยงานความมั่นคงในต่างประเทศคือ “Harvest Now, Decrypt Later (HNDL)” หมายถึงวันนี้ยังถอดรหัสไม่ได้ แต่เก็บรวบรวมข้อมูลไว้ให้มากที่สุดก่อน เมื่อกำเนิดควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ อัลกอริทึมของ ชอร์ ค่อยมาถอดรหัสเปิดเผยข้อมูลภายหลัง

5. ผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยทางเอกสาร และใช้ Gen AI (ChatGPT) ช่วยในการวิเคราะห์ สรุปสถานการณ์ในปัจจุบันได้ว่ามาตรฐาน NIST PQC FIPS 203 204 และ 205 ที่โครงสร้างคณิตศาสตร์ Module-Lattice และ

Hash-based ซึ่งอัลกอริทึมของ ชอร์ ไม่สามารถถอดรหัสแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ได้ เพราะไม่มีคาบและไม่อยู่ในกลุ่มเชิงคูณที่ QFT ใช้ในการคำนวณ โดยทำตารางสรุปดังนี้

ตารางที่ 5 สรุปสถานะทางทฤษฎี (ปัจจุบัน)

มาตรฐาน NIST PQC	พื้นฐานคณิตศาสตร์	อัลกอริทึมของ ชอร์	เหตุผล
FIPS 203 – ML-KEM (Kyber)	Module-LWE	❌ ใช้ไม่ได้	ไม่มีโครงสร้างคาบ และ มี noise
FIPS 204 – ML-DSA (Dilithium)	Module-LWE / SIS	❌ ใช้ไม่ได้	Lattice problem ไม่ใช่ periodic
FIPS 205 – SLH-DSA (SPHINCS+)	Hash-based	❌ ใช้ไม่ได้	ฟังก์ชันแฮชไม่สามารถย้อนกลับด้วย QFT

6. บทสรุป

จากสนามรบสู่สมรภูมิคณิตศาสตร์

สถานการณ์สงครามคณิตศาสตร์ปัจจุบัน ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็นสองฝ่าย คือ ฝ่ายเจาะระบบควอนตัมคอมพิวเตอร์ด้วยอัลกอริทึมของ ชอร์ กับ ฝ่ายป้องกันระบบด้วย Post-Quantum Cryptography (PQC) ของมาตรฐาน NIST PQC FIPS 203 204 และ 205

โดยถือว่า ยกแรกคือการตื่นตัวของควอนตัมคอมพิวเตอร์กับอัลกอริทึมของ ชอร์ จะได้รับชัยชนะในการถอดรหัสเจาะระบบด้วยความสามารถเชิงควอนตัมตามทฤษฎี (แม้ปัจจุบันยังไม่มีควอนตัมคอมพิวเตอร์จริง) แต่ด้วยกระแส Harvest Now, Decrypt Later ระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมดและหน่วยงานความมั่นคงควรรีบนำมาตราฐาน NIST PQC FIPS 203 204 และ 205 มาปรับใช้แม้ยังไม่ถึงยุคกำเนิดควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็ตาม

ดังนั้นในยกที่สองวิศวกรได้สร้างปัญหาทางคณิตศาสตร์ในการเข้ารหัส PQC จนออกมาเป็นรูปธรรมในมาตรฐาน NIST PQC FIPS ซึ่งถือว่าเป็นชัยชนะของฝ่ายป้องกันในยกที่สอง

ควอนตัมคอมพิวเตอร์ในสถานะ Superposition สามารถแทน “คำตอบทั้งหมด” ด้วยการแยกตัวประกอบ N ได้เร็วมากเพื่อทำลาย RSA และแก้ discrete log ได้เร็วมากเพื่อทำลาย ECC ทำให้ความน่าจะเป็นของคำตอบเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดด้วยการ “ลองทุกคำพร้อมกัน” เรียกว่า Brute-force key แล้วขยายเฉพาะคำตอบที่ถูก

อย่างไรก็ตาม การวิจัยในบทความนี้ อยู่บนชุดความคิดอัลกอริทึมของ ชอร์ แต่ความเป็นไปได้ในอนาคต (เชิงทฤษฎี) หากมีการค้นพบ ควอนตัม อัลกอริทึม ใหม่ที่แก้ LWE/SIS ได้เร็ว จะเป็นภัยคุกคามใหญ่ต่อ NIST PQC FIPS 203 204 และ 205 แต่ผู้วิจัยได้สำรวจแล้ว ยังไม่มีหลักฐานใดบ่งชี้ว่ามีอัลกอริทึมแก้ปัญหา LWE/SIS และ

สามารถจัดการกับความซับซ้อนแบบ Noisy linear algebra ของ lattice ได้ เพราะต้องทำลายทฤษฎีเชิงคณิตศาสตร์ระดับลึกของ lattice ทั้งหมด

สงครามรหัสลับไม่ได้มีเสียงปืนใหญ่และการทิ้งระเบิด แต่เป็นสมรภูมิรบในโลกดิจิทัลที่ไร้ตัวตนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และใช้กลยุทธ์ชั้นสูงที่ซับซ้อนเหนือจินตนาการของวิศวกรคอมพิวเตอร์เพื่อการป้องกันประเทศ

จาก “ซีซาร์ไซเฟอร์” ที่ใช้เพียงการเลื่อนตัวอักษร มาถึง “Lattice Cryptography” ที่ใช้โครงสร้างทางคณิตศาสตร์หลายมิติ การปกป้องข้อมูลกลายเป็นปฏิบัติการลับระดับโลกในศตวรรษที่ 21 แห่งการสงคราม

การทหารไม่ได้ต่อสู้ไม่ได้อยู่แค่อาวุธยุทโธปกรณ์ แต่อยู่ที่สมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และพลังของการประมวลผลมหาศาลบนอัลกอริทึมที่แสนฉลาดเหนือจินตนาการ “สงครามรหัสลับ” จึงเป็นภาพสะท้อนของการเปลี่ยนผ่านจากยุทธวิธีทางทหารสู่ยุทธศาสตร์ทางความรู้วิศวกรรมที่มาคู่กับการทำสงครามแบบผสมผสาน และยังคงแฝงคติเตือนใจว่า “ผู้ที่เข้าใจคณิตศาสตร์ ย่อมครอบครองความลับของโลก”

7. เอกสารอ้างอิง

[1] B. Schneier, *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*, 2nd ed., New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1996.

[2] D. Kahn, *The Codebreakers: The Comprehensive History of Secret Communication from Ancient Times to the Internet*, New York, NY, USA: Scribner, 1996.

[3] William F. Friedman and Charles J. Mendelsohn, *The Zimmermann Telegram of January 16, 1917 and Its Cryptographic Background*. Fort Meade, War Department, Office of The Chief Signal officer Washington, United states Government Printing Office Washington, 1928. [Available on cited: https://www.nsa.gov/portals/75/documents/news-features/declassified-documents/friedman-documents/lectures-speeches/folder_198/41766889080599.pdf]

[4] National Institute of Standards and Technology (NIST), *Federal Information Processing Standard (FIPS) Publication 197: Advanced Encryption Standard (AES)*, Gaithersburg, MD, USA, 2001.

[5] National Institute of Standards and Technology, Federal Information Processing Standards Publication 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard, Gaithersburg, MD, U.S.A., Aug. 13, 2024.

[6] National Institute of Standards and Technology, Federal Information Processing Standards Publication 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard, Gaithersburg, MD, U.S.A., Aug. 13, 2024.

[7] National Institute of Standards and Technology, Federal Information Processing Standards Publication 205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard, Gaithersburg, MD, U.S.A., Aug. 13, 2024.

[8] P. W. Shor, "*Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring,*" Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), Santa Fe, NM, USA, 1994, pp. 124–134, doi: 10.1109/SFCS.1994.365700.

[9] W. F. Friedman, "*The index of coincidence and its applications in cryptography*," Riverbank Publications, no. 22, Geneva, IL, USA, 1922.

การออกแบบ Packet format สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ด้วย ROS custom message
Designing a packet format for robot control using ROS custom message

ขันชัย กิ่งกังวาลย์
ส่วนงานวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
Khanchai Kingkangwan
Robotics and Automation Engineering Division Defence Technology Institute

บทคัดย่อ

การควบคุมหุ่นยนต์ทั้งแบบมีสายหรือไร้สาย สามารถเลือกใช้โปรโตคอลในการควบคุมได้หลายแบบตามความเหมาะสม เช่น RS232, UART, CAN, TCP, UDP หรือโปรโตคอลเฉพาะ เช่น MAVLink สำหรับควบคุมโดรน หรือ Modbus ที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรม เป็นต้น ในส่วนของข้อมูลที่รับส่งระหว่างชุดควบคุมกับหุ่นยนต์นั้น ต้องออกแบบโครงสร้างข้อมูล (Packet format) ให้สอดคล้องกับฟังก์ชั่นการทำงานของหุ่นยนต์รวมทั้งจะต้องมีวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล (Packet validation) ก่อนที่จะนำข้อมูลนั้นไปสั่งงานเสมอ โดยเฉพาะหุ่นยนต์ที่ปฏิบัติงานร่วมกับมนุษย์ เช่น หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด (EOD Robot) ในระหว่างการเก็บกู้หากมีความผิดพลาดของข้อมูลแล้วสั่งงานให้ระบบยิงปืน (Disrupter) ทำงานเองโดยไม่ได้สั่งยิง จะทำให้เกิดอันตรายกับเจ้าหน้าที่ได้ บทความนี้จึงขอนำเสนอการออกแบบ Packet format และวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ เช่น Checksum, CRC เปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบ Packet format ด้วย ROS custom message เพื่อเป็นแนวทางสำหรับนักพัฒนาโปรแกรมหุ่นยนต์ได้นำไปใช้ได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การออกแบบข้อมูลสำหรับควบคุมหุ่นยนต์, การตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล, ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์

Abstract

Robot control, whether wired or wireless, can utilize various communication protocols depending on suitability such as RS232, UART, CAN, TCP, UDP, or specialized protocols like MAVLink for drone control or Modbus used in industrial systems. The data exchanged between the control unit and the robot must also be designed in a packet format that aligns with the robot's functional requirements. In particular, control commands must include a method for validating the integrity of the data before execution. This is especially critical for robots that operate in close proximity to humans such as Explosive Ordnance Disposal (EOD) robots. For example, during an operation, if corrupted data mistakenly triggers the disrupter without an actual command, it could endanger

personnel. Therefore, this article presents an approach to designing packet formats and common data validation techniques, such as Checksum and CRC, and compares them with the use of ROS custom messages for packet design. This serves as a guideline for robotics software developers to implement suitable and reliable communication systems.

Keywords: Packet format design for robot control, Data error detection, Robot Operating System

1. บทนำ

หุ่นยนต์มีความสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวันโดยเฉพาะวงการอุตสาหกรรม เช่น สายการผลิตรถยนต์หรืออิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากหุ่นยนต์สามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง ทำงานซ้ำๆ ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ช่วยให้ลดต้นทุนแรงงานและลดข้อผิดพลาด นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังสามารถทำงานแทนมนุษย์ในพื้นที่อันตราย เช่น การเก็บกู้วัตถุระเบิด การกู้ภัย การทำงานในเหมือง โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ หรือพื้นที่ติดเชื้อ เป็นต้น

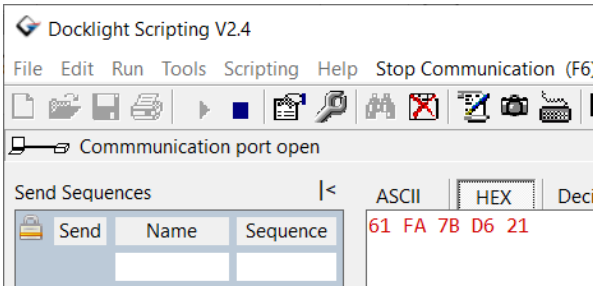
การพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์นั้น เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความเชี่ยวชาญ มีความเข้าใจกระบวนการรับส่งข้อมูลกับหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานได้ตรงกับฟังก์ชั่นที่กำหนดไว้ โดยแนวคิดพื้นฐานของการควบคุมหุ่นยนต์เป็นการส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง เช่น จากคอมพิวเตอร์ควบคุมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ในหุ่นยนต์ จึงจำเป็นต้องมีโครงสร้างข้อมูล (Packet format) ที่ทั้งสองฝั่งเข้าใจตรงกัน เพื่อให้สามารถถอดรหัสได้ถูกต้อง โดยการออกแบบ Packet format สำหรับสื่อสารกับหุ่นยนต์นั้นมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ประเภทของหุ่นยนต์ ความเร็วในการรับส่งข้อมูล ความเสถียรของการเชื่อมต่อ ความง่ายในการแก้ไขข้อมูล (Debug) และความปลอดภัยของข้อมูล เป็นต้น ตัวอย่างการออกแบบ Packet format ที่นิยมใช้ทั่วไป เช่น Fixed-Length packet format โดยความยาวของแพ็กเก็ตถูกกำหนดแน่นอน เหมาะกับระบบที่มีเวลาการประมวลผลจำกัด Variable-Length packet format ขนาดของแพ็กเก็ตเปลี่ยนแปลงตามข้อมูลที่ส่ง จึงต้องมี Field บอกจำนวนข้อมูล และ Text-Based protocol จะใช้ตัวอักษร ASCII แบบข้อความทำให้เข้าใจง่ายเหมาะกับการดีบักเป็นต้น การออกแบบ Packet format ที่ดีควรจะมีวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล (Error detection) เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของข้อมูล (Validation) ป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์ทำงานผิดพลาด บทความนี้จึงขอนำเสนอวิธีการออกแบบ Packet format รูปแบบต่างๆ เปรียบเทียบให้เห็นข้อดีและข้อจำกัดต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปใช้กับคุมหุ่นยนต์ได้อย่างเหมาะสม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบ Packet format และวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ รวมทั้งพื้นฐานของระบบปฏิบัติการหุ่นยต์ (ROS) มีดังนี้

2.1 การออกแบบ Packet format และการตรวจสอบด้วย Checksum

การออกแบบ Packet format และการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลด้วย Checksum เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย [1, 2] โดย Checksum คือค่าตัวเลขที่ได้จากการคำนวณตามสูตรเฉพาะจากข้อมูลต้นฉบับ แล้วแนบไปกับข้อมูลเพื่อให้ปลายทางสามารถตรวจสอบได้ว่าข้อมูลที่ได้รับตรงกับต้นทางหรือไม่ ตัวอย่าง Packet format ประกอบด้วย [Header][Payload][Checksum][Terminator] สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทาง Serial port โดยกำหนด Header (0x61), Termination (0x21), Payload (0xFA, 0x7B) เป็นความเร็วล้อซ้ายและล้อขวา กำหนดให้คำนวณ Checksum โดย (header_bytes + payload_bytes) % 256 จะได้ 0xD6 ดังนั้นแพ็คเก็ตที่ได้คือ 61FA7BD621 เมื่อทดสอบรับข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Docklight จะได้ ดังรูปที่ 1



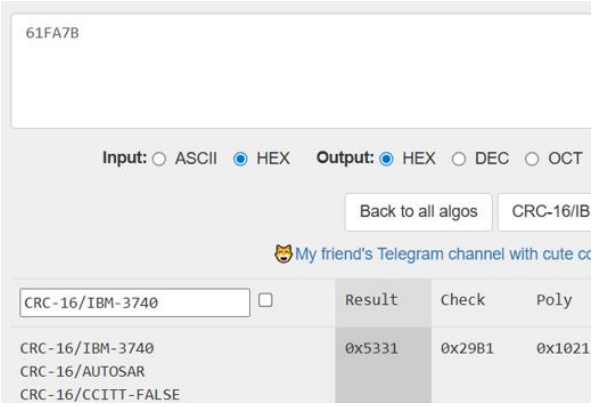
รูปที่ 1 ข้อมูลที่ได้รับจาก COM port

เมื่อหุ่นยนต์ได้รับข้อมูลก็จะทำการตรวจสอบ Header, Terminator และคำนวณ Checksum ด้วยวิธีการเดียวกันกับฝั่งส่ง หากผลการคำนวณเท่ากับ Checksum ที่ส่งมาก็แสดงว่าข้อมูลนี้ถูกต้อง สามารถนำข้อมูลของ Payload ไปควบคุมหุ่นยนต์ได้ ข้อจำกัดของ Checksum คือ การรวมตัวเลขจะไม่สามารถตรวจพบข้อผิดพลาดที่ซับซ้อนได้ เช่น ทดลองสลับข้อมูลของ Payload จาก (0xFA, 0x7B) เป็น (0x7B, 0xFA) จะได้ Checksum เป็น 0xD6 ซึ่งมีค่าเท่าเดิมแต่แพ็คเก็ตจะเปลี่ยนเป็น 617BFAD621 ซึ่งฝั่งรับเมื่อตรวจสอบแล้วจะเชื่อว่าแพ็คเก็ตนี้ถูกต้อง หากนำ Payload นี้ไปสั่งงานหุ่นยนต์ส่งผลให้ความเร็วล้อซ้ายและล้อขวาจะสลับกัน ทำให้การเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เพื่อลดความผิดพลาดของ Checksum จึงมีวิธีการปรับปรุงการคำนวณเพิ่มเติม เช่น Fletcher Checksum [3] ซึ่งเป็นวิธีตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่ดีกว่าโดยใช้แนวคิดของการสะสมค่าซ้ำสองรอบเพื่อให้ลำดับของข้อมูลมีผลต่อการคำนวณด้วย จึงสามารถตรวจจับการสลับตำแหน่งได้ เช่น จากตัวอย่างเดิมเมื่อทดลองสลับข้อมูลของ Payload จะได้ Fletcher Checksum เป็น 0xF075 และ 0x6F75 ซึ่งจะเห็นว่า Checksum ต่างกันดังนั้น Fletcher Checksum จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูงกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลด้วย Checksum ก็ยังมีโอกาสที่เกิดความผิดพลาดได้ หากต้องการความแม่นยำสูงขึ้นจะใช้วิธีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่า เช่น CRC (Cyclic Redundancy Check) เป็นต้น

2.2 การออกแบบ Packet format และการตรวจสอบด้วย CRC

การออกแบบ Packet format และการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลด้วย CRC เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในระบบสื่อสาร เพื่อให้แน่ใจว่าข้อมูลไม่ได้เสียหายระหว่างการส่งหรือการจัดเก็บ วิธีการคำนวณ CRC จะกำหนด Polynomial ที่ใช้ในการคำนวณ เช่น 0x07, 0x1021, 0x8005 แล้วแต่ขนาดของข้อมูล เช่น CRC-8, CRC-16, CRC-32 โดยนำข้อมูลมาคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่คล้ายการหารยาว [4] และใช้ Polynomial เป็นตัวหาร ค่า CRC ที่ได้จะถูกส่งไปพร้อมกับข้อมูลต้นทาง ผู้รับจะนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณใหม่และตรวจสอบว่าค่า CRC เท่ากับค่าที่แนบมาหรือไม่ ถ้าเท่ากันก็แสดงว่าข้อมูลนั้นถูกต้อง ไม่มีการเสียหายระหว่างการส่ง จากตัวอย่าง การควบคุมหุ่นยนต์ข้างต้น Packet format ประกอบด้วย [Header][Payload][CRC][Terminator] กำหนดให้นำผลรวมของ Header กับ

Payload ไปคำนวณหา CRC-16 ด้วย Polynomial 0x1021 จะได้แพ็คเก็ต 61FA7B533121 สามารถตรวจสอบ CRC-16 ได้โดยนำ Payload (61FA7B) ไปคำนวณที่ https://crccalc.com/ ดังรูปที่ 2 จะได้ CRC-16 = 0x5331

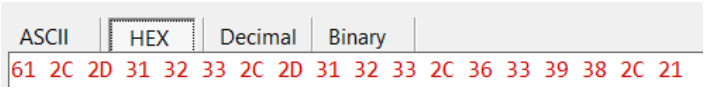


รูปที่ 2 การคำนวณ CRC-16

จากรูปที่ 2 ทดลองสลับข้อมูลของ Payload (617BFA) จะได้ CRC-16 เป็น FA31 ซึ่งจะไม่เท่าเดิมทำให้แพ็คเก็ตไม่เหมือนกัน ดังนั้นวิธีตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลด้วย CRC จึงนิยมนำไปใช้กับการควบคุมหุ่นยนต์มากกว่าวิธี Checksum

2.3 การออกแบบ Packet format ด้วย Text-based protocol

การออกแบบ Packet format ด้วย Text-based protocol เป็นอีกแนวทางที่สะดวก เข้าใจง่าย สามารถกำหนดชนิดข้อมูลเป็นอะไรก็ได้ เนื่องจากแบ่งแยกข้อมูลกันอย่างชัดเจน เช่น คั่นข้อมูลแต่ละตัวด้วย “,”อย่างไรก็ตามการออกแบบวิธีนี้ยังคงต้องมีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลเช่นกัน ตัวอย่าง Packet format ประกอบด้วย “ Header,Data1 ,Data2 ,CRC,Terminator" สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ด้วย Serial port โดย Header (“a”), Terminator (“!”), Payload (“-123,-123”) เป็นการสั่งงานให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ถอยหลังด้วยความเร็วล้อซ้ายเท่ากับล้อขวา และกำหนดให้นำผลรวมของ Header กับ Payload (ไม่รวม “,”) ไป คำนวณหา CRC-16 ด้วย Polynomial 0x1021 จะได้แพ็คเก็ต “a,-123,-123,6398,!” ทดสอบรับข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Docklight จะได้ดังรูปที่ 3



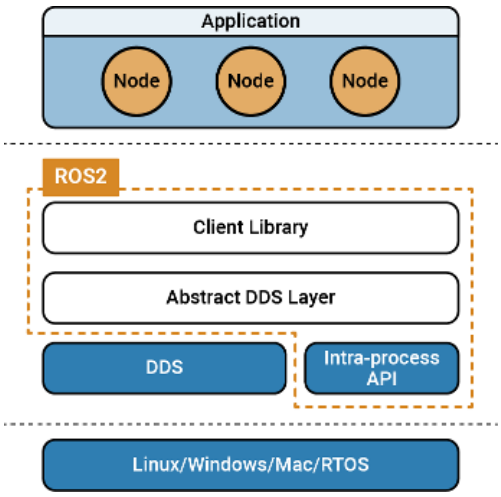
รูปที่ 3 ข้อมูลแบบ HEX ที่ COM port ได้รับ

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าข้อมูลแต่ละตัวของแพ็คเก็ตจะถูกแบ่งเป็นไบต์เรียงต่อกัน เช่น “-123” คือ “0x2D,0x31,0x32,0x33” และมีข้อมูล 0x2C ที่ซ้ำกันนั่นคือ “,” จะเห็นว่าวิธีนี้ทำให้จำนวนข้อมูลเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธีอื่น ในส่วนของฝั่งรับจะนำข้อมูลที่ได้นี้ไป Split comma เพื่อแบ่งแยกข้อมูลของแต่ละตัวแล้วนำไปเปรียบเทียบ Header, Terminator และ CRC เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลต่อไป

2.4 ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (ROS)

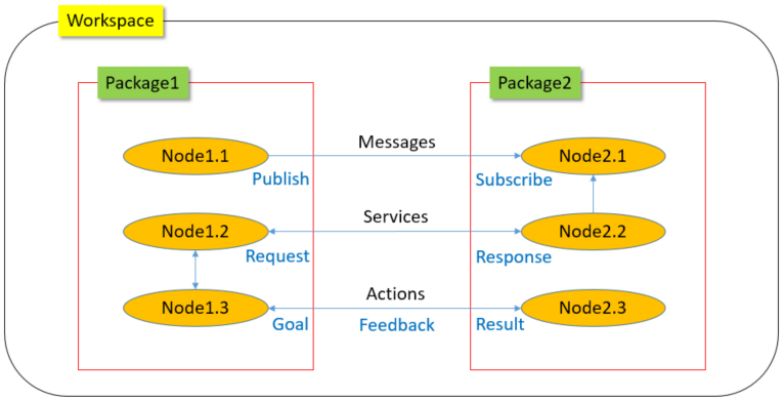
ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (ROS) [5] เป็น Framework หรือ Middleware ที่จะทำให้หุ่นยนต์ทำงานได้สามารถติดตั้งกับระบบปฏิบัติการ Ubuntu, Windows หรือ Mac มี Library, Tools และ Algorithms ต่างๆ สำหรับ

ทำงานด้านหุ่นยนต์ เช่น Robot simulation หรือ Robot kinematics เป็นต้น สำหรับ ROS2 แบ่งการทำงานเป็น Layer ส่วนที่เกี่ยวข้องกับนักพัฒนาโปรแกรมคือ Application layer เป็นการเขียนโปรแกรมสร้างโหนดให้ทำหน้าที่ต่างๆ โดยติดต่อกับ ROS Client layer ซึ่งสามารถเลือกได้ว่าจะใช้ภาษา C++ (rclcpp) หรือภาษา Python (rclpy) ในส่วนของการจัดการภายในจะใช้ DDS (Data Distribution Service) [6] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 สถาปัตยกรรมของ ROS2

DDS เป็นมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลแบบ Publish-Subscribe ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูล ออกแบบมาสำหรับ Real-time systems โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการความเร็วสูง ทำงานแบบ Decentralized ไม่ต้องมี Broker หรือ Server กลาง มีความน่าเชื่อถือ (Reliable) รองรับ QoS (Quality of Service) รองรับ Multicast (ส่งทีเดียวหลายเครื่องรับได้) ดังนั้นการรับส่งข้อมูลด้วย ROS จึงไม่จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลอีกเนื่องจาก DDS มีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแพ็กเก็ต (Packet integrity) ให้อยู่แล้ว ROS แบ่งโครงสร้างโปรแกรมเป็นลำดับชั้น ได้แก่ Workspace, Package, Node และมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโหนดด้วย Interface ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ (Types) คือ Message, Services และ Actions ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างโปรแกรมของ ROS

2.5 การป้องกันการดักจับแพ็คเก็ต

หุ่นยนต์ที่ใช้งานทางด้านความมั่นคง ควรจะต้องพิจารณาถึงวิธีป้องกันการดักจับแพ็คเก็ต เพื่อรักษาความลับและความปลอดภัยของระบบ หาก Attacker (ผู้โจมตี) รู้ Packet format เขาสามารถรู้ทุกอย่างที่หุ่นยนต์

รายงานได้ เช่น รู้ตำแหน่ง GPS แบบ Real-time ทำให้เสี่ยงต่อการถูกติดตามเป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังต้องป้องกันการปลอมข้อมูล (Data Injection) ถ้า Attacker รู้ Packet format เขาสามารถสร้างแพ็คเก็ตปลอมเลียนแบบเพื่อสั่งหุ่นยนต์ให้ทำสิ่งที่ไม่ต้องการได้ โดยเฉพาะถ้าแพ็คเก็ตเป็นมาตรฐานทั่วไป ไม่มีการเข้ารหัส Attacker แค่บันทึกแพ็คเก็ตคำสั่งเดิมแล้วเล่นซ้ำ (Replay) หุ่นยนต์ก็จะทำงานซ้ำๆ จนไม่อาจควบคุมหรือเกิดความเสียงหายได้

ขั้นพื้นฐานของการป้องกันการโจมตี คือ ป้องกันไม่ให้แทรกเข้ามาในเครือข่ายของหุ่นยนต์ โดยกำหนดวิธีการเชื่อมต่อเครือข่าย เช่น ถ้าใช้ Wi-Fi จะกำหนด WPA3/WPA2 ซึ่งเป็นมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับเครือข่ายเพื่อปกป้องการเชื่อมต่อไม่ให้คนภายนอกเข้าถึงหรือดักฟังข้อมูลได้ ควรเลือกใช้ช่องสัญญาณหรือย่านความถี่ที่คนทั่วไปเข้าไม่ถึง เช่น LoRa, UHF/VHF, Zigbee หรือ Wi-Fi 5/6 GHz ใช้ฟังก์ชัน DFS (Dynamic Frequency Selection) เพื่อเปลี่ยนช่องอัตโนมัติเมื่อพบสัญญาณรบกวนเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆ ที่ใช้ได้กับระบบสื่อสารของหุ่นยนต์ เช่น MAC Address filtering โดย AP (Access Point) จะยอมรับการเชื่อมต่อเฉพาะ MAC address ของหุ่นยนต์ที่อนุญาต หรือ Hidden SSID เพื่อลดโอกาสที่จะเห็นเครือข่าย หากไม่อยู่ในเครือข่ายเดียวกันการดักจับ ROS message จะยากมากเพราะ ROS2 ออกแบบให้สื่อสารกันผ่าน UDP Multicast และ Unicast ซึ่งเป็นรูปแบบการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายที่ DDS ใช้ส่ง Message ระหว่างโหนดต่างๆ โดยใช้หลายพอร์ต ไม่ใช่แค่พอร์ตเดียวเหมือน UDP ทั่วไป

ในกรณีที่ Attacker สามารถแทรกเข้ามาในเครือข่ายของหุ่นยนต์ได้ การออกแบบ Packet format จะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง วิธีป้องกันที่ง่ายที่สุดคือการทำให้แพ็คเก็ตอ่านยาก (Obfuscation) หากไม่สามารถเข้ารหัส (Encryption) เต็มรูปแบบ [8] ซึ่งอาจเป็นเพราะข้อจำกัดของ CPU หรือ Latency เช่น ใช้การเปลี่ยน Byte order หรือ Shuffle field ในแพ็คเก็ต เพิ่มการคำนวณ Checksum ให้ซับซ้อนขึ้น หรือ XOR ค่ากับ Key บางตัวเป็นต้น อย่างไรก็ตาม Obfuscation ก็มีประสิทธิภาพไม่เทียบเท่ากับการเข้ารหัสยังสามารถ Obfuscation reverse ได้ ตัวอย่างการดักจับแพ็คเก็ตทาง Serial port (UART) เช่น Telemetry ของ FPV Drone สามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่ว่าต้องการแค่อ่านหรือส่งข้อมูลด้วย เช่น ใช้โปรแกรม PuTTY, Eltima VSP, com0com ที่สามารถดักข้อมูลโดยใช้ซอฟต์แวร์เพื่อฟังและจับข้อมูลที่ไหลอยู่ในเครือข่าย หรือสื่อสารโดยไม่ให้ผู้ส่งหรือผู้รับรู้ตัว (Sniff) อีกวิธีคือการดักระดับสัญญาณโดยใช้ Logic analyzer ต่อขนาน RX/TX เพื่อดูสัญญาณ ในส่วนการดักจับแพ็คเก็ตของ UDP ก็ทำได้เช่นกัน เช่น ดักจับด้วยโปรแกรม Hercules ถ้ารู้ IP/Port ที่ UDP ส่งอยู่

การดักจับ ROS custom message ในเครือข่ายเดียวกันสามารถทำได้ก็จริงแต่ไม่ง่ายนักเพราะต้องรู้โครงสร้างของ ROS custom message ต้องมีไฟล์ .msg และ build ด้วย colcon build ให้ใช้งานได้ รวมทั้งการสื่อสารด้วย ROS2 ข้อมูลจะถูกส่งเป็น RTPS (Real-Time Publish-Subscribe) บน UDP หากเปิด DDS Security (Encryption + Authentication) [9] ซึ่งเป็นฟีเจอร์เข้ารหัสข้อมูลร่วมกับการตรวจสอบตัวตนผ่าน Certificate ว่าตรงกับที่อนุญาตหรือไม่ การจำกัด Domain ID, QoS และ Whitelist participant ซึ่งไม่ใช่แค่การกำหนด IP/Port/MAC เท่านั้น ทำให้ปลอมแพ็คเก็ตยากมากหากไม่มี Certificate อีกทั้ง Message จะเปลี่ยนเป็น Binary ตามมาตรฐาน RTPS ไม่ใช่ Raw string เหมือน UDP ทั่วไป

3. การดำเนินการวิจัย

การออกแบบ Packet format ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีพื้นฐานที่นิยมใช้สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ เหมาะสำหรับโปรแกรมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คอมไพเลอร์ (Compiler) เช่น Arduino หรือ MicroPython เป็นต้น ปัจจุบันมีบอร์ดประมวลผลขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งระบบปฏิบัติการ Ubuntu ได้ เช่น Raspberry pi, Orange pi, NVIDIA Jetson, UP board เป็นต้น บอร์ดประมวลผลดังกล่าวจึงนิยมนำไปใช้กับหุ่นยนต์เนื่องจากมีความเร็วในการประมวลผลสูง สามารถเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ที่หลากหลายกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น กล้อง หรือ RPLiDAR เป็นต้น

บทความนี้จึงขอนำเสนออีกแนวทางในการออกแบบ Packet format ด้วย ROS custom message ซึ่งมีการนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรม [7] สามารถนำมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ได้

แนวคิดพื้นฐานของการสร้าง ROS custom message เกิดขึ้นจาก Common message ที่ ROS มีให้ เช่น std_msgs/String สำหรับส่งข้อความตัวอักษร หรือ geometry_msgs/Twist สำหรับส่งความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุมนั้น ไม่ได้ออกแบบมาสำหรับหุ่นยนต์ที่เราสร้างขึ้นเองซึ่งคำสั่งหรือข้อมูลหุ่นยนต์อาจมีหลายตัวในแพ็กเก็ตเดียว เช่น ความเร็วล้อ โหมดการทำงาน สถานะแบตเตอรี่และคำสั่งหยุดฉุกเฉินเป็นต้น หากจะใช้ Common message หลายตัวแยกกันก็จะต้องใช้หลาย Topic ส่งผลให้สิ้นเปลือง Bandwidth และข้อมูลอาจไม่ Synchronized กัน ดังนั้น ROS custom message จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อรวมข้อมูลทั้งหมดที่ต้องใช้ในแพ็กเก็ตเดียว ตัวอย่างการออกแบบ ROS custom message สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ป้อมปืนเลเซอร์ (Laser turret robot) โดยจะควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์พร้อมทั้งควบคุมป้อมปืนให้หัน (Pan) กระดก (Tilt) และสั่งงานเปิด/ปิดเลเซอร์ ในแพ็คเก็ตเดียว ดังรูปที่ 6 มีขั้นตอนดังนี้

รูปที่ 6 หุ่นยนต์ป้อมปืนเลเซอร์

3.1 สร้าง Workspace ชื่อ robot_ws และสร้าง Package ชื่อ robot_controller_pkg ด้วยภาษา Python (rclpy) ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws/src$ ros2 pkg create robot_controller_pkg --build-type ament_python --dependencies rclpy

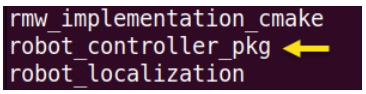
3.2 ทำการ build ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws$ colcon build

3.3 ตรวจสอบว่า robot_controller_pkg ถูกสร้างขึ้นหรือยัง ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws$ source install/setup.bash

~/robot_ws$ ros2 pkg list



รูปที่ 7 robot_controller_pkg

จากรูปที่ 7 จะเห็น robot_controller_pkg ที่สร้างขึ้นมา ขั้นตอนต่อไปจะสร้าง ROS custom message

3.4 สร้าง Package ชื่อ robot_interface ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws/src$ ros2 pkg create robot_interface

3.5 สร้างโฟลเดอร์ msg ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws/src/robot_interface$ mkdir msg

3.6 เพิ่มคำสั่งใน package.xml ดังนี้

<build_depend>rosidl_default_generators</build_depend>

<exec_depend>rosidl_default_runtime</exec_depend>

<member_of_group>rosidl_interface_packages</member_of_group>

3.7 เพิ่มคำสั่งใน CMakeLists.txt ดังนี้

find_package(rosidl_default_generators REQUIRED)

3.8 สร้างไฟล์ ROS custom message ชื่อ RobotCmd.msg ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws/src/robot_interface/msg$ touch RobotCmd.msg

3.9 ออกแบบ RobotCmd.msg ดังรูปที่ 8 ประกอบด้วย

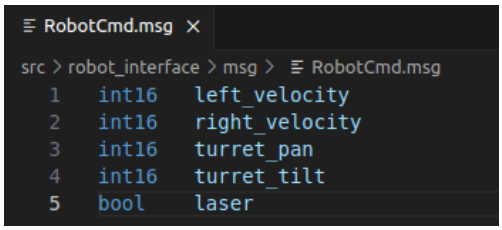
left_velocity คือความเร็วล้อซ้าย (-255 ถึง 255)

right_velocity คือความเร็วล้อขวา (-255 ถึง 255)

turret_pan คือองศาการหันของป้อมปืน ที่ติดตั้งอยู่บนเซอร์โวมอเตอร์ (0 ถึง 180)

turret_tilt คือองศาการกระดกของป้อมปืน ที่ติดตั้งอยู่บนเซอร์โวมอเตอร์ (0 ถึง 180)

laser คือควบคุมการยิงเลเซอร์ (True/False)



รูปที่ 8 robot_controller_pkg

3.10 เพิ่มคำสั่งใน CMakeLists.txt ดังนี้

rosidl_generate_interfaces(${PROJECT_NAME} "msg/RobotCmd.msg")

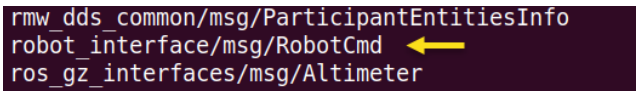
3.11 colcon build ใน robot_ws ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws$ colcon build --packages-select robot_interface

3.12 ตรวจสอบว่า ROS ติดตั้ง ROS custom message ที่สร้างขึ้นใหม่ ดังรูปที่ 9

~/robot_ws$ source install/setup.bash

~$ ros2 interface list



รูปที่ 9 Custom message ที่สร้างขึ้น

3.13 แสดงข้อมูล Interface ดังรูปที่ 10 ด้วยคำสั่ง

~$ ros2 interface show robot_interface/msg/RobotCmd

```
khan@ubuntu22:~/robot_ws$ ros2 interface show robot_interface/msg/RobotCmd
int16   left_velocity
int16   right_velocity
int16   turret_pan
int16   turret_tilt
bool    laser
```

รูปที่ 10 RobotCmd ที่สร้างขึ้น

จากรูปที่ 10 จะเห็น ROS custom message (RobotCmd.msg) ที่สร้างขึ้นมาสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ป้อมปืนเลเซอร์

4. ผลการวิจัย

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบ RobotCmd.msg ในการควบคุมหุ่นยนต์ป้อมปืนเลเซอร์ มีขั้นตอนดังนี้

4.1 เขียนโปรแกรมสร้างโหนดชื่อ robot_controller ซึ่งจะ Subscriber topic ชื่อ robot_cmd โดยมี Interface type เป็น RobotCmd และเมื่อได้รับ Message callback จะแสดงข้อมูลเพื่อนำไปควบคุมหุ่นยนต์ต่อไป

4.2 เรียกโหนด robot_controller ด้วยคำสั่ง

~/robot_ws$ source install/setup.bash

~/robot_ws$ ros2 run robot_controller_pkg robot_controller

4.3 ตรวจสอบ Topic พร้อมแสดง Interface ดังรูปที่ 11 ด้วยคำสั่ง

~$ ros2 topic list -t

```
khan@ubuntu22:~$ ros2 topic list -t
/parameter_events [rcl_interfaces/msg/ParameterEvent]
/robot_command [robot_interface/msg/RobotCmd]
/rosout [rcl_interfaces/msg/Log]
```

รูปที่ 11 Topic ที่จะ Subscribe

4.4 ทดสอบ Publish message ด้วย CLI (Command Line Interface) ด้วยคำสั่ง

~$ ros2 topic pub /robot_command robot_interface/msg/RobotCmd "{left_velocity: 120, right_velocity: -120, turret_pan: 45, turret_tilt: 90, laser: true}"

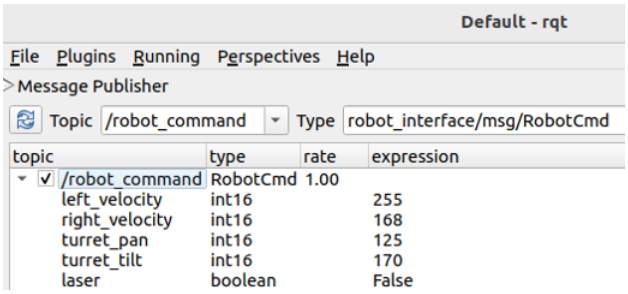
4.5 ตรวจสอบที่โหนด robot_controller จะได้รับข้อมูลที่ Publish มาสามารถนำไปควบคุมหุ่นยนต์ได้ ดังรูปที่ 12

```
khan@ubuntu22:~/robot_ws$ ros2 run robot_controller_pkg robot_controller
[INFO] [1752041858.955954135] [robot_controller]: Robot command: left_vel=120 right_vel=-120 Pan=45 Tilt=90 Laser=True
[INFO] [1752041859.928558124] [robot_controller]: Robot command: left_vel=120 right_vel=-120 Pan=45 Tilt=90 Laser=True
[INFO] [1752041860.931777610] [robot_controller]: Robot command: left_vel=120 right_vel=-120 Pan=45 Tilt=90 Laser=True
```

รูปที่ 12 Message ที่โหนดได้รับ

4.6 ทดสอบ Publish ด้วย rqt โดยป้อนข้อมูลที่ RobotCmd message ดังรูปที่ 13

ก า ร



จ า ก

```
khan@ubuntu22:~/robot_ws$ ros2 run robot_controller_pkg robot_controller
[INFO] [1752042565.439916088] [robot_controller]: Robot command: left_vel=255 right_vel=168 Pan=125 Tilt=170 Laser=False
[INFO] [1752042566.391380925] [robot_controller]: Robot command: left_vel=255 right_vel=168 Pan=125 Tilt=170 Laser=False
[INFO] [1752042567.389296383] [robot_controller]: Robot command: left_vel=255 right_vel=168 Pan=125 Tilt=170 Laser=False
```

รูปที่ 14 ข้อมูลที่ได้รับจาก RobotCmd message

ทดสอบดังรูปที่ 13 โหนด robot_controller จะแสดงข้อมูลที่ได้รับจาก rqt ดังรูปที่ 14 สามารถนำไปควบคุมหุ่นยนต์ได้

5. สรุป

การออกแบบ Packet format เพื่อควบคุมหุ่นยนต์มีหลายวิธีสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม แต่ไม่ว่าจะเลือกวิธีใดก็ตามจะต้องมีวิธีการตรวจสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลนั้นเสมอ โดย Checksum เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดทรัพยากรแต่มีข้อจำกัดในการคำนวณกับข้อมูลบางประเภท การสลับบิตหรือการเปลี่ยนค่าบางตำแหน่งอาจทำให้การตรวจสอบผิดพลาดได้ สำหรับการออกแบบ Packet format ที่นิยมใช้เช่น Text-based protocol ร่วมกับ CRC นั้น แพ็คแก็ตจะเข้าใจง่าย มีความยืดหยุ่นในการกำหนดข้อมูล แต่จะทำให้ข้อมูลต่อหนึ่งแพ็กเก็ตเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อความเร็วในการประมวลผลและเพิ่ม Bandwidth ของระบบสื่อสาร เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบ Packet format ด้วย ROS custom message ที่ใช้ DDS จัดการอยู่เบื้องหลัง ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะในระบบฝังตัว (Embedded Systems) ซึ่งเป็นการสื่อสารที่มี Latency ต่ำมาก เนื่องจากรวมข้อมูลที่จำเป็นไว้ในแพ็กเก็ตเดียว ช่วยลด Overhead จากการส่งหลายๆ ครั้ง ลดขั้นตอนการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล ง่ายต่อการดีบักเพราะมีโครงสร้างตายตัวทำให้ตรวจสอบง่ายรวมทั้งสามารถขยายแพ็กเก็ตได้ในอนาคตเพียงแค่เพิ่ม Field ใหม่โดยไม่กระทบกับโครงสร้างข้อมูลเดิม

การใช้ ROS เป็น Framework สำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์เมื่อพิจารณาในเชิงความมั่นคงทางเทคโนโลยี มีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถปรับแต่งโค้ดให้เข้ากับข้อกำหนดด้านความมั่นคง แบ่งแยกระบบเป็นโมดูลาร์ (Sensors, Control, Navigation) ทำให้ลดความเสี่ยงหากมีข้อผิดพลาดจะไม่ทำให้เสียหายทั้งระบบ รองรับการพัฒนากับ Hardware ได้ทั้ง UGV (Unmanned Ground Vehicle), UAV (Unmanned Aerial Vehicle), ROV (Remote Operated underwater Vehicle) , AUV (Autonomous Underwater Vehicle) มีมาตรฐานการสื่อสารชัดเจน (Message, Service, Action) ทำให้เชื่อมต่อกันได้ทุกระบบ เมื่อพิจารณาในเชิงความมั่นคงทางการทหาร ระบบหุ่นยนต์ที่ใช้ ROS สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้ ROS2 + SLAM + Multi-Camera Streaming ในการสอดแนม (Reconnaissance) ตรวจการณ์ชายแดน เฝ้าระวังพื้นที่ การใช้ ROS Navigation stack + Path planning ในการลาดตระเวน (Patrol) ตรวจเส้นทาง หุ่นยนต์เดินตรวจรอบฐาน การใช้ ROS Mapping + Sensor fusion ในการกู้ภัย (Search & Rescue) ค้นหาผู้ประสบภัยในซากตึก การใช้ ROS Sensor drivers + Data logging ในการเก็บข้อมูลข่าวกรอง (Intelligence gathering) เก็บภาพ สัญญาณเสียง สภาพอากาศ เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของหุ่นยนต์ที่จำเป็นในบริบทความมั่นคง คือ มีความทนทานสูง (Ruggedization) ทนต่อแรงกระแทก อุณหภูมิ กันน้ำ กันฝุ่น มีการสื่อสารที่ปลอดภัย เข้ารหัสข้อมูล ป้องกันการโจมตีข้อมูล มีความน่าเชื่อถือ เช่น ทำงานได้แม้ไม่มี GPS หรือสัญญาณเครือข่าย สามารถทำงานอัตโนมัติบางส่วน (Semi/Full Autonomy) เพื่อลดความเสี่ยงต่อผู้ควบคุม

นอกจากนี้การพัฒนาหุ่นยนต์ด้วย ROS ยังมีเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ ดีบัก และ Visualization ได้ทันที เช่น CLI, rqt, PlotJuggler, RViz, Gazebo ทำให้สะดวก รวดเร็ว เหมาะสมกับการต่อยอดเทคโนโลยี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณส่วนงานวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ช่วยเหลือในการเขียนบทความนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Federal Aviation and William J. Hughes, 2015, “Selection of Cyclic Redundancy Code and Checksum Algorithms to Ensure Critical Data Integrity”, National Technical Information Services (NTIS), Springfield, Virginia 22161, March 2015.

[2] Theresa C. Maxino, 2006, “The Effectiveness of Checksums for Embedded Networks”, Department of Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

[3] Peter M. Fenwick, 2004, “Checksums and error control”, The University of Auckland.

[4] Sergey V. Klimenko, Valentin V. Yakovlev and Boris V. Sokolov, 2018, “The Study of Implementations of CRCs Algorithms”, Problems of Mathematical and Natural-Scientific Training in Engineering Education, St.-Petersburg, Russia, 8–9 November, 2018.

[5] “ROS 2 Documentation” https://docs.ros.org/en/humble/index.html.

[6] “Introduction to Robot Operating System 2 (ROS 2)” https://www.mathworks.com/help/ros/gs/robot-operating-system-ros2-basic-concepts.html.

[7] Endre Eros, Martin Dahla, Kristofer Bengtssona, Atieh Hannab, Petter Falkmana, 2019, “A ROS2 based communication architecture for control in collaborative and intelligent automation systems”, 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019), June 24-28, 2019, Limerick, Ireland.

[8] Francisco J. Rodríguez-Lera, Vicente Matellán-Olivera, Angel Manuel Guerrero-Higueras, Camino Fernández-Llamas, “Message Encryption in Robot Operating System: Collateral Effects of Hardening Mobile Robots”, 1AI Robolab, Computer Science and Communications Research Unit, Faculty of Science, Technology and Communications, University of Luxembourg, Esch-sur-Alzette, Luxembourg, 2Robotics Group, Research Institute on Applied Sciences in Cybersecurity, Universidad de León, León, Spain.

[9] Timm Lauser, Maximilian Müller, Ingmar Baumgart, Christoph Krau, “Data Distribution and Redistribution - A formal and practical Analysis of the DDS Security Standard”, Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing, SAC ’25, March 31-April 4, 2025, Catania, Italy.

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องและผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ
Factors Associated with and Impacts of Air Cadets' Choice of Major Fields of Study

หฤทัยทิพย์ ตัณฑเทศ[1]
[1]ภาควิชาสังคมศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
Haruetaitip Tuntatead[1]
[1]Social Sciences Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ 2) เปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชา และ 3) ศึกษาผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชา ดำเนินการวิจัยแบบผสานวิธี โดยระยะที่ 1 เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ กับกลุ่มตัวอย่างนักเรียนนายเรืออากาศที่ผ่านการเลือกสาขาวิชาจำนวน 194 คน เครื่องมือที่ใช้ คือ แบบสอบถามปัจจัยส่วนบุคคลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา วิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา การทดสอบค่าทีแบบอิสระ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า 1) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในระดับมาก คือ ปัจจัยด้านเจตคติในเรื่องความก้าวหน้าในอนาคตและความสนใจในสาขาวิชาที่เลือก กับปัจจัยด้านหลักสูตรในเรื่องความน่าสนใจของหลักสูตร รูปแบบของการเรียน สาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี และสาขาวิชาที่ประกอบอาชีพได้หลากหลาย 2) เปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคล พบว่า สาขาวิชา รายได้ของครอบครัว เป้าหมายสำคัญในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศ และประสบการณ์ในการเลือกสาขาวิชาที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยต่างกันในเรื่องของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และระยะที่ 2 การวิจัยเชิงคุณภาพ เครื่องมือที่ใช้ คือ แบบสัมภาษณ์ โดยเก็บข้อมูลจากการสนทนากลุ่มกับนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 3 ที่ผ่านการเลือกสาขาวิชา ทั้ง 7 สาขาวิชา จำนวน 14 คน วิเคราะห์ข้อมูลเชิงเนื้อหา ผลพบว่า ผลกระทบที่เกิดจากการเลือกสาขาวิชาเกี่ยวข้องกับผลการเรียน แรงจูงใจในการเรียน และความสุขในการเรียน

คำสำคัญ: การเลือกสาขาวิชา นักเรียนนายเรืออากาศ แรงจูงใจในการเรียน ผลการเรียน

Abstract

The objectives of this study were: 1) to investigate the factors related to the selection of majors by Air cadets, 2) to compare personal factors with those related to the selection of majors, and 3) to examine the impacts of selecting a field of study. This survey research by mixed methods. In Phase 1, a quantitative approach was conducted with a purposive sample of 194 air cadets who had completed the academic major selection process. The research instrument consisted of a

questionnaire assessing personal variables and factors related to major selection, and data were analyzed using descriptive statistics, independent samples t-test, and one-way analysis of variance (ANOVA). The results revealed that: (1) the most influential factors in major selection were attitudinal factors, particularly future career advancement and interest in the chosen field, as well as curricular factors such as course attractiveness, teaching methods, potential for high income, and career versatility; and (2) significant differences at the .05 level were found among personal factors namely academic major, family monthly income, primary motivation for becoming an air force cadet, and prior experience in choosing a major regarding factors influencing academic major selection. In Phase 2, a qualitative study was conducted through focus group discussions with 14 third-year cadets who had already selected their majors across seven academic programs. The data were analyzed using content analysis, which revealed that the consequences of major selection were strongly associated with academic performance, learning motivation, and learning satisfaction.

Keywords: major selection, air cadets, learning motivation, academic performance

1. บทนำ

การเลือกสาขาวิชาในระดับอุดมศึกษา สำหรับนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย ถือเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญของชีวิตนักเรียน ซึ่งมีผลต่อเส้นทางการศึกษาและอาชีพในอนาคตอย่างมีนัยสำคัญ [1, 2] การตัดสินใจดังกล่าวไม่ได้เกิดจากความสนใจส่วนบุคคลเพียงอย่างเดียว หากแต่เป็นผลลัพธ์ของปัจจัยหลายด้าน ทั้งจากครอบครัว สถาบันการศึกษา กลุ่มเพื่อน และสื่อสังคมออนไลน์ [3] เนื่องจากการศึกษาเป็นรากฐานในการพัฒนาคนให้มีคุณภาพ ซึ่งการให้ความสำคัญกับการคาดการณ์แนวโน้มอนาคตทางด้านการศึกษา โดยปัจจุบันแนวโน้มทางด้านความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและวิทยาการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ผู้เรียนมีโอกาสในการเลือกที่จะศึกษาในสิ่งที่ตรงกับความถนัดและความสนใจของตนเอง รวมทั้งความต้องการของตลาดแรงงาน เพื่อให้สามารถพัฒนาศักยภาพของตนเองให้มีความรู้ความสามารถ ทักษะ นำไปสู่การแข่งขันในช่วงชีวิตวัยทำงาน การเลือกสายงาน ซึ่งจะนำไปสู่สายวิชาชีพ และตำแหน่งที่มีความเหมาะสม รายได้ที่เพิ่มขึ้น ตลอดจนเป็นที่ยอมรับจากผู้อื่นและสังคม [4]

ในบริบทของประเทศไทย การเลือกสาขาวิชายังสะท้อนถึงความเข้าใจในตนเอง ความคาดหวังของผู้ปกครอง และการแนะแนวที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งหากขาดความชัดเจน อาจนำไปสู่การเปลี่ยนสาขาในระดับอุดมศึกษา หรือการลาออกกลางคัน ส่งผลต่อทรัพยากรของประเทศและความพึงพอใจในชีวิตของผู้เรียน [5] มีผลกระทบทางลบมากกว่ากลุ่มผู้เรียนที่เลือกสาขาได้ตรงกับคุณลักษณะ-ความถนัด [6] ทำให้หลายสถาบันทางการศึกษาได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาหลักสูตรให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้เรียนมากขึ้น [7-10] โดยเฉพาะในสาขาวิศวกรรม พบว่านักศึกษาที่เลือกสาขาวิชาเอกได้ไม่เหมาะสม เนื่องจากข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือมีความเข้าใจผิดเกี่ยวกับสาขาวิชาต่าง ๆ มักจะเกิดความรู้สึกผิดหวัง และอาจนำไปสู่การละทิ้งการเลือกทำงานด้านวิศวกรรมได้ [11, 12]

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เป็นสถาบันทางการศึกษาหลักในระดับอุดมศึกษาของกองทัพอากาศ โดยปัจจุบันมีหลักสูตรในระดับปริญญาตรี ทั้งหมด 7 สาขาวิชา คือ 1) สาขาวิชาวิศวกรรมอากาศยาน

2) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล 3) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า 4) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา 5) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน 6) สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ และ 7) สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหารและอากาศยาน มีหน้าที่ในการผลิตนายทหารสัญญาบัตรหลักให้กับกองทัพอากาศ [13] มีพันธกิจหลักในการพัฒนานักเรียนนายเรืออากาศ (Air cadet) ให้มีความสามารถทางด้านวิชาการ และทักษะในด้านวิชาชีพที่ตรงกับความต้องการของกองทัพอากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาหลักสูตรการศึกษาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันที่ได้มีการปรับปรุงพัฒนาหลักสูตรตามวงรอบ 5 ปี โดยในหลักสูตรที่ปรับปรุงใหม่นี้มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในเรื่องของการจัดกระบวนการเรียนการสอนให้มีความเหมาะสม และมีกระบวนการแบ่งกลุ่มผู้เรียนและกำหนดอัตราส่วน (Quata) ตามภารกิจสำคัญของกองทัพอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเลือกสาขาของนักเรียนนายเรืออากาศ

จากความสำคัญและปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยในฐานะเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาให้กับนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 1 ซึ่งเป็นชั้นปีที่ต้องทำการเลือกสาขาวิชา จึงได้เห็นความสำคัญของการมุ่งศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในการศึกษาของนักเรียนนายเรืออากาศ โดยเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์และผลกระทบจากการเรียนการสอน เพื่อเสนอแนวทางในการจัดกระบวนการเลือกสาขาวิชาให้มีความเหมาะสม เพื่อนำไปพัฒนาการแนะแนวการศึกษาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ให้สอดคล้องกับบริบทของกองทัพอากาศและความต้องการของผู้เรียนต่อไป

ทฤษฎีการตัดสินใจและการกระทำทางสังคม (The Multiple Factors Theory of Decision Making and Social Action)

ทฤษฎีการกระทำทางสังคมตามแนวคิดของ Max Weber [14] ที่เชื่อว่าการกระทำทางสังคมพื้นฐานมี 4 ประเภท คือ 1) การกระทำที่ได้รับการชี้นำจากความคาดหวังว่าสิ่งของและผู้คนในสภาพแวดล้อมของบุคคลใดบุคคลหนึ่งจะทำและตอบสนองอย่างไร 2) การกระทำที่ยึดถือค่านิยมอันเป็นที่สุดของบุคคล ซึ่งอาจรวมอยู่ในหลักจริยธรรม สุนทรียศาสตร์ หรือหลักศาสนา 3) การกระทำที่เกิดจากการตอบสนองทางอารมณ์หรือความรู้สึกเกี่ยวกับบุคคลและสิ่งของรอบตัวใครบางคน และ 4) การกระทำที่ดำเนินการเป็นส่วนหนึ่งของประเพณีสังคมที่มีมายาวนาน โดยการกระทำทางสังคมทั้ง 4 ประเภทนี้ สองประเภทแรกถือว่ามีเหตุผลมากกว่า และมีความเป็นสังคมน้อยกว่าสองประเภทหลัง ซึ่ง Weber เชื่อว่าโดยทั่วไปแล้ว การกระทำมักได้รับการชี้นำจากปัจจัยทางสังคมและเหตุผลบางประการร่วมกัน

ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการตัดสินใจและการกระทำทางสังคมตามแนวคิดของ William W. Reader [15] ได้อธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของบุคคล โดยให้ความสำคัญกับตัวแปรทางด้านจิตวิทยาสังคมที่เกี่ยวกับการตัดสินใจของมนุษย์ ซึ่งจากการศึกษาของ Reader ที่รวบรวมทฤษฎีทางสังคมวิทยาซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการตัดสินใจของมนุษย์ว่าเกี่ยวข้องกับปัจจัยภายนอกในเรื่องของสถานภาพทางเศรษฐกิจและสังคม (Socio-Economic Status) เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ Reader เชื่อว่าปัจจัยภายนอกในเรื่องของสถานภาพทางเศรษฐกิจและสังคมนั้น มีอิทธิพลโดยตรงต่อการตัดสินใจน้อย แต่แท้จริงแล้วการตัดสินใจเลือกแสดงพฤติกรรมของบุคคลจะประกอบด้วยหลายปัจจัยรวมกัน รวมทั้งบุคคลอาจแสดงพฤติกรรมแบบเดียวกัน แต่ใช้เหตุผลในการตัดสินใจแตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย ดังนี้ 1) ปัจจัยดึง (Pull factors) ประกอบด้วย เป้าหมายหรือจุดประสงค์ ความเชื่อ มาตรฐานของค่านิยม นิสัยและขนบธรรมเนียม 2) ปัจจัยผลักดัน (Push factors) ประกอบด้วย ความคาดหวัง ข้อผูกพัน การบังคับ และ 3) ปัจจัยความสามารถ (Able factors) ประกอบด้วย โอกาส ความสามารถและการสนับสนุน จึงสรุปตามทฤษฎีได้ว่า การตัดสินใจเป็นความคิดอย่างมีระบบ มีจุดมุ่งหมาย บุคคลจะตัดสินใจกระทำสิ่งใดสิ่งหนึ่งนั้นขึ้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเป็นองค์ประกอบ ไม่สำคัญอยู่เพียงปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเหตุผลที่ใช้ตัดสินใจในแต่ละครั้งอาจเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละสถานการณ์ของแต่ละบุคคล ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยทั้ง 3 ประเภทคือ ปัจจัยดึง ปัจจัยผลักดันและปัจจัยความสามารถ โดยทั้ง 3 ปัจจัยนี้มีส่วนสำคัญที่ใช้ประกอบการตัดสินใจของบุคคล

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระดับอุดมศึกษา

บุคคลแต่ละคนมีความแตกต่างกันในด้านต่างๆ ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างกันของลักษณะทางกายภาพและสภาพแวดล้อมของแต่ละบุคคล ทำให้การตัดสินใจของแต่ละบุคคลมีความแตกต่างกัน โดยปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการพฤติกรรมการตัดสินใจ ประกอบด้วย 4 ปัจจัย ดังนี้ 1) ปัจจัยด้านวัฒนธรรม (Cultural Factor) เป็นวิธีการดำเนินชีวิตที่สังคมเชื่อถือว่าเป็นสิ่งดีงามและยอมรับมาปฏิบัติผ่านกระบวนการทางสังคมที่เกี่ยวข้องกับครอบครัว และสถาบันต่างๆ ในสังคม คนที่อยู่ในวัฒนธรรมต่างกันย่อมมีพฤติกรรมการเลือกที่แตกต่างกัน [16-19] 2) ปัจจัยด้านสังคม (Social Factor) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันและมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการตัดสินใจ [17-19] เช่น การต้องการการยอมรับทางสังคม หรือการทำพฤติกรรมเลียนแบบตามแบบอย่างที่ดี 3) ปัจจัยส่วนบุคคล (Personal Factor) การตัดสินใจของบุคคลได้รับอิทธิพลจากลักษณะส่วนบุคคลของคนในด้านต่างๆ เช่น ความต้องการ หรือความถนัดส่วนบุคคล [11, 6] 4) ปัจจัยด้านจิตวิทยา (Psychological factor) หรือปัจจัยภายในที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมต่อการตัดสินใจ [12,16-18] เช่น แรงจูงใจใฝ่สัมฤทธิ์ในการศึกษาและความพยายามในการเรียนรู้

ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่า มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักศึกษาในสถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษา เพื่อพัฒนาหลักสูตรให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้เรียนตามอัตลักษณ์ของแต่ละสาขาวิชาหรือแต่ละสถาบันการศึกษาหลากหลาย [7, 9-11, 20, 21] แต่พบว่ายังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาในกลุ่มนักเรียนทหาร ซึ่งเป็นกลุ่มวิชาชีพเฉพาะที่ผู้สำเร็จการศึกษาจากสถาบันทางการศึกษาทางทหารต้องทำงานหรือปฏิบัติหน้าที่เกี่ยวข้องกับอาวุธยุทโธปกรณ์ที่มีมูลค่าสูง และมีลักษณะเฉพาะของกระบวนการเลือกสาขาวิชา รวมถึงการศึกษาในระบบโรงเรียนทหาร จึงมีความจำเป็นในการศึกษาเรื่องดังกล่าวเพื่อความคุ้มค่า และเป็นการวางแผนพัฒนาหลักสูตร และการบริหารจัดการด้านการศึกษาในการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนทหารที่เป็นกลุ่มวิชาชีพเฉพาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศในหลักสูตรปรับปรุงใหม่ปี 2563
2. เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศในหลักสูตรปรับปรุงใหม่ปี 2563
3. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ ในหลักสูตรปรับปรุงใหมปี 2563

ระเบียบวิธีวิจัย

รูปแบบการวิจัย เป็นการวิจัยผสานวิธี (Mixed Method Research) โดยระยะที่ 1 เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) และระยะที่ 2 เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research)

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ นักเรียนนายเรืออากาศ เฉพาะชั้นปีที่ 1-3 ที่กำลังศึกษาอยู่ในหลักสูตรปรับปรุงปี 2563 จำนวน 312 คน

กลุ่มตัวอย่าง ระยะที่ 1 เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ ผู้วิจัยใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive Sampling) โดยกำหนดคุณสมบัติตรงตามวัตถุประสงค์ ได้แก่ นักเรียนนายเรืออากาศที่ผ่านกระบวนการเลือกสาขาวิชาในหลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2563 และกำลังศึกษาในชั้นปีที่ 2 และ 3 ปีการศึกษา 2565 โดยเลือกเก็บข้อมูลจากประชากรทั้งหมดที่มีคุณสมบัติตรงตามเกณฑ์ รวม 194 คน สำหรับระยะที่ 2 เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ ได้

คัดเลือกผู้ให้ข้อมูลหลักตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยเลือกนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการเลือกสาขาครบทั้ง 7 สาขาวิชา สาขาวิชาละ 2 คน รวม 14 คน เพื่อให้เกิดความครอบคลุมของข้อมูลและสะท้อนประสบการณ์จากทุกสาขาอย่างเท่าเทียม

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ส่วนที่ 1 แบบสอบถามข้อมูลทั่วไป เป็นข้อคำถามเกี่ยวกับปัจจัยส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งเป็นข้อคำถามแบบปลายปิด ในเรื่องของสาขาวิชา รายได้ของครอบครัวต่อเดือน ผลการเรียนรวมโดยเฉลี่ย และข้อคำถามที่มีลักษณะคำถามเป็นแบบให้เลือกตอบ (checklist) เช่น เป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศและประสบการณ์ในการเลือกสาขา

ส่วนที่ 2 แบบสอบถามปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา ซึ่งผู้วิจัยสร้างขึ้นจากการศึกษาแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจ งานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้องการเลือกสาขาวิชาเรียนในระดับอุดมศึกษา แล้วนำไปสร้างเป็นแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) 5 ระดับ ตามวิธีของลิเคิร์ท (Likert scale) ตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับจุดมุ่งหมายที่ต้องการวัด (Item Objective Congruence: IOC) ความครอบคลุมของข้อคำถาม และความชัดเจนของภาษา โดยผู้ทรงคุณวุฒิด้านจิตวิทยาและด้านการศึกษา จำนวน 3 ท่าน เพื่อประเมินความตรงเชิงเนื้อหา (Content validity) ตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือกับกลุ่มตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกับประชากรเป้าหมาย รวมทั้งสิ้น 30 คน โดยพบว่ามีค่าความเชื่อมั่น (Reliability) อยู่ในระดับสูงมาก 0.97

ส่วนที่ 3 แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้างเกี่ยวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา และผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ

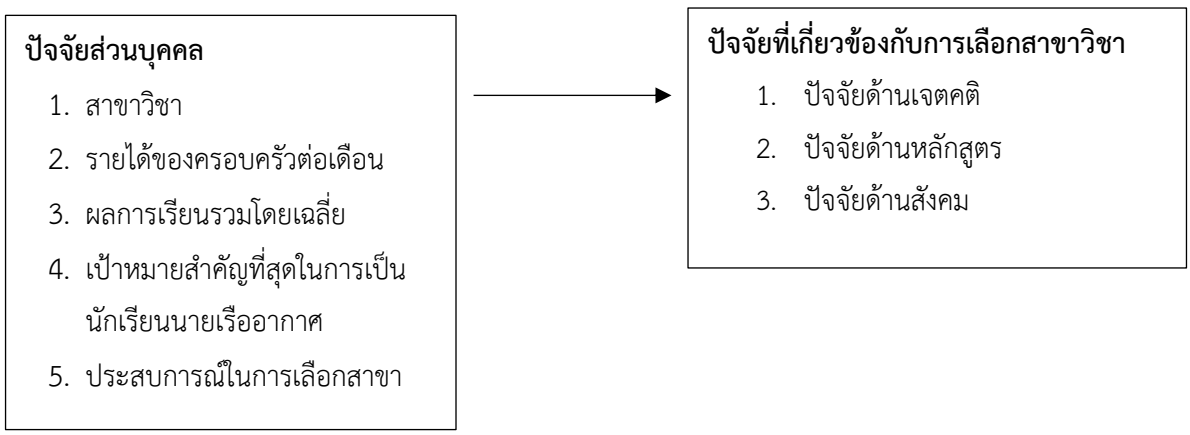
3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้ตรวจสอบความครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว จะนำมาวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ ข้อมูลทั่วไปด้วยค่าสถิติพื้นฐาน และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาที่มีปัจจัยส่วนบุคคลที่แตกต่างกันโดยใช้ค่าสถิติที (t-test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) โดยใช้ สถิติ Welch-test เนื่องจากความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มไม่เท่ากัน

3.2 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยใช้การวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (content analysis) เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา และผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ

กรอบแนวคิดการวิจัย



ผลการวิจัย

การศึกษาเรื่องนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบจากการเลือกสาขาของนักเรียนนายเรืออากาศในหลักสูตรปรับปรุงปี 2563 โดยกลุ่มตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 194 คน จากจำนวนนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 2 และชั้นปีที่ 3 ในปีการศึกษา 2565 รวมทั้งหมด 216 คน คิดเป็นร้อยละ 89.81 โดยศึกษาในสาขาวิชาคอมพิวเตอร์ ร้อยละ 20.6 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน ร้อยละ 18.0 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าร้อยละ 16.5 สาขาวิชาวิศวกรรมอากาศยานร้อยละ 15.5 สาขาวิชาวิศวกรรม เครื่องกลร้อยละ 11.9 สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ร้อยละ 8.2 และสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ทางทหารและอากาศยาน ร้อยละ 9.3 ตามลำดับ

รายได้ของครอบครัวต่อเดือน ระดับ 30,001-60,000 บาทต่อเดือนร้อยละ 46.4 รองลงมาอยู่ในระดับสูงกว่า 60,000 บาท และต่ำกว่า 30,000 บาทต่อเดือนร้อยละ 26.8 เท่ากัน ส่วนใหญ่มีระดับผลการเรียนรวมโดยเฉลี่ย 2.75-3.24 ร้อยละ 35.1 รองลงมาอยู่ในระดับผลการเรียนรวมโดยเฉลี่ยต่ำกว่า 2.75 ร้อยละ 22.1 ระดับผลการเรียนรวมโดยเฉลี่ย 3.25-3.49 และระดับผลการเรียนรวมโดยเฉลี่ย 3.50 ขึ้นไป ร้อยละ 21.6 เท่ากัน ส่วนใหญ่มีการเลือกสาขาได้ตามความต้องการที่คาดหวัง ร้อยละ 85.6 โดยเป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศคือ ต้องการเป็นส่วนกำลังรบ (นักบิน) ร้อยละ 49.0 รองลงมาคือต้องการมีอาชีพที่มั่นคง ร้อยละ 18.0 ต้องการเป็นส่วนสนับสนุน (เทคนิค/วิศวกร) ร้อยละ 12.9 ต้องการเป็นสายวิชาชีพที่มีรายได้ดีร้อยละ 12.4 ต้องการเป็นสายอาชีพด้านวิชาการ (อาจารย์/นักวิจัย) ร้อยละ 3.6 ตามลำดับ โดยมีผลวิจัยตามวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาของนักเรียนนายเรืออากาศ

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาของนักเรียนนายเรืออากาศ หลักสูตรปรับปรุง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	แปลผล
ปัจจัยด้านเจตคติ			
1. เป็นสาขาวิชาที่คาดว่าจะมีความก้าวหน้าในอนาคต	3.64	1.37	มาก
2. ความเหมาะสมกับความรู้ความสามารถของตนเอง	3.45	1.31	ปานกลาง
3. โอกาสที่จะเป็นกำลังพลในส่วนกำลังรบภายหลังจากสำเร็จการศึกษา	3.42	1.35	ปานกลาง
4. ความสนใจในสาขาวิชาที่เลือก	3.57	1.33	มาก
5. ความต้องการเรียนด้านวิศวกรรม	3.26	1.46	ปานกลาง
ปัจจัยด้านหลักสูตร			
6. หลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ	3.57	1.31	มาก
7. รูปแบบการเรียนการสอนของแต่ละสาขาวิชา	3.52	1.27	มาก
8. ความพร้อมของสถานที่และอุปกรณ์การเรียน	3.36	1.29	ปานกลาง
9. ชื่อเสียงและคุณภาพของอาจารย์ประจำหลักสูตร	3.35	1.35	ปานกลาง
10. เป็นสาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี	3.51	1.30	มาก
11. เป็นสาขาวิชาที่สามารถประกอบอาชีพได้หลากหลาย	3.64	1.39	มาก
12. การประชาสัมพันธ์รายละเอียดของแต่ละสาขาวิชา	3.35	1.30	ปานกลาง

ปัจจัยด้านสังคม			
13. ตัวอย่างจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขาวิชา	3.33	1.32	ปานกลาง
14. การเลือกเรียนตามเพื่อน	3.29	1.45	ปานกลาง
15. การเลือกเรียนตามคำแนะนำของครอบครัว	2.72	1.37	ปานกลาง
16. การประชาสัมพันธ์เกี่ยวกับขอบเขตการทำงานในสายวิชาชีพ	3.47	1.35	ปานกลาง

จากตารางที่ 1 พบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศในหลักสูตรปรับปรุงที่อยู่ในระดับมาก 2 ปัจจัย คือ 1) ปัจจัยด้านเจตคติในเรื่องของมุมมองในสาขาวิชาที่เลือกว่าเป็นสาขาวิชาที่คาดว่าจะมีความก้าวหน้าในอนาคต ($\bar{X}$ = 3.64, SD = 1.37) และความสนใจในสาขาวิชาที่เลือก ($\bar{X}$ = 3.57, SD = 1.33) และ 2) ปัจจัยด้านหลักสูตร ในเรื่องหลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ ($\bar{X}$ = 3.57, SD = 1.31) รูปแบบของการเรียนการสอนในแต่ละสาขาวิชา ($\bar{X}$ = 3.52 , SD = 1.27) เป็นสาขาวิชาที่สามารถสร้างรายได้ดี ($\bar{X}$ = 3.51 , SD = 1.30) และเป็นสาขาวิชาที่สามารถประกอบอาชีพได้หลากหลาย ($\bar{X}$ = 3.64 , SD = 1.39) ส่วนปัจจัยทางด้านสังคม มีระดับความเกี่ยวข้องในการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาอยู่ในระดับปานกลาง

2. ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปัจจัยส่วนบุคคลกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ ในหลักสูตรปรับปรุง

2.1 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลในเรื่องสาขาวิชาต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่สาขาวิชาต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชา	Welch's F	df1	df2	*p*
ปัจจัยด้านเจตคติ				
2. ความเหมาะสมกับความรู้ความสามารถของตนเอง	2.59*	6	72.11	.03
5. ความต้องการเรียนด้านวิศวกรรม	6.50**	6	71.58	.00
ปัจจัยด้านหลักสูตร				
6. หลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ	3.40*	6	72.22	.01
7. รูปแบบการเรียนการสอนของแต่ละสาขาวิชา	3.01*	6	72.47	.01
9. ชื่อเสียงและคุณภาพของอาจารย์ประจำหลักสูตร	3.79*	6	70.97	.01
10. เป็นสาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี	3.17*	6	72.62	.01
ปัจจัยด้านสังคม				
13. ตัวอย่างจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขาวิชา	3.12*	6	71.14	.01

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 **มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน Welch พบว่า นักเรียนนายเรืออากาศที่ศึกษาในสาขาวิชาต่างกันมีค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในหลายปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยด้านเจตคติ พบว่า ค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาของนักเรียนนายเรืออากาศในแต่ละสาขา มีความแตกต่างกันในเรื่องความเหมาะสมกับความรู้ความสามารถของตนเอง (Welch's F = 2.59, df1 =

6, df2 = 72.22, p = .03) และความต้องการเรียนด้านวิศวกรรม (Welch's F = 6.50, df1 = 6, df2 = 71.58, p < .01) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ .01 ตามลำดับ

ด้านปัจจัยด้านหลักสูตร พบค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน ในเรื่องหลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ (Welch's F = 3.40, df1 = 6, df2 = 72.22, p = .01) รูปแบบการเรียนการสอนของแต่ละสาขาวิชา (Welch's F = 3.01, df1 = 6, df2 = 72.47, p = .01) ชื่อเสียงและคุณภาพของอาจารย์ประจำหลักสูตร (Welch's F = 3.79, df1 = 6, df2 = 70.97, p = .01) และเป็นสาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี (Welch's F = 3.17, df1 = 6, df2 = 72.62, p = .01) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

และปัจจัยด้านสังคม พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ในเรื่องตัวอย่างจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขาวิชา (Welch's F = 3.12, df1 = 6, df2 = 71.14, p = .01) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

2.2 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลในเรื่องรายได้ของครอบครัวต่อเดือนต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ รายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบรายได้ของครอบครัวต่อเดือนต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชา	**Welch's F**	**df1**	**df2**	***p***
ปัจจัยด้านเจตคติ				
3. โอกาสที่จะเป็นกำลังพลในส่วนกำลังรบภายหลังจากสำเร็จการศึกษา	3.59*	2	108.86	.03
ปัจจัยด้านหลักสูตร				
6. หลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ	3.41*	2	111.41	.04
10. เป็นสาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี	3.44*	2	110.56	.04
ปัจจัยด้านสังคม				
13. ตัวอย่างจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขาวิชา	3.49*	2	112.34	.03

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน Welch พบว่า นักเรียนนายเรืออากาศที่ระดับรายได้ของครอบครัวต่อเดือนต่างกันมีค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ในทั้ง 3 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยแรกคือด้านเจตคติ พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ในเรื่องโอกาสที่จะเป็นกำลังพลในส่วนกำลังรบภายหลังจากสำเร็จการศึกษา (Welch's F = 3.59, df1 = 2, df2 = 108.86, p = .03) และปัจจัยที่ 2 ด้านหลักสูตรในเรื่องหลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ (Welch's F = 3.41, df1 = 2, df2 = 111.41, p = .04) เป็นสาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี (Welch's F = 3.44, df1 = 2, df2 = 110.56, p = .04) รวมทั้ง ปัจจัยที่ 3 ด้านสังคมในเรื่องตัวอย่างจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขาวิชา (Welch's F = 3.49, df1 = 2, df2 = 112.34, p = .03) โดยกลุ่มนักเรียนนายเรืออากาศที่ระดับรายได้ของครอบครัวต่อเดือน ต่ำกว่า 30,000 บาท มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มนักเรียนนายเรืออากาศที่ระดับรายได้ของครอบครัวต่อเดือน 60,000 บาทอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัย

2.3 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลในเรื่องผลการเรียนรวมโดยเฉลี่ยในระดับที่แตกต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ พบว่า ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

2.4 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลในเรื่องเป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศที่แตกต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ รายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศที่แตกต่างกันกับค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชา	Welch's F	df1	df2	*p*
ปัจจัยด้านเจตคติ				
2. ความเหมาะสมกับความรู้ความสามารถของตนเอง	2.54*	5	32.83	.05
ปัจจัยด้านหลักสูตร				
6. หลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ	4.95**	5	34.06	.00
ปัจจัยด้านสังคม				
15. การเลือกเรียนตามคำแนะนำของครอบครัว	2.65*	5	33.26	.04

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 **มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน Welch พบว่า นักเรียนนายเรืออากาศที่มีเป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศที่แตกต่างกันมีค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในหลายปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยด้านเจตคติ พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาในเรื่อง ความเหมาะสมกับความรู้ความสามารถของตนเอง (Welch's F = 2.54, df1 = 5, df2 = 32.83, p = .05) อย่างเกือบมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ส่วนปัจจัยด้านหลักสูตร ในเรื่องหลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ (Welch's F = 4.95, df1 = 5, df2 = 34.06, p < .01) และปัจจัยด้านสังคม ในเรื่องการเลือกเรียนตามคำแนะนำของครอบครัว (Welch's F = 2.65, df1 = 5, df2 = 33.26, p = .04) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มนักเรียนนายเรืออากาศที่มีเป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศเพราะเป็นอาชีพที่มั่นคงกับกลุ่มกเรียนนายเรืออากาศที่มีเป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศตามเหตุผลอื่น ๆ ส่วนบุคคล

2.5 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลในเรื่องประสบการณ์การเลือกสาขาวิชาแตกต่างกันกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ รายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลในเรื่องประสบการณ์การเลือกสาขาวิชาแตกต่างกันกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขา	ประสบการณ์การเลือกสาขา				*t*	*p*
	ได้เลือกตามความต้องการ (n=166)		ไม่ได้เลือกตามความต้องการ (n=28)			
	$\bar{X}_1$	S.D.	$\bar{X}_2$	S.D.		
ปัจจัยด้านเจตคติ						

1. เป็นสาขาวิชาที่คาดว่าจะมีความก้าวหน้าในอนาคต	3.72	1.35	3.14	1.41	2.11*	0.04
4. ความสนใจในสาขาวิชาที่เลือก	3.56	1.34	3.00	1.15	2.45*	0.02
ปัจจัยด้านหลักสูตร						
6. หลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ	3.66	1.31	3.00	1.19	2.52*	0.01
7. รูปแบบการเรียนการสอนของแต่ละสาขาวิชา	3.60	1.27	3.07	1.22	2.04*	0.04

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ผลการวิเคราะห์ t-test พบว่ากลุ่มที่มีประสบการณ์การเลือกสาขาวิชาแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ใน 4 ปัจจัยย่อย ได้แก่ การเป็นสาขาที่คาดว่าจะมีความก้าวหน้าในอนาคต ($\overline{X}_1$= 3.72, $\overline{X}_2$= 3.14, t = 2.11, p = .04) ความสนใจในสาขาที่เลือก (ได้เลือก: $\overline{X}_1$= 3.56, $\overline{X}_2$= 3.00, t = 2.45, p = .02) หลักสูตรมีความน่าสนใจ (ได้เลือก: $\overline{X}_1$= 3.66, $\overline{X}_2$= 3.00, t = 2.52, p = .01) และรูปแบบการเรียนการสอน ($\overline{X}_1$= 3.60, $\overline{X}_2$= 3.07, t = 2.04, p = .04). โดยทั้ง 4 ปัจจัยย่อยดังกล่าว กลุ่มที่ได้เลือกสาขาตามความต้องการมีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้เลือกตามความต้องการชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.6 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกกับนักเรียนนายเรืออากาศในเรื่องของผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ พบว่าประเด็นหลักที่ได้จากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 3 ทั้ง 7 สาขาวิชาจำนวน 14 คน จนได้ข้อมูลที่มีความอิ่มตัวเป็นประเด็นหลักของผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชา สรุปได้ 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

2.6.1 ผลการเรียน โดยมีสาระสำคัญเป็นเรื่องเกี่ยวกับการได้เรียนตามความสนใจและความถนัด และรูปแบบการเรียนการสอนของนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 1 ดังนี้

- การได้เรียนตามความสนใจและความถนัด ตัวอย่างคำสัมภาษณ์ดังนี้ “ได้เรียนในสิ่งที่ตั้งใจไว้ ก็จะเรียนได้ดี เข้าใจเวลาเรียนวิชาในสาขา” หรือ “ได้เลือกเรียนในเรื่องที่สนใจ ก็จะเกิดความอยากเรียน” หรือ “เรียนในสาขาวิชาที่ยาก เรียนไม่เข้าใจ แต่ก็ทำอะไรไม่ได้” (-) หรือ “เรียนไปก็ไม่เข้าหัว เพราะมันซับซ้อน” (-) หรือ “ไม่ค่อยถนัดวิชาคำนวณ เลยทำให้ไม่ได้มีโอกาสเลือกสาขาวิชาที่ต้องการ” หรือ “ยังไม่รู้ว่าตัวเองถนัด หรือต้องการเรียนสาขาวิชาอะไร”

- รูปแบบการเรียนการสอนของนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 1 โดยมีสาระสำคัญเป็นเรื่องเกี่ยวกับความพร้อมของแต่ละบุคคลในการเรียน และการปรับตัวของนักเรียน ดังตัวอย่างคำสัมภาษณ์ดังนี้ “การปรับตัวต่อการเป็นนักเรียนใหม่ของแต่ละคนไม่เท่ากัน” หรือ “เหนื่อยกับการฝึกนักเรียนใหม่ทำให้ความมุ่งมั่นในการเรียนลดลง เลยทำคะแนนได้ไม่ดีพอ” หรือ “พอรู้เกณฑ์ก็ไม่สามารถแก้ไข ทำคะแนนเฉลี่ยให้สูงขึ้นได้” หรือ “พอเหนื่อยมาก ๆ ก็ไม่อยากคิดอะไร”

2.6.2 แรงจูงใจในการเรียน โดยมีสาระสำคัญเป็นเรื่องเกี่ยวกับการความมุ่งมั่นด้านการเรียน และการประชาสัมพันธ์ข้อมูล โดยมีสาระสำคัญเป็นเรื่องเกี่ยวกับการเข้าถึงข้อมูลเพื่อทำให้เกิดปัจจัยชักนำ ดังนี้

- การความมุ่งมั่นด้านการเรียน ดังตัวอย่างคำสัมภาษณ์ดังนี้ “อยากเป็นนักบินตามที่ตั้งใจ ก็ต้องตั้งใจเรียน” หรือ “อยากทำให้ครอบครัวภูมิใจเรียนสาขาไหนก็ได้” หรือ “สาขาวิชาเรียนที่สนใจสามารถไปอยู่ได้หลายที่ในกองทัพ”

- การประชาสัมพันธ์ข้อมูล ดังตัวอย่างคำสัมภาษณ์ดังนี้ “มีการบอกถึงข้อจำกัดในการกำหนดเกณฑ์ในการเลือกสาขาล่าช้า” หรือ “ไม่รู้ข้อมูลว่าแต่ละสาขามีข้อดีอย่างไร มีความแตกต่างกันอย่างไร” หรือ

“อยากทราบข้อมูลว่าแต่ละสาขาสามารถทำงานที่ไหนได้บ้าง เพราะถ้าไม่ได้บินจะได้พอรู้ว่าจะต้องไปอยู่ที่ไหน” หรือ “ไม่มีข้อมูลที่ชัดเจนจากใคร เพราะเป็นครั้งแรกที่มีการแบ่งส่วนการรบกับส่วนสนับสนุน”

2.7.3 ความสุขในการเรียน โดยมีสาระสำคัญเป็นเรื่องเกี่ยวกับอารมณ์ทางบวกด้านการเรียน ดังตัวอย่างคำสัมภาษณ์ดังนี้ “มีความสุขที่ได้เรียนในเรื่องที่สนใจ ได้อยู่กับกลุ่มเพื่อนที่สนใจเรื่องคล้ายกัน” หรือ “สนุกกับการเรียนตามที่ชอบที่สนใจ”

อภิปรายผลการวิจัย

1. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ หลักสูตรปรับปรุง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศในหลักสูตรปรับปรุงที่อยู่ในระดับมาก คือ ปัจจัยด้านเจตคติ ในเรื่องของมุมมองในสาขาวิชาที่เลือกว่าเป็นสาขาวิชาที่คาดว่าจะมีความก้าวหน้าในอนาคต ($\bar{X}$ = 3.64, SD = 1.37) และความสนใจในสาขาวิชาที่เลือก ($\bar{X}$ = 3.56, SD = 1.33) เนื่องจากการเลือกสาขาของนักเรียนนายเรืออากาศจะเลือกตามลำดับผู้ที่ได้ผลการเรียนรวมเฉลี่ยในชั้นปีที่ 1 สูงที่สุดไปจนถึงผู้ที่ได้คะแนนเฉลี่ยต่ำที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาปรากฏการณ์การลาออกกลางคันและการคงอยู่ของนิสิตระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยบูรพา: การสร้างโมเดลการวัดเหตุผลในการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาเรียน ที่พบว่า เหตุผลในการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาเรียนที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา โดยส่วนใหญ่เลือกเรียนตามความต้องการของตนเองหรือความชอบส่วนตัว คิดเป็นร้อยละ 78.33 [22] และการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกเรียนสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยราชธานีที่พบว่าปัจจัยด้านส่วนตัวมีผลต่อการเลือกสาขาในระดับมาก เช่นเดียวกัน [23] ซึ่งอาจแสดงถึงความเกี่ยวข้องกับเรื่องของแรงจูงใจภายใน (Intrinsic motivation) ของแต่ละบุคคล โดยเฉพาะการตัดสินใจเลือกเรียนวิศวกรรมศาสตร์มีความซับซ้อนและได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลายด้าน ซึ่งแรงจูงใจส่วนตัวในการพัฒนาตนเองและเลือกอาชีพที่มีความท้าทายและมีโอกาสก้าวหน้าก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ [21] สอดคล้องกับทฤษฎีของ Reader [15] ที่ให้ความสำคัญกับตัวแปรทางด้านจิตวิทยาสังคมที่เกี่ยวกับการตัดสินใจของมนุษย์ ในปัจจัยด้านเจตคติ ในเรื่องของมุมมองในสาขาวิชาที่เลือกว่าเป็นสาขาวิชาที่คาดว่าจะมีความก้าวหน้าในอนาคต ในมุมที่เป็นปัจจัยผลักดัน (Push factors) ให้เกิดการตัดสินใจเลือกสาขาวิชา

รวมทั้งปัจจัยด้านหลักสูตร ในเรื่องหลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ ($\bar{X}$ = 3.57, SD = 1.31) รูปแบบของการเรียนการสอนในแต่ละสาขาวิชา ($\bar{X}$ = 3.52, SD = 1.27) เป็นสาขาวิชาที่สามารถสร้างรายได้ดี ($\bar{X}$ = 3.51, SD = 1.30) และเป็นสาขาวิชาที่สามารถประกอบอาชีพได้หลากหลาย ($\bar{X}$ = 3.64, SD = 1.39) สอดคล้องกับผลการศึกษาความคิดเห็นของนักศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกศึกษาต่อการตัดสินใจเลือกศึกษาต่อหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ (หลักสูตรนานาชาติ) พบว่า ด้านอาจารย์ผู้สอนมีค่าเฉลี่ยมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.29) รองลงมาคือด้านหลักสูตรและการจัดการเรียนการสอน ($\bar{X}$ = 4.07) ด้านภาพลักษณ์ของสถาบัน ($\bar{X}$ = 3.94) ด้านค่านิยมของนักศึกษาและผู้ปกครอง ($\bar{X}$ = 3.81) และด้านการประชาสัมพันธ์ ($\bar{X}$ = 3.53) ตามลำดับ [24] และงานวิจัยเรื่องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเรียนในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี ที่พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเรียนในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ โดยเฉพาะของคณะวิศวกรรมศาสตร์นั้น ปัจจัยด้านหลักสูตรมีเป็นปัจจัยที่สำคัญในลำดับแรก โดยเห็นว่ามหาวิทยาลัยมีหลักสูตรที่เมื่อเรียนจบแล้วสามารถศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้นได้ [25] รวมทั้งสอดคล้องกับการศึกษาเรื่องการตัดสินใจเลือกเรียนสาขาวิชาสารสนเทศศึกษาของนักศึกษาระดับปริญญาตรีในมหาวิทยาลัยของรัฐ ที่พบว่าปัจจัยด้านการจัดการเรียนการสอน มีส่วนสำคัญในการตัดสินใจ เลือกเรียนสาขาวิชาสารสนเทศศึกษาของนักศึกษาระดับปริญญาตรีในมหาวิทยาลัยของรัฐในระดับมากเช่นกัน [20] แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปัจจัยทางด้านหลักสูตรที่มีผลต่อการเลือกสาขาวิชาของผู้เรียน สอดคล้องกับทฤษฎีของ Waber [14] .ในเรื่องของการกระทำที่ได้รับการชี้นำจากความ

คาดหวังว่าสิ่งของและผู้คนในสภาพแวดล้อมของบุคคลทั้งในเรื่องของรูปแบบการเรียนการสอน รวมทั้งทฤษฎีของ Reader {15] ในเรื่องของปัจจัยผลักดันในเรื่องของความคาดหวังในเรื่องของการสร้างรายได้ หรือการประกอบอาชีพได้หลากหลาย

ส่วนปัจจัยทางด้านสังคมทั้งในเรื่องตัวแบบจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขา การเลือกตามกลุ่มเพื่อน การเลือกตามคำแนะนำของครอบครัว และข้อมูลเกี่ยวกับขอบเขตการทำงานในสายวิชาชีพของแต่ละสาขาวิชา มีระดับความเกี่ยวข้องในการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาอยู่ในระดับปานกลาง สอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเรียนวิชาบังคับเลือกของนักศึกษาแพทย์ชั้นปีที่ 3 และชั้นปีที่ 5 คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ [26] และการศึกษาปัจจัยในการตัดสินใจศึกษาต่อของนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ [9] ที่พบว่าปัจจัยทางด้านสังคมทั้งในเรื่องตัวแบบจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขา การเลือกตามกลุ่มเพื่อน มีอิทธิพลต่อการเลือกสาขาค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปัจจัยในด้านอื่น สอดคล้องแนวคิดของ Reader {15] ที่เชื่อว่าปัจจัยภายนอกในเรื่องของสถานภาพทางเศรษฐกิจและสังคมนั้น มีอิทธิพลโดยตรงต่อการตัดสินใจน้อย แต่แท้จริงแล้วการตัดสินใจเลือกแสดงพฤติกรรมของบุคคลจะประกอบด้วยหลายปัจจัยรวมกัน

การเปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศในหลักสูตรปรับปรุงใหม่ พบว่า สาขาวิชา รายได้ของครอบครัวต่อเดือน เป้าหมายสำคัญที่สุดในการเป็นนักเรียนนายเรืออากาศ และประสบการณ์ในการเลือกสาขาวิชาที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในเรื่องของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาวิชาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยปัจจัยที่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มสาขาวิชา มีทั้งหมด 7 ปัจจัยย่อย ได้แก่ ความเหมาะสมกับความรู้ความสามารถของตนเอง ความต้องการเรียนด้านวิศวกรรม หลักสูตรของสาขาวิชามีความน่าสนใจ รูปแบบการเรียนการสอนของแต่ละสาขาวิชา ชื่อเสียงและคุณภาพของอาจารย์ประจำหลักสูตร เป็นสาขาวิชาที่สร้างรายได้ดี และตัวอย่างจากรุ่นพี่ที่เป็นต้นแบบในแต่ละสาขาวิชา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกสถานศึกษาเพื่อเรียนต่อในระดับอุดมศึกษา ของธนพัฒน์ อินทวี [27] ที่ศึกษาในขอบเขตพื้นที่จังหวัดนครปฐมที่พบว่า องค์ประกอบการตัดสินใจเลือกสถานศึกษาเพื่อเรียนต่อในระดับอุดมศึกษา ที่มีระดับการตัดสินใจมากที่สุดคือ องค์ประกอบด้านผลผลิต และคุณภาพ ในเรื่องของการมีทักษะอาชีพตามสาขาที่เรียน และองค์ประกอบด้านกระบวนการจัดการเรียนการสอน ในเรื่องการจัดกิจกรรมเสริมหลักสูตรอย่างเหมาะสม รวมทั้งองค์ประกอบในเรื่องของความน่าเชื่อถือของสถาบัน ในเรื่องของการเป็นสถาบันที่มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับของสังคม มีคณาจารย์ที่มีความรู้ ความสามารถ มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับ และมีการจัดการเรียนการสอนที่มีมาตรฐาน ในขณะที่องค์ประกอบด้านอิทธิพลชักจูงจากบุคคลอื่น จะมีระดับการตัดสินใจในระดับปานกลาง

2. ผลกระทบจากการเลือกสาขาวิชาของนักเรียนนายเรืออากาศ ในหลักสูตรปรับปรุงใหม่ เกี่ยวข้องกับผลการเรียน แรงจูงใจในการเรียน และความสุขในการเรียน สอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยที่ทำให้นักศึกษาระดับปริญญาตรีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีสภาพรอพินิจ ของ เกษสุดา จันดาพันธ์ [28] ที่พบว่า หนึ่งในสาเหตุสำคัญของการเสี่ยงออกกลางคันด้านพฤติกรรมของนักเรียนนักศึกษา ได้แก่ สาเหตุการไม่ได้เรียนในสาขาที่ต้องการ หรือไม่สอดคล้องกับระดับสติปัญญาและความพร้อมของตน ทำให้ไม่ตั้งใจเรียนหรือเรียนไม่ทันเพื่อน ซึ่งเป็นผลกระทบสำคัญจากการเลือกสาขาวิชาที่ไม่เหมาะสมของผู้เรียน สอดคล้องกับแนวคิดของ Waber [14] ในเรื่องของการตัดสินใจเลือกหรือกระทำพฤติกรรมเกิดจากการตอบสนองทางอารมณ์หรือความรู้สึกเกี่ยวกับบุคคล ดังนั้นหากบุคคลไม่สามารถตัดสินใจเลือกได้ตามความต้องการย่อมส่งผลกระทบทางอารมณ์และความรู้สึกด้านลบได้

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือหนึ่งในการจัดกระบวนการเลือกสาขาวิชา เพื่อช่วยให้นักเรียนนายเรืออากาศ หรือผู้เรียนได้มีโอกาสเลือกสาขาวิชาเรียนได้ตามความสามารถและความสนใจ มีความเหมาะสมตรงกับความต้องการของผู้เรียน ในเรื่องปัจจัยที่เกี่ยวข้องเจตคติส่วนบุคคลในเรื่องการให้ข้อมูลเกี่ยวกับการให้ข้อมูลประชาสัมพันธ์ที่เป็นประโยชน์ในเรื่องของทักษะหรือความถนัดเฉพาะที่ต้องใช้ในการเรียนในแต่ละสาขาวิชา และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักสูตรในเรื่องรูปแบบการเรียนการสอน หรือความน่าสนใจของหลักสูตร

5.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสาขาในการศึกษานี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาการหลักสูตร การสื่อสารข้อมูลในเรื่องของหลักสูตร และรูปแบบการเรียนการสอนในแต่ละสาขาวิชาของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชระดับปริญญาตรี และสถาบันการศึกษาโดยเฉพาะทางด้านการทหาร หรือทางด้านวิชาชีพเฉพาะอื่น ๆ ในบริบทใกล้เคียงกันต่อไป เพื่อให้ผู้เรียนได้มีข้อมูลที่เพียงในการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาที่เหมาะสมกับตนเองในการศึกษาต่อไป

5.3 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและผลกระทบกับการเลือกสาขา มีขอบเขตการศึกษาในบริบทของโรงเรียนทหารในส่วนของกองทัพอากาศ ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้ควรคำนึงถึงบริบทของแต่ละสถานศึกษาเป็นสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองทัพอากาศที่ได้สนับสนุนการวิจัย (Financial support) ครั้งนี้ โดยได้รับทุนสนับสนุนจากกองทัพอากาศ ประจำปีงบประมาณ 2565 เลขที่ทุน 13/2565

เอกสารอ้างอิง

[1] Lent, R. W., Brown, S. D., & Hackett, G. (1994). Toward a unifying social cognitive theory of career and academic interest, choice, and performance. *Journal of Vocational Behavior*, 45(1), 79–122. https://doi.org/10.1006/jvbe.1994.1027

[2] Super, D. E. (1990). A life-span, life-space approach to career development. In D. Brown & L. Brooks (Eds.), *Career choice and development: Applying contemporary theories to practice* (2nd ed., pp. 197–261). San Francisco: Jossey-Bass.

[3] Schneider, B., & Stevenson, D. (1999). *The ambitious generation: America's teenagers, motivated but directionless.* London: Yale University Press

[4] สำนักนโยบายและแผนการอุดมศึกษา. (2561). *แผนอุดมศึกษาระยะยาว 20 ปี พ.ศ. 2561- 2580* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักนโยบายและแผนการอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา.

[5] สำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา. (2565). *มาตรการฟื้นฟูภาวะถดถอยทางการเรียนรู้*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอส.บี.เค. การพิมพ์ จำกัด.

[6] ลือรัตน์ อนุรัตน์พานิช. (2557). รูปแบบคุณลักษณะตามสาขาเน้นและผลกระทบจากการเลือกสาขาของนักศึกษา คณะเภสัชศาสตร์ ชั้นปีที่ 5 มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2556. *วารสารสถาบันทรัพยากรมนุษย์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์,* 9 (2), 64-76.

[7] เสาวลักษณ์ เรียงพรม และอรอุมา ลาสุนนท์. (2561). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในจังหวัดมหาสารคาม ของผู้สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง. *วารสารนานาชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์,* 8 (3), 66-92.

[8] จุไรรัตน์ ศิริมั่งมูล, นุชนาถ พันธุราษฎร์, และณัฐณา ขำศิริ. (2562). *ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกเข้าศึกษาในมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเภทโควตาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปีการศึกษา 2562.* [รายงานวิจัย]. สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[9] ปาริชาติ บัวเจริญ, นพรัตน์ เตชะพันธ์รัตนกุล และปวันรัตน์ บัวเจริญ. (2562). การศึกษาปัจจัยในการตัดสินใจศึกษาต่อของนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่. *วารสารบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ ราชมงคลล้านนา,* 7(1), 1-14.

[10] รัชฎา เทพประสิทธิ์ และจรัญ แสนราช. (2563). การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกสาขาวิชาของนักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะครุศาสตร์ โดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล. *วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์,* 14(1), 134-146.

[11] Ngambeki Ida, Dalrymple Odesma, and Evangelou Demetra. (2009). *Decision Making In First Year Engineering: Exploring How Students Decide About Future Studies And Career Pathways".* School of Engineering Education Graduate Student Series. Paper 4. http://docs.lib.purdue.edu/enegs/4

[12] กนกกาญจน์ ศรีสุรินทร์, กนิษฐา คูณมี, และศุภชัย จันทร์งาม. (2557) ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกเรียนสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยราชธานี. *ในการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 6.* (หน้า 1-8).

[13] กองทัพอากาศ. (2563). *ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี(พ.ศ.2561 - 2580)(ฉบับปรับปรุง พ.ศ.๒๕๖๓).* กองทัพอากาศ.

[14] Max Weber. (1968). *Basic Sociological Terms.* Berkeley: University of California Press.

[15] Reeder, William W., (1971). *Partial Theories from the 25 Years Research Program on Directive Factors in Believer and Social Action*. McGraw Hill.

[16] Cubillo, J. M., Sanchez, J., and Cervino, J. (2006). International Student's Decision-Making Process. *International Journal of Educational Management,* 20(2). 101-115.

[17] ไกรสิงห์ สุดสงวน. (2560) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาของนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร. มหาวิทยาลัยศิลปากร. *วารสาร Veridian E Journal สาขามนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศิลปะ,* 10(1), 201-207.

[18] นวพร ทองนุช และ รุ่งลักษมี รอดขำ (2560) ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกเรียนสาขาบัญชี ของนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. *ในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8 "Research 4.0 Innovation and Development SSRU's 80th Anniversary"* http://journalgrad.ssru.ac.th/index.php/8thconference/article/view/895

[19] สมศรี เพชรโชติ. (2560). ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกเข้าศึกษาต่อหลักสูตรคหกรรมศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. *วารสารวิทยาลัยดุสิตธานี*, 11(3), 168-184.

[20] สมฤทัย ธีรเรืองสิริ และดวงกมล อุ่นจิตติ. (2564). การตัดสินใจเลือกเรียนสาขาวิชาสารสนเทศศึกษาของนักศึกษาระดับปริญญาตรีในมหาวิทยาลัยของรัฐ. *วารสารวิชาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*. 29(1). 149-175.

[21] Jacques Lombard and Anne Crafford. (2013). Why do people decide to study engineering?. *Innovate***,** Issue 08, 124-126.

[22] เจนวิทย์ วารีบ่อ, ศรัณย์ ภิบาลชนม์, และเสกสรรค์ ทองคำบรรจง. (2562). ปรากฏการณ์การลาออกกลางคันและการคงอยู่ของนิสิตระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยบูรพา: การสร้างโมเดลการวัดเหตุผลในการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาเรียน. *วารสารการวัดผลการศึกษา,* 36(100), 220-234.

[23] กนกกาญจน์ ศรีสุรินทร์ กนิษฐา คูณมี และศุภชัย จันทร์งาม. (2557). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกเรียนสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยราชธานี. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*. ครั้งที่ 6;30 – 31 พฤษภาคม 2557. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม. หน้า 1-8.

[24] มัชฌิมา รัตนลัมภ์ และ วชิราภรณ์ ทองคุ้ม. (2564). ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ (หลักสูตรนานาชาติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. *วารสาร Mahidol R2R e-Journal,* 8(2), 159-172.

[25] ธันยากร ช่วยทุกข์เพื่อน. (2558). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเรียนในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี. *สุทธิปริทัศน์*, 29(90), 256-271.

[26] พรรัตน์ ระบิลทศพร, อนงค์นาฎ งามจริยาวัตร, อมรณัฏฐ์ ทับเปีย, ณัฐพล สุขประเสริฐ, ศุภเกต แสนทวีสุข, และนันทิยา สมภาร. (2562). ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเรียนวิชาบังคับเลือกของนักศึกษาแพทย์ชั้นปีที่ 3 และชั้นปีที่ 5 คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. *Thammasat Medical Journal,* 19 (Supplement), 148-154.

[27} ธนพัฒน์ อินทวี. (2564). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกสถาบันศึกษาเพื่อเรียนต่อในระดับอุดมศึกษา. *วารสารนวัตกรรมการศึกษาและการวิจัย*, 5(1), 1-14.

[28] เกษสุดา จันดาพันธ์. (2563). *การศึกษาปัจจัยที่ทำให้นักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีสภาพรอพินิจ.* [รายงานวิจัย] สำนักวิจัยมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Factors Influencing Admission to Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy

ธนานพ ลื่มสุวรรณโรจน์[1]

[1]กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Tananop Limsuwanroj[1]

[1]Faculty of Academic Navamida Kasatriyadhiray Royal Air Force Academy

Tananop.lims@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากกองสถิติ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ประจำปีการศึกษา 2565 จำนวน 4,986 คน และทำการวิเคราะห์ด้วยสถิติถดถอยโลจิสติกแบบพหุคูณ (Multiple Logistic Regression Analysis) เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลการสอบเข้า ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chi-square = 510.796, $p < .001$) และมีความเหมาะสมกับข้อมูล (Hosmer–Lemeshow $p = .207$) โดยสามารถอธิบายความแปรปรวนของผลการสอบเข้าได้ร้อยละ 19.3 (Nagelkerke $R^2 = 0.193$) และจำแนกผลได้ถูกต้องร้อยละ 88.7 โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ได้แก่ ผลการเรียน ระดับชั้นการศึกษา ขนาดโรงเรียน สังกัดโรงเรียน ภูมิลำเนา คำนำหน้าชื่อบิดา การย้ายมาเรียนในเมือง รวมถึงช่วงเวลาการสมัครและการจ่ายเงิน อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การสอบเข้า, การถดถอยโลจิสติก, นักเรียนเตรียมนายเรืออากาศ

Abstract

This study aimed to investigate the factors influencing admission to Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy. Secondary data were obtained from the Statistical Division of the Academy for the academic year 2022, consisting of 4,986 applicants. The data was analyzed using Multiple Logistic Regression Analysis to identify variables that significantly affected the admission results. The analysis revealed that the model was statistically significant (Chi-square = 510.796, $p < .001$) and well fitted to the data (Hosmer–Lemeshow $p = .207$). The model could explain 19.3 percent of the variance in admission results (Nagelkerke $R^2 = 0.193$) and correctly classified 88.7 percent of the cases. The factors influencing admission to Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy included grade point average (GPA), educational level, school size, school affiliation, domicile region, father's title, relocation to an urban area, as well as the timing of application and payment with statistical significance.

Keywords: Admission, Logistic Regression, Air Cadet

1. บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การศึกษาเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ของประเทศ พร้อมทั้งยังเป็นหนทางการพัฒนาการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมของชาติอย่างยั่งยืน ประเทศไทยให้ความสำคัญกับการจัดการศึกษาอย่างต่อเนื่องผ่านนโยบาย “เรียนฟรี 15 ปี” [17] แต่ปัญหาความเหลื่อมล้ำทางการศึกษา ทั้งด้านคุณภาพและโอกาสในการเข้าถึงก็ยังเป็นปัญหาหลักหลักในการฉุดรั้งการศึกษาของประเทศไทย โดยเฉพาะความแตกต่างระหว่างนักเรียนในเขตเมืองและชนบท ซึ่งมักเกิดจากปัจจัยทางเศรษฐกิจ สังคม และสภาพแวดล้อมของครอบครัวที่ไม่เท่าเทียมกัน [18]

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เป็นสถาบันการศึกษาทางทหารระดับอุดมศึกษาที่มีภารกิจสำคัญในการผลิตนายทหารสัญญาบัตรของกองทัพอากาศ เพื่อรับราชการและปฏิบัติหน้าที่ปกป้องประเทศในด้านการป้องกันภัยทางอากาศและการพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยาน การสอบคัดเลือกเข้าเรียนในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชจึงเป็นกระบวนการที่มีความเฉพาะตัว โดยกำหนดให้ผู้สมัครต้องผ่านเกณฑ์หลายด้าน ทั้งการสอบข้อวิชาการ สอบพลศึกษา การตรวจร่างกาย และการสอบสัมภาษณ์ ซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องอาศัยการเตรียมตัวและความพร้อมรอบด้าน

อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนแรกของการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช คือการวิชาการซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่สุดที่เกี่ยวกีบการปัญหาความเหลื่อมล้ำทางการศึกษา โดยจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการสอบเข้าโรงเรียนต่าง ๆ ในประเทศและต่างประเทศ โดย ธนัชชา ชาญเศรษฐกุล [4] ได้ศึกษา ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย พบว่า อาชีพของบิดามารดาหรือผู้ปกครอง และ แหล่งเงินทุนการศึกษา เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ซึ่งสอดคล้องกับ M. A. Perez et al. [14] ที่ได้ศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านประชากรของผู้สมัครกับการรับเข้าเรียนในโรงเรียนแพทย์ โดยพบเดียวกันว่า

การศึกษาของพ่อแม่ มีผลต่อการเข้าเรียนต่อ พร้อมยังได้พบอีกว่า ผลการเรียน ยังมีผลต่อการเข้าเรียนอีกด้วย ซึ่ง วรรณวิษา ตุลย์มงคล และ สมชาย เล็กเจริญ [2] ที่ได้ศึกษา การเปรียบเทียบเทคนิค Naïve Bayes และ Binary Logistic Regression เพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจศึกษาต่อของนักเรียน U.N.N. Academy ก็พบเช่นเดียวกันว่า ผลการเรียน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจศึกษาต่อ นอกจากนี้ วินัย วงศ์สุรวัฒน์ [3] และ สุวิมล จีระทรงศรี [5] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับ การปฏิรูปการศึกษาและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายของรัฐและเอกชนในประเทศไทย และ ผลสัมฤทธิ์ของการกวดวิชาและการสอบคัดเลือกเข้าศึกษาต่อสถาบันอุดมศึกษาของรัฐ ตามลำดับ พบว่า ประเภทของโรงเรียนที่จบมา จะได้คะแนนสอบเข้าสูงกว่าเหมือนกัน สุดท้าย Glynn Jones [11] ได้ศึกษา การตรวจสอบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของนักศึกษาในการเรียนหลักสูตรการศึกษาระดับสูงในวิทยาลัยการศึกษาระดับสูงในสหราชอาณาจักร พบว่า สภาพแวดล้อมการเรียนรู้ที่คุ้นเคย และ ความสะดวกในการเดินทาง และ อยู่ใกล้ครอบครัว มีผลต่อการเข้าเรียนต่อ นอกจากนี้โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชยังไม่มีการศึกษาเชิงประจักษ์ที่ชัดเจนมากนัก แม้จะมีสมมติฐานว่า ลักษณะส่วนบุคคล (อายุ คำนำหน้าชื่อบิดา ภูมิลำเนา การย้ายมาเรียนในเมือง) ปัจจัยการศึกษา (ผลการเรียน ระดับชั้นที่ศึกษา ขนาดโรงเรียน สังกัดโรงเรียน) มี รวมถึงปัจจัยทางเวลา (วันที่สมัคร วันที่จ่ายเงิน) อาจมีอิทธิพลต่อโอกาสการสอบผ่านก็ตาม

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งวิเคราะห์ “ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช” โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกแบบพหุคูณ (Multiple Logistic Regression Analysis) เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลการสอบเข้า

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

1.3. สมมติฐานการวิจัย

1) ลักษณะส่วนบุคคล (อายุ คำนำหน้าชื่อบิดา ภูมิลำเนา การย้ายมาเรียนในเมือง) มีอิทธิพลต่อต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
2) การศึกษา (ผลการเรียน ระดับชั้นที่ศึกษา ขนาดโรงเรียน สังกัดโรงเรียน) มีอิทธิพลต่อต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
3) เวลา (วันที่สมัคร วันที่จ่ายเงิน) มีอิทธิพลต่อต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

2. การดำเนินการวิจัย

2.1. ทฤษฎีการถดถอยโลจิสติกพหุคูณ (Multiple Logistic Regression Theory)

ทฤษฎีการถดถอยโลจิสติกพหุคูณ (Multiple Logistic Regression) เป็นแนวคิดทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตามแบบทวินาม (Binary Dependent Variable) เช่น “สอบผ่าน = 1” และ “ไม่ผ่าน = 0” กับ ตัวแปรอิสระหลายตัว (Multiple Independent Variables) ซึ่งอาจเป็นทั้งข้อมูลเชิงกลุ่ม (Categorical) และเชิงปริมาณ (Continuous) ซึ่ง โมเดลโลจิสติกพหุคูณจะประมาณความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์หนึ่งจะเกิดขึ้น โดยใช้สมการ [10,16]

$$\text{Logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k \qquad (1)$$

โดยค่าที่แสดงออกมาจะเป็นค่าของ $\mathrm{Exp}(\beta)$ หรือ Odds Ratio (OR) แสดงถึง “การเปลี่ยนแปลงของโอกาสเกิดเหตุการณ์” เมื่อค่าของตัวแปรอิสระเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย

2.2. ทฤษฎีความเหลื่อมล้ำทางการศึกษา (Educational Inequality Theory)

ทฤษฎีความเหลื่อมล้ำทางการศึกษา Coleman [13] ได้อธิบายไว้ว่า วามแตกต่างทางเศรษฐกิจและสังคมของครอบครัว มีผลโดยตรงต่อโอกาสทางการศึกษา และได้กล่าวไว้อีกว่า “การศึกษาไม่สามารถลดความเหลื่อมล้ำได้หากไม่แก้ไขความแตกต่างทางสังคมภายนอกโรงเรียน” นอกจากนี้ กับ Bourdieu [15] ได้อธิบายไว้ว่า “ทุน (Capital)” แบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ทุนทางเศรษฐกิจ (Economic Capital): รายได้และทรัพย์สิน ทุนทางสังคม (Social Capital): เครือข่าย ความสัมพันธ์ในสังคม และ ทุนทางวัฒนธรรม (Cultural Capital): ความรู้ ค่านิยม ภาษา และวิธีคิดที่ได้รับจากครอบครัว และ Bourdieu ยังกล่าวไว้ว่า “ระบบการศึกษาไม่เพียงถ่ายทอดความรู้ แต่ยังถ่ายทอดโครงสร้างความเหลื่อมล้ำจากรุ่นสู่รุ่น ผ่านทุนวัฒนธรรมของครอบครัว” ดังนั้นจึงสรุปได้ ว่า แนวคิดของทั้งสองนักทฤษฎีได้ให้กรอบในการทำความเข้าใจว่า ความไม่เท่าเทียมกันในโอกาสทางการศึกษาไม่ได้เกิดจากความสามารถส่วนบุคคลเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากโครงสร้างทางสังคมและเศรษฐกิจที่รายล้อมผู้เรียน ซึ่งส่งผลต่อความพร้อมและโอกาสในการประสบความสำเร็จทางการศึกษา

3. การดำเนินการวิจัย

3.1. ประชากร

ประชากรในการวิจัยครั้งนี้ คือ ผู้สมัครสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ประจำปีการศึกษา 2565 ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 4,986 คน

3.2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชุดข้อมูลทุติยภูมิที่ได้รับจากกองสถิติ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ข้อมูลประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของผู้สมัคร เช่น วันเดือนปีที่สมัคร วันเดือนปีที่จ่ายเงินค่าสมัคร คำนำหน้าชื่อบิดา อายุ ที่อยู่อาศัย ระดับชั้น โรงเรียนเดิม เกรดเฉลี่ยสะสม และผลการสอบในรอบแรก

3.3. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล ใช่สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) และ การวิเคราะห์การถดถอยพหุโลจิสติกส์ (Multiple Logistic Regression Analysis) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ผลการวิเคราะห์จะนำเสนอในรูปของค่า อัตราส่วนความเป็นไปได้ (Odds Ratio: OR) พร้อมระดับนัยสำคัญทางสถิติ (p-value) เพื่อระบุว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อโอกาสการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อย่างมีนัยสำคัญ

4. ผลการวิจัย

4.1. ลักษณะส่วนบุคคล

ข้อมูลผู้สมัครสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ประจำปีการศึกษา 2565 จำนวน 4,986 คน พบว่าผู้สมัครส่วนใหญ่มีอายุ 17 ปี คิดเป็นร้อยละ 46.09 รองลงมาคืออายุ 18 ปี ร้อยละ 37.06 ส่วนใหญ่บิดามีคำหน้าชื่อเป็นนาย คิดเป็นร้อยละ 73.20 รองลงมาคือบิดาเป็นสัญญาบัตร ร้อยละ 15.10 โดยมีภูมิลำเนาอยู่ในภูมิภาคกลางมากที่สุด ร้อยละ 20.26 รองลงมาคือตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ 19.88 และภาคเหนือ ร้อยละ 14.30

ในด้านการศึกษา พบว่าผู้สมัครส่วนใหญ่อยู่ในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4 คิดเป็นร้อยละ 49.74 ส่วนใหญ่ศึกษาอยู่ในโรงเรียนขนาดใหญ่พิเศษ ร้อยละ 77.34 และอยู่ในสังกัดสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

(สพฐ.) ร้อยละ 74.09 ขณะที่ผู้สมัครส่วนใหญ่จะเรียนที่จังหวัดที่ผู้สมัครเปิด คิดเป็นร้อยละ 80.34 ดังรายละเอียดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละของผู้สมัครสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ลักษณะส่วนบุคคล		จำนวน	ร้อยละ
อายุ	16 ปี	840	16.85
	17 ปี	2,298	46.09
	18 ปี	1,848	37.06
คำนำหน้าชื่อบิดา	นาย	3,650	73.20
	ประทวน	554	11.11
	สัญญาบัตร	753	15.10
	นายพล	29	0.58
ภาคที่เกิด	กรุงเทพมหานคร	592	11.87
	กลาง	1,010	20.26
	ตะวันออก	590	11.83
	ตะวันตก	306	6.14
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	991	19.88
	เหนือ	713	14.30
	ใต้	784	15.72
ระดับชั้น	มัธยมศึกษาปีที่ 4	2,480	49.74
	มัธยมศึกษาปีที่ 5	2,032	40.75
	มัธยมศึกษาปีที่ 6	364	7.30
	อื่น ๆ	110	2.21
ขนาดโรงเรียน	ใหญ่พิเศษ	3,856	77.34
	ใหญ่	620	12.43
	กลาง	461	9.25
	อื่น ๆ	49	0.98
สังกัดโรงเรียน	สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน	3,694	74.09
	สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการศึกษาเอกชน	953	19.11
	กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น	175	3.51
	สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	142	2.85
	อื่น ๆ	22	0.44
ย้ายจังหวัด	ไม่ย้าย	4,006	80.34
	ย้าย	980	19.66
	รวม	4986	100

นอกจากนี้ ผู้สมัครสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ประจำปีการศึกษา 2565 มีผลการเรียนเฉลี่ย 3.38 และวันที่สมัคร และ วันที่จ่ายเงินเฉลี่ย คือ 16.57 วัน และ 8.71 วันตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนและร้อยละของผู้สมัครสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ลักษณะส่วนบุคคล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลการเรียน	3.38	0.57
วันที่สมัคร	16.57 วัน	11.89 วัน
วันที่จ่ายเงิน	8.71 วัน	8.26 วัน

4.2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุโลจิสติกส์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ได้มีการตรวจสอบข้อสมมติพื้นฐานของการวิเคราะห์ พบว่า ตัวแปรตามเป็นตัวแปรแบบทวินาม (Binary) โดยกำหนดให้ “สอบผ่าน” รหัสเป็น 1 และ “ไม่ผ่าน” รหัสเป็น 0 สำหรับความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระเชิงต่อเนื่องกับค่า Logit (Linearity of the Logit) พบว่ามีตัวแปรต่อเนื่องทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ ค่าเฉลี่ยผลการเรียน (ค่าพี ของสถิติทดสอบ = 0.944), วันที่สมัคร (ค่าพี ของสถิติทดสอบ = 0.177) และวันที่จ่ายเงิน (ค่าพี ของสถิติทดสอบ = 0.011) โดยจากสถิติทดสอบพบว่า วันที่จ่ายเงินเท่านั้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับ Logit ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับค่าด้วย Box–Cox Transformation เพื่อให้ตัวแปรดังกล่าวมีความเป็นเชิงเส้นตรง โดยแปลงตัวแปร “วันที่จ่ายเงิน” เป็น “ln(วันที่จ่ายเงิน)” (ค่าพี ของสถิติทดสอบ = 0.916) เพื่อให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ ผลการตรวจสอบ Multicollinearity ของตัวแปรอิสระทั้งหมดพบว่าค่าดัชนี Variance Inflation Factor (VIF) มีค่าน้อยกว่า 5 ทุกตัว ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [12] แสดงว่าไม่มีปัญหา Multicollinearity ระหว่างตัวแปรอิสระ ส่วนการตรวจสอบค่าผิดปกติ (Outlier) ด้วยสถิติ Cook’s Distance พบว่าข้อมูลทุกกรณีมีค่า Cook’s Distance น้อยกว่า 1 [8] แสดงว่าไม่มี Outlier ที่รุนแรงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุโลจิสติกส์ในครั้งนี้ ผ่านการตรวจสอบข้อสมมติพื้นฐานทั้งหมดและมีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์เชิงสถิติดั้งนั้นแล้วสมการการวิเคราะห์การถดถอยพหุโลจิสติกส์มีสมการดังนี้

$$\mathbf{Logit}(\text{การสอบผ่าน}) = \beta_1(\text{วันที่สมัคร}) + \beta_2(\ln\text{วันที่จ่ายเงิน}) + \beta_3(\text{อายุ}) + \beta_4(\text{คำนำหน้าชื่อบิดา}) + \beta_5(\text{ภูมิลำเนา}) + \beta_6(\text{ผลการเรียน}) + \beta_7(\text{ระดับชั้นที่ศึกษา}) + \beta_8(\text{ขนาดโรงเรียน}) + \beta_9(\text{สังกัดโรงเรียน}) + \beta_{10}(\text{การย้ายมาเรียนในเมือง}) + \varepsilon \quad (2)$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศอย่างมีนัยสำคัญทางมากที่สุด ได้แก่ การเรียนที่นักเรียนอยู่ในระดับชั้นอื่นๆ เมื่อเทียบกับมัธยมศึกษาปีที่ 4 รองลงมาคือ นักเรียนอยู่ในมัธยมศึกษาปีที่ 6 เมื่อเทียบกับมัธยมศึกษาปีที่ 4 นอกจากนั้นยังมี ผลการเรียน บิดาเป็นสัญญาบัตรเมื่อเทียบกับบิดาเป็นนาย สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการศึกษาเอกชนเมื่อเทียบกับสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน การย้ายมาเรียนในเมือง นักเรียนอยู่ในมัธยมศึกษาปีที่ 5 เมื่อเทียบกับมัธยมศึกษาปีที่ 4 สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม เมื่อเทียบกับสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน ภาคกลางเมื่อเทียบกับกรุงเทพมหานคร ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเมื่อเทียบกับกรุงเทพมหานคร ภาคเหนือเมื่อเทียบกับกรุงเทพมหานคร โรงเรียนขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับโรงเรียนขนาดใหญ่พิเศษ วันที่สมัคร และ วันที่จ่ายเงิน

โดยแบบจำลองมี นัยสำคัญทางสถิติ (*Chi-square* = 510.796, $p < .001$) แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การตรวจสอบความ

เหมาะสมของแบบจำลองด้วยสถิติ Hosmer–Lemeshow Test พบว่า ค่า $p = .207$ ซึ่งมีค่ามากกว่า .05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับข้อมูล (*model fit)* ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่คาดการณ์กับค่าจริง นอกจากนี้ ค่า *Nagelkerke* $R^2 = .193$ หมายความว่า แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของการสอบเข้าได้ร้อยละ 19.3 ของทั้งหมด ขณะที่ค่า *–2 Log Likelihood = 2992.638* อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับขนาดข้อมูล สุดท้าย แบบจำลองสามารถ จำแนกผลการสอบเข้าได้ถูกต้องร้อยละ 88.7 แสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองในระดับที่ดี [10,16] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การวิเคราะห์การถดถอยพหุโลจิสติกส์ที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศ

ตัวแปร	B	Exp B	Wald	Sig.
ค่าคงที่	-4.942	.007	104.305	
วันที่สมัคร	-0.540	0.947	140.854	0.000
บิดาเป็นสัญญาบัตร (เทียบกับนาย)	0.475	1.608	15.472	0.000
ภาคกลาง (เทียบกับกรุงเทพมหานคร)	-0.414	0.661	6.255	.012
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ(เทียบกับกรุงเทพมหานคร)	-0.561	0.571	10.988	0.000
ภาคเหนือ (เทียบกับกรุงเทพมหานคร)	-0.502	0.605	7.066	.008
ผลการเรียน	1.220	3.386	102.843	.000
มัธยมศึกษาปีที่ 5 (เทียบกับมัธยมศึกษาปีที่ 4)	0.506	1.659	12.058	.001
มัธยมศึกษาปีที่ 6 (เทียบกับมัธยมศึกษาปีที่ 4)	1.251	3.493	33.240	.000
ระดับชั้นอื่น ๆ (เทียบกับมัธยมศึกษาปีที่ 4)	1.896	6.659	47.497	.000
โรงเรียนขนาดใหญ่ (เทียบกับโรงเรียนขนาดใหญ่พิเศษ)	-0.344	0.709	4.150	.042
สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการศึกษาเอกชน (เทียบกับสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน)	0.383	1.466	8.288	.004
สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (เทียบกับสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน)	1.121	3.067	21.447	.000
การย้ายมาเรียนในเมือง	0.455	1.576	14.567	.000
วันที่จ่ายเงิน (แปลงค่าเป็นลอการิทึมธรรมชาติ)	-0.504	0.604	86.533	.000
โมเดลมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chi-square = 510.796, p < .001)				
มีความเหมาะสมกับข้อมูล (Hosmer–Lemeshow p = .207)				
อธิบายความแปรปรวนได้ 19.3% (Nagelkerke R^2 = .193)				
มีค่า –2 Log Likelihood = 2992.638 และ				
จำแนกผลได้ถูกต้อง 88.7%				

5. สรุป

5.1. อภิบายผล

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสอบเข้าโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยใช้สถิติ ถดถอยโลจิสติกแบบพหุคูณ (Multiple Logistic Regression Analysis) จากข้อมูลผู้สมัครสอบจำนวน 4,986 คน ในปีการศึกษา 2565 เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสอบผ่าน ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่ส่งผล

ต่อการสอบเข้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ ผลการเรียน , ระดับชั้นการศึกษา, ขนาดโรงเรียน, สังกัดโรงเรียน, ภูมิลำเนา, คำนำหน้าชื่อบิดา, การย้ายมาเรียนในเมือง, ช่วงเวลาการสมัคร และ ช่วงเวลาการจ่ายเงิน

โดยผลวิจัยพบว่าผลการวิเคราะห์พบว่า นักเรียนระดับ มัธยมศึกษาปีที่ 6 และกลุ่ม “อื่น ๆ” มีโอกาสสอบผ่านสูงกว่าระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะกลุ่ม “อื่น ๆ” ที่มีค่า Exp(B) สูงถึง 6.659 เท่า ซึ่งสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าผู้เรียนที่อยู่ในระดับชั้นที่สูงกว่าได้รับประสบการณ์การเตรียมสอบมากกว่า และมีความเข้าใจข้อสอบมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ สุวิมล จีระทรงศรี [5] ที่ระบุว่า “การเรียนกวดวิชาและเทคนิคการอ่านล่วงหน้า” เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มโอกาสในการสอบเข้ามหาวิทยาลัย อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ วินัย วงศ์สุรวัฒน์ [3] ซึ่งชี้ให้เห็นว่า นักเรียนที่ศึกษาในโรงเรียนเอกชนและได้รับการเตรียมตัวอย่างต่อเนื่อง มักมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงกว่าโรงเรียนรัฐบาล

นอกจากนี้ ในด้านผลการเรียนพบว่า นักเรียนที่มีผลการเรียนเฉลี่ยสูง มีโอกาสสอบผ่านมากกว่านักเรียนที่มีผลการเรียนต่ำถึง 3.386 เท่า ซึ่งสูงเป็นอันดับที่สอง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความสามารถทางวิชาการและความพยายามในการเรียนเป็นพื้นฐานสำคัญต่อความสำเร็จในการสอบเข้า สอดคล้องกับงานของ ธนัชชา ชาญเศรษฐกุล [4] และ วรรณวิษา ตุลย์มงคล และ สมชาย เล็กเจริญ [2] ที่ระบุว่า “ผลการเรียน” เป็นตัวแปรสำคัญที่สุด และ “แหล่งทุนการศึกษา” เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจศึกษาต่อ

ในส่วนของการศึกษาที่เหลือ นักเรียนจากโรงเรียน สังกัดสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการศึกษาเอกชน และกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มีโอกาสสอบผ่านมากกว่านักเรียนจาก สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างด้านคุณภาพการจัดการเรียนการสอน ทรัพยากร และระบบแนะแนว ซึ่งมีผลต่อความพร้อมในการสอบ ซึ่งสอดคล้องกับวินัย วงศ์สุรวัฒน์ [3] ที่พบว่าโรงเรียนเอกชนมีประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงกว่าโรงเรียนรัฐบาล อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานของ จิณณวัตร เลิศประดิษฐ์ และ อุทัย แก้วเพชร [1] ที่ชี้ให้เห็นว่า ความแตกต่างด้านทรัพยากรของโรงเรียนเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดช่องว่างทางการศึกษาในประเทศไทย ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความเหลื่อมล้ำทางด้านทรัพยากรและคุณภาพของสถานศึกษาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแตกต่างของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและโอกาสในการศึกษาต่อของนักเรียน

ต่อมาในเรื่องลักษณะส่วนบุคคลที่เหลือ “คำนำหน้าชื่อบิดา” ซึ่งสะท้อนอาชีพของบิดา มีอิทธิพลต่อผลการสอบโดยผู้สมัครที่บิดาเป็น “สัญญาบัตร” มีโอกาสสอบผ่านมากกว่าผู้ที่บิดาเป็น “นาย” โดยผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับงานของ ธนัชชา [4] และ Perez et al. [14] ที่ชี้ให้เห็นว่า ฐานะทางเศรษฐกิจและอาชีพของผู้ปกครองมีอิทธิพลต่อโอกาสในการศึกษาต่อ เนื่องจากส่งผลต่อทรัพยากรที่ใช้ในการเตรียมสอบ เช่น ค่าใช้จ่ายในการเรียนพิเศษ หนังสือเรียน และการสนับสนุนด้านเวลา นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานของ อุมาพร ภัทรวนิช, L. B. Williams, T. A. Lyson, และ กุลภา อาชวานันทกุล [7] ที่ยืนยันว่าครอบครัวที่มีรายได้สูงมีแนวโน้มจะลงทุนด้านการศึกษาของบุตรมากกว่า

ส่วนในเรื่องการย้ายปัจจัยด้านภูมิลำเนาและการย้ายมาเรียนในเมือง นักเรียนจากภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีโอกาสสอบผ่านต่ำกว่านักเรียนในกรุงเทพมหานคร ในขณะที่นักเรียนที่ “ย้ายมาเรียนในเมือง” มีโอกาสสอบผ่านมากกว่า 1.576 เท่า แสดงถึงข้อได้เปรียบด้านโอกาสทางการศึกษาในเขตเมืองที่มีครูคุณภาพ สื่อการสอน และข้อมูลแนะแนวครบถ้วน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Jones [11] ที่พบว่า นักเรียนในสหราชอาณาจักรมีแนวโน้มเลือกศึกษาต่อในสถาบันที่อยู่ใกล้บ้านเพื่อช่วยลดภาระทางเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม การศึกษาภายในเขตเมืองมักเปิดโอกาสให้นักเรียนได้รับคุณภาพการเรียนการสอนและการแนะแนวทางการศึกษาที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานของ สมจินตนา คุ้มภัย และ นีรนาท แก้วประเสริฐ ระฆังทอง [6] ที่ยืนยันว่า โรงเรียนในเขตเมืองมี

คุณภาพการจัดการเรียนการสอนสูงกว่าโรงเรียนในชนบท และส่งผลให้ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนในเขตเมืองอยู่ในระดับที่ดีกว่า

ในด้านส่วนท้ายปัจจัยด้านเวลา พบว่า “วันที่สมัคร” และ “วันที่จ่ายเงิน” มีผลเชิงลบต่อโอกาสสอบผ่าน โดยผู้ที่สมัครหรือจ่ายเงินล่าช้าจะมีแนวโน้มสอบไม่ผ่าน ซึ่งสะท้อนถึงระดับวินัย ความตั้งใจ และการจัดการเวลา ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สอดคล้องกับลักษณะของนักเรียนนายเรืออากาศ

5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

1) ยกระดับความพร้อมทางวิชาการ โดยการ ส่งเสริมการเรียนรู้เทคนิคการอ่านล่วงหน้า การจัดเวลาและทักษะการสอบ หรือ สร้างระบบติวออนไลน์แบบสาธารณะ (Public Learning Platform) เนื่องจาก นักเรียนระดับ มัธยมศึกษาปีที่ 6 และกลุ่ม “อื่น ๆ” มีโอกาสสอบผ่านสูงกว่าระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4 และ ผลการเรียน เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการสอบผ่าน ซึ่งสะท้อนว่าความพร้อมทางวิชาการเป็นปัจจัยชี้ขาดของความสำเร็จในการสอบ
2) ลดความเหลื่อมล้ำทางภูมิภาค โดยการ จัดโครงการเตรียมสอบฟรีหรือทุนสำหรับนักเรียนชนบท หรือ พัฒนาเครือข่ายแนะแนวในพื้นที่ห่างไกล เนื่องจาก ผลวิจัยพบว่า กเรียนที่มีภูมิลำเนาอยู่ในภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีโอกาสสอบผ่านน้อยกว่านักเรียนในกรุงเทพมหานครอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
3) สนับสนุนครอบครัวและโรงเรียนต้นทาง โดยการ ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างโรงเรียนรัฐ เอกชน และชุมชนท้องถิ่น เนื่องจาก ผลการวิจัยพบว่า สังกัดโรงเรียนมีผลต่อการสอบผ่านอย่างมีนัยสำคัญ โดยนักเรียนจากโรงเรียนสังกัดเอกชนและกระทรวง อว. มีโอกาสสอบผ่านมากกว่าโรงเรียนในสังกัด สพฐ. และผู้สมัครที่บิดาเป็น “สัญญาบัตร” มีโอกาสสอบผ่านมากกว่า ซึ่งอาจจะเป็นผลให้ ฐานะครอบครัวและทรัพยากรของโรงเรียนต้นทาง มีบทบาทโดยตรงต่อผลการสอบ
4) ปรับกระบวนการสมัครให้เท่าเทียม โดย กำหนดระบบเตือนการสมัคร การกระจายข่าวสารการสมัคร หรือ ให้โอกาสพิเศษแก่ผู้สมัครที่มีภูมิลำเนาห่างไกล เนื่องจาก วันที่สมัคร และ วันที่จ่ายเงิน มีผลเชิงลบต่อการสอบผ่าน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผู้ที่สมัครหรือชำระเงินล่าช้ามีโอกาสสอบผ่านต่ำกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการขาดข้อมูลข่าวสารหรือข้อจำกัดด้านเวลาและการเดินทาง

5.2.2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1) ศึกษาปัจจัยเชิงลึกเพิ่มเติม เช่น ความตั้งใจในการรับราชการ วินัย และแรงจูงใจทางอาชีพ
2) ใช้การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ (Spatial / GIS) เพื่อเปรียบเทียบระดับจังหวัดหรือภูมิภาค
3) รวมข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสัมภาษณ์ผู้สมัครที่สอบผ่านและไม่ผ่าน
4) ศึกษาปีถัด ๆ เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายผลสอบเชิงเวลา (Predictive Modeling)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] จิณณวัตร เลิศประดิษฐ์ และ อุทัย แก้วเพชร, “ความเหลื่อมล้ำทางการศึกษาของเด็กไทยผ่านมุมมองด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม,” *การประชุมวิชาการด้านวัฒนธรรมศึกษาแห่งเอเชีย (The Asian Conference on Cultural Studies 2019)*, สถาบันวิชาการนานาชาติ (IAFOR), ญี่ปุ่น, หน้า 1–14, 2562.

[2] วรรณวิษา ตุลย์มงคล และ สมชาย เล็กเจริญ, “การเปรียบเทียบเทคนิค Naïve Bayes และ Binary Logistic Regression เพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจศึกษาต่อของนักเรียน U.N.N. Academy,” *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2556 (RSU Research Conference 2013)*, 4 เมษายน 2556, มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี, หน้า 207–213.

[3] วินัย วงศ์สุรวัฒน์, “การปฏิรูปการศึกษาและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาของโรงเรียนรัฐบาลและเอกชนในประเทศไทย,” *วารสาร Educational Research for Policy and Practice*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 17–31, กุมภาพันธ์ 2554

[4] ธนัชชา ชาญเศรษฐกุล, “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย,” *วารสารวิทยาการจัดการปริทัศน์*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 2, หน้า 65–79, พฤษภาคม–สิงหาคม 2566.

[5] สุวิมล จีระทรงศรี, *ผลสัมฤทธิ์ของการกวดวิชาและการสอบคัดเลือกเข้าศึกษาต่อในอุดมศึกษาของรัฐ*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาสถิติประยุกต์และเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะสถิติประยุกต์, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, 2552.

[6] สมจินตนา คุ้มภัย และ นีรนาท แก้วประเสริฐ ระฆังทอง, “การเปรียบเทียบความเหลื่อมล้ำทางการศึกษาระหว่างโรงเรียนมัธยมศึกษาในเขตเมืองและโรงเรียนมัธยมศึกษาในชนบท จังหวัดนครศรีธรรมราช,” *วารสาร Journal of Management Information and Decision Sciences*, ปีที่ 25, ฉบับพิเศษ 2, หน้า 1–16, 2565.

[7] อุมาพร ภัทรวนิช, L. B. Williams, T. A. Lyson, และ กุลภา อาชวานันทกุล, “ความเหลื่อมล้ำและการลงทุนทางการศึกษาในเด็กไทย,” *วารสารประชากรและสังคมศึกษา*, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, หน้า 95–109, 2554.

[8] A. Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, 4th ed. London: SAGE Publications, 2013.

[9] C. N. Birkeli, C. Normand, K. Isaksson Rø, and M. Kvernenes, "Educational supervision in internal medicine residency training – a scoping review," *BMC Medical Education*, vol. 23, no. 644, pp. 1–15, 2023

[10] D. W. Hosmer, S. Lemeshow, and R. X. Sturdivant, *Applied Logistic Regression*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

[11] G. Jones, “An examination of the factors influencing students’ decisions to study higher education courses in further education colleges in the UK,” *Widening Participation and Lifelong Learning*, vol. 22, no. 1, pp. 6–24, Apr. 2020

[12] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*, 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2010.

[13] J. S. Coleman, *Equality of Educational Opportunity*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1966.

[14] M. A. Perez et al., "Association of applicant demographic factors with medical school acceptance," *BMC Medical Education*, vol. 23, no. 960, pp. 1–8, 2023

[15] P. Bourdieu, “The forms of capital,” in *Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education*, J. Richardson, Ed. New York: Greenwood, 1986, pp. 241–258.
[16] S. Menard, *Applied Logistic Regression Analysis*, 2nd ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2002.
[17] UNICEF, *15-Year Free Education Program: Kingdom of Thailand*. Bangkok: UNICEF Thailand, 2018
[18] U. Pattaravanich, L. B. Williams, T. A. Lyson, and K. Archavanitkul, *“Inequality and Educational Investment in Thai Children,” Rural Sociology*, vol. 70, no. 4, pp. 561–583, 2005.

การวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดความร้อนในหลุมขยะชีวภาพแบบฝังกลบและความเสี่ยงการเกิดอัคคีภัย

The behaviour analysis of heat-generation within biological landfills and fire accident risk

เทียนสิริ เหลืองวิไล[1,*]

[1]ภาควิชาคณิตศาสตร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Thiansiri Luangwilai[1]

[1]Mathematics and Computer Science Division, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Thiansiri.L@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดการขยะชีวมวลถือว่าเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของทุกประเทศ เนื่องจากปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและการจัดการที่ยากลำบาก โดยกระบวนการฝังกลบขยะชีวมวลนั้นเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากมีต้นทุนการดำเนินการที่ต่ำและยังสามารถนำผลลัพธ์หลังจากที่ขยะย่อยสลายแล้วไปใช้เป็นปุ๋ยในการปรับสภาพดินเพื่อการเกษตรต่อไปได้ โดยกระบวนการย่อยสลายของขยะชีวมวลนั้นจะเริ่มต้นจากปฏิกิริยาชีวภาพที่จะมีคายความร้อนออกมา เพื่อความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 80 องศาเซลเซียส จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากนั้นความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หากบริหารจัดการไม่ดีเท่าที่ควรจะทำให้เกิดไฟไหม้ขึ้นได้ ซึ่งจะก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอย่างใหญ่หลวงและการดำเนินการดับไฟนั้นสามารถได้ยาก เพราะฉะนั้นการศึกษาพฤติกรรมและป้องกันอัคคีภัยจึงมีความจำเป็นมาก

คำสำคัญ: ขยะชีวมวล, วิเคราะห์พฤติกรรม, อัคคีภัย, หลุมขยะฝังกลบ

Abstract

The problem of biomass waste management is considered a major environmental issue in every country due to the rapidly increasing amount of waste and the difficulty of proper disposal. Landfilling is one of the most widely used methods for managing biomass waste because it is cost-effective and the decomposed residue can be used as fertilizer to improve soil quality for agricultural purposes. The decomposition process of biomass waste begins with biological reactions that generate heat, causing the temperature to rise to around 80°C. This increase in temperature triggers chemical and oxidation reactions, which can cause a rapid rise in heat. If not properly managed, this may lead to spontaneous combustion, resulting in severe environmental pollution

and making fire suppression extremely difficult. Therefore, studying the behaviour of biomass waste and developing effective fire prevention measures are essential.

Keywords: biological waste, behaviour analysis, fire accident, landfills

1. บทนำ

โดยทั่วไปแล้ว แหล่งกำเนิดความร้อนภายในหลุมขยะชีวภาพแบบฝังกลบที่มีปริมาณวัสดุอินทรีย์จำนวนมาก มักเกิดจากสองกระบวนการหลัก ได้แก่ ปฏิกิริยาทางชีวภาพและการเกิดออกซิเดชันของวัสดุที่มีเซลลูโลส [1] กิจกรรมทางชีวภาพมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าและสามารถทำให้อุณหภูมิภายในหลุมขยะชีวภาพแบบฝังกลบเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เพียงพอจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ การเกิดความร้อนทางเคมีมักถูกจำลองด้วยสมการปฏิกิริยาแบบอาเรย์เนียส (Arrhenius) เดี่ยว [2] ปฏิกิริยาทางชีวภาพเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการย่อยสลายของกลุ่มก้อนขยะชีวภาพขนาดใหญ่ [1] รวมถึงในพื้นที่ที่เก็บเชื้อเพลิงของเสียในอุตสาหกรรม เช่น ขยะชุมชนและหลุมฝังกลบ [3]

Brinton และคณะ [4] ระบุว่าปฏิกิริยาทางชีวภาพเป็นสิ่งที่พึงประสงค์ในกระบวนการย่อยสลาย โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมทางชีวภาพอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส Hogland และคณะ [5] กล่าวว่าช่วงอุณหภูมินี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายในระยะเวลาเพียงไม่กี่เดือนหรือแม้แต่ไม่กี่วัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการให้ความร้อนทั้งทางชีวภาพและออกซิเดชันนี้ อาจนำไปสู่การติดไฟได้ด้วยตนเอง (Self-ignition) [2]

นักวิจัยหลายท่าน [1, 6 - 9] ได้เสนอว่า ความชื้นเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อปฏิกิริยาทางชีวภาพ โดยช่วงความชื้นที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทางชีวภาพอยู่ที่ประมาณ 40–60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก อย่างไรก็ตามช่วงความชื้นวิกฤตที่อาจนำไปสู่การเกิดการลุกไหม้ได้เองอยู่ที่ประมาณ 20–45 เปอร์เซ็นต์ [1] หากความชื้นสูงกว่าช่วงนี้จะมีความชื้นเพียงพอสำหรับการระเหย ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิภายในได้ แต่หากต่ำกว่าช่วงนี้ ความชื้นจะไม่เพียงพอสำหรับการคงอยู่ของปฏิกิริยาทางชีวภาพ โดยทั่วไปกระบวนการย่อยสลายจะดำเนินอยู่ในช่วงความชื้น 40–70 เปอร์เซ็นต์ [6]

Sidhu และคณะ [10] ได้ศึกษาแบบจำลองที่รวมทั้งกระบวนการให้ความร้อนทางปฏิกิริยาชีวภาพและทางปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีการใช้และบริโภคออกซิเจนแต่ไม่มีความชื้น ต่อมา Luangwilai และคณะ [11] ได้ขยายงานดังกล่าวโดยเพิ่มผลของความชื้น ที่มีอัตราส่วนเริ่มต้นของความชื่นต่อน้ำหนักขยะชีวภาพที่ต่างกัน จากนั้น Luangwilai และคณะ [12] ได้วิเคราะห์ผลของความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมและพายุฝน จากนั้น Luangwilai และคณะ [13] ได้วิเคราะห์แบบจำลองที่รวมทั้งผลกระทบของการที่มีตัวแปรของอากาศไหลผ่านกองขยะและความชื้นไว้ด้วยกัน

ในงานวิจัยชิ้นนี้ จะดำเนินการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความร้อนภายในหลุมขยะชีวภาพแบบฝังกลบเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของหลุมขยะชีวภาพ โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่รวมพฤติกรรมปฏิกิริยาชีวภาพ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การไหลของอากาศ และความชื้น เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจอันจะนำไปสู่แนวทางการเร่งประสิทธิภาพการย่อยสลายของขยะชีวภาพและในเวลาเดียวกันยังช่วยป้องกันการเกิดความร้อนสะสมภายในหลุมขยะชีวภาพที่อาจจะนำไปสู่การเกิดการลุกไหม้ได้เอง ทั้งนี้พฤติกรรมทั่วไปของแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับพื้นที่ของกระบวนการให้ความร้อนได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางมาแล้วเช่นกัน [14, 15]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองของหลุมขยะชีวภาพเชิงอุดมคติสองมิติ (Two-dimensional idealised landfill model) ที่มีความกว้าง L เมตร และความลึก H เมตร โดยขนาดของกองขยะและหลุมขยะในระดับอุตสาหกรรมสามารถแตกต่างกันไปได้ตั้งแต่ 6 ถึง 30 เมตร ทั้งในแนวสูงและแนวกว้าง และมีความยาวได้ถึงหลายร้อยเมตร [1, 6, 16, 17]

ในงานวิจัยนี้ ไม่ได้พิจารณาการลดลงของวัสดุเซลลูโลสและขยะชีวมวล รวมถึงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเฟสของแข็งและก๊าซ เนื่องจากเชื่อว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลเพียงเล็กน้อยต่อทั้งกองขยะหมักขนาดใหญ่และช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาในงานนี้ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิเพียงค่าเดียวเพื่ออธิบายพฤติกรรมเฉพาะที่ กล่าวคือกองขยะถูกสมมติว่าอยู่ในสมดุลความร้อนเฉพาะที่ (Local thermal equilibrium) นี่เป็นสมมติฐานทั่วไปที่มักใช้ในการศึกษาวัสดุพรุน (Porous media) และเตียงอนุภาคอัดแน่น (Packed particle beds) [18]

Sidhu และคณะ [10] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงพื้นที่ (Spatial model) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจน ภายในกองขยะต่อมา Escudey และคณะ [19] รวมถึง Moraga และคณะ [20] ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากข้อมูลการทดลองของพวกเขาในกองตะกอนน้ำเสียว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกองได้อย่างสมเหตุสมผล

Luangwilai และคณะ [11] ได้ขยายแบบจำลองของ Sidhu และคณะ [10] เพื่อศึกษาผลของ ความชื้น ในกองขยะหมัก โดยได้ปรับสมการ (1) และ (2) ซึ่งอธิบายการกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนตามลำดับ และเพิ่มเทอมที่เกี่ยวข้องกับของน้ำและไอน้ำ โดยใช้สมการ (3) และ (4) เพื่ออธิบาย ความเข้มข้นของน้ำและไอน้ำตามลำดับ ต่อมา Luangwilai และคณะ [13] ได้ขยายแบบจำลองนี้เพิ่มเติมอีก โดยเพิ่มเทอมการไหลของอากาศ (Air-flow terms) เข้าไปในสมการ (1), (2) และ (3)

สมการหลักที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-dependent) ของอุณหภูมิ (T), ความเข้มข้นของออกซิเจน (O_2), ความเข้มข้นของไอน้ำ (V) และ ปริมาณน้ำในสถานะของเหลว (W) ในรูปมิติ (Dimensional form) มีดังนี้.

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยหลัก

$$(\rho C)_{eff}\frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) - \epsilon\rho_{air}C_{air}\left(U_x\frac{\partial T}{\partial x} + U_y\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \mu_1(W)Q_c\rho_c A_3 O_2 M_{O_2}(1-\epsilon)e^{-E_3/RT} + \mu_2(W)Q_b\rho_b(1-\epsilon)\frac{A_1 e^{-E_1/RT}}{1+A_2 e^{-E_2/RT}} + L_v(\epsilon Z_c V - (1-\epsilon)Z_e W e^{-L_v/RT}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} = D_{O_2 eff}\left(\frac{\partial^2 O_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 O_2}{\partial y^2}\right) - \epsilon\left(U_x\frac{\partial O_2}{\partial x} + U_y\frac{\partial O_2}{\partial y}\right) + \mu_1(W)\rho_c A_3 O_2(1-\epsilon)e^{-E_3/RT}, \quad (2)$$

$$\epsilon\frac{\partial V}{\partial t} = D_V\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right) - \epsilon\left(U_x\frac{\partial V}{\partial x} + U_y\frac{\partial V}{\partial y}\right) + Z_e W(1-\epsilon)e^{-L_v/RT} - \epsilon Z_c, \quad (3)$$

$$(1-\epsilon)\frac{\partial W}{\partial t} = \epsilon Z_c V - Z_e W(1-\epsilon)e^{-L_v/RT}. \quad (4)$$

สมการความสัมพันธ์

$$k_{eff} = \epsilon k_{air} + (1-\epsilon)(\sigma k_W + (1-\sigma)k_c), \quad (5)$$

$$(\rho C)_{eff} = \epsilon \rho_{air} C_{air} + (1-\epsilon)(WM_W C_W + \rho_{compost} C_C), \quad (6)$$

$$D_{O_2 eff} = D_V = \epsilon D_{O_2 air}, \quad (7)$$

$$\mu_1(W) = \begin{cases} (1-(W/W_C)^b), & W < W_C \\ 0, & W \geq W_C \end{cases}, \quad (8)$$

$$\mu_2(W) = \begin{cases} \frac{\sigma-\sigma_a}{\sigma_m-\sigma_a}, & \sigma_a \leq \sigma \leq \sigma_m \\ \frac{\sigma_b-\sigma}{\sigma_b-\sigma_m}, & \sigma_m \leq \sigma \leq \sigma_b \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{WM_W}{WM_W+(1-\epsilon)\rho_{compost}}. \quad (10)$$

พจน์ต่าง ๆ ในสมการ (1) ถึง (10) ได้ถูกนิยามไว้ในส่วนของนามานุกรม (nomenclature) โดยที่พารามิเตอร์ทางกายภาพทั้งหมดในแบบจำลองนี้ถือว่า ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมถึงความเข้มข้นของออกซิเจน ไอน้ำ และน้ำในสถานะของเหลว

ความร้อนที่เกิดจากการออกซิเดชันของวัสดุที่มีเซลลูโลส ถูกแทนด้วยเทอมที่สามทางด้านขวามือของสมการ (1) และ (2) ส่วนความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Biological activity) ถูกแทนด้วยเทอมที่สี่ทางด้านขวามือของสมการ (1) วิธีการเชิงแบบจำลองลักษณะนี้ ถูกนำมาใช้ในหลายงานวิจัย เพื่อศึกษากระบวนการหมักในสถานะของแข็ง (Solid-state fermentation processes) [21]

พารามิเตอร์ A_1 และ E_1 ในสมการ (1) ใช้จำลองการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมการเผาผลาญ (Metabolic activity) ของชีวมวลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงถึงระดับหนึ่ง โปรตีนที่มีความไวต่อความร้อนจะเริ่มเสื่อมสภาพ (Denature) และทำให้เซลล์ตาย กระบวนการนี้ถูกแทนด้วยพารามิเตอร์การยับยั้งการทำงานของชีวมวล คือ A_2 และ E_2 เพื่อให้แน่ใจว่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนจากกิจกรรมทางชีวภาพมีค่าสูงสุดเสมอ (Global maximum) พลังงานกระตุ้นของกระบวนการยับยั้ง ต้องมีค่ามากกว่ากระบวนการเจริญเติบโตของชีวมวล กล่าวคือ $E_2 > E_1$ รายละเอียดของเทอมที่แทนการเกิดความร้อนจากชีวมวลสามารถดูได้ในงานวิจัยของ Chen และ Mitchell [22]

สมการ (3) และ (4) ใช้แทนกระบวนการ การระเหย (Evaporation) และ การควบแน่น (Condensation) ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นภายในกองขยะหมัก โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากปฏิกิริยาเหล่านี้ถูกแทนด้วยเทอมที่ห้าในสมการ (1) สมการเหล่านี้อ้างอิงจากผลงานของ Sisson และคณะ [23, 24] Sexton และคณะ [25] และ Gray และคณะ [26] ซึ่งพัฒนาแบบจำลองกระบวนการเกิดความร้อนด้วยตนเอง (Self-heating) ในกองกากอ้อย (Bagasse) โดยคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนสถานะระหว่างน้ำและไอน้ำ และตรวจสอบค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงด้วยข้อมูลการทดลองจริงจากกองกากอ้อย

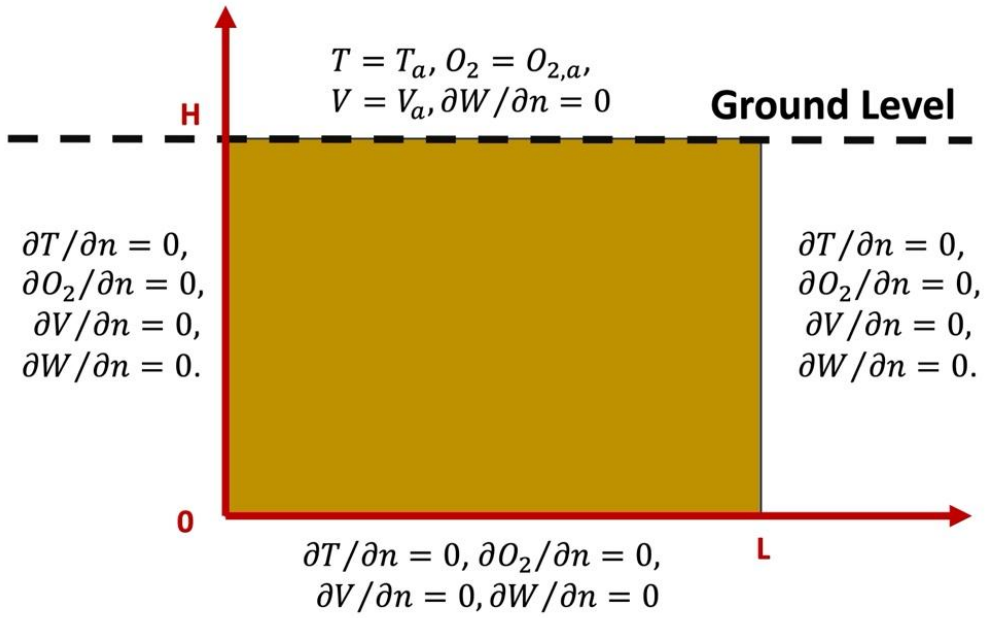
สมการเชิงพีชคณิต (5) และ (6) นิยาม ค่าการนำความร้อนเชิงประสิทธิผล (Effective thermal conductivity) และ ความจุความร้อนเชิงประสิทธิผล (Effective thermal capacity) ของกองขยะชีวภาพตามลำดับ โดยคำนวณจากสมบัติของอากาศและวัสดุ ขณะที่สมการ (7) นิยามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผล (Effective diffusion coefficients) ของออกซิเจนและไอน้ำ

ผลของความชื้นต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาทางชีวภาพถูกกำหนดในพจน์ (8) และ (9) ตามลำดับ ในการอธิบายปรากฏการณ์นี้ งานวิจัยนี้อ้างอิงจาก Chen [27] ซึ่งเสนอว่าเมื่อปริมาณน้ำในสถานะของเหลวในกองเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวของจุดเกิดปฏิกิริยาจะถูกน้ำปกคลุมบางส่วน ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลง และเมื่อเกินค่าความชื้นวิกฤต W_C น้ำจะปกคลุมพื้นผิวทั้งหมด ทำให้ปฏิกิริยานี้หยุดลง

อ้างอิงจากผลงานของ Kuwahara และคณะ [8] และ Nakayama และคณะ [9] เพื่ออธิบายผลของความชื้นต่อปฏิกิริยาทางชีวภาพ ซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อน้ำหนักขยะหมักถึงค่าขีดเริ่มต้นที่กำหนด (ในแบบจำลองนี้เรียกว่า $\boldsymbol{\sigma}_a$) และจะหยุดทำงานเมื่ออัตราส่วนความชื้นเกินกว่าค่าขีดสูงสุด ($\boldsymbol{\sigma}_b$) ในช่วงระหว่างสองค่าดังกล่าว ปฏิกิริยาทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ $\boldsymbol{\sigma}_m$

การไหลของอากาศ (Air flow) ถูกกำหนดด้วย U_x และ U_y ในสมการ (1) ถึง (3) การไหลของอากาศนี้มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของออกซิเจน และความเข้มข้นของไอน้ำ ภายในกองแต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อน้ำในสถานะของเหลว

สำหรับ เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ของระบบนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 1 โดยขอบเขตด้านล่างและด้านข้างของหลุมจะเปรียบได้กับการมีฉนวนกั้น ส่วนขอบเขตด้านบน ค่าอุณหภูมิ ความเข้มข้นของออกซิเจน และไอน้ำ จะถูกสมมุติให้เท่ากับค่าบรรยากาศโดยรอบ ถือว่าเป็นการกำหนดขอบเขตอย่างง่าย (Simple boundary conditions) ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีไม่แตกต่างจากการใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบแบบนอยมันน์ (Neumann boundary) ดังที่อธิบายไว้ในงานวิจัยของ Luangwilai และคณะ [28]



รูปที่ 1 แผนภาพหน้าตัดขวางของหลุมขยะฝังกลบและค่าขอบเขตของสมการเชิงอนุพันธ์หลัก

3. การดำเนินการวิจัย

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะดำเนินการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการ (1) ถึง (4) พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกัน และใช้โปรแกรม FLEXPDE™ [29] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) ที่สามารถปรับตามพื้นที่และเวลาได้ (Space- and time-adaptive) โดยมีการควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error tolerance) ให้น้อยกว่า 0.1% — ผลลัพธ์ทั้งหมดจะถูกนำเสนอในส่วนถัดไปของงานวิจัยนี้

ผลการคำนวณจาก FLEXPDE™ ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องมาก่อนโดย Sidhu และคณะ [10] และ Luangwilai และคณะ [30] ซึ่งใช้ทั้งวิธี Finite differences และ Method of lines [31] เขียนด้วย MATLAB [32] ในการเปรียบเทียบ พบว่าผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีเกือบเหมือนกันทุกประการ โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสภาวะคงที่ (Steady-state temperature) สูงสุดไม่เกิน 0.5 องศาเคลวิน (K) และยังสามารถทำนายค่าพารามิเตอร์ของ Bifurcation ที่ตำแหน่งจุดจำกัด (Limit-point bifurcations) ได้เท่ากันอีกด้วย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อ้างอิงจากงานของ Sidhu และคณะ [10] Kuwahara และคณะ [8] และ Gray และคณะ [23] ซึ่งได้ระบุไว้ในส่วนของนามานุกรม (nomenclature) ของงานวิจัยนี้.

4. ผลการวิจัย

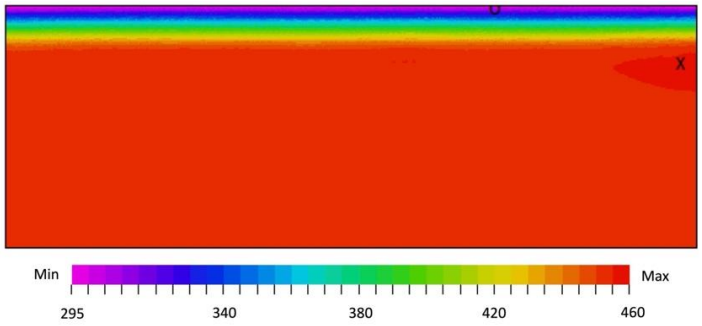
ในงานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของหลุมขยะฝังกลบต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความร้อนภายในหลุมขยะชีวภาพ โดยทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (PDEs) พร้อมกับสมการเชิงพีชคณิตที่สอดคล้องกัน (สมการ (1) ถึง (10))

Sidhu และคณะ [10] และ Luangwilai และคณะ [30] ได้ศึกษาแบบจำลองที่ไม่รวมความชื้น พบว่า หากกองขยะมีขนาดเล็กเกินไป อุณหภูมิภายในจะอยู่ในช่วงที่ต่ำ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาทางชีวภาพ ในขณะที่กองขยะขนาดใหญ่กว่าจะสามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ประมาณ 323–363 องศาเคลวิน) อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มขนาดกองขยะมากเกินไป ความเสี่ยงของการลุกไหม้ด้วยตนเอง (Spontaneous combustion) ก็จะสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเกิน 423 องศาเคลวิน จะเป็นค่าที่ใกล้กับอุณหภูมิจุดติดไฟของวัสดุขยะชีวภาพ [1]

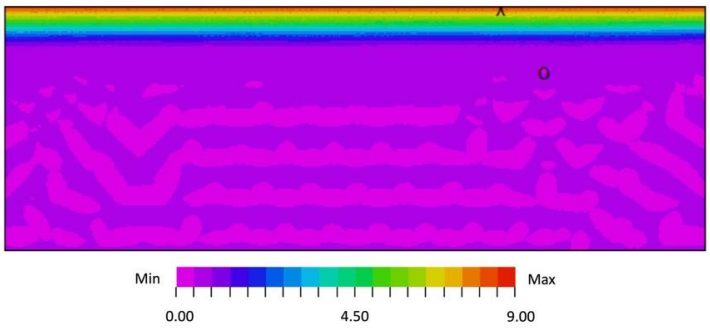
Luangwilai และคณะ [30] ยังได้ศึกษาผลของความเร็วลมที่ไหลผ่านกองขยะ (Air flow) และพบว่า หากความเร็วลมสูงเกินไป การสูญเสียความร้อนจะมีอิทธิพลมาก จนต้องใช้กองขยะที่มีขนาดใหญ่มากเพื่อให้ได้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ในทางกลับกันหากความเร็วลมต่ำเกินไปปริมาณออกซิเจนภายในกองจะไม่เพียงพอในการสร้างอุณหภูมิสูงและความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในจะหยุดลงเมื่อออกซิเจนหมด สำหรับค่าความเร็วลมในระดับปานกลางจะสามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้แม้ในกองขนาดปานกลาง ซึ่งก็อาจมีโอกาสเกิดการลุกไหม้ได้เองเช่นกัน

รูปที่ 2 แผนภาพอุณหภูมิภายในหลุมขยะฝังกลบ เมื่อความลึก H=5 เมตร และ ความกว้าง L=20 เมตร

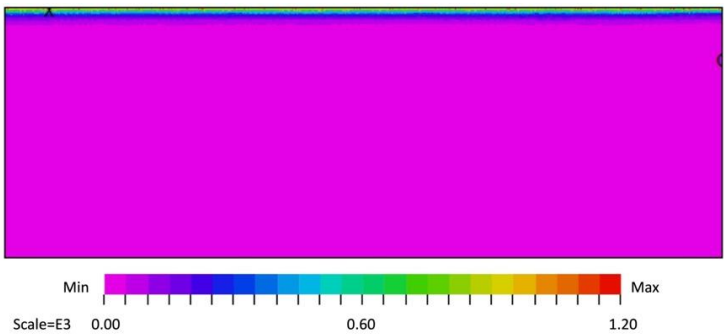
จากงานวิจัยชิ้นนี้ พบว่าถ้าหลุมขยะฝังกลบมีความลึกไม่มากพอ จะทำให้อุณหภูมิภายในมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกตลอดเวลา ซึ่งถือว่าต่ำไปและไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาชีวภาพทำให้กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและเป็นไปอย่างช้า ๆ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิภายในของหลุมขยะฝังกลบในมุมมองหน้าตัดขวาง โดยค่าอุณหภูมิภายในหลุมทั้งหมดใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมเกือบทั้งหมด ส่วนค่าปริมาณไอน้ำความชื้น และความเข้มข้นของออกซิเจน ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมและค่าเริ่มต้น เนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวภาพไม่สามารถทำงานได้ดีและไม่สามารถจุดให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นมาได้



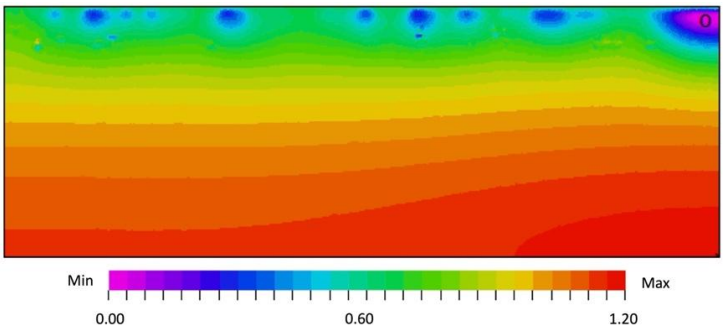
(ก) แผนภาพอุณหภูมิภายในหลุมขยะฝังกลบ (T)



(ข) แผนภาพความเข้มข้นของออกซิเจนในหลุมขยะฝังกลบ (O_2)



(ค) แผนภาพความปริมาณน้ำในหลุมขยะฝังกลบ (W)



(ง) แผนภาพความเข้มข้นไอน้ำในหลุมขยะฝังกลบ (Va)

รูปที่ 3 แผนภาพค่าตัวแปรหลักของสมการเชิงอนุพันธ์หลักของหลุมขยะฝังกลบ เมื่อความลึก H=10 เมตร และความกว้าง L=20 เมตร

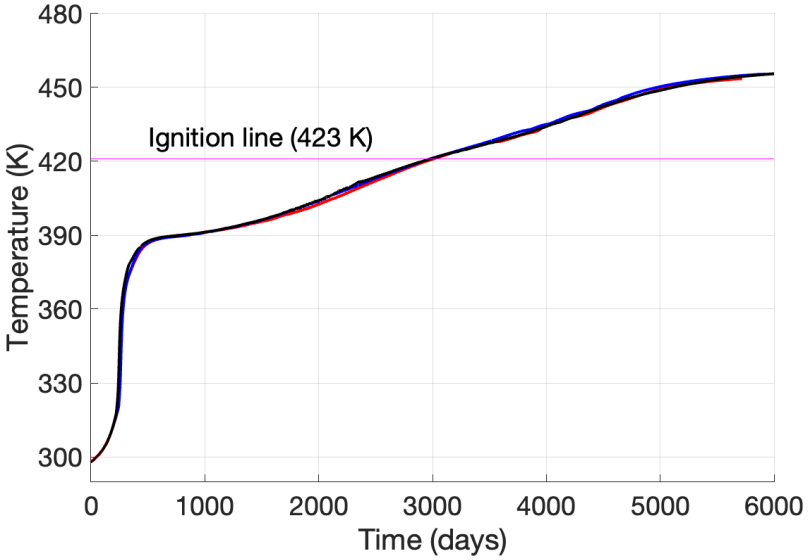
ในทางตรงกันข้ามเมื่อขนาดของหลุมขยะฝังกลบได้มีการเพิ่มความลึกมากขึ้น จนมีมวลของขยะชีวมวลที่อยู่ในหลุมขยะมากเพียงพอ จะทำให้ปฏิกิริยาชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถสะสมความร้อนได้เพียงพอ จนเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในจนไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาชีวภาพ ที่อุณหภูมิประมาณ 323–363 องศาเคลวิน โดยในช่วงอุณหภูมินี้ การย่อยสลายของขยะชีวมวลนั้นจะเป็นไปอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิภายในสามารถคงอยู่ในช่วงนี้ได้เป็นเวลาหลายเดือนหรืออาจจะมากถึงเป็นปีได้ ขึ้นอยู่กับมวลของขยะชีวภาพที่หลงเหลือจากการย่อยสลาย ในกรณีที่หลุมขยะมีการขนาดใหญ่มากเกินไป อุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นสูงได้อีกเรื่อย ๆ จากการเข้ามาของปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีหลายเหตุการณ์ที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกิน 420 องศาเคเวินและทำให้มีการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงที่หลงเหลืออยู่ เกิดเป็นอัคคีภัยได้ การเกิดไฟไหม้ในพื้นที่ของหลุมขยะแบบฝังกลบนั้น ถือว่าเป็นเรื่องที่สร้างมลพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อมอย่างใหญ่หลวง เพราะโดยปกติแล้วตัวไฟจะดำเนินการไปยังช้า ๆ ใต้ผิวดินอย่างยาวนาน หลายครั้งที่เจ้าหน้าที่ดับเพลิงฉีดน้ำดับเพลิงที่ด้านบน ตัวไฟยังคงลุกไหม้ต่อในด้านล่าง จนเมื่อน้ำแห้งระเหยไปไฟก็จะกลับมาลุกหนักขึ้นมาเหมือนเดิม ในกรณีที่มีการขุดแยกก็จะเป็นการเพิ่มออกซิเจนเข้าสู่กองไฟ ไฟก็จะลุกไหม้หนักขึ้นกว่าเดิมได้อีก [6]

โดยในรูปที่ 3 แสดงค่าตัวแปรหลักทั้งสี่ของสมการเชิงอนุพันธ์หลักที่ (1) – (4) ภายในตำแหน่งต่าง ๆ ด้านหน้าตัดขวางของหลุมขยะฝังกลบที่มีความลึก 10 เมตรและมีความยาว 20 เมตร โดยรูปที่ 3(ก) แสดงอุณหภูมิภายใน ในภาพนี้จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดการย่อยสลายจะเกิดความร้อนจากกระบวนการปฏิกิริยาชีวภาพ หลังจากนั้นเมื่อความร้อนสะสมมากเพียงพอจะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในหลุมขยะฝั่งกลบ จนความร้อนสูงขึ้น โดยจุดที่มีความร้อนมากที่สุดจะอยู่บริเวณก้นหลุม (แสดงด้วยสีแดง) ส่วนที่ติดกับบริเวณผิวพื้นดินด้านบน จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อน ออกซิเจน และความชื้นกับสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในรูปนี้ มีค่าที่สูงเกินอุณหภูมิติดไฟของวัสดุเซลลูโลสบริเวณก้นหลุม อันจะสร้างความเสี่ยงที่จะเกิดไฟไหม้ขึ้นได้อย่างสูง

ในรูปที่ 3(ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ในรูปนี้แสดงให้เห็นถึงการที่ออกซิเจนภายในหลุมขยะฝังกลบนั้นได้ลดลงไปอย่างมาก เป็นการยืนยันว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นทำงานได้อย่างเต็มที่ จนทำให้อุณหภูมิโดยรวมภายในหลุมขยะฝังกลบนั้นมีค่าที่สูงมาก โดยจุดที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยที่สุดนั้นคือบริเวณก้นของหลุม ส่วนบริเวณที่ติดกับผิวดินด้านบนนั้น ยังคงได้รับออกซิเจนเพิ่มเติมจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ทำให้ยังคงความเข้มข้นของออกซิเจนที่สูงอยู่ได้ ซึ่งจะเห็นเป็นบริเวรพื้นที่บาง ๆ

รูปที่ 3(ค) แสดงปริมาณน้ำ ในรูปนี้แสดงให้เห็นปริมาณน้ำหรือความชื้นของวัสดุภายในหลุมขยะฝังกลบ ที่มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน เพราะเมื่ออุณหภูมิภายในหลุมขยะฝังกลบสูงขึ้น จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ปริมาณน้ำหรือความชื้นภายในหลุมขยะค่อย ๆ ระเหยออกไป จนเหลือปริมาณน้ำที่ลดลง แต่บริเวณผิวด้านบนของหลุมขยะนั้น ยังคนได้รับความชื้นเพิ่มเติมจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเช่นเดียวกับกรณีของออกซิเจน

รูปที่ 3(ง) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไอน้ำ โดยในรูปนี้แสดงให้เห็นพฤติกรรมที่ความชื้นและปริมาณน้ำภายในหลุมขยะฝังกลบค่อย ๆ ระเหยกลายเป็นไอน้ำ จากด้านล่างสุดของหลุมขยะและพัดออกไปจากหลุมขยะที่บริเวณผิวด้านบนที่ติดต่อกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เพราะด้านข้างและด้านล่างของหลุมขยะนั้นเหมือนมีฉนวนกันไม่ให้ไอน้ำระเหยออกไปได้ง่าย



รูปที่ 4 แผนภาพอุณหภูมิสูงสุดภายในหลุมขยะฝังกลบเทียบกับเวลาสำหรับความกว้างหลุมที่แตกต่างกัน เมื่อความลึก H=10 เมตร โดยมีความกว้าง L=10 เมตร (เส้นสีแดง), L=20 เมตร (เส้นสีน้ำเงิน) และ L=30 เมตร (เส้นสีดำ)

ในรูปที่ 4 แสดงพฤติกรรมอุณหภูมิสูงสุดของหลุมขยะฝังกลบตามช่วงเวลา เมื่อความลึกของหลุมขยะมีขนาด 10 เมตรและมีความกว้างอยู่ที่ 10 เมตร (แสดงด้วยเส้นสีแดง) ความกว้างอยู่ที่ 20 เมตร (แสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน) และความกว้างอยู่ที่ 30 เมตร (แสดงด้วยเส้นสีดำ) พฤติกรรมโดยรวมที่เห็นนั้น แสดงให้เห็นว่าถ้าหลุมขยะฝังกลบมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะเพิ่มอุณหภูมิภายในให้สูงขึ้น จากการเก็บกักอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาชีวภาพ จนสูงเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้แล้ว อุณหภูมิจะค่อย ๆ สูงขึ้นจนเกินขีดจำกัดของอุณหภูมิติดไฟของเซลลูโลสที่ 423 องศาเคลวินได้ ซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้ได้ ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเฝ้าระวังและตรวจสอบอุณหภูมิภายในหลุมขยะฝังกลบ เมื่ออุณหภูมิภายในเกินช่วงอุณหภูมิ 380 องศาเคลวินขึ้นไป ต้องดำเนินการหาแนวทางลดอุณหภูมิภายใน เช่น การเปิดช่องให้ลมพัดเข้าไปในหลุมขยะเพื่อลดอุณหภูมิ หรือมีการฉีดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิเข้าไปไปยังจุดต่าง ๆ ของหลุมขยะ อันจะเป็นการเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนเกินขีดจำกัดของจุดติดไฟได้

5. สรุป

ในการวิจัยชิ้นนี้ ได้ใช้แบบจำลองสองมิติที่ขึ้นกับตำแหน่ง (Two-dimensional spatially-dependent model) เพื่อศึกษากระบวนการเกิดความร้อนด้วยตนเอง (Self-heating) ของปฏิกิริยาชีวภาพและปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในกองขยะชีวมวล เพื่อมาจำลองพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของหลุมขยะฝังกลบ เพื่อหาถึงความสัมพันธ์ของขนาดหลุมขยะที่มีมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการย่อยสลาย อันจะเป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการปริมาณขยะชีวมวลที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันและสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ ไปส่งเสริมผลผลิตทางการเกษตรในการปรับปรุงคุณภาพดินได้อีกด้วย อีกทั้งความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมและความสัมพันธ์นี้ ยังช่วยป้องกันความเสี่ยงของการเกิดอัคคีภัยในบริเวณของหลุมขยะชีวภาพ เพราะหากผิดพลาดเกิดอัคคีภัยแล้วจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง

โดยในงานวิจัยพบว่าหากหลุมขยะมีความตื้นเกินไป อุณหภูมิภายในของหลุมขยะจะอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมตลอดไป ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายและปฏิกิริยาชีวภาพทำงานไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้การย่อยสลาย

เป็นไปอย่างช้า ๆ และอาจมีกลิ่นเหม็นเป็นระยะเวลายาวนาน ในทางตรงกันข้าม หากความลึกของหลุมขยะมีปริมาณที่เพียงพอแล้ว จะทำให้หลุมขยะมีความสามารถในการเก็บกักความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาชีวภาพเริ่มต้น อันจะเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาชีวภาพและการย่อยสลายให้เร็วขึ้น ขยะชีวภาพเหล่านั้นก็จะสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตรได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น ทำให้สามารถรองรับขยะใหม่ ๆ ได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยชิ้นนี้พบว่าหากหลุมขยะมีความลึกเพียงพอที่สามารถกักเก็บความร้อนและเร่งปฏิกิริยาชีวภาพได้แล้วนั้น เป็นการยืนยันว่าจะสามารถไปจุดเริ่มต้นปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างแน่นอน และจะทำให้อุณหภูมิความร้อนภายในหลุมเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งข้ามช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของปฏิกิริยาชีวภาพไป แล้วมีโอกาสที่จะเพิ่มไปต่อเนื่อง จนข้ามอุณหภูมิของการติดไฟของวัสดุเซลลูโลสไป ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดอัคคีภัยได้ ดังนั้นผู้รับผิดชอบในการบริหารจัดการหลุมขยะชีวภาพเหล่านี้ จำเป็นที่จะต้องเฝ้าระวัง ถ้าอุณหภูมิภายในหลุมขยะชีวภาพเพิ่มขึ้นเกินกว่า 390 องศาเคลวินไปแล้ว จำเป็นที่จะต้องเร่งหา กระบวนการลดอุณหภูมิภายใน ตัวอย่างเช่น การดำเนินการฉีดน้ำเข้าไปด้านล่างของหลุมหรือเปิดช่องให้อากาศไหลเวียนแล้วลดอุณหภูมิความร้อนภายในลงตามความเหมาะสมของสถานที่

ข้อสังเกตว่า ช่วงเวลาในแบบจำลองนี้จะยาวนานกว่าความเป็นจริง เพราะว่าสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งสี่นั้นถูกพิจารณาในสิ่งแวดล้อมในอุดมคติ โดยสิ่งแวดล้อมคงที่ตลอดเวลาและไม่มีการรบกวนจากตัวแปรภายนอก แต่ในทางธรรมชาติความเป็นจริงแล้ว จะมีการรบกวนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในตอนกลางวัน ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปของสิ่งแวดล้อม ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำให้อัตราการเกิดความร้อนภายในหลุมขยะเพิ่มเร็วได้มากขึ้นกว่าเดิมได้หลายเท่าขึ้นอยู่กับพื้นที่ของหลุมขยะและสิ่งแวดล้อม แต่ถึงอย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยชิ้นนี้ ช่วยให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการเกิดความร้อนว่าเป็นอย่างไรได้บ้าง โดยเราทราบว่าถ้าหลุมขยะเล็กเกินไป การย่อยสลายก็จะเกิดช้า แต่หากต้องการจะเร่งกระบวนการย่อยสลาย จำเป็นที่จะต้องสร้างหลุมขยะให้ใหญ่ขึ้น แต่กระบวนการเร่งการย่อยสลายนี้ ผู้จัดการจำเป็นที่จะต้องเฝ้าระวังอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเตรียมแผนการรองรับในกรณีที่อุณหภูมิขึ้นต่อเนื่องเกินกว่าช่วงอุณหภูมิเหมาะสมของปฏิกิริยาชีวภาพ

6. นามานุกรม

A_C	Pre-exponential factor for oxidation of cellulosic material ($m^3\ kg^{-1}s^{-1}$)	1×10^7
A_1	Pre-exponential factor for oxidation of biomass growth ($m^3\ kg^{-1}s^{-1}$)	2.0×10^8
A_2	Pre-exponential factor for inhibition of biomass growth (-)	6.86×10^{30}
A_w	Percentage of water added to actual compost materials	
b	Constant for moisture-covering effect	1.5
C_{air}	Heat capacity of air ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)	1005
C_C	Heat capacity of cellulosic material ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)	3320
C_w	Heat capacity of water ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)	4190
D_{oair}	Diffusion coefficient of oxygen (m^2s^{-1})	2.5×10^{-5}
D_{oeff}	Effective diffusion coefficient of oxygen (m^2s^{-1})	7.5×10^{-6}
E_C	Activation energy for oxidation of cellulosic material ($J\ mol^{-1}$)	110×10^3
E_1	Activation energy for biomass growth ($J\ mol\ biomass^{-1}$)	100×10^3
E_2	Activation energy for inhibition of biomass growth ($J\ mol\ biomass^{-1}$)	200.0×10^3
L	Width of compost pile (m)	20
O_2	Oxygen concentration in pile ($mol\ m^{-3}$)	

$O_{2,a}$	Ambient oxygen concentration (mol m^{-3})	8.5675
Q_b	Exothermicity for oxidation of biomass per kg. of dry cellulose (J kg^{-1})	6.66×10^{6}
Q_C	Exothermicity for oxidation of cellulosic material (J kg^{-1})	1.7×10^{7}
R	Ideal gas constant (J K^{-1} mol^{-1})	8.31441
RH	Relative humidity (%)	50
T	Temperature in compost pile (K)	
T_a	Ambient temperature (K)	298
k_{air}	Effective thermal conductivity of air ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.026
k_C	Effective thermal conductivity of cellulose ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.3
k_w	Effective thermal conductivity of water ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.58
k_{eff}	Effective thermal conductivity of bed ($Wm^{-1}K^{-1}$)	
M_w	Mass of water (kg mol^{-1})	0.018
M_{O2}	Mass of oxygen (kg mol^{-1})	0.032
t	Time (s)	
x	Spatial distance along width of pile (m)	
V	Water vapour concentration (mol m^{-3})	
V_a	Ambient water vapour concentration (mol m^{-3})	1.74×RH
W	Liquid water (mol m^{-3})	
W_c	Critical liquid water effectively covering all available site (mol m^{-3})	300/0.018
Z_c	Pre-exponential factor for condensation (s^{-1})	4.7
Z_e	Pre-exponential factor for evaporation (s^{-1})	3.41×10^{4}
L_v	Latent heat of vapourisation (J mol^{-1})	42×10^{3}
ε	Void fraction (-)	0.3
$(\rho C)_{eff}$	Effective thermal capacity per unit volume of bed ($Jm^{-3}K^{-1}$);	
ρ_{air}	Density of air (kg m^{-3})	1.17
ρ_b	Density of bulk biomass in compost pile (kg m^{-3})	120
ρ_c	Density of pure cellulosic material in compost pile (kg m^{-3})	120
$\rho_{compost}$	Density of bulk biomass in compost pile (kg m^{-3})	120
ρ_w	Density of water (kg m^{-3})	1000
σ	Liquid water-to-compost weight ratio (-)	
σ_a	Activation limit of liquid water-to-compost weight ratio (-)	0.15
σ_m	Optimum limit of liquid water-to-compost weight ratio (-)	0.6
σ_b	Deactivation limit of liquid water-to-compost weight ratio (-)	0.8
$\mu_1(W)$	Effects of moisture on biological reaction (-)	
$\mu_2(W)$	Effects of moisture on oxidation reaction (-)	

7. เอกสารอ้างอิง

[1] R. Rynk, “Fires at composting facilities,” *BioCycle Magazine*, vol. 41, pp. 54–58, 2000.

[2] P. C. Bowes, *Self-heating: Evaluating and Controlling the Hazard*, Elsevier, Amsterdam, 1984.

[3] P. F. Hudak, “Spontaneous combustion of shale spoils at sanitary landfill,” *Waste Management & Research*, vol. 22, pp. 687–688, 2001.

[4] W. F. Brinton, E. Evans Jr., M. L. Droffner, and R. B. Brinton, “Standardized test for evaluation of compost self-heating,” *BioCycle*, vol. 36, pp. 60–65, 1995.

[5] W. Hogland, T. Bramryd, and I. Persson, “Physical, biological and chemical effects of unsorted fractions of industrial solid waste in waste fuel storage,” *Waste Management & Research*, vol. 14, pp. 197–210, 1996.

[6] R. T. Haug, *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers, USA, 1993.

[7] Y. P. Lin, G. H. Huang, H. W. Lu, and L. He, “Modelling of substrate degradation and oxygen consumption in waste composting processes,” *Waste Management*, vol. 28, pp. 1375–1385, 2008.

[8] F. Kuwahara, Y. Sano, A. Nakayama, K. Nakasaki, and T. Fukazawa, “Numerical modeling of a composting process with aeration,” *Journal of Porous Media*, vol. 12, no. 10, pp. 927–938, 2009.

[9] A. Nakayama, K. Nakasaki, F. Kuwahara, and Y. Sano, “A lumped parameter heat transfer analysis for composting processes with aeration,” *Transactions of the ASME*, vol. 129, pp. 902–906, 2007.

[10] H. S. Sidhu, M. I. Nelson, and X. D. Chen, “A simple spatial model for self-heating compost piles,” *ANZIAM Journal (E)*, vol. 48, pp. C135–C150, 2007.

[11] T. Luangwilai, H. S. Sidhu, M. I. Nelson, and X. D. Chen, “Modelling the effects of moisture content in compost piles,” in *Proc. 39th Australian Chemical Engineering Conf. (Chemeca 2011)*, Engineers Australia, 2011. [Online]. Available: http://www.conference.net.au/chemeca2011/papers/411.pdf

[12] T. Luangwilai, H. S. Sidhu, and M. I. Nelson, “Understanding the role of moisture in the self-heating process of compost piles,” in *Proc. 40th Australian Chemical Engineering Conf. (Chemeca 2012)*, Engineers Australia, 2012.

[13] T. Luangwilai, H. S. Sidhu, and M. I. Nelson, “One-dimensional spatial model for self-heating in compost piles: Investigating effects of moisture and air flow,” *Food and Bioproducts Processing*, vol. 108, pp. 18–26, 2018.

[14] T. Luangwilai, H. S. Sidhu, and M. I. Nelson, “Biological self-heating in compost piles: a Semenov formulation,” *Chemical Engineering Science*, vol. 101, pp. 533–542, 2013.

[15] T. Luangwilai, H. S. Sidhu, and M. I. Nelson, “Inclusion of biological and chemical self-heating processes in compost piles model: A Semenov formulation,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 32, no. 11, p. 2230027, 2022.

[16] D. Riggle, “Controlling and preventing fires at composting facilities,” *BioCycle Magazine*, vol. 50, no. 5, pp. 58–63, 1996.

[17] *US Today*, “Enormous mulch fire sparks rancour, confusion in small Texas town,” Jan. 10, 2007. [Online]. Available: http://www.usatoday.com/news/nation/2007-01-10-mulch_x.htm

[18] D. Nield and A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Springer-Verlag, New York, 1992.

[19] M. Escudey, A. Arias, J. Forster, N. Moraga, C. Zambra, and A. C. Chang, “Sewage sludge self-heating and spontaneous combustion: field, laboratory and numerical studies,” *High Temperature Materials and Processes*, vol. 77, no. 5, pp. 337–346, 2008.

[20] N. O. Moraga, F. Corvalan, M. Escudey, A. Arias, and C. E. Zambra, “Unsteady 2D coupled heat and mass transfer in porous media with biological and chemical heat generations,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 5841–5848, 2009.

[21] M. Khanahmadi, R. Roostaazad, A. Safekordi, R. Bozorgmehri, and D. A. Mitchell, “Investigating the use of cooling surfaces in solid-state fermentation tray bioreactors: modelling and experimentation,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 79, pp. 1228–1242, 2004.

[22] X. D. Chen and D. A. Mitchell, “Start-up strategies for self-heating and efficient growth in stirred bioreactors for solid state fermentation,” in *Proc. 24th Annual Australian and New Zealand Chemical Engineering Conf.*, vol. 4, The Institute of Engineers, pp. 111–116, 1996.

[23] B. F. Gray, M. J. Sexton, B. Halliburton, and C. Macaskill, “Wetting-induced ignition in cellulosic materials,” *Fire Safety Journal*, vol. 37, pp. 465–479, 2002.

[24] R. A. Sisson, A. Swift, G. C. Wake, and B. F. Gray, “The self-heating of damp cellulosic materials: I. High thermal conductivity and diffusivity,” *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 49, pp. 273–291, 1992.

[25] R. A. Sisson, A. Swift, G. C. Wake, and B. F. Gray, “The self-heating of damp cellulosic materials: II. On the steady states of the spatially distributed case,” *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 50, pp. 285–306, 1993.

[26] M. J. Sexton, C. Macaskill, and B. F. Gray, “Self-heating and drying in two-dimensional bagasse piles,” *Combustion Theory and Modelling*, vol. 5, pp. 517–536, 2001.

[27] X. D. Chen, “On the fundamentals of diffusive self-heating in water containing combustible materials,” *Chemical Engineering and Processing*, vol. 37, pp. 367–378, 1998.

[28] T. Luangwilai, *Mathematical Modelling of the Self-Heating in Compost Piles*, Ph.D. dissertation, Univ. of New South Wales, 2012.

[29] PDE Solutions Inc., *FLEXPDE™*, [Online]. Available: http://www.pdesolutions.com

[30] T. Luangwilai, H. S. Sidhu, M. I. Nelson, and X. D. Chen, “Air-flow and ambient temperature effects on the biological self-heating of compost piles,” *Asia Pacific Journal of Chemical Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 609–618, 2010, doi:10.1002/apj.438.

[31] W. E. Schiesser, *The Numerical Method of Lines: Integration of Partial Differential Equations*, Academic Press, 1st ed., 1991.

[32] MathWorks Inc., *MATLAB*, [Online]. Available: http://www.mathworks.com

การประเมินการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องจากข้อมูลดาวเทียมนภา-2 กรณีศึกษาพื้นที่ อ.มวกเหล็ก จ.สระบุรี

Assessment of Machine Learning on Land-Use Classification using NAPA-2 Satellite Imagery: A Case Study in Muak Lek, Saraburi

จิตรลดา เทียนสวัสดิ์[1*] และ เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ[2]

[1,2] สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Chitralada Thiensawat[1] and Kiatkulchai Jitt-Aer[2]

[1,2] The Graduate School of Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

pangram.cht@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินจากข้อมูลดาวเทียมนภา-2 และประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกด้วยการใช้อัลกอริทึมซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine algorithm) โดยใช้พื้นที่อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่กำลังขยายตัวทางเศรษฐกิจและมีการพัฒนาพื้นที่เมืองมากขึ้น ดังนั้น การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินจึงเป็นประโยชน์สำหรับแก้ปัญหาและการบริหารจัดการเชิงพื้นที่ รวมถึงการวางผังเมืองในอนาคต ซึ่งในการศึกษานี้ได้จำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เหมืองหิน พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่แหล่งน้ำ และเส้นทางการขนส่ง พร้อมทั้งการประเมินค่าความถูกต้องของผลการจำแนกโดยใช้ตารางประเมินค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa coefficient) ผลการศึกษาพบว่าค่าความถูกต้องโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์แคปปาของชุดข้อมูลเป็น 82.86% และ 82.35% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนภา-2 ของกองทัพอากาศ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน และมีผลการประเมินความถูกต้องในระดับดี

คำสำคัญ: d, กองทัพอากาศ, การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน, การเรียนรู้ของเครื่อง, ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the classification of land use and land cover (LULC) from NAPA-2 satellite of the Royal Thai Air Force. The Support Vector Machine (SVM) algorithm is applied to increase the accuracy of classification in Muak Lek, Saraburi, in which the economic expansion is inextricably linked with the urban development. This study classified six types of LULC: including built-up area, forest area, limestone mining, agriculture area, water body, and transport network. The Assessment of classification accuracy is based on overall accuracy and Kappa coefficient. The results show that the overall accuracy and Kappa coefficients of the datasets are 82.86% and 82.35% respectively. Therefore, it can be concluded that using the datasets of the NAPA-2 satellite of the Royal Thai Air Force can be applied to classify land use and land cover with good quality.

Keywords: NAPA-2 satellite, Royal Thai Air Force, Land use and cover classification, Machine learning, Support vector machine

1. บทนำ

พื้นที่ชุมชนเมืองและสิ่งปลูกสร้างนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการใช้ชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะการย้ายฐิ่นฐานของมนุษย์จากพื้นที่ชนบทเข้าสู่เมืองเพื่อหางานทำและยกระดับคุณภาพชีวิต ประกอบกับการเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจึงทำให้มนุษย์สามารถสร้างสรรค์และประดิษฐ์สิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น กลุ่มอาคารสำนักงาน โรงพยาบาล หมู่บ้านจัดสรร เป็นต้น นอกจากนี้ ประชากรที่ย้ายเข้าสู่เมืองเพิ่มมากขึ้นในทุกเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ และรวมไปถึง จังหวัดเล็ก ๆ ตัวอย่างเช่น จังหวัดสระบุรี ส่งผลให้เกิดการแปลงสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น จากพื้นที่ป่าไม้กลายเป็นพื้นที่ทำกิน ที่อยู่อาศัย ถนน เป็นต้น การขยับขยายพื้นที่เมืองทำให้มีพื้นที่ป่าที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง [1] และส่งผลให้เกิดการเติบโตของเมืองที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน (Urban sprawl) ทำให้ยากต่อการบริหารจัดการเมืองให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต [2] ดังนั้นการสำรวจการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินจึงได้รับความสำคัญมากขึ้น

จากการขยายตัวของเมืองยังให้เกิดการศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทเมืองและสิ่งปลูกสร้าง [3] โดยในปัจจุบันนั้นมีวิธีการการสำรวจอย่างหลากหลาย เช่น การสำรวจทางภาคสนาม การสำรวจจากห้วงอากาศและอวกาศ และการสำรวจที่นิยมสำหรับพื้นที่ในบริเวณกว้าง คือ วิธีการสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ด้วยภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งข้อมูลดาวเทียมในปัจจุบันมีทั้งที่ให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายและมีค่าใช้จ่ายจากผู้ให้บริการต่าง ๆ เช่น ระบบข้อมูลดาวเทียมเซนติเนล (Sentinel) ที่ให้บริการโดยไม่มีค่าใช้จ่ายจากองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency) สำหรับประเทศไทยนั้น โครงการดาวเทียมนภา-2 เป็นดาวเทียมดวงที่ 2 ของกองทัพอากาศที่ยิงขึ้นสู่ชั้นอวกาศสำหรับภารกิจสำรวจทรัพยากรโลก (Earth observation) ซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensors) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยเหลือประชาชนในด้านการแก้ปัญหาเชิงพื้นที่ต่าง ๆ รวมถึงการประยุกต์ใช้เพื่อช่วยเหลือประชาชนในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น เหตุการณ์ภัยพิบัติอย่างทันท่วงทีและมีประสิทธิภาพ

ด้วยโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชกำลังดำเนินการย้ายไปอยู่ ณ ที่ตั้ง อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี เพื่อเป็นการสนับสนุนชุมชนและสร้างภาพลักษณ์ที่ดีของข้าราชการทหารอากาศและกองทัพอากาศ โดยการใช้ทรัพยากรของกองทัพอากาศให้เป็นประโยชน์ต่อพื้นที่ ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ข้อมูลจากดาวเทียมนภา-2 สำหรับการประเมินพื้นที่ส่วนหนึ่งของอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ด้วยการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เพื่อให้การจำแนกมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเพื่อประเมินความถูกต้องของการจำแนกและประเมินค่าความสอดคล้องในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินของอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

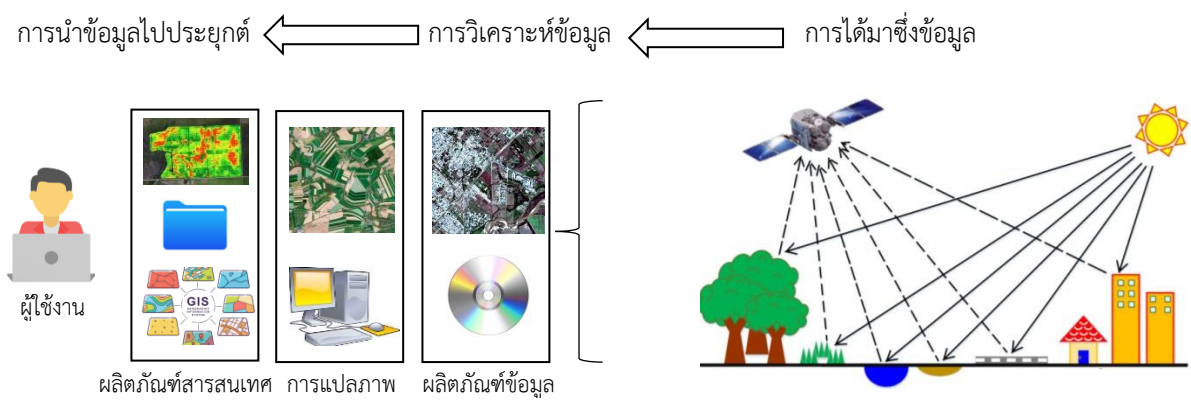
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การรับรู้ระยะไกล

จาก [4] ได้อธิบายรากศัพท์การรับรู้ระยะไกล หรือ Remote sensing ไว้ว่า remote หมายถึงระยะไกล และ sensing หมายถึงการรับรู้ หากตีความหมายตามคำศัพท์ หมายถึง การรับรู้ข้อมูลจากระยะไกลโดยผ่านเครื่องมือโดยผู้รับรู้ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับวัตถุนั้นโดยตรง โดยอีกนัยหนึ่งการรับรู้ระยะไกลเป็นระบบสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับพื้นผิวโลกด้วยเครื่องรับรู้ที่ติดไปกับอากาศยานหรือดาวเทียม ซึ่งตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนมาจากวัตถุบนพื้นโลก หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนเป็นข้อมูลเชิงเลขซึ่งนำไปใช้แสดงเป็นภาพและทำแผนที่ [5]

กระบวนการและองค์ประกอบการรับรู้ระยะไกล

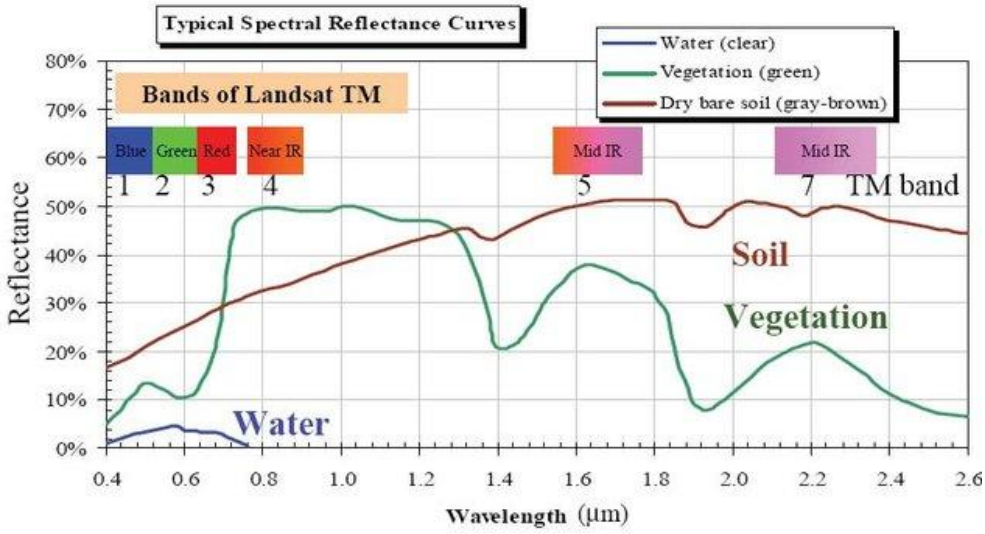
การรับรู้ระยะไกลประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ การได้มาซึ่งข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ ดังแสดงตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการและองค์ประกอบของการรับรู้ระยะไกล [4]

การสะท้อนเชิงสเปกตรัมของสิ่งปกคลุมดิน

วัตถุต่าง ๆ ที่ปกคลุมบนพื้นผิวโลก จะมีปฏิสัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านพลังงานที่แตกต่างกัน จากสมบัติดังกล่าวจะสามารถจำแนกวัตถุชนิดต่าง ๆ ในรูปแบบของลายเซ็นเชิงคลื่น (Spectral signature) ที่มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไป [6] ตัวอย่างเช่น ลายเซ็นเชิงคลื่นของพืชพรรณ (Vegetation) น้ำ (Water) และดิน (Soil) ดังแสดงตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะบ่งชี้เชิงสเปกตรัมของสิ่งปกคลุมดินหรือลายเซ็นเชิงคลื่น [7]

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน

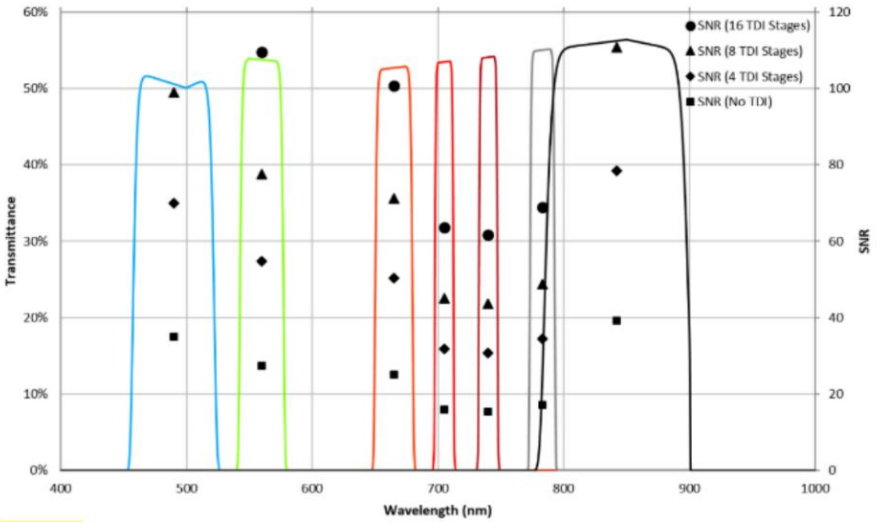
การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use) หมายถึง กิจกรรมของมนุษย์ที่เกิดจากความต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของมนุษย์เอง [8] ในด้านต่าง ๆ เช่น ที่อยู่อาศัย และพื้นที่การเพาะปลูก ในขณะที่สิ่งปกคลุมดิน (Land cover) คือ สิ่งต่าง ๆ ที่ปรากฏหรือปกคลุมพื้นผิวโลก [9] เช่น ทุ่งหญ้า ป่าไม้ แหล่งน้ำ เป็นต้น

ช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องผ่านตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน มาใช้ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินโดยใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม ซึ่งวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเป็นหนึ่งในวิธีการจำแนกแบบกำกับดูแล (Supervised classification) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวข้องกับการจดจำรูปแบบ ตลอดจนการแก้ปัญหา และการจัดกลุ่ม โดยอาศัยหลักการของการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการสอนให้ระบบเรียนรู้ โดยเน้นไปยังเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลได้ดีที่สุด [10]

3. การดำเนินการวิจัย

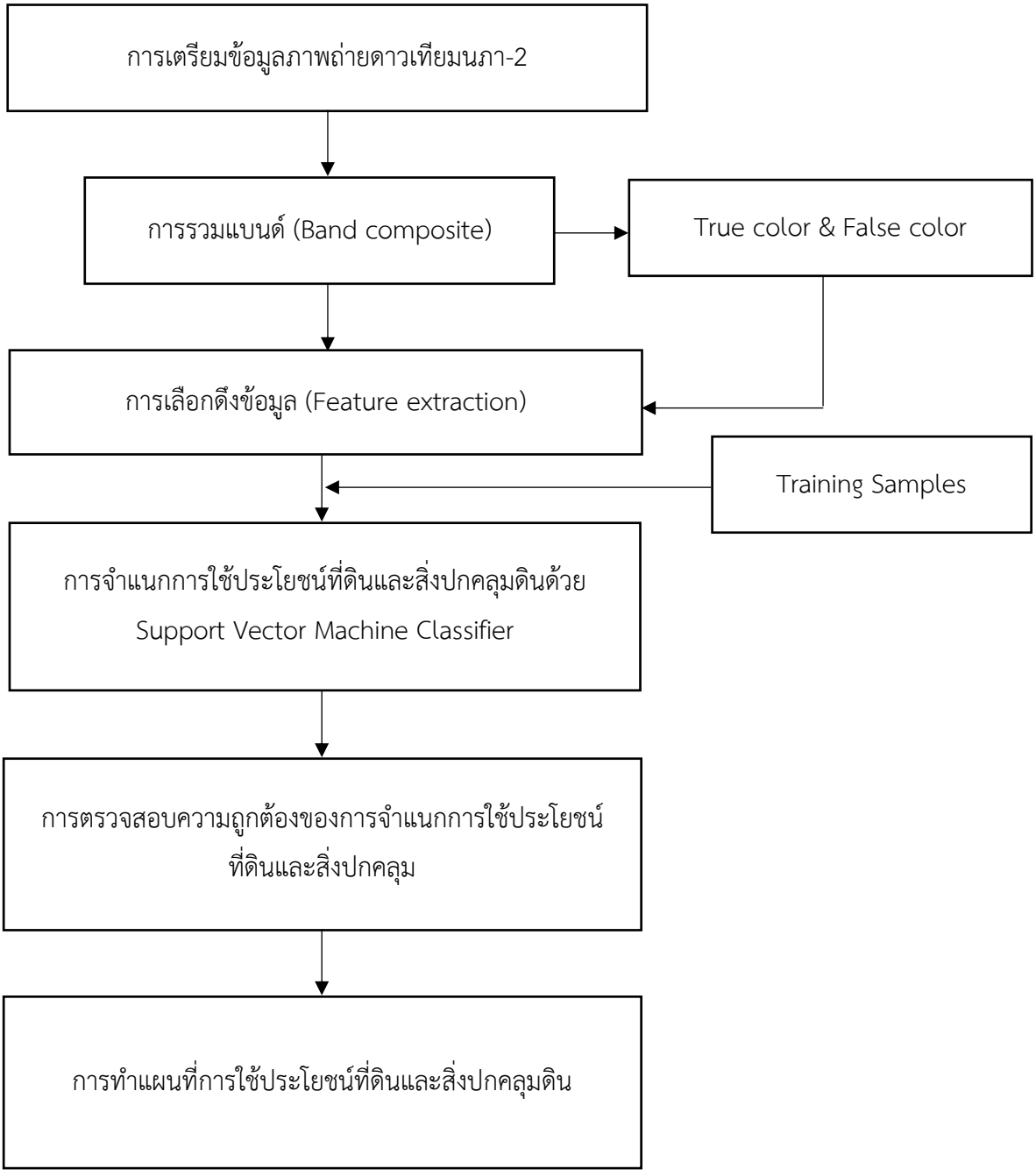
เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ซึ่งใช้เครื่องมือจาก 2 ส่วน คือ 1) ข้อมูลดาวเทียมนภา-2 ของกองทัพอากาศ ซึ่งเป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรโลก มีความละเอียดการถ่ายภาพ 5 เมตร และสามารถตรวจจับข้อมูลภาพได้แบบหลายช่วงความยาวคลื่น (Multispectral bands) ซึ่งประกอบไปด้วย 7 ช่วงความยาวคลื่น คือ ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (Blue) ช่วงคลื่นสีเขียว (Green) ช่วงคลื่นสีแดง (Red) ช่วงคลื่นขอบแดง (Red Edge จำนวน 3 ช่วง) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared) ดังแสดงตามภาพที่ 3 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างของพื้นที่ได้ และ 2) โปรแกรม ArcGIS 10.7.1 ที่เป็นเครื่องมือด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) สำหรับการสร้าง แก้ไข วิเคราะห์ จัดเก็บ และแบ่งปันข้อมูลร่วมกัน เพื่อใช้ในการตัดสินใจเชิงพื้นที่ และสามารถแสดงผลได้ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ



ภาพที่ 3 ข้อมูลความยาวช่วงคลื่นของดาวเทียมนภา-2 [11]

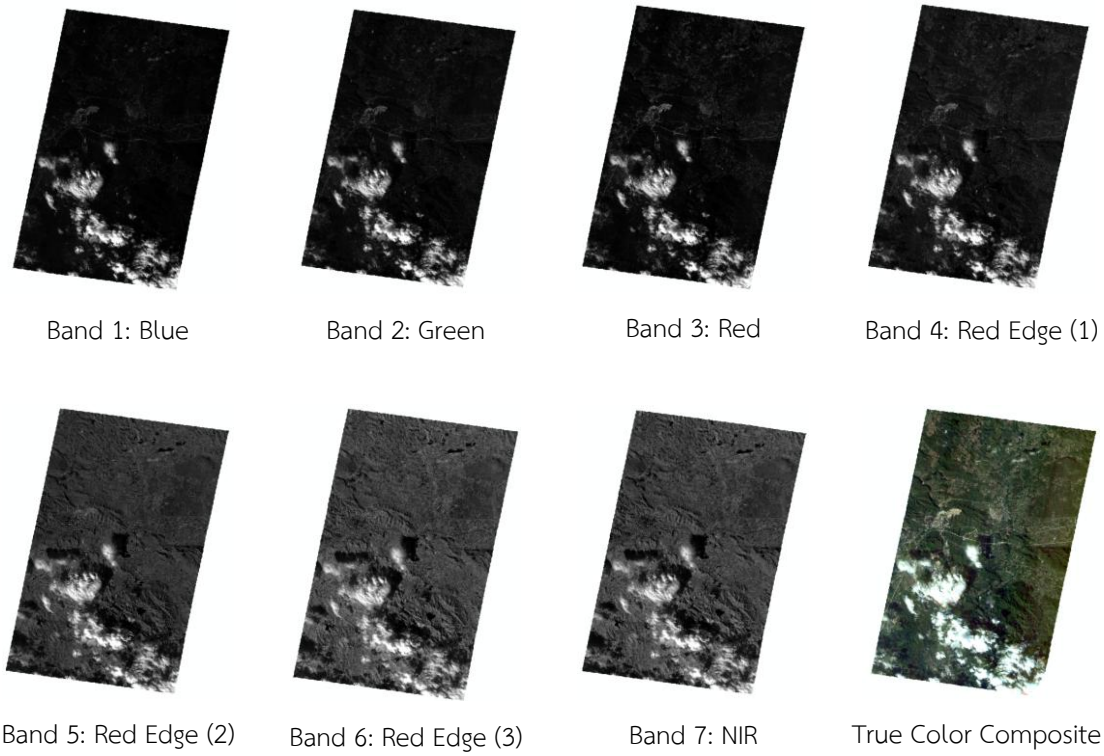
ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา



ภาพที่ 4 กรอบแนวคิดในการศึกษา (Conceptual framework)

การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

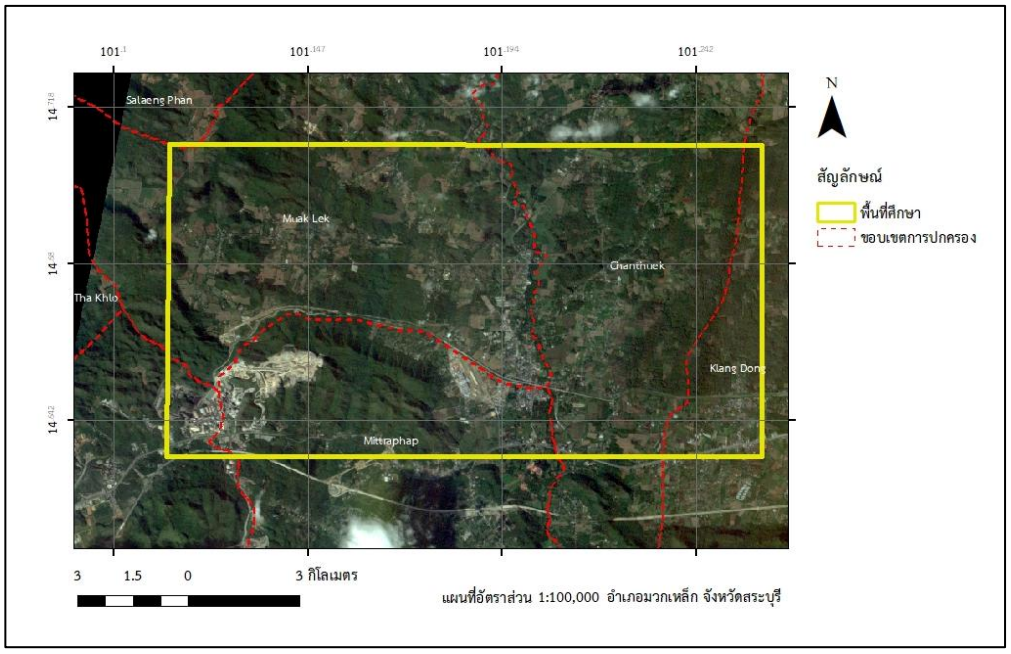
ภาพที่ 4 คือ กรอบแนวคิดการดำเนินการศึกษา โดยเริ่มจากการเตรียมข้อมูลดาวเทียมนภา-2 ที่เป็นภาพถ่ายพื้นที่อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ซึ่งถ่ายไว้เมื่อวันที่ 6 ธันวาคม 2565 โดยประกอบไปด้วยข้อมูลภาพถ่ายจำนวนทั้งหมด 7 แบนด์ (Blue: = ช่วงคลื่นน้ำเงิน, Green: ช่วงคลื่นเขียว, Red: ช่วงคลื่นแดง, Red Edge: ช่วงคลื่นขอบแดง, Near Infrared: ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้) ซึ่งแต่ละแบนด์ถูกแยกกันเป็นชั้น (Layer) ดังแสดงตามภาพที่ 5



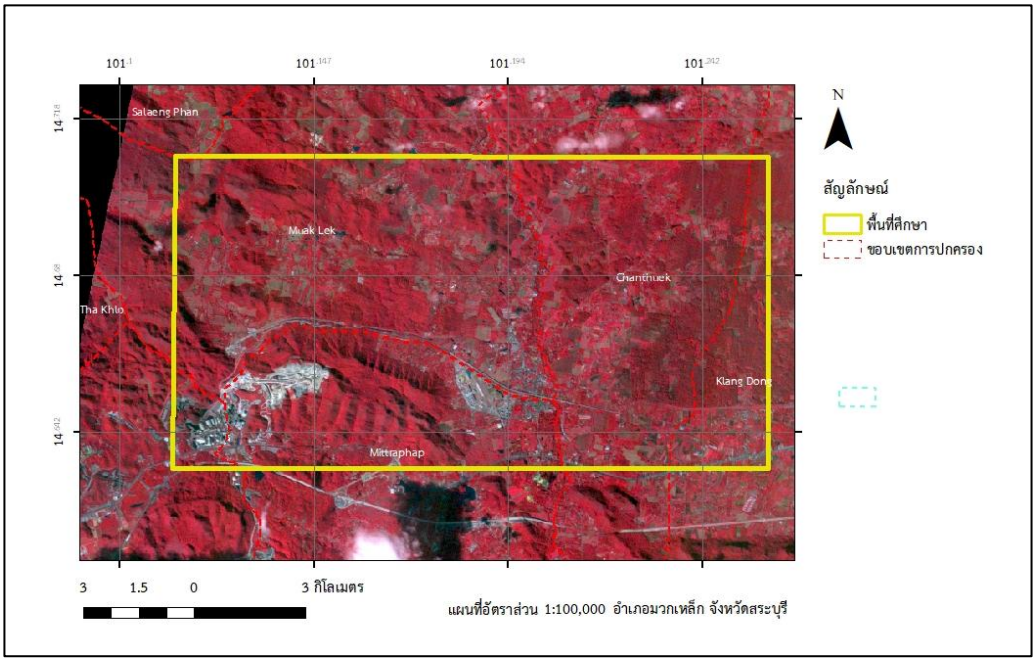
ภาพที่ 5 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนภา-2 ทั้ง 7 แบนด์ และภาพสีผสมตามธรรมชาติ

การรวมแบนด์

ขั้นตอนต่อไปเป็นการรวมแบนด์ (Layer stacking หรือ Band composite) เพื่อให้เกิดภาพสีผสมตามธรรมชาติ (True color composite) ซึ่งเกิดจากการรวมแบนด์ของช่วงคลื่นสีแดง เขียว และน้ำเงิน (Red Green Blue: RGB) และกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา (กรอบพื้นที่สีเหลือง) ดังแสดงเป็นแผนที่ตามภาพที่ 6 นอกจากการรวมแบนด์ให้ได้ภาพสีผสมตามธรรมชาติ การศึกษานี้ยังรวมแบนด์แบบสีผสมเท็จ (False color composite) ซึ่งเกิดจากการรวมแบนด์ของช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ แดง และเขียว (NIR Red Green) ซึ่งเป็นการผสมสีให้พืชพรรณปรากฏเป็นสีแดง ดังแสดงตามภาพที่ 7 ซึ่งถูกใช้ในการช่วยเลือกดึงข้อมูลพื้นที่พืชพรรณสำหรับการฝึกเรียนรู้ (Training) ของเครื่อง



ภาพที่ 6 แผนที่ภาพสีผสมตามธรรมชาติและขอบเขตพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 7 แผนที่ภาพสีผสมเท็จและขอบเขตพื้นที่ศึกษา

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน

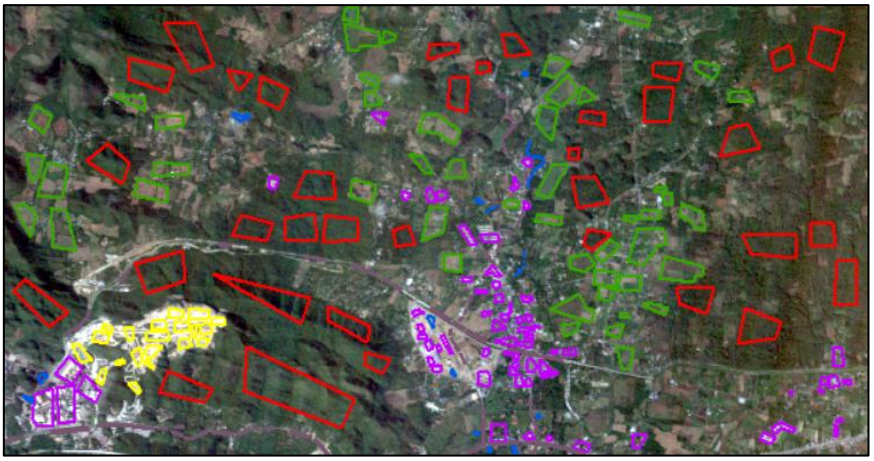
ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำแนกข้อมูลตามประเภทพื้นที่ ซึ่งการจำแนกพื้นที่ทั้งหมดประกอบไปด้วย 6 กลุ่มพื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (Built-up) พื้นที่ป่าไม้ (Forest) พื้นที่เหมืองหิน (Limestone mining) พื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture) พื้นที่แหล่งน้ำ (Water body) และเส้นทางการขนส่ง (Transport network) โดยทำการจำแนกด้วยวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งถูกกำหนดกลุ่มและสัญลักษณ์สี ดังอธิบายในตารางที่ 1

กลุ่มการจำแนก	ชื่อกลุ่ม	สัญลักษณ์สี
1	ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง	
2	ป่าไม้	
3	เหมืองหิน	
4	เกษตรกรรม	
5	แหล่งน้ำ	
6	เส้นทางการขนส่ง	

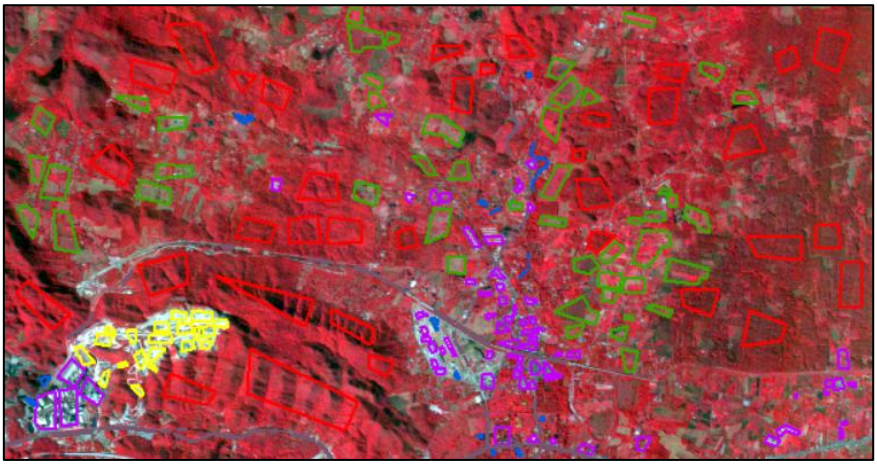
ตารางที่ 1 คำอธิบายกลุ่มการจำแนกและสัญลักษ์แทนด้วยสี

ในขั้นตอนนี้ โดยการใช้โปรแกรม ArcGIS เป็นการเลือกดึงตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่มของแต่ละกลุ่มพื้นที่จากภาพถ่ายดาวเทียม โดยการวาดรูปทรงเลขาคณิต (Polygon) บนพื้นที่ตัวอย่างเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ได้เรียนรู้ว่าพื้นที่ส่วนนั้นคือพื้นที่ประเภทใด โดยการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลภาพดาวเทียมทั้ง 2 แบบ คือ ภาพสีผสมตามธรรมชาติ (ภาพที่ 8ก) และภาพสีผสมเท็จ (ภาพที่ 8ข) เพื่อช่วยเลือกดึงตัวอย่างข้อมูลจำพวกพื้นที่ต่าง ๆ ให้ง่ายขึ้น

หลังจากการดึงข้อมูลตัวอย่าง ขั้นตอนต่อไปเป็นการให้คอมพิวเตอร์ฝึกเรียนรู้ข้อมูลตัวอย่างดังกล่าวด้วยตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่เรียนรู้และจัดกลุ่มประเภทพื้นที่จากค่าทางสถิติการสะท้อนช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกลุ่มพื้นที่ต่าง ๆ และเมื่อคอมพิวเตอร์ได้ผ่านกระบวนการเรียนรู้ ขั้นตอนต่อไปคือให้คอมพิวเตอร์จำแนกกลุ่มพื้นที่ต่าง ๆ ที่กำหนด ในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ซึ่งความถูกต้องจะมากน้อยเพียงใดก็อยู่บนฐานของปริมาณและความถูกต้องของข้อมูลตัวอย่างที่คอมพิวเตอร์ได้เรียนรู้มาก่อนหน้านี้



(ก) ภาพสีผสมตามธรรมชาติ



(ข) ภาพสีผสมเท็จ

ภาพที่ 8 การเลือกดึงตัวอย่างข้อมูลเพื่อให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้

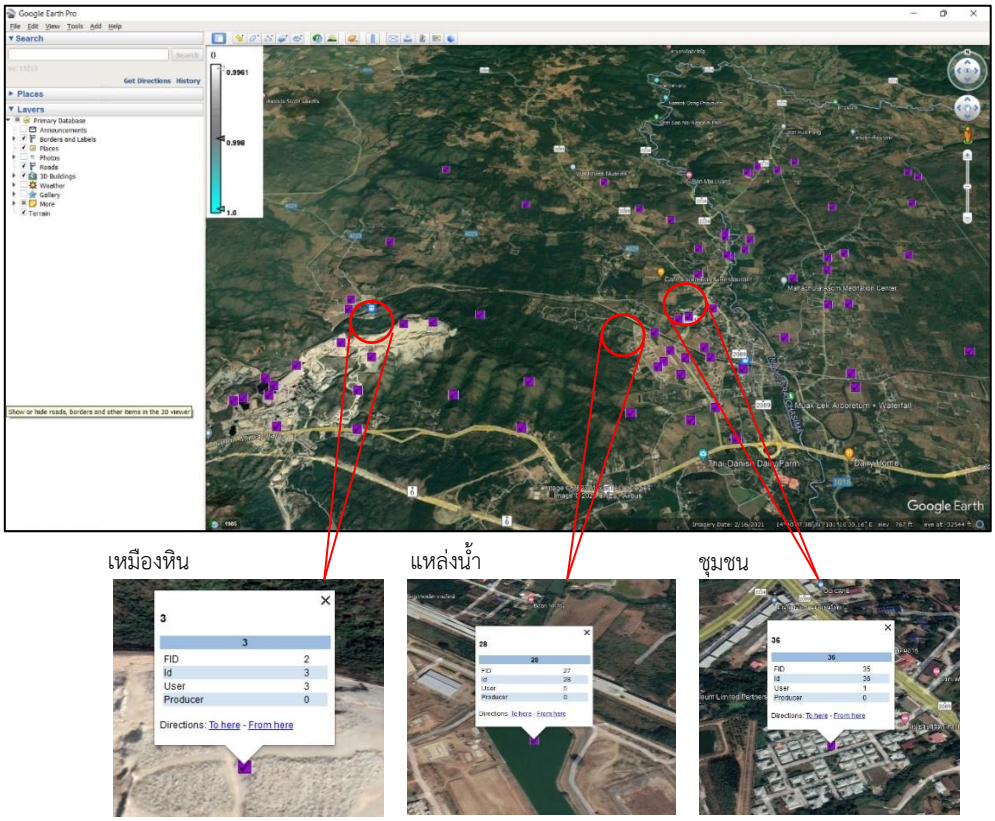
การตรวจสอบความถูกต้องของการการจำแนก

หลังจากขั้นตอนการจำแนกด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ขั้นตอนต่อไปคือการดำเนิน การประเมินความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพซึ่งใช้ข้อมูลที่ใช้สำหรับอ้างอิงในการตรวจสอบความถูกต้องในโปรแกรม ArcGIS และทดสอบความแม่นยำด้วยเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน (Confusion matrix) ทั้งในด้านความถูกต้องของผู้จำแนก (Producer's accuracy) และความถูกต้องของผู้ใช้ (User's accuracy) เพื่อคำนวณหาค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องแคปปา (Kappa coefficient) ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องและความสอดคล้องของผลการจำแนกกับจุดตรวจสอบ โดยค่าความถูกต้องโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์แคปปา สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Overall\ accuracy = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_{ii}}{N} \quad (1)$$

$$Kappa\ coefficient = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_{ii} - \sum_{i=1}^{k}(n_{i+} \times n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{k}(n_{i+} \times n_{+i})} \quad (2)$$

โดยที่ k คือ จำนวนแถว (ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน); n_{ii} คือ ผลรวมของแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน; n_{i+} คือ ผลรวมของแถวของเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน; n_{+i} คือ ผลรวมของคอลัมน์ของเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน; และ N คือ จำนวนจุดตรวจสอบทั้งหมด



ภาพที่ 9 การใช้จำนวนจุดตรวจสอบโดยอาศัยการสำรวจจากกูเกิลเอิร์ธ

การดำเนินการประเมินความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพทำได้โดยการสร้างจุดสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นเพื่อสำรวจการใช้ที่ดินที่ได้จากการแปลความหมายข้อมูลภาพดาวเทียมรวมทั้งหมด 70 จุด และเทียบผลกับสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินตามจริงโดยอาศัยการสำรวจจากกูเกิลเอิร์ธ (Google Earth) ดังแสดงตัวอย่างตามภาพที่ 9

4. ผลการวิจัย

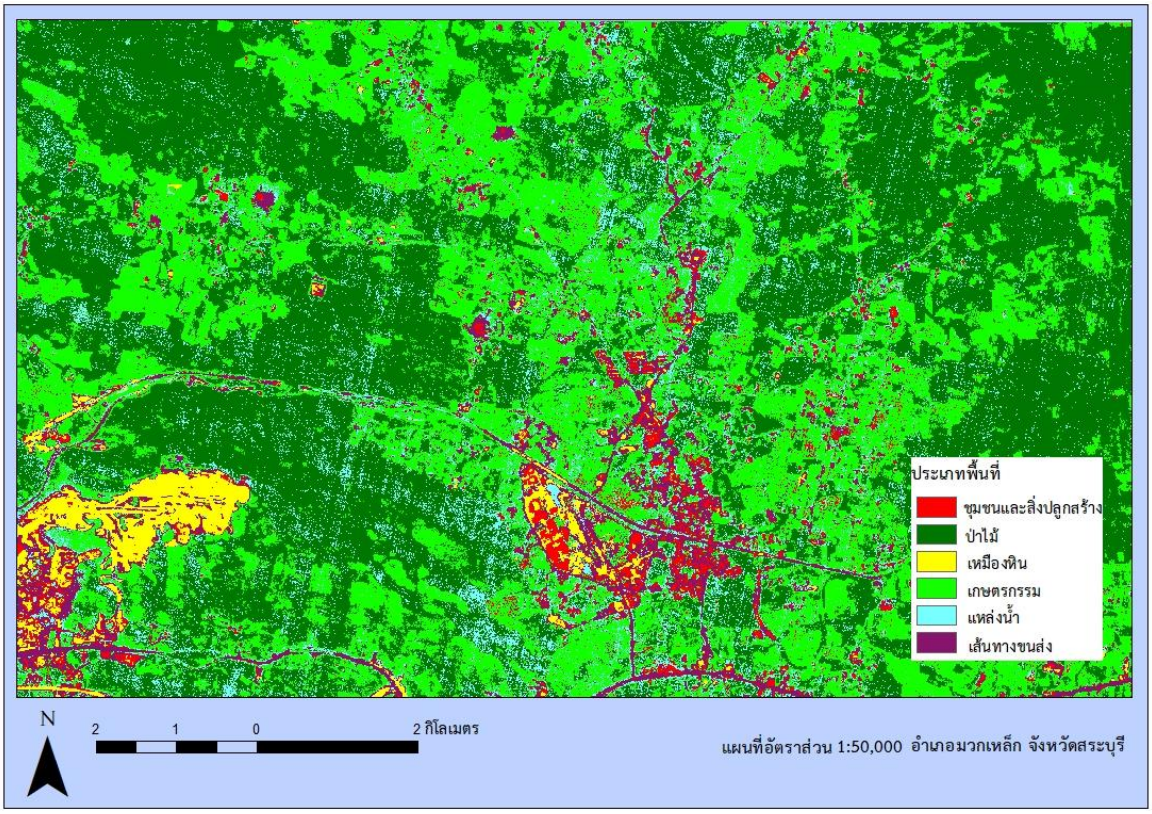
ผลการประเมินความถูกต้องของการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินแบบควบคุมกำกับ ดูแล โดยวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนให้ค่าความถูกต้องโดยรวม 82.86% และค่าของสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องแคปปามีค่า 82.35% ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2

ประเภทพื้นที่	ชุมชน/สิ่งปลูกสร้าง	ป่าไม้	เหมืองหิน	เกษตรกรรม	แหล่งน้ำ	เส้นทางขนส่ง	รวม	ความถูกต้องของผู้ใช้ (%)
ชุมชน/สิ่งปลูกสร้าง	16	0	0	1	0	0	17	94.12
ป่าไม้	0	10	0	0	0	0	10	100.00
เหมืองหิน	4	0	5	0	0	0	9	55.56
เกษตรกรรม	0	1	0	13	0	0	14	92.86
แหล่งน้ำ	0	1	2	0	4	3	10	40.00
เส้นทางขนส่ง	0	0	0	0	0	10	10	100.00
รวม	20	12	7	14	4	13	70	-
ความถูกต้องของผู้จำแนก (%)	80.00	83.33	71.43	92.86	100.00	76.92	-	-
ค่าความถูกต้องโดยรวม = 82.86 %								
สัมประสิทธิ์แคปปา = 82.35 %								

ตารางที่ 2 ตารางการประเมินความถูกต้องของการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในด้านความถูกต้องของผู้ใช้มีค่าการประเมินระดับดีมาก (92.86 – 100.00%) คือ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรกรรม และเส้นทางการขนส่ง ในขณะที่พื้นที่เหมืองหินและแหล่งน้ำมีค่าการประเมินค่อนข้างต่ำ คือ 55.56% และ 40.00% ตามลำดับ ส่วนการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในด้านความถูกต้องของผู้จำแนกมีค่าการประเมินในทุก ๆ ประเภทนั้น มีระดับปานกลางจนถึงระดับดีมาก เช่นระดับปานกลาง คือ พื้นที่เหมืองหินและเส้นทางการขนส่งมีค่าความถูกต้อง 71.43% และ 76.92% ตามลำดับ ในระดับดี คือ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างและพื้นที่ป่าไม้ มีค่าความถูกต้อง 80.00% และ 83.33% ตามลำดับ และสุดท้ายระดับดีมาก คือ พื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่แหล่งน้ำ มีค่าความถูกต้อง 92.86% และ 100.00% ตามลำดับ

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนภา-2 ของกองทัพอากาศประยุกต์ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้วิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน สามารถผลิตเป็นแผนที่ได้ การใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินของพื้นที่ในอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ดังแสดงตามภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนที่การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

สามารถอภิปรายผลการประเมินการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินจากการใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนภา-2 ได้ว่าผลการศึกษามีค่าความถูกต้องโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์แคปปาในระดับดี เนื่องจากภาพมีค่าความคมชัดระดับ 5 x 5 เมตร และมีอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้หลายช่วงคลื่น ทำให้ข้อมูลภาพสามารถนำมารวมแบนด์ได้ทั้งแบบภาพสีผสมตามธรรมชาติและภาพสีผสมเท็จ รวมถึงการประยุกต์ใช้ตัวจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถแปลผลได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ป่าไม้ และพื้นที่เกษตรกรรมที่มีค่าการประเมินความถูกต้องสูง อย่างไรก็ตาม การจำแนกพื้นที่บางประเภท เช่น พื้นที่แหล่งน้ำ อาจมีการประเมินค่าที่ไม่ดีมากนัก เนื่องจากแหล่งน้ำมีคุณสมบัติดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดใกล้ ดังนั้น แหล่งน้ำในภาพถ่ายดาวเทียมจะมีลักษณะมืด (โดยเฉพาะเมื่อทำภาพสีผสมเท็จ) ดังนั้น ข้อมูลที่คอมพิวเตอร์เรียนรู้จากข้อมูลแหล่งน้ำอาจไปทำให้เกิดข้อบกพร่องในการตีความระหว่างน้ำกับเงาของแสงจากดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นบนพื้นโลก ตัวอย่างเช่น บริเวณภูเขาที่แสงตกกระทบด้านหนึ่ง ก็ทำให้เกิดเงามืดในฝั่งตรงข้าม การตีความของคอมพิวเตอร์จึงอาจตีความเป็นแหล่งน้ำได้ ดังนั้น

ช่วงเวลาของวัน (มุมดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีแสงมาตกกระทบกับวัตถุบนพื้นโลก) จึงมีความสำคัญกับคุณภาพภาพถ่ายดาวเทียม และอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่นั้น ๆ

5. สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินจากข้อมูลดาวเทียมนภา-2 เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ดาวเทียมของกองทัพอากาศให้เกิดประโยชน์กับประเทศไทย โดยการศึกษานี้ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง คือ อัลกอริทึมซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนก โดยใช้พื้นที่กรณีศึกษา คือ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ซึ่งในการศึกษานี้ได้จำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภท ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เหมืองหิน พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่แหล่งน้ำ และเส้นทางการขนส่ง พร้อมประเมินค่าความถูกต้องของผลการจำแนกโดยใช้ตารางประเมินค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์แคปปา โดยผลการศึกษาพบว่าค่าความถูกต้องโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์แคปปาในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินมีผลในระดับดี

ในด้านของการใช้ประโยชน์ของดาวเทียมนภา-2 นั้น ถือว่าเป็นทรัพยากรของกองทัพอากาศที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อภาครัฐ ภาคเอกชน รวมถึงประชาชน ในด้านการแก้ปัญหาและการบริหารจัดการเชิงพื้นที่ ดังนั้นการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินบริเวณพื้นที่อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ในการศึกษานี้ จะเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ข้อมูลดาวเทียมนภา-2 ของกองทัพอากาศในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศไทยได้ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการทางอวกาศกองทัพอากาศ ที่สนับสนุนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนภา-2 เพื่อการศึกษาและวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] เปรมศิริ คงเส้ง., "การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินของจังหวัดภูเก็ต จากภาพดาวเทียมแลนด์แซท 8 ด้วยคุณสมบัติทางชีพลักษณ์," วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2560.

[2] จิตรภณ สุนทร, "การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตอำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม," *Veridian E-J., Silpakorn Univ. (ฉบับภาษาไทย สาขามนุษยศาสตร์สังคมศาสตร์ และศิลปะ)*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, น. 82-95, 2561.

[3] ณยศ กุลพานิช, มรกต วรชัยรุ่งเรือง และ พรสมิทธิ์ ฉายสมิทธิกุล, "การสำรวจหาพื้นที่เมืองและสิ่งปลูกสร้างของจังหวัดนครปฐมด้วยวิธีการสำรวจระยะไกล จากดาวเทียม Landsat 8 และ Sentinel 2," *ว. สวนสุนันทาวิชาการและวิจัย*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, น. 44-55, 2563.

[4] ชูเดช โลศิริ., ภูมิศาสตร์เทคนิค: บทที่ 3 การรับรู้ระยะไกล. กรุงเทพฯ: ด่านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, 2559.

[5] ราชบัณฑิตยสถาน, พจนานุกรมศัพท์ภูมิศาสตร์: ฉบับราชบัณฑิตยสถาน, พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: ราชบัณฑิตยสถาน, 2549.

[6] ขัตติยานี ศรีแฉล้ม, สุพรรณ กาญจนสุธรรม, แก้ว นวลฉวี และ ณรงค์ พลีรักษ์, "การศึกษาค่าสะท้อนพลังงานของมันสำปะหลังจากข้อมูลดาวเทียม ในเขตอำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา," *ว. วิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 3, น. 12-22, 2561.

[7] Brojan, V., Kannan, B., and Sivasamy, R., "Geoinformatic tools in insect pest management," in Functional Insect Pest Management, A.E. Publications, 2014, Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/305379622_Geoinformatic_Tools_in_Insect_Pest_Management

[8] วัฒนชัย สายวงศ์คา และธนวันต์ เย็นฉ่ำ, "การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการจัดการปริมาณน้ำทางการเกษตร กรณีศึกษา ตำบลท่านางงาม อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ในปี พ.ศ. 2554," วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาภูมิศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก, 2554

[9] สุรัสวดี อิฐรัตน์, ภูมิศาสตร์เทคนิค: บทที่ 2 ภาพถ่ายทางอากาศและการตีความ. กรุงเทพฯ: ด่านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, 2559.

[10] ทรัน วัน นินห์ และ ชาติชาย ไวยสุระสิงห์, "การศึกกษาเปรียบเทียบวิธีแบบความน่าจะเป็นได้สูงที่สุด กับ วิธีแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในการวิเคราะห์ข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในเมืองขอนแก่น," *ว. วิจัย ม. ขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 4, น. 49-60, 2560.

[11] Hugo Brouwer et al., "Multi-Spectral Imaging from LEO: High-Resolution Images and Data from the NAPA-2 Turn-Key Mission," presented at the 36th Annual Small Satellite Conference, Utah State University, Logan, United States, 2022.

การศึกษาการทดสอบระเบิดยานเกราะด้วยหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569

A Study on Blast Testing of Armored Vehicles using Anthropomorphic Test Device in Accordance with NATO AEP-55 STANAG 4569

สถาพร ไผ่แผน[1], กิตติธัช ถนอมพงษ์ชาติ[2], ณรงค์กร เดินหลักคำ[3*] และ ณัฐภัทร คุ้มปรีดี[4]

ศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

Sataporn Paipan[1], Kittituch Thanompongchart[2], Narongkorn Doenlakkham[3*] and Nuttapat Coompreedee[4]

Defence & Security Standard Test Centre, Defence Technology Institute, 47/433 Office of the Permanent Secretary of Defence Building, Chaengwattana Road, Pakkred, Nonthaburi 11120

narongkorn.d@dti.or.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทดสอบระเบิดยานเกราะด้วยหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ (Anthropomorphic Test Device: ATD) โดยเริ่มจากศึกษาวิวัฒนาการของหุ่นทดสอบตั้งแต่อดีต ซึ่งในระยะแรกได้มีการใช้สัตว์ทดลอง ซากศพมนุษย์ และอาสาสมัครจริง จากนั้นได้มีการพัฒนาเข้าสู่ยุคของหุ่นทดสอบรุ่นแรก ได้แก่ รุ่น Sierra Sam และ รุ่น VIP-50 ต่อมาในช่วงการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านยานยนต์ ได้มีการสร้างหุ่นทดสอบรุ่น Hybrid I และ รุ่น Hybrid II จนกระทั่งพัฒนาเข้าสู่ยุคมาตรฐานสากลด้วยหุ่นทดสอบรุ่น Hybrid III ซึ่งเป็นหุ่นทดสอบหลักที่ใช้ในปัจจุบัน

จากการศึกษานี้ทำให้ได้แนวทางการพัฒนาหุ่นทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้ในการทดสอบและประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางต่อภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิด ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 โดยการสร้างหุ่นทดสอบและติดตั้งเครื่องวัดในตำแหน่งวิกฤติของร่างกายมนุษย์เพื่อใช้วัดค่าทางกลศาสตร์ ได้แก่ แรงกระทำ ความเร่ง ความเร็ว และโมเมนต์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ผลที่จะได้จากการพัฒนาหุ่นทดสอบนี้ จะสามารถลดต้นทุนได้จำนวนมากเมื่อเทียบกับการซื้อหุ่นทดสอบจากต่างประเทศ อีกทั้งยังเป็นการสนับสนุนอุตสากรรมความมั่นคงภายในประเทศ โดยสามารถนำไปใช้ให้บริการทดสอบแก่หน่วยงานภาครัฐ หน่วยงานทางทหาร และภาคเอกชน ทำให้ลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาได้อย่างมาก

คำสำคัญ: Blast Testing, Anthropomorphic Test Device, NATO AEP-55 STANAG 4569

Abstract

This research investigates the blast testing of armored vehicles using an Anthropomorphic Test Device (ATD). The study begins with an examination of the historical evolution of ATDs, tracing their development from the early stages when animal subjects, human cadavers, and live volunteers were used. Subsequently, the first generation of test dummies was introduced, including the *Sierra Sam* and *VIP-50* models. With advancements in the automotive industry, the *Hybrid I* and *Hybrid II* models were developed, leading to the establishment of international standards with the *Hybrid III* model, which remains the primary test device in current use.

Based on this study, a development framework for an ATD was established to be applied in testing and evaluating the protection level of armored vehicles against explosive and mine threats in accordance with NATO AEP-55 STANAG 4569. The ATD was constructed and instrumented with sensors at critical body locations to measure mechanical parameters such as force, acceleration, velocity, and moment. The collected data were processed and analyzed to evaluate occupant survivability according to standardized criteria. The development of this ATD demonstrated significant potential for reducing testing costs compared to importing the ATD from abroad. Moreover, it supports the domestic defence industry by enabling testing services for military, governmental, and private sector organizations, reducing expenses and turnaround for overseas testing.

Keywords: Blast Testing, Anthropomorphic Test Device, NATO AEP-55 STANAG 4569

1. บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ (Anthropomorphic Test Device: ATD) โดยเริ่มตั้งแต่ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และศึกษาวิวัฒนาการของหุ่นจำลองการทดสอบแทนมนุษย์ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยสามารถแบ่งช่วงการพัฒนาออกเป็น 4 ยุค ได้แก่ ยุคเริ่มต้น ยุคพัฒนาเข้าสู่วงการยานยนต์ ยุคมาตรฐานสากล และยุคปัจจุบันและอนาคต ทำให้เห็นวิวัฒนาการของหุ่นจำลองการทดสอบเริ่มมาตั้งแต่การใช้สัตว์ทดลอง ซากศพมนุษย์ อาสาสมัคร จากนั้นได้มีการพัฒนามาเป็นหุ่นจำลองการทดสอบแทนมนุษย์ ได้แก่ หุ่นจำลองการทดสอบ รุ่น Sierra Sam รุ่น VIP-50 รุ่น Hybrid I รุ่น Hybrid II และ รุ่น Hybrid III ซึ่งเป็นหุ่นทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบัน

จากนั้นได้ศึกษาข้อกำหนดและรายละเอียดของมาตรฐานการประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิด ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 เพื่อเป็นข้อมูลนำมาออกแบบและพัฒนาในการเตรียมการสร้างหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ของศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง โดยการสร้างหุ่นทดสอบและติดตั้งเครื่องวัดในตำแหน่งวิกฤติของร่างกายมนุษย์เพื่อใช้วัดค่าทางกลศาสตร์ ได้แก่ แรงกระทำ ความเร่ง ความเร็ว และโมเมนต์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

ผลจากการศึกษาวิจัยนี้ ทำให้เข้าใจวิวัฒนาการของหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ และได้แนวทางการประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 ดังแสดงในหัวข้อที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และได้แนวทางการดำเนินการวิจัยในหัวข้อที่ 4 และสรุปผลการศึกษาวิจัยในหัวข้อสุดท้าย

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาวิจัยการสร้างหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ (ATD) รุ่น Hybrid III อ้างอิงตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineers, SAE)

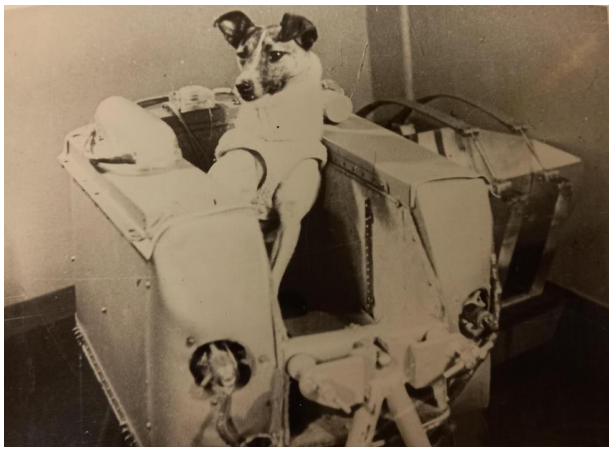
2.2 เพื่อศึกษาการทดสอบการประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิด ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569

2.3 เพื่อเตรียมการพัฒนาหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ ของศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ให้สามารถให้บริการทดสอบเพื่อสนับสนุนอุตสากรรมความมั่นคงภายในประเทศ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

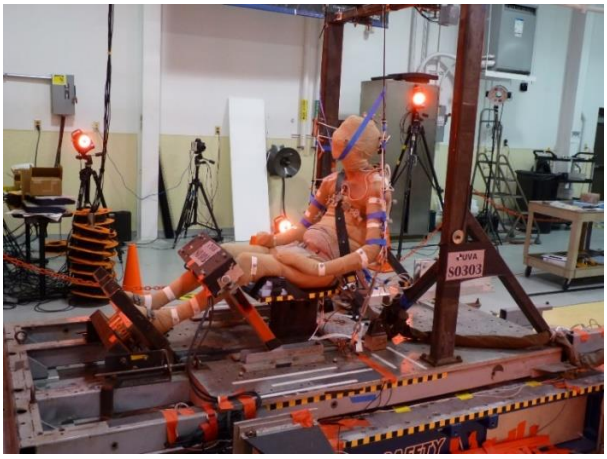
3.1 วิวัฒนาการของหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ (Anthropomorphic Test Device, ATD)

ยุคเริ่มต้น (ทศวรรษ 1930 – 1940: Animal, Cadaver, Volunteer) : ก่อนจะมีการใช้หุ่นทดสอบแทนมนุษย์ นักวิจัยเคยใช้สัตว์ทดลอง (Animal Testing) เช่น ลิง สุกร สุนัข เป็นต้น เพื่อใช้ในการศึกษาการได้รับผลกระทบจากการทดลองแทนมนุษย์ เช่น การทดลองส่งสุนัข ไลก้า [1,2] ของสหภาพโซเวียต ซึ่งกลายเป็นสัตว์ตัวแรกของโลกที่โคจรรอบโลกในภารกิจยานอวกาศสปุตนิก 2 และคาดว่าไลก้าน่าจะตายภายในไม่กี่ชั่วโมงหลังปล่อยยานอวกาศ แต่อย่างไรก็ดีการทดลองนี้ได้พิสูจน์ว่าไลก้าสามารถรอดชีวิตจากการปล่อยยานขึ้นสู่วงโคจรและทนต่อสภาวะไร้น้ำหนักได้ ซึ่งถือว่าเป็นการเริ่มต้นของวงการบินอวกาศของมนุษย์ และให้ข้อมูลข้างต้นบางส่วนให้แก่นักวิทยาศาสตร์ว่าสิ่งมีชีวิตมีการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมในการบินอวกาศอย่างไร



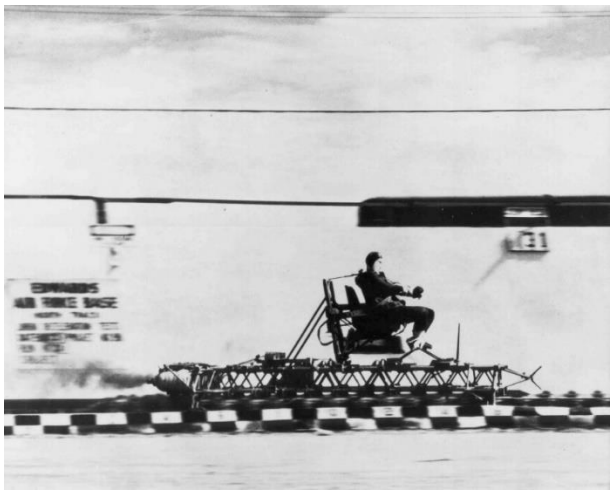
รูปที่ 1 ไลก้า สัตว์ตัแรกที่โคจรรอบโลก (เอกสารอ้างอิง [1,2])

การใช้สัตว์ในการทดลองยังถือว่าเป็นตัวแทนร่างกายมนุษย์ไม่ได้ทั้งหมด เนื่องจากมีสรีระร่างกายที่ต่างจากมนุษย์ ต่อมาจึงได้มีการใช้ศพของมนุษย์ (Cadaver Testing) มาใช้ในการทดสอบจริง ในช่วงปลายทศวรรษ 1930 โดยมหาวิทยาลัยเวย์นสเตต (Wayne State University) [2] ในเมืองดีทรอยต์เป็นมหาวิทยาลัยแห่งแรกที่เริ่มงานวิจัยอย่างจริงจังเกี่ยวกับการรวบรวมข้อมูลผลกระทบของการชนด้วยความเร็วสูงต่อร่างกายมนุษย์ แต่ก็ยังไม่มีข้อมูลที่เชื่อถือได้ว่าร่างกายมนุษย์ตอบสนองต่อแรงที่รุนแรงฉับพลันที่กระทำต่อร่างกายอย่างไรในการเกิดอุบัติเหตุทางรถยนต์ เพราะตอนนั้นยังไม่มีเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพในการวัดการตอบสนองดังกล่าว อีกทั้งยังมีประเด็นเรื่องจริยธรรมกับศีลธรรมเกี่ยวกับการทำงานกับศพอีกด้วย



รูปที่ 2 ศพมนุษย์ใช้สำหรับทดสอบการชน (เอกสารอ้างอิง [2])

อาสาสมัคร (Volunteer Testing) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้คนจริงๆ ในการทดสอบ ดังที่มีการบันทึกไว้ในปี พ.ศ. 2497 พันเอก จอห์น ปอล สแตปป์ (Colonel John Paul Stapp) [2] แห่งกองทัพอากาศสหรัฐฯ ทำการทดสอบโดยนั่งบนรถรางเลื่อนที่ขับเคลื่อนด้วยจรวดที่มีความเร็วมากกว่า 1,000 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือกรณี ลอว์เรนซ์ แพทริค (Lawrence Patrick) [2] ซึ่งขณะนั้นเป็นศาสตราจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเวย์นสเตต ได้ทดลองนั่งรถเลื่อนจรวดประมาณ 400 ครั้ง เพื่อทดสอบผลกระทบของการลดความเร็วอย่างรวดเร็วต่อร่างกายมนุษย์ อย่างไรก็ดีถึงแม้จะเป็นตัวแทนการทดสอบโดยใช้มนุษย์จริง แต่ก็ถือว่ามีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายต่ออาสาสมัครได้



รูปที่ 3 อาสาสมัครมนุษย์ทดสอบนั่งบนรถรางเลื่อนที่ขับเคลื่อนด้วยจรวด (เอกสารอ้างอิง [2])

ยุคหุ่นทดสอบแทนมนุษย์รุ่นแรก (ทศวรรษ 1950 – 1960 : Sierra Sam, VIP-50) : หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพสหรัฐฯ ได้เริ่มตระหนักถึงความสำคัญของความปลอดภัยของนักบินและทหาร จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบจากแรงกระแทกต่อร่างกายมนุษย์ โดยได้สร้างหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ตัวแรกขึ้นมาชื่อ Sierra Sam [2,3] โดย Samuel W. Alderson ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของเขาที่ Alderson Research Labs (ARL) และร่วมกับบริษัท Sierra Engineering Company เพื่อใช้ในการทดสอบเบาะดีดตัว หมวกนิรภัย และสายรัดนิรภัยของนักบิน [3,4]

รูปที่ 4 หุ่นทดสอบแทนมนุษย์รุ่นแรก Sierra Sam (เอกสารอ้างอิง [3])

นอกจากนั้น Alderson ยังได้สร้างหุ่นทดสอบรุ่น VIP-50 [2] ซึ่งสร้างขึ้นโดยเฉพาะในงานทดสอบอุตสาหกรรมยานยนต์ให้กับ บริษัท เจเนอรัลมอเตอร์ และ บริษัท ฟอร์ด และผลงานดังกล่าวนี้ยังได้รับการยอมรับจากสำนักงานมาตรฐานแห่งชาติ (National Bureau of Standards) ของสหรัฐฯ แต่อย่างไรก็ตามหุ่นทดสอบแทนมนุษย์เหล่านี้ยังถือว่าเป็นหุ่นทดสอบยุคเริ่มต้น มีโครงสร้างที่แข็ง ไม่ยืดหยุ่น และยังติดตั้งเซนเซอร์ได้จำกัด

ยุคพัฒนาเข้าสู่วงการยานยนต์ (ทศวรรษ 1960 – 1970: Hybrid I, Hybrid II) : เมื่อเข้าสู่ยุคที่อุตสาหกรรมยานขยายตัวอย่างรวดเร็ว และสิ่งที่เป็นเงาตามตัวมาคืออุบัติเหตุจากรถยนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ดั้งนั้น หน่วยงานความปลอดภัยต่างๆ จึงได้มีข้อกำหนดเพิ่มขึ้นมาในด้านความปลอดภัย ซึ่งขณะนั้น บริษัท เจเนอรัลมอเตอร์ กำลังพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบอยู่นั้นก็พบว่าหุ่นทดสอบยังไม่สมบูรณ์และไม่ตอบโจทย์ความต้องการทั้งหมด ทางบริษัทฯ จึงได้ร่วมมือกับสมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineers, SAE) โดยทีมวิศวกรได้ผสมผสานข้อดี

ของหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ตระกูล Sierra และตระกูล VIP เข้าด้วยกันกลายเป็นหุนทดสอบแทนมนุษย์ รุ่น Hybrid I [2] ในปี ค.ศ. 1971 ที่เป็นตัวแทนผู้ชายโดยเฉลี่ย 50 เปอร์เซ็น (50^{th} percentile male) ทั้งด้านสัดส่วน ความสูง และน้ำหนัก ที่ใกล้เคียงมนุษย์มากขึ้น และสามารถบันทึกค่าแรงและความเร่งได้แม่นยำขึ้น

นับจากนั้นเป็นต้นมา หุ่นทดสอบแทนมนุษย์สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ก็พัฒนาต่อเนื่องมา และได้กำเนิดหุ่นทดสอบรุ่นต่อมา คือ Hybrid II [2] ในปี ค.ศ. 1972 ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น สามารถวัดการตอบสนองและสามารถบันทึกข้อมูลที่จุดสำคัญได้ เช่น ไหล่ กระดูกสันหลัง หัวเข่า เป็นต้น และ Hybrid II กลายเป็นหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ตัวแรกที่ถูกใช้ในการทดสอบเพื่อกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยยานยนต์ สำหรับการทดสอบเข็มขัดนิรภัย บริเวณตักและไหล่ของรถยนต์ โดยสำนักงานบริหารความปลอดภัยการจราจรบนทางหลวงแห่งชาติ (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)

รูปที่ 5 หุ่นทดสอบแทนมนุษย์ รุ่น Hybrid II (เอกสารอ้างอิง [2])

ยุคมาตรฐานสากล (ทศวรรษ 1970 – ปัจจุบัน: Hybrid III) : ยุคมาตรฐานสากล เป็นยุคที่มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมยานยนต์ถึงขั้นสูงสุด และเป็นยุคที่สถาบันมาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับยานยนต์ทั้งระดับชาติและระดับนานาชาติ ก็มีข้อกำหนดด้านความปลอดภัยที่สูงขึ้น เพื่อเป็นมาตรฐานสากล และเป็นการป้องกันอันตรายและลดการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุของยานยนต์ จึงทำให้การพัฒนาหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ ต้องมีการพัฒนาต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงรุ่น Hybrid III [2] ในปี ค.ศ. 1976 ซึ่งถือว่าเป็นหุ่นทดสอบที่สำคัญที่สุด ใช้กันแพร่หลายทั่วโลก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ และถูกใช้จนถึงปัจจุบัน ซึ่งพัฒนาให้มีความแม่นยำสูงในการเลียนแบบโครงสร้างและการตอบสนองทางชีวกลศาสตร์ของมนุษย์ มีข้อต่อ การเคลื่อนไหวได้สมจริง สามารถติดตั้งเซนเซอร์ได้หลายจุด สามารถวัดค่า G ความเร่ง ความดัน แรงที่กระทำ รวมถึงการหมุนของศีรษะ และหุ่นรุ่นนี้ (Hybrid III's Family) มีหลายแบบจำลอง เช่น ผู้ชายขนาดร่างเฉลี่ย (50^{th} percentile male) ผู้หญิงร่างเล็ก (5^{th} percentile female) เด็ก 10 ปี เด็ก 6 ปี และเด็ก 3 ปี เป็นต้น

รูปที่ 5 หุ่นทดสอบแทนมนุษย์ตระกูล Hybrid III (เอกสารอ้างอิง [2])

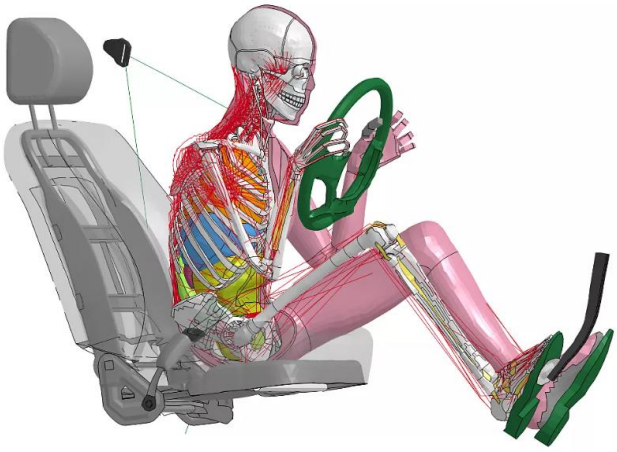
ยุคปัจจุบันและอนาคต (ทศวรรษ 2010 – ปัจจุบัน: THOR, WIAMan, THUMS) : ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาต่อยอดจากหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ รุ่น Hybrid III โดยปรับปรุงให้มีสรีระร่างกายเหมือนมนุษย์ให้มากขึ้น และเพิ่มเครื่องมือวัดมากขึ้น จนกลายเป็นหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ชื่อ Test device for Human Occupant Restraint (THOR) [2] ในปี ค.ศ. 2013 และถูกใช้เป็นหุ่นทดสอบการชนตัวแรกของ THOR โดยองค์กรประเมินความปลอดภัยของรถยนต์ในยุโรป (Euro NCAB)

รูปที่ 6 หุ่นทดสอบแทนมนุษย์ รุ่น THOR-50M และ THOR-5F (เอกสารแนบ [2])

นอกจากการทดสอบการชนของอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วไปแล้ว ยังมีการทดสอบเฉพาะทาง เช่น การบินและอวกาศ ทางทหาร ตัวอย่างเช่น การทดสอบแรงระเบิด เกราะป้องกัน หมวกนิรภัย เป็นต้น ในปี ค.ศ. 2018 [2,5] กองทพสหรัฐฯ ร่วมกับบริษัท Diversified Technical Systems (DTS) ได้สร้างหุ่นจำลองการทดสอบแทนมนุษย์ ที่เรียกว่า Warrior Injury Assessment Mannequin (WIAMan) โดยหุ่นจำลองการทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีการจำลองการเคลื่อนไหวได้สมจริงมากขึ้น เป็นกลุ่มตัวแทนเฉพาะงาน และมีการเพิ่มเครื่องมือวัดมากขึ้น สมบูรณ์แบบมากขึ้น เพื่อใช้ทดสอบระดับการป้องกันระเบิดของยานเกราะ และประเมินการบาดเจ็บของทหารที่โดยสารในยานเกราะ

รูปที่ 7 หุ่นทดสอบแทนมนุษย์ รุ่น WIAMan (เอกสารแนบ [2,5])

แบบจำลองดิจิทัล เป็นอีกแนวทางพัฒนาสู่ยุคอนาคต โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาทำแบบจำลองดิจิทัลแทนมนุษย์ แล้วนำมาวิเคราะห์และประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ที่มีความสมจริงและครอบคลุมผู้ใช้งานหลากหลายกลุ่มมากขึ้น เมื่อปี ค.ศ. 2021 บริษัท โตโยต้า มอเตอร์ คอร์ปอเรชั่น ประกาศเปิดตัวซอฟต์แวร์ Total Human Model for Safety (THUMS) [2,6] ซึ่งเป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์เทคโนโลยีจำลองร่างกายมนุษย์แบบเสมือนจริงเพื่อความปลอดภัยที่ช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์อาการบาดเจ็บของร่างกายมนุษย์ที่เกิดจากอุบัติเหตุรถชนได้



รูปที่ 8 แบบจำลองดิจิทัลแทนมนุษย์ รุ่น THUMS (เอกสารแนบ [6])

3.2 การประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569

3.2.1 ระดับของการป้องกัน (Protection Level) การประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดนั้น ทางศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคงได้พิจารณาออกแบบการทดสอบโดยดำเนินการตามข้อกำหนดอ้างอิงตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 Volume 1 [7] และ มาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 Volume 2 [8] ซึ่งแบ่งระดับการป้องกันออกแป็น 4 ระดับ คือ

ระดับ 1 – ระดับ 4 เริ่มตั้งแต่ภัยคุกคามจากระเบิดมือ ทุ่นระเบิด 6 kg. ทุ่นระเบิด 8 kg. และทุ่นระเบิด 10 kg. ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Protection levels for occupants of armored vehicles for grenade and blast mine threats (เอกสารอ้างอิง [8])

Level	Grenade and Blast Mine Threat		
4	4b	Mine Explosion under belly	10 kg (explosive mass) Blast AT Mine
	4a	Mine Explosion pressure activated under any wheel or track location	
3	3b	Mine Explosion under belly	8 kg (explosive mass) Blast AT Mine
	3a	Mine Explosion pressure activated under any wheel or track location	
2	2b	Mine Explosion under belly	6 kg (explosive mass) Blast AT Mine
	2a	Mine Explosion pressure activated under any wheel or track location	
1	Hand grenades, unexploded artillery fragmenting sub-munitions, and other small anti personnel explosive devices detonated anywhere under the vehicle.		

3.2.2 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ (ATD Instrumentation) ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 ต้องติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งวิกฤติบนหุ่นทดสอบเพื่อเป็นตัวแทนร่างกายมนุษย์ ได้แก่ ศีรษะ คอ ทรวงอก กระดูกเชิงกราน กระดูกสันหลัง กระดูต้นขา และกระดูกหน้าแข้ง เพื่อใช้วัดค่าทางกลศาสตร์ที่กระทำต่อร่างกายมนุษย์ ได้แก่ แรงกระทำ ความเร่ง ความเร็ว และโมเมนต์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์บนหุ่นทดสอบ Hybrid III (เอกสารอ้างอิง [8])

Table E1 Mandatory instrumentation for Hybrid III

Location in ATD	**Parameter**	**Symbol**	**Associated injury criterion**
Head	Linear accelerations	Ax, Ay, Az	HIC
Upper Neck	Axial force (tension/compression)	Fz	Fz
	Shear Forces	Fx, Fy	Fx, Fy
	Bending moment (flexion and extension)	My	Moc_y
Thorax	Deflection	Dx	TCC (frontal) VC (frontal)
Pelvis	Linear acceleration (vertical)	Az	DRI
Femur left & right	Axial force (compression)	Fz	Fz
Tibia left & right*	Axial force (compression)	Fz	Fz

* Lower load cell for HIII leg.
Upper load cell for MIL-LX leg

3.2.3 การบันทึกท่าทางการนั่งของหุ่นทดสอบ (Documentation of ATD seating posture) ในขั้นตอนการทดสอบต้องทำการบันทึกท่าทางการนั่งทั้งก่อนและหลังการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9 และบันทึกค่าจากการวัดทั้งหมดของค่าทางกลศาสตร์ที่กระทำต่อร่างกายมนุษย์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

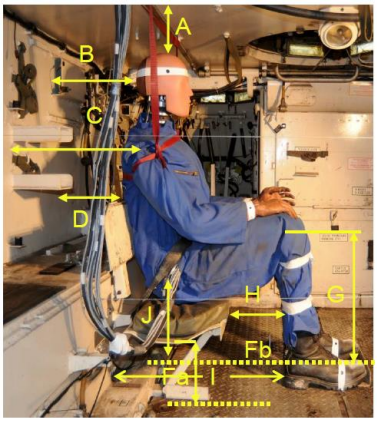


Figure E7: Illustration of measures to document the seating posture of an ATD inside a vehicle

Measure		[mm]
A	Head-roof	110
B	Head-wall	430
C	Shoulder-wall	475
D	Back-wall	400
E	Back panel height	625
Fa	Seat panel-mid height	235
Fb	Seat panel front height	285
G	Knee height	490
H	Calf – seat panel	200
I	Heel-wall	620
J	H-point height	410

รูปที่ 9 การบันทึกท่าทางการนั่งก่อนและหลังการทดสอบ (เอกสารแนบ [8])

3.2.4 เกณฑ์การประเมินการบาดเจ็บ (Injury Assessment) หลังจากได้ค่าผลการทดสอบการระเบิดยานเกราะแล้ว ก็จะนำมาประเมินการบาดเจ็บของผู้โดยสาร ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 มีค่าเกณฑ์กำหนดตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าเกณฑ์การประเมินการบาดเจ็บสำหรับหุ่นทดสอบ Hybrid III (เอกสารอ้างอิง [8])

Table E2 Injury Assessment Reference Values for Hybrid III ATD with MIL-Lx

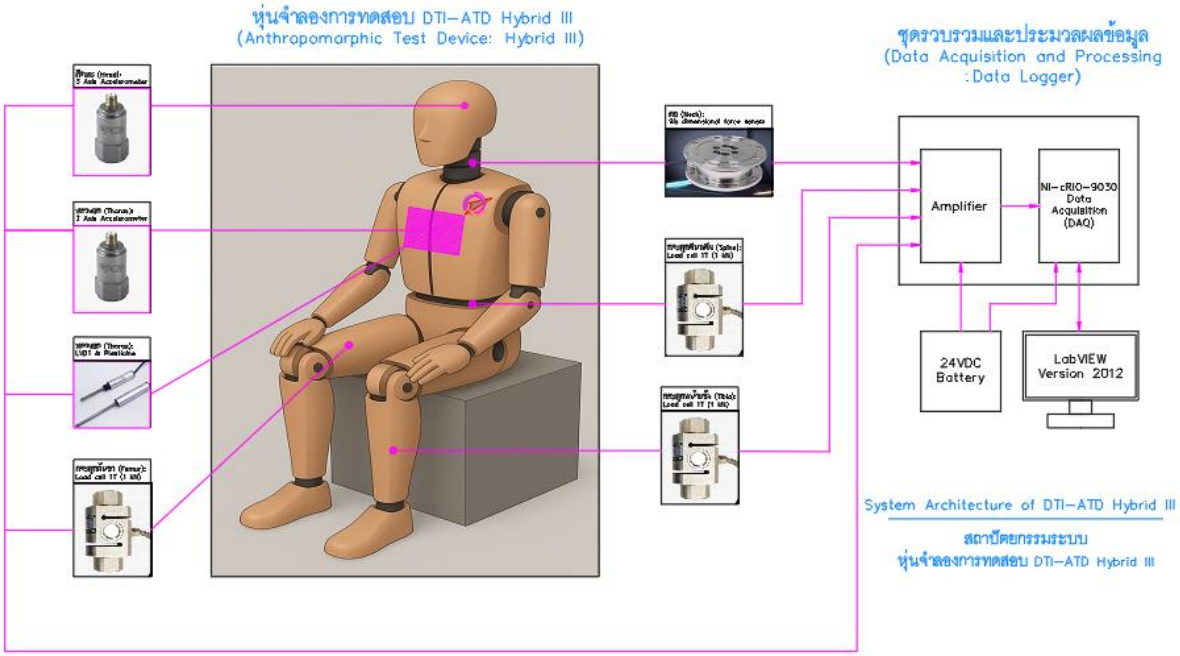
Body region	Criterion	IARV	Pass/fail level
Head	Head Injury Criterion	HIC_{15}	250
Neck	Axial compression force	Fz-	4.0 kN - 0 ms / 1.1 kN > 30 ms *(Figure in appendix E6.3)*
	Axial tension force	Fz+	3.3 kN @ 0 ms / 2.8 kN @ 35 ms / 1.1 kN > 45 ms *(Figure in appendix E6.3)*
	Shear force	Fx+- / Fy+-	3.1 kN @ 0 ms / 1.5kN @ 25-35 ms / 1.1 kN > 45 ms *(Figure in appendix E6.3)*
	Bending moment (flexion)	Moc_y +	190 Nm
	Bending moment (extension)	Moc_y -	77 Nm
Thorax	Thoracic Compression Criterion	$TCC_{frontal}$	30 mm
	Viscous Criterion	$VC_{frontal}$	0.70 m/s
Spine	Dynamic Response Index	DRI_z	17.7
Femur	Axial compression force	Fz-	6.9 kN
Tibia*	Axial compression force	Fz-	2.6 kN (Mil-LX, upper load cell) 5.4 kN (HIII, lower load cell)

*) On decision of the NA the Mil-LX leg or the HIII leg with the corresponding pass/fail values can be used.

4. ผลการวิจัยและแนวทางพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ

4.1 ทบทวนวรรณกรรม (Literature review) เพื่อศึกษาวิวัฒนาการของการพัฒนาหุ่นทดสอบแทนมนุษย์ Anthropomorphic Test Device (ATD) ตั้งแต่ยุคเริ่มต้นจนมาถึงยุคปัจจุบันซึ่งเป็นยุคแห่งมาตรฐานสากล โดยหุ่นจำลองการทดสอบที่ใช้ คือ หุ่นจำลองการทดสอบ ATD รุ่น Hybrid III ตามมาตรฐาน Society Automotive of Engineers (SAE) [9] และศึกษามาตรฐานการทดสอบและประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 [7-8] ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

4.2 ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture) ของหุ่นจำลองการทดสอบ DTI-ATD Hybrid III สำหรับศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 สถาปัตยกรรมระบบของหุ่นจำลองการทดสอบ

4.3 เตรียมการพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ ATD ของศูนย์ทดสอบฯ หลังจากได้ออกแบบสถาปัตยกรรมแล้วก็ทำการเลือกเซนเซอร์ และอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 11 และเตรียมการติดตั้งเซนเซอร์และอุปกรณ์บนหุ่นจำลองการทดสอบ ATD รุ่น Hybrid III ตามมาตรฐานของ SAE ซึ่งจะติดตั้งในตำแหน่งวิกฤติของร่างกายมนุษย์เพื่อใช้วัดค่าทางกลศาสตร์ ได้แก่ แรงกระทำ ความเร่ง ความเร็ว และโมเมนต์ ในตำแหน่ง ศีรษะ คอ หน้าอก กระดูกสันหลัง กระดูกต้นขา และกระดูกแข้ง ตามมาตรฐานกำหนดไว้

รูปที่ 11 เตรียมการสร้างหุ่นจำลองการทดสอบของศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง

5. สรุปผลการศึกษาวิจัย

5.1 จากการศึกษาการออกแบบหุ่นทดจำลองการทดสอบแทนมนุษย์ (ATD) และการประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดนั้น ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 ทำให้เข้าใจข้อกำหนดของมตารฐาน และสามารถออกแบบและพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ เพื่อที่จะนำมาทดสอบในภารกิจของศูนย์ทดสอบฯ ได้

5.2 ทำให้เข้าใจรายละเอียดของเกณฑ์การประเมินการบาดเจ็บของผู้โดยสาร ได้ดังนี้

1) เกณฑ์การบาดเจ็บที่คอ (Neck injury criterion)
   - แรงกดที่คอ (Neck axial compression force, Fz-)
   - แรงยืดที่คอในแนวแกน z (Neck axial tension force, Fz+)
   - แรงเฉือนที่คอในแนวแกน x (Neck shear force, Fx+-)
   - แรงเฉือนที่คอในแนวแกน y (Neck shear force, Fy+-)
   - โมเมนต์ดัดที่คอหมุนรอบแกน z (Bending moment (Flexion/Extension), Mocy)
2) เกณฑ์การบาดเจ็บที่ทรวงอก (Thorax injury criterion)
   - ระยะยุบตัวบนหน้าอก (Thoracic compression criterion, TCCfrontal)
   - ความเร็วของการยุบตัวบนหน้าอก (Thoracic viscous criterion, VCfrontal)
3) เกณฑ์การบาดเจ็บที่กระดูกต้นขา (Femur injury criterion)
4) เกณฑ์การบาดเจ็บที่กระดูกแข้ง (Tibia injury criterion)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ สถานที่ เครื่องมือวัด วัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำและความร่วมมือเป็นอย่างดี จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ชัยเสรีเม็ททอล แอนด์ รับเบอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำและความร่วมมือเป็นอย่างดี จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Elizabeth Dohrer, *"Laika the Dog & the First Animals in Space."* Space.com. [Online]. Available: https://www.space.com (Accessed: Jul. 15, 2025).

[2] Wikipedia, the free encyclopedia. "*Crash test dummy.*" Wikipedia [Online]. Available: https://en.wikipedia.org (Accessed: Jul. 18, 2025).

[3] Alderson, S. W. (1949). Development of Sierra Sam Dummy for Aircraft Ejection Seat Testing. U.S. Air Force Technical Report.

[4] Duane W. Cowgill et al., *"Evaluation of the sierra Engineering Company, Light Helmet."* Sierra Engineering Company. California, USA, 1978.

[5] Diversified Technical System Inc. (DTS), "*WIAMan BLAST TEST MANIKIN.*" DTS A VPG Brand [Online]. Available: https://dtsweb.com (Accessed: Jul. 25, 2025).

[6] Tjark Kreuzinger, *"Toyota's Total Human Model for Safety Version 7 released."* Toyota [Online]. Available: https://www.toyota-europe.com (Accessed: Jul. 26, 2025).

[7] NATO Standardization Office, *AEP-55, Volume 1: Procedures for Evaluating the Protection level of Logistic and Light Armoured Vehicles*, STANAG 4569 Ed.1, Brussels, Belgium, 2005.

[8] NATO Standardization Office, *AEP-55, Volume 2: Procedures for Evaluating the Protection level of Armoured Vehicles*, STANAG 4569 Ed.2, Brussels, Belgium, 2005.

[9] SAE International. Performance Specifications for Anthropomorphic Test Device (ATD) Systems (Standard No. SAE J2570). SAE International, Warrendale, PA, USA, 2011.

[10] Mertz, H. J. (1993). *Anthropomorphic Test Devices: Historical Review and Current Status*. Society of Automotive Engineers (SAE).

[11] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (2020). *Crash Test Dummies and Vehicle Safety Standards*.

[12] Shaw, J. M., et al. (2016). *Blast Test Dummies: Development and Military Applications*. Journal of Biomechanics.

การประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับหุ่นจำลองการทดสอบ ATD Hybrid III
Implementation of a LabVIEW Application for the Anthropomorphic Test Device (ATD) Hybrid III

จิระพงษ์ มะกะ[1], กันต์ธร นาทอง[2], ณรงค์กร เดินหลักคำ[3*] และณัฐภัทร คุ้มปรีดี[4]
ศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
Jirapong Maka[1], Gunthorn Nathong[2], Narongkorn Doenlakkham[3*] and Nuttapat Coompreedee[4]
Defence & Security Standard Test Centre, Defence Technology Institute, 47/433 Office of the Permanent Secretary of Defence Building, Chaengwattana Road, Pakkred, Nonthaburi 11120
narongkorn.d@dti.or.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับฮาร์ดแวร์ NI-cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) สำหรับพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ Anthropomorphic Test Device (ATD) รุ่น Hybrid III อ้างอิงตามมาตรฐาน Society of Automotive Engineers (SAE) เพื่อใช้ทดสอบและประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางต่อภัยคุกคามจากวัตถุระเบิดและทุ่นระเบิด ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 โดยติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์บนหุ่นจำลองการทดสอบ เพื่อวัดค่าแรงกระทำ ความเร็ว ความเร่ง และโมเมนต์ ที่จุดวิกฤตบนร่างกายมนุษย์ โดยการวัดสัญญาณจากเซนเซอร์แล้วนำมาประมวลผลสัญญาณ และเก็บบันทึกข้อมูลในชุดบันทึกข้อมูล สุดท้ายทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด และทำการพิสูจน์ยืนยันความใช้ได้ของหุ่นจำลองการทดสอบ

จากผลการทดสอบการใช้งานพบว่าสามารถใช้งานได้จริง อุปกรณ์มีความทนทานสูง เนื่องจากสามารถทำงานใช้ในช่วง –20°C – +55°C ทนแรงสั่นสะเทือนได้ไม่น้อยกว่า 5G ทนแรงกระแทกได้ไม่น้อยกว่า 30G และมีความถูกต้องแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทำให้สามารถลดต้นทุนได้จำนวนมากเมื่อเทียบกับการซื้อหุ่นทดสอบจากต่างประเทศ

คำสำคัญ: LabVIEW, Anthropomorphic Test Device (ATD), NATO AEP-55 STANAG 4569

Abstract

This research proposes the application of LabVIEW 2012 software together with the NI cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) hardware for the development of an Anthropomorphic Test Device (ATD) Hybrid III, referenced from the Society of Automotive Engineers (SAE) standards. The developed ATD was employed to test and evaluate the protection levels of armored vehicles against explosive and mine threats in accordance with NATO AEP-55 STANAG 4569. The measurement and operating systems were integrated into the ATD to measure forces, velocities, accelerations, and moments at critical body regions. The acquired signals from these observation points were processed and recorded using a data logging system. Finally, the instrument was calibrated, the functionality of the ATD was verified, and the system performance was validated through practical testing.

The experimental results demonstrated the practicality of the developed ATD. The device exhibited high durability, operating reliably within a temperature range of -20^{o}C to +55^{o}C, and withstanding vibration levels of at least 5G and shock load up to 50G. Measurement deviations were within acceptable limits. These results indicate that the ATD is suitable for real testing applications, offering a significant cost reduction compared to purchasing similar devices from overseas.

Keywords: LabVIEW, Anthropomorphic Test Device (ATD), NATO AEP-55 STANAG 4569

1. บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับฮาร์ดแวร์ NI-cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) สำหรับวิจัยและพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ Anthropomorphic Test Device (ATD) ของศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เพื่อรองรับการขยายงานทดสอบในส่วนของการทดสอบการระเบิดยานเกราะ ซึ่งเป็นงานทดสอบที่ได้ขยายการให้บริการของศูนย์ทดสอบฯ หุ่นจำลองการทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นนี้อ้างอิงตามหุ่นจำลองการทดสอบ ATD รุ่น Hybrid III ตามมาตรฐาน Society of Automotive Engineers (SAE) เพื่อใช้ทดสอบและประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางต่อภัยคุกคามจากวัตถุระเบิดและทุ่นระเบิดตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 โดยติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์บนหุ่นจำลองการทดสอบ เพื่อวัดค่าแรงกระทำ ความเร็ว ความเร่ง และโมเมนต์ ที่จุดวิกฤตบนร่างกายมนุษย์ โดยการวัดสัญญาณจากเซนเซอร์แล้วนำมาประมวลผลสัญญาณ และเก็บบันทึกข้อมูลในชุดบันทึกข้อมูล สุดท้ายทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด และทำการพิสูจน์ยืนยันความใช้ได้ของหุ่นจำลองการทดสอบ

ผลจากการศึกษาวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับฮาร์ดแวร์ NI-cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) ได้วิจัยและพัฒนาและออกแบบหุ่นจำลองการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด และทำการพิสูจน์ยืนยันความใช้ได้ของหุ่นจำลองการทดสอบ ดังแสดงในหัวข้อการดำเนินการวิจัย และได้แสดงผลการทดสอบการใช้งานในหัวข้อผลการวิจัย และสรุปผลการศึกษาวิจัยในหัวข้อสุดท้าย

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาระบบรวบรวมและประมวลผลข้อมูล (Data Acquisition and Processing) โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับฮาร์ดแวร์ NI-cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) ในการวิจัยและพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ ATD ของศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง

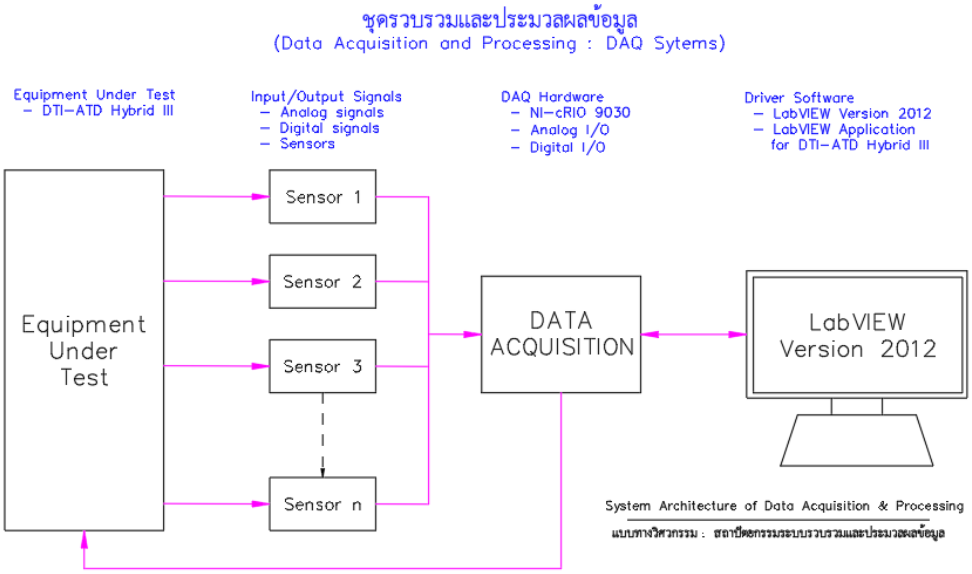
2.2 เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ ATD ของศูนย์ทดสอบฯ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ให้สามารถให้บริการทดสอบเพื่อสนับสนุนอุตสากรรมความมั่นคงภายในประเทศ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

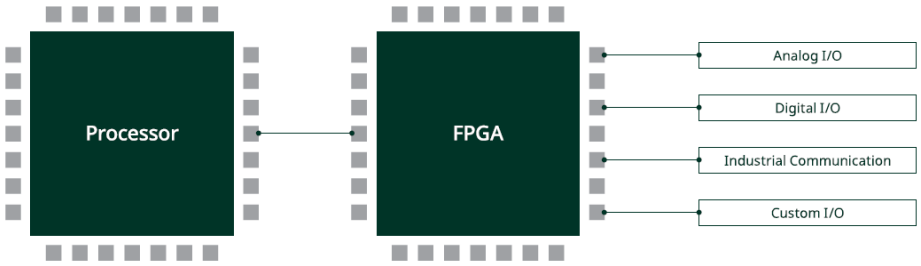
3.1 ชุดรวบรวมและประมวลผลข้อมูล (Data Acquisition and Processing, DAQ System)

ชุดรวบรวมและประมวลผลข้อมูลเป็นระบบที่มีความสำคัญมากในขั้นตอนการทดสอบและการบันทึกข้อมูล โดยมีกระบวนการและขั้นตอนการทำงาน ดังแสดงตามสถาปัตยกรรมระบบในรูปที่ 1 และระบบ DAQ System ถูกนำมาใช้ในทุกกระบวนการที่ต้องการวัดผลจากเซนเซอร์และการบันทึกผลการทดสอบตลอดห้วงการทดสอบ (Data Logger) ทั้งในขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา การพิสูจน์ยืนยันความใช้ได้ (Validation) การทดสอบและประเมินผล (Testing & Evaluation) และการควบคุมกระบวนการผลิต (Production Control) เป็นต้น โดยชุดรวบรวมและประมวลผลข้อมูลประกอบด้วยองค์ประกอบ 4 ดังนี้

3.1.1 ฮาร์ดแวร์ชุดรวบรวมและประมวลผล (DAQ Hardware) เป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของชุดรวบรวมและประมวลผลข้อมูล [1,2] มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกัน คือ ชุดประมวลผลแบบเวลาเรียลไทม์ (Real-time processor (Intel/ARM)) โปรแกรมที่ผู้ใช้งานสามารถเขียนขึ้นเพื่อกำหนดการทำงาน (Field Programmable Gate Array, FPGA) และชุดเชื่อมต่อกับสัญญาณอินพุท/เอาท์พุท (I/O & Communication Modules) ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3



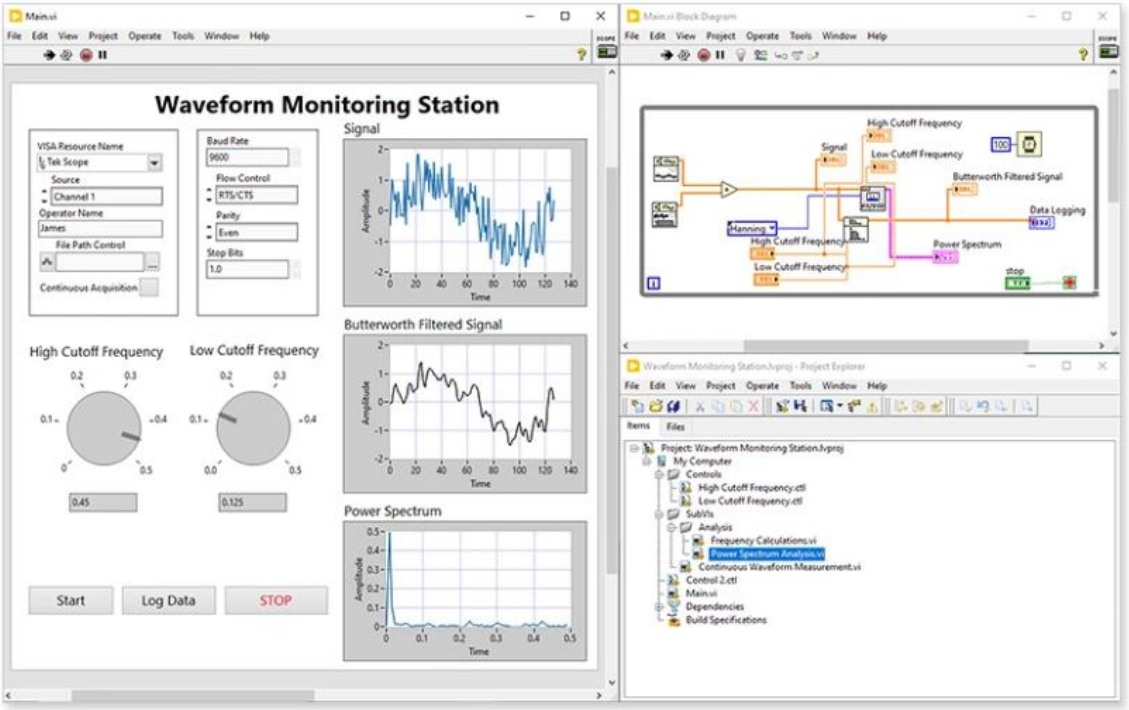
รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมระบบชุดรวบรวมและประมวลผลข้อมูล



รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมระบบของ DAQ Hardware (เอกสารอ้างอิง [1,2])

รูปที่ 3 DAQ Hardware รุ่น CompactRIO และ Communication Modules (เอกสารอ้างอิง [1,2])

3.1.2 โปรแกรม LabVIEW 2012 (Driver Software) เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับออกแบบควบคุมการทำงาน โดยผู้ใช้งานสามารถเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อกำหนดการทำงานบน FPGA (Field Programmable Gate Array) ของโปรแกรม LabVIEW 2012 เพื่อออกแบบการควบคุมการทำงาน กำหนดค่าเริ่มต้นการทำงาน (Configuration) การอ่านค่าจากเซนเซอร์และการแปลงค่าและการคำนวณต่างๆ การบันทึกข้อมูล และการเชื่อมต่อกับสัญญาณอินพุท/เอาท์พุท (I/O & Communication Modules) ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ โปรแกรม LabVIEW 2012 (เอกสารอ้างอิง [1,2])

3.2 หุ่นจำลองการทดสอบ (Anthropomorphic Test Device, ATD)

อุปกรณ์ที่ทดสอบ (Equipment under Test) คือ หุ่นจำลองการทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบการระเบิดยานเกราะ โดยเป็นหุ่นจำลองการทดสอบ (Anthropomorphic Test Device, ATD) ที่ทางศูนย์ทดสอบมาตรฐานความมั่นคง ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยอ้างอิงตามมาตรฐานหุ่นจำลองการทดสอบ ATD รุ่น Hybrid III ตามมาตรฐาน Society Automotive of Engineers (SAE) [3-6] ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์วัดในตำแหน่งวิกฤติของร่างกายมนุษย์เพื่อใช้วัดค่าทางกลศาสตร์ ได้แก่ แรงกระทำ ความเร่ง ความเร็ว และโมเมนต์ ในตำแหน่ง ศีรษะ คอ หน้าอก กระดูกสันหลัง กระดูกต้นขา และกระดูกแข้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยการทดสอบจะนำหุ่นจำลองการทดสอบนั่งในตำแหน่งที่กำหนด และทดสอบการระเบิดยานเกราะเพื่อประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 [7,8] ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 5 ตัวอย่าง ATD รุ่น Hybrid III ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 (เอกสารแนบ [7,8])

5. การดำเนินการวิจัย

5.1 ศึกษาข้อกำหนดของหุ่นจำลองการทดสอบ ATD รุ่น Hybrid III ตามมาตรฐาน Society Automotive of Engineers (SAE) [6] และศึกษามาตรฐานการทดสอบและประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางสำหรับภัยคุกคามจากระเบิดและทุ่นระเบิดตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 [7,8]

5.2 พัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์วัดบนหุ่นจำลองการทดสอบ ATD โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์วัดในตำแหน่งวิกฤติของร่างกายมนุษย์เพื่อใช้วัดค่าทางกลศาสตร์ และออกแบบพัฒนาระบบรวบรวมและประมวลผล (Data Acquisition System) ตามสถาปัตยกรรมของระบบรวบรวมและประมวลผลและสถาปัตยกรรมระบบของหุ่นจำลองการทดสอ DTI-ATD-Hybrid III ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยได้ออกแบบพัฒนาเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ตามรายละเอียดดังนี้

5.2.1) เกณฑ์การบาดเจ็บที่คอ (Neck injury criterion)

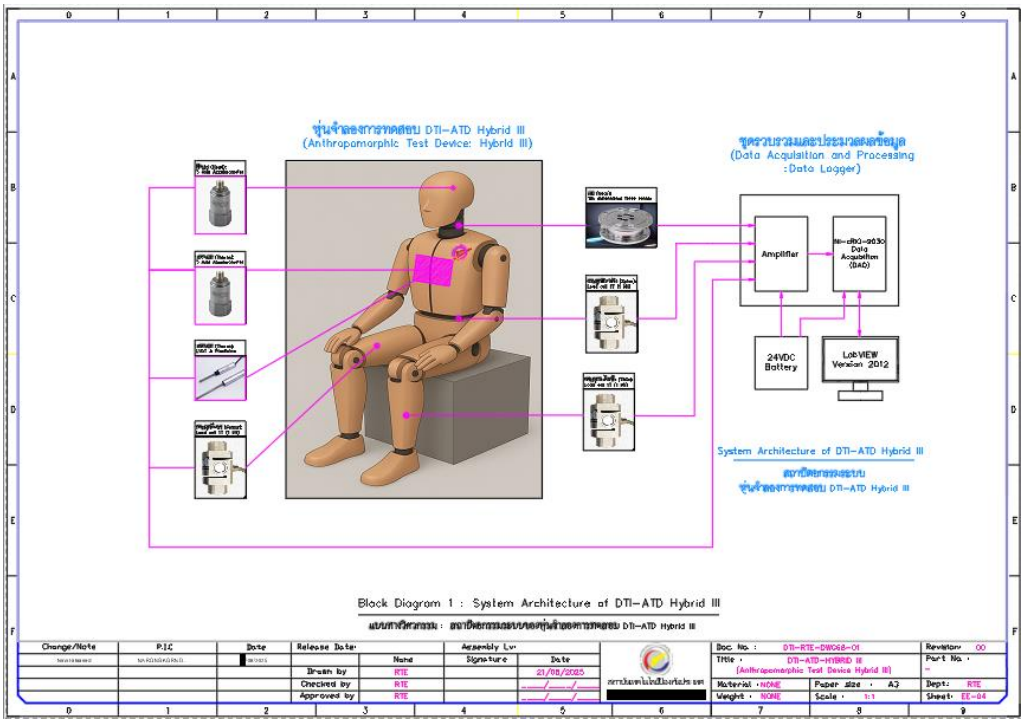
- แรงกดที่คอ (Neck axial compression force, Fz-)
- แรงยืดที่คอในแนวแกน z (Neck axial tension force, Fz+)
- แรงเฉือนที่คอในแนวแกน x (Neck shear force, Fx+-)
- แรงเฉือนที่คอในแนวแกน y (Neck shear force, Fy+-)
- โมเมนต์ดัดที่คอหมุนรอบแกน z (Bending moment (Flexion/Extension), Mocy)

5.2.2) เกณฑ์การบาดเจ็บที่ทรวงอก (Thorax injury criterion)

- ระยะยุบตัวบนหน้าอก (Thoracic compression criterion, TCCfrontal)
- ความเร็วของการยุบตัวบนหน้าอก (Thoracic viscous criterion, VCfrontal)

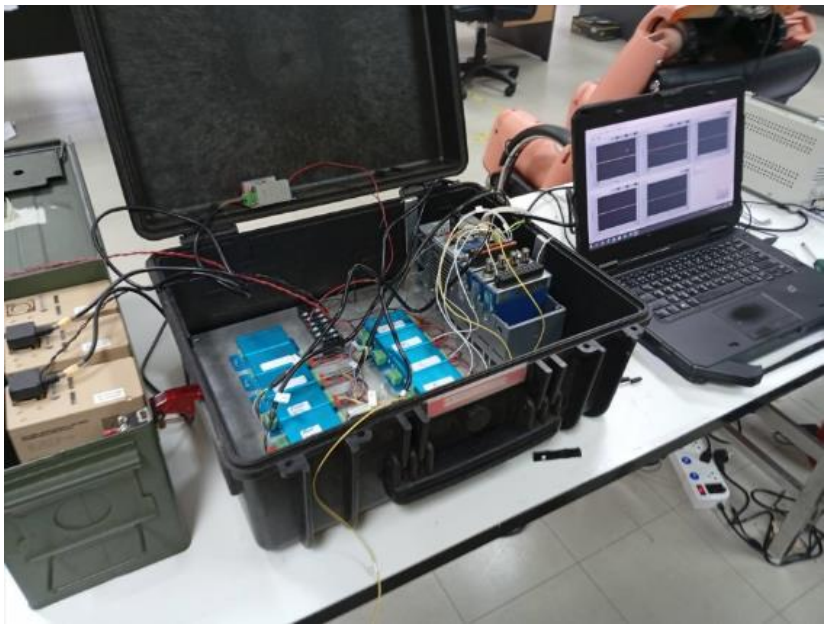
5.2.3) เกณฑ์การบาดเจ็บที่กระดูกต้นขา (Femur injury criterion)

5.2.4) เกณฑ์การบาดเจ็บที่กระดูกแข้ง (Tibia injury criterion)

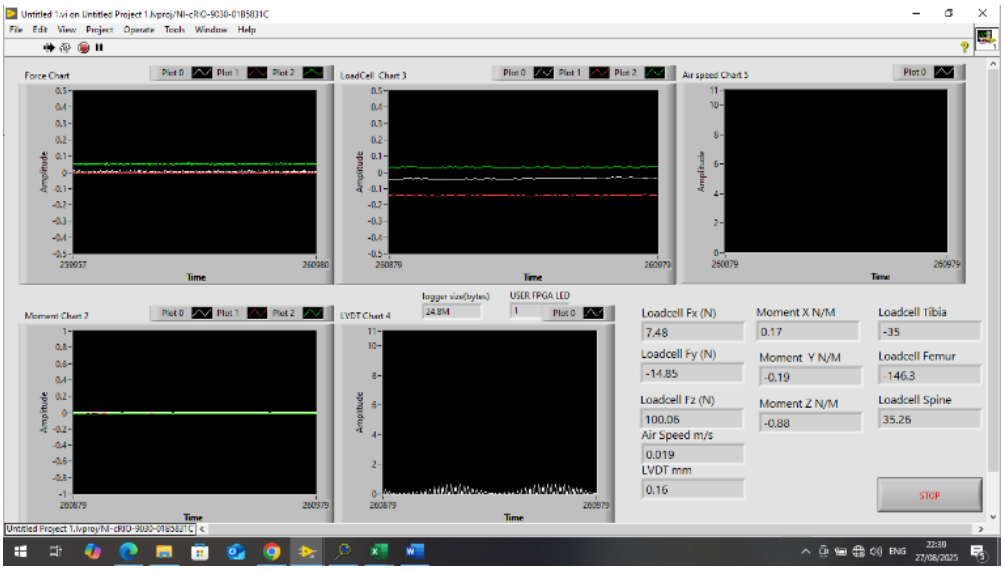


รูปที่ 6 สถาปัตยกรรมระบบของหุ่นจำลองการทดสอบ DTI-ATD Hybrid III

5.3 พัฒนาระบบรวบรวมและประมวลผลข้อมูล (Data Acquisition and Processing) โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับฮาร์ดแวร์ NI-cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) มาเขียนโปรแกรมควบคุมการทดงานทั้งหมด และกำหนดค่าเริ่มต้น (Configuration) ต่างๆ ให้ถูกต้องและมีความแม่นยำ สามารถอ่านค่า ค่าแรงกระทำ ความเร่ง ความเร็ว และโมเมนต์ ที่กระทำต่อหุ่นจำลองในห้วงการทดสอบแบบ Real time ได้อย่างถูกต้องและสามารถบันทึกข้อมูลการทดสอบได้ตลอดห้วงการทดสอบ ดังแสดงกล่องระบบรวบรวมและประมวลผลในรูปที่ 7 และโปรแกรมควบคุมการทำงานและแสดงผลที่เขียนโดยใช้โปรแกรม LabVIEW เวอร์ชั่น 2012 ดังแสดงในรูปที่ 8

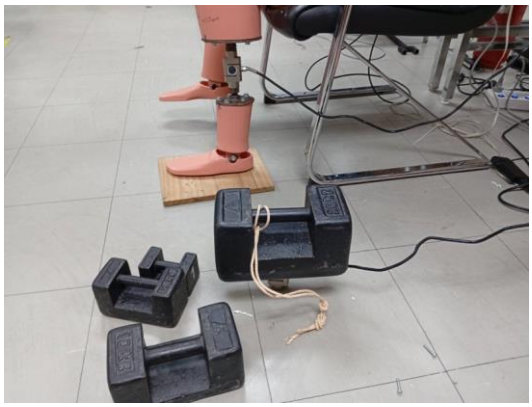


รูปที่ 7 กล่องระบบรวบรวมและประมวลผลข้อมูล (Data Acquisition and Processing)



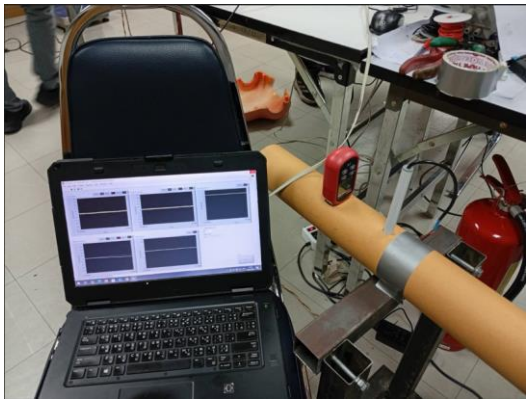
รูปที่ 8 โปรแกรมควบคุมการทำงานและแสดงผลเขียนโดยใช้โปรแกรม LabVIEW เวอร์ชั่น 2012

5.4 สอบเทียบและทวนสอบเครื่องมือวัด (Calibration and Verification) ก่อนติดตั้งเครื่องวัดต้องทำการสอบเทียบก่อนทุกชิ้นเพื่อให้มีความถูกต้องและแม่นยำ หลังจากติดตั้งบนหุ่นเสร็จแล้ว ต้องทำการทวนสอบผลการใช้งาน เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถใช้งานได้และอ่านค่าได้ถูกต้องแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 9



ก) การสอบเทียบ Load cell

ข) การสอบเทียบแรงและโมเมนต์



ค) การสอบเทียบ Flow meter

ง) การสอบเทียบความเร่ง Accelerometer

รูปที่ 9 การสอบเทียบเครื่องมือวัดและการทวนสอบหุ่นจำลองการทดสอบ

6. ผลการวิจัย

6.1 ทำการทดสอบการใช้งานจริง (Experiment Results) ในขั้นตอนการพิสูจนืยืนยันผลความใช้ได้ (Validation) โดยนำหุ่นทดสอบนั่งในรถยานเกราะจริงที่โรงงานผลิตจริง แล้วทำการจำลองการทดสอบโดยใช้คนโยกรถยานเกราะและทำการบันทึกผลการทดลอง ต้งแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11

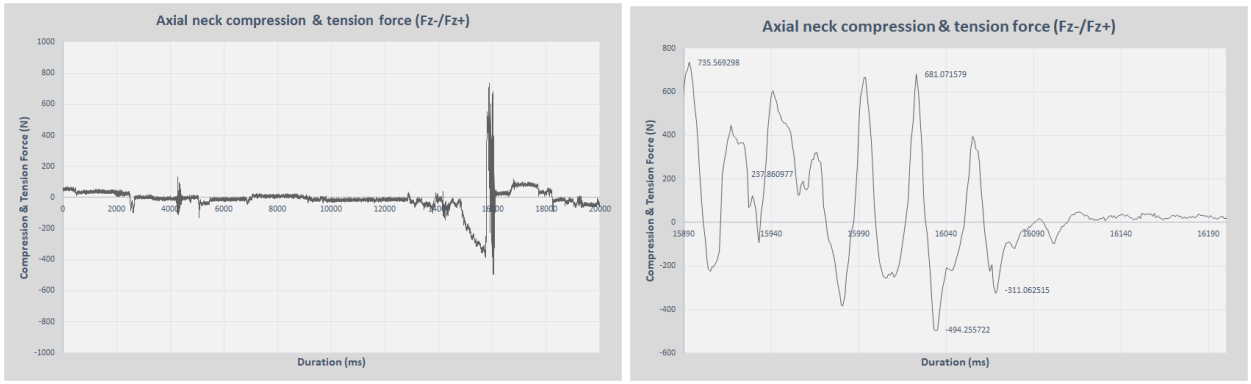
รูปที่ 10 การทดสอบการใช้งานจริงบนยานเกราะล้อยางที่โรงงานผลิต

รูปที่ 11 การจำลองการระเบิดยานเกราะโดยใช้คนโยกและบันทึกผลการทดสอบ

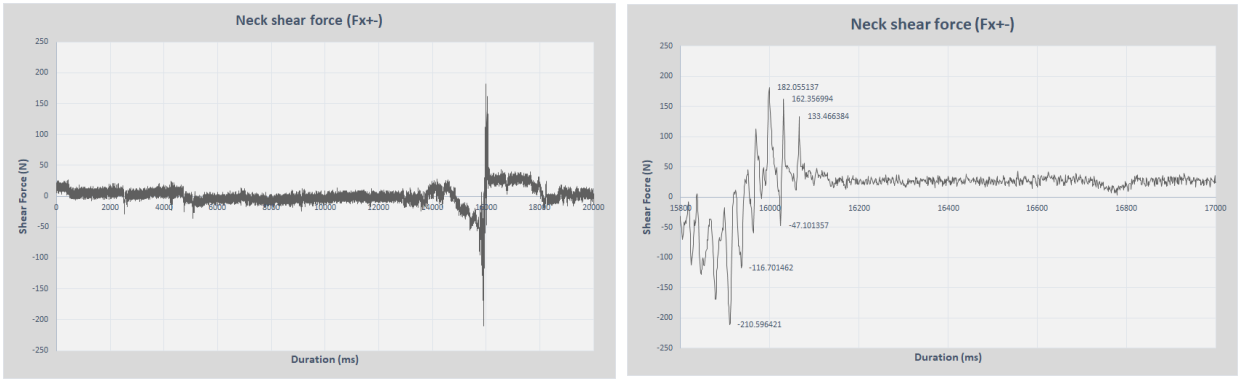
6.2 จากผลการทดสอบการใช้งานจริง (Experiment Results) โดยนำหุ่นทดสอบนั่งในรถยานเกราะจริงที่โรงงานผลิตจริง แล้วทำการจำลองการทดสอบโดยใช้คนโยกรถยานเกราะและทำการบันทึกผลการทดลองโดยได้ผลการทดลองตามที่แสดงในตารางที่ 1 และแสดงผลการทดสอบตามรูปที่ 12 – รูปที่ 15

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการใช้งานจริง ในขั้นตอนการพิสูจน์ยืนยันความใช้ได้ (Validation)

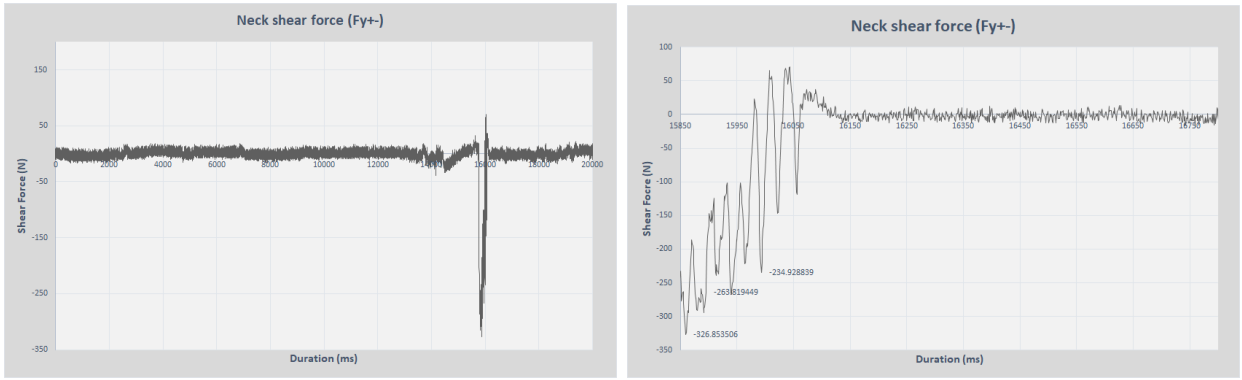
Body region	Criterion	IARV	Pass/fail level	ผลการทดสอบ
คอ (Neck)	แรงอัดในแนวแกน z (Axial compression force)	Fz-	4.0 kN - 0 ms 1.1 kN > 30 ms	0.494256 kN - 0 ms 0.311063 kN > 30 ms
	แรงดึงในแนวแกน z (Axial tension force)	Fz+	3.3 kN @ 0 ms 2.8 kN @ 35 ms 1.1 kN > 45 ms	0.735569 kN @ 0 ms 0.237860 kN @ 35 ms 0.681072 kN > 45 ms
	แรงเฉือนในแนวแกน x,y (Shear force)	Fx+-	3.1 kN @ 0 ms 1.5kN @ 25-35 ms 1.1 kN > 45 ms	0.210596 kN @ 0 ms 0.116701 kN @ 25-35 ms 0.047101 kN > 45 ms
		Fy+-		0.326854 kN @ 0 ms 0.116701 kN @ 35 ms 0.047101 kN > 45 ms
	โมเมนต์ดัด (ก้มหน้า) Bending moment (flexion)	Mocy+	190 Nm	27.419758 Nm
	โมเมนต์ดัด (เงยหน้า) Bending moment (extension)	Mocy-	77 Nm	4.852486 Nm
ทรวงอก (Thorax)	ระยะยุบตัวของทรวงอก (Thoracic Deformation)	D_{cfc180}	30 mm	4.06 mm
	ห้วงเวลากระทำบนหน้าอก (Duration (ms))	Time (sec)	-	150 ms
	ความเร็วของแรงกดบนหน้าอก (Deformation Velocity)	dD_{cfc180}/dt	0.70 m/s	0.027667 m/s
ต้นขา (Femur)	แรงอัดในแนวแกน z (Axial compression force)	Fz-	6.9 kN	0.170060 kN
หน้าแข้ง (Tibia)	แรงอัดในแนวแกน z (Axial compression force)	Fz-	5.4 kN	0.534416 kN



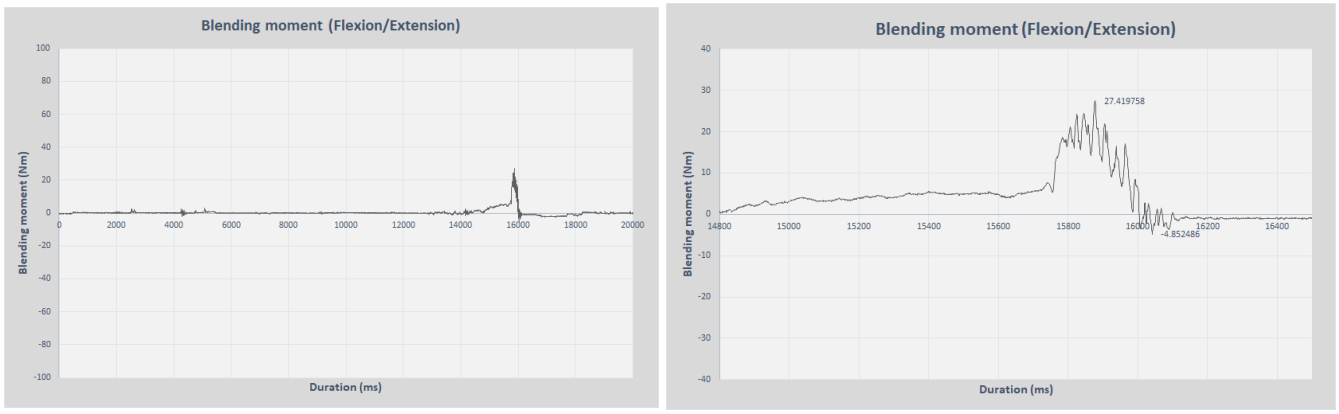
รูปที่ 12 แรงอัด/แรงยืดบนคอในแนวแกน z (Fz-/Fz+)



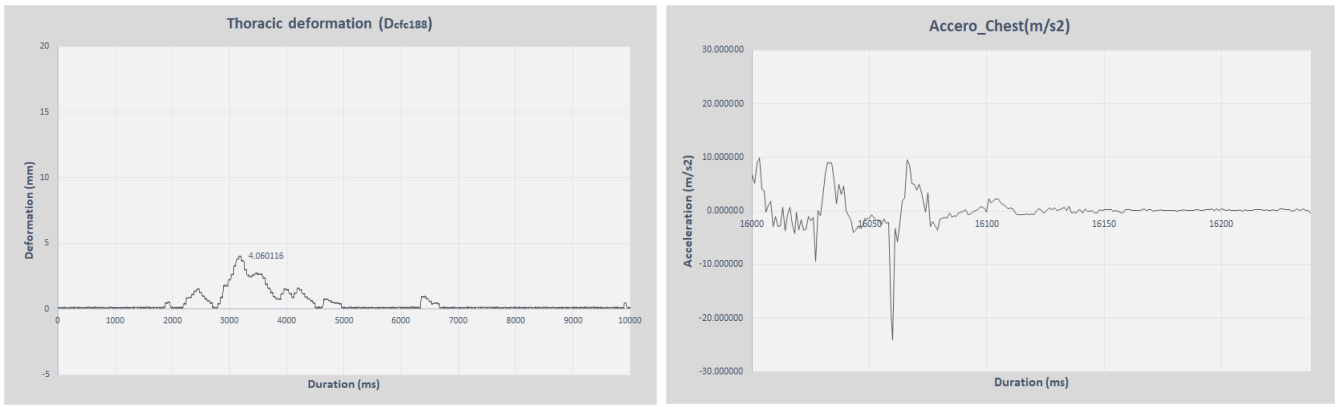
รูปที่ 13 แรงเฉือนบนคอในแนวแกน x (Fx+-)



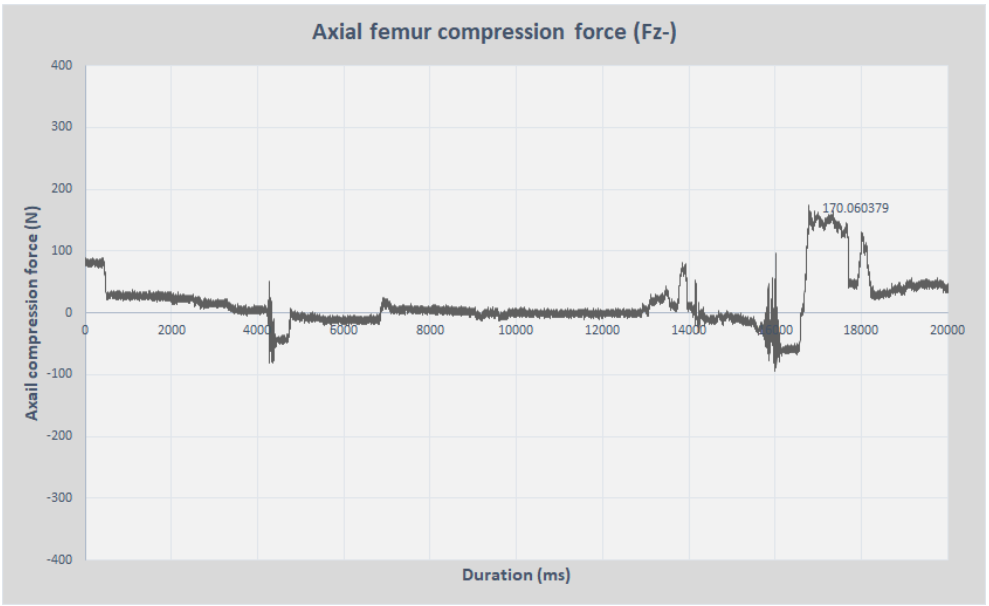
รูปที่ 14 แรงเฉือนบนคอในแนวแกน y (Fy+-)



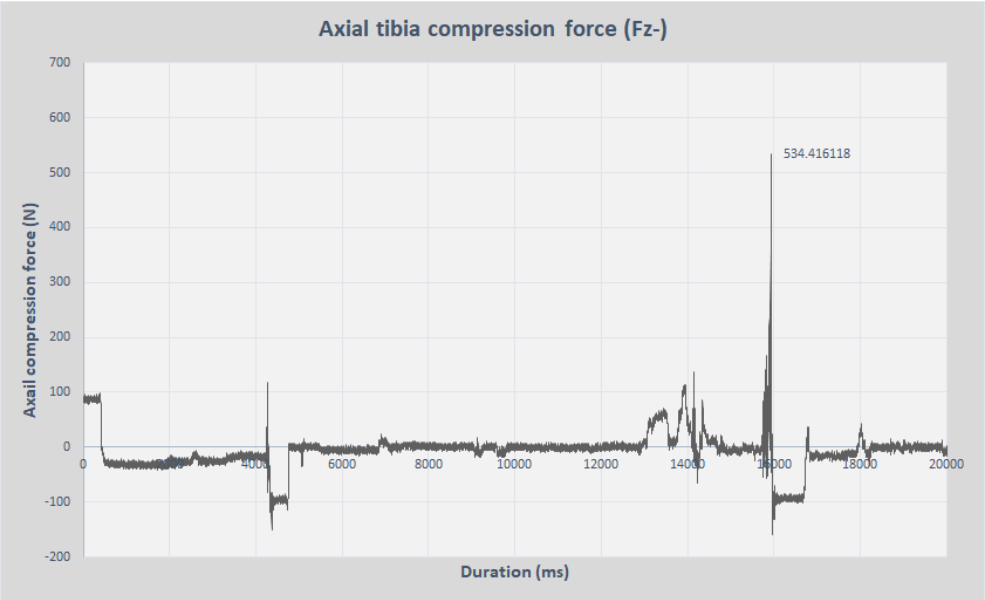
รูปที่ 15 โมเมนต์ดัด (ก้มหน้า/เงยหน้า)



รูปที่ 16 ระยะยุบและความเร่งที่กระทำบนทรวงอก



รูปที่ 17 แรงอัดบนกระดูกต้นขาในแนวแกน z



รูปที่ 15 แรงอัดบนกระดูกหน้าแข้งในแนวแกน z

7. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW เวอร์ชั่น 2012 ร่วมกับฮาร์ดแวร์ NI-cRIO-9030 Data Acquisition (DAQ) เพื่อพัฒนาหุ่นจำลองการทดสอบ ATD รุ่น Hybrid III อ้างอิงตามมาตรฐาน Society of Automotive Engineers (SAE) และเพื่อใช้ทดสอบและประเมินระดับการป้องกันของยานเกราะล้อยางต่อภัยคุกคามจากวัตถุระเบิดและทุ่นระเบิด ตามมาตรฐาน NATO AEP-55 STANAG 4569 โดยติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์บนหุ่นจำลองการทดสอบ และวัดสัญญาณจากเซนเซอร์แล้วนำมาประมวลผลสัญญาณและบันทึกข้อมูล สุดท้ายทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด ทวนสอบการใช้งานได้ของหุ่นจำลองการทดสอบ และทดสอบการใช้งานจริง

จากผลการทดสอบการใช้งานจริง (Experiment Result) ในขั้นตอนการสาธิตการใช้งานและพิสูจน์ยืนยันผลการใช้งาน (Demonstration & Validation) พบว่าสามารถใช้งานได้จริง การอ่านค่ามีความถูกต้องแม่นยำ สามารถบันทึกค่าในห้วงการทดสอบได้ สามารถนำค่าที่บันทึกได้มาประมวลผลและประเมินความอยู่รอดของผู้โดยสารตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ ดังนั้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหุ่นจำลองการทดสอบนี้ สามารถนำมาใช้ในการทดสอบจริงได้ อุปกรณ์มีความทนทานสูง เนื่องจากสามารถทำงานใช้ในช่วง –20°C – +55°C ทนแรงสั่นสะเทือนได้ไม่น้อยกว่า 5G ทนแรงกระแทกได้ไม่น้อยกว่า 30G และมีความถูกต้องแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และทำให้สามารถลดต้นทุนได้จำนวนมากเมื่อเทียบกับการซื้อหุ่นทดสอบจากต่างประเทศ อีกทั้งยังเป็นการสนับสนุนอุตสากรรมความมั่นคงภายในประเทศ โดยสามารถนำไปใช้ให้บริการทดสอบแก่หน่วยงานภาครัฐ หน่วยงานทางทหาร และภาคเอกชน ทำให้ลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาได้อย่างมาก

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมความมั่นคง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ สถานที่ เครื่องมือวัด วัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำและความร่วมมือเป็นอย่างดี จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ชัยเสรีเม็ททอล แอนด์ รับเบอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำและความร่วมมือเป็นอย่างดี จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] National Instruments. *LabVIEW 2012 User Manual*. Austin, Texas: National Instruments, 2012.

[2] National Instruments. *"CompactRIO System Component."* NI.com. [Online]. Available: https://www.ni.com/en.html (Accessed: Jul. 15, 2025).

[3] Mertz, H. J. (1993). *Anthropomorphic Test Devices: Historical Review and Current Status*. Society of Automotive Engineers (SAE).

[4] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (2020). *Crash Test Dummies and Vehicle Safety Standards*.

[5] Shaw, J. M., et al. (2016). *Blast Test Dummies: Development and Military Applications*. Journal of Biomechanics.

[6] SAE International. Performance Specifications for Anthropomorphic Test Device (ATD) Systems (Standard No. SAE J2570). SAE International, Warrendale, PA, USA, 2011.

[7] NATO Standardization Office, *AEP-55, Volume 1: Procedures for Evaluating the Protection level of Logistic and Light Armoured Vehicles*, STANAG 4569 Ed.1, Brussels, Belgium, 2005.

[8] NATO Standardization Office, *AEP-55, Volume 2: Procedures for Evaluating the Protection level of Armoured Vehicles*, STANAG 4569 Ed.2, Brussels, Belgium, 2005.

การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยขยะขวดพลาสติก (PET) และปูนไฮเดรตโดยวิธีมาร์แชลล์

Investigation of PET and Hydrated Lime-Modified Asphalt Concrete by Marshall Test

ณัฐชนน จันทร์แพง [1], ภัทรภณ สังข์แจ่ม[2*] และ พงษ์ฤทธิ์ นิติวงศ์[3]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
Natchanon Junphang[1], Phattraphon Sungjam[2*] and Pongrit Nitiwong[3]
[1]Department of Civil Engineering, Division of Electrical
Navaminda Kasatiyadhiraj Royal Thai Air Force Academy

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยการผสมขยะขวดพลาสติก PET (Polyethylene Terephthalate) และปูนขาว (Hydrated Lime) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานและความเสถียรของวัสดุภายใต้สภาวะจำลองของการกัดกร่อนจากน้ำเกลือ (NaCl 10%) เป็นเวลา 7 วันโดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม, กลุ่มผสม PET, กลุ่มผสมปูนขาว และกลุ่มผสมปูนขาวร่วมกับ PET

ผลการทดสอบพบว่า กลุ่มผสม PET และปูนขาวร่วมกันให้ผลดีที่สุด โดยมีค่า Marshall Stability สูงสุด (2,680.86 ปอนด์) เพิ่มขึ้น 27.9% ความหนาแน่นสูงสุด (2.384 g/cm^3) และปริมาตรช่องว่างอากาศ (Air voids) ลดลงเหลือ 3.24% พร้อมทั้งค่า VFB เพิ่มขึ้นเป็น 77.76% สะท้อนถึงโครงสร้างที่แน่นและทนทานต่อการซึมน้ำ นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าการไหล (Flow) จาก 12.94 เหลือ 10.67 (0.01นิ้ว) แสดงถึงความต้านทานการเสียรูปที่ดีขึ้น ดังนั้นการผสม PET และปูนขาวในแอสฟัลต์คอนกรีตจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการยืดอายุการใช้งานของถนนภายใต้สภาพแวดล้อมที่รุนแรง และยังสนับสนุนแนวคิดโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืน ด้วยการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, ขยะขวดพลาสติก PET, VFB

Abstract

This study focuses on improving the performance of asphalt concrete by incorporating PET plastic waste (Polyethylene Terephthalate) and hydrated lime (Calcium Hydroxide) to enhance the strength, durability, and stability of the material under simulated saltwater corrosion conditions (10% NaCl) for a period of 7 days. The experiment was divided into four groups: a control group, a PET-incorporated group, a hydrated lime-incorporated group, and a group incorporating both hydrated lime and PET.

The results showed that the group combining PET and hydrated lime yielded the best results, with the highest Marshall Stability (2,680.86 pounds), a 27.9% increase, the highest density (2.384 g/cm³), and a reduction in air voids to 3.24%. Additionally, the VFB (voids filled with bitumen) increased to 77.76%, reflecting a more compact structure and improved resistance to water penetration. The flow value also decreased from 12.94 to 10.67 (0.01 inches), indicating better resistance to deformation. Therefore, the incorporation of PET and hydrated lime into asphalt concrete presents a promising approach for extending the lifespan of roads under harsh environmental conditions. This also supports the concept of sustainable infrastructure by effectively reusing waste materials.

Keywords: Corrosion, Yielded, Bitumen**,** Marshall Stability

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน ความเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสภาวะแวดล้อมได้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบคมนาคมขนส่ง สภาพแวดล้อมที่รุนแรงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นความชื้นสะสม ฝนตกหนัก กรดจากมลภาวะทางอากาศ ไอเกลือในพื้นที่ชายฝั่งทะเล รวมถึงสารเคมีที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ล้วนเป็นปัจจัยเร่งการเสื่อมสภาพของถนน ทำให้เกิดรอยแตกร้าว ผิวสัมผัสหลุดร่อน และลดอายุการใช้งานของถนนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งไม่เพียงแต่กระทบต่อความปลอดภัยในการสัญจรเท่านั้น แต่ยังส่งผลให้เกิดภาระค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยปัญหาดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวิจัยและพัฒนาวัสดุก่อสร้างให้มีความสามารถในการต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจในระดับนานาชาติ คือการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycling) เพื่อส่งเสริมแนวคิดด้านความยั่งยืน โดยเฉพาะการนำขวดพลาสติก (Polyethylene Terephthalate, PET) ซึ่งมีปริมาณขยะสะสมจำนวนมากมาใช้ในการเสริมคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต PET เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ดี เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว และความสามารถในการยึดเกาะ ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความคงตัวของวัสดุ ลดการซึมผ่านของน้ำ และเพิ่มความต้านทานต่อแรงเฉือน

นอกจากนี้ การใช้ปูนขาว (Hydrated Lime) ร่วมด้วย ยังเป็นอีกแนวทางที่ได้รับการยอมรับในวงการวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีคุณสมบัติในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างยางแอสฟัลต์และมวลรวม อีกทั้งยังช่วยลดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นต้นเหตุของความชื้นสะสมและการเสื่อมสภาพของวัสดุในระยะยาว การผสานคุณสมบัติของ PETและปูนขาวจึงเป็นแนวทางเชิงนวัตกรรมที่มีศักยภาพในการยกระดับคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งในแง่ของความแข็งแรง ความคงทน และการต้านทานต่อสภาพแวดล้อม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของแอสฟัลต์คอนกรีต

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุที่ได้จากการผสมระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) เพื่อนำไปใช้งานเป็นชั้นทางสำหรับการจราจรทุกประเภทในภาคพื้น เช่น ถนน รันเวย์ของสนามบิน ฯลฯ โดยจะต้องควบคุมและตรวจสอบให้ถูกต้องตามแนวระดับความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดที่เหมาะสมตามประเภทของการใช้งานสถานที่

2.2 พลาสติก PET (Polyethylene Terephthalate)

พลาสติก คือ สารประกอบน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาว ๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบย่อยซึ่งได้แก่ ไปไฮโดรคาร์บอนที่มี ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน และพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย คือ พลาสติกประเภท PET พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) พลาสติกประเภทนี้มีลักษณะใส แข็งทนแรงกระแทกดี ไม่เปราะแตกง่าย และกันแก๊สซึมผ่านดี สามารถมองทะลุได้ เช่น ขวดน้ำเปล่า ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้

2.3 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรเคมีคือ NaCl ประกอบด้วยโซเดียม (Na) และคลอรีน (Cl) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นหนึ่งในเกลือที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ สามารถพบได้ในน้ำทะเล น้ำเกลือ และเหมืองเกลือ เป็นสารที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี และการผลิตพลังงาน

2.4 ปูนขาวไฮเดรต (Hydrated Lime, $Ca(OH)_2$)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (Quicklime, CaO) และน้ำ (H_2O) ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามสมการ

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + \text{ความร้อน} \qquad (1)$$

ปูนขาวไฮเดรตมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีคุณสมบัติเป็นด่างสูง โดยมีค่า pH ประมาณ 12.4 ที่อุณหภูมิห้อง มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.42 และพื้นที่ผิวสูง (398 m^2/gm) ทำให้มีความสามารถในการดูดซับและทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นๆ ได้ดี สามารถพบได้ในธรรมชาติในรูปของแร่ เช่น แคลไซต์ (Calcite) และอาราโกไนต์ (Aragonite) ปูนขาวไฮเดรตถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การบำบัดน้ำเสีย การปรับปรุงคุณภาพน้ำ การปรับสภาพดิน และการเพิ่มเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเพิ่มความทนทานต่อความชื้นและการกัดเซาะจากน้ำ

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ขยะขวดพลาสติก (PET)

เลือกใช้ PET ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 (0.06 มม.) ค้างตะแกรงเบอร์ 50 (0.03 มม.)

3.1.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70)

ยางมะตอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.851: มาตรฐานแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานการทาง

3.1.3 ปูนขาวไฮเดรตไลม์ (Hydrated Lime, $Ca(OH)_2$)

3.1.4 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)

3.1.5 วัสดุมวลรวมคละตามาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 408/2532)

วัสดุมวลรวมคละที่ใช้ในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตในงานวิจัยนี้ คือ หินแอลฟัลต์สำหรับการจราจร กองสนามบิน กรมช่างโยธาทหารอากาศ โดยใช้หิน 2 ประเภท ได้แก่ หินส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) ขนาด 1/2" และ 3/4" และ หินส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ขนาด 3/8", 4, 8, 50และ200 และได้เรียงการกระจายขนาดดังรูป 3.1

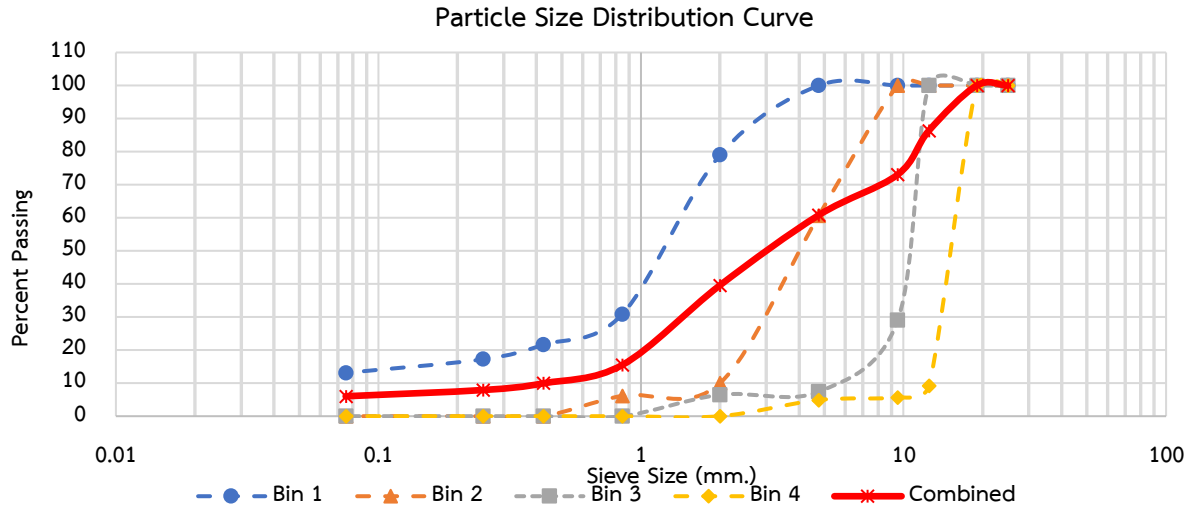
3.2 อัตราส่วนผสมและการทดสอบ

3.2.1 โครงการวิจัยได้ออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (ทล.-ม. 408/2532) ดังนี้

1. ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม(Optimum Binder Content, OBC) คือ 5.3 % โดยมวลรวมหากก้อนตัวอย่างมีน้ำหนัก 1,200 กรัม ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณ 63.6 กรัม

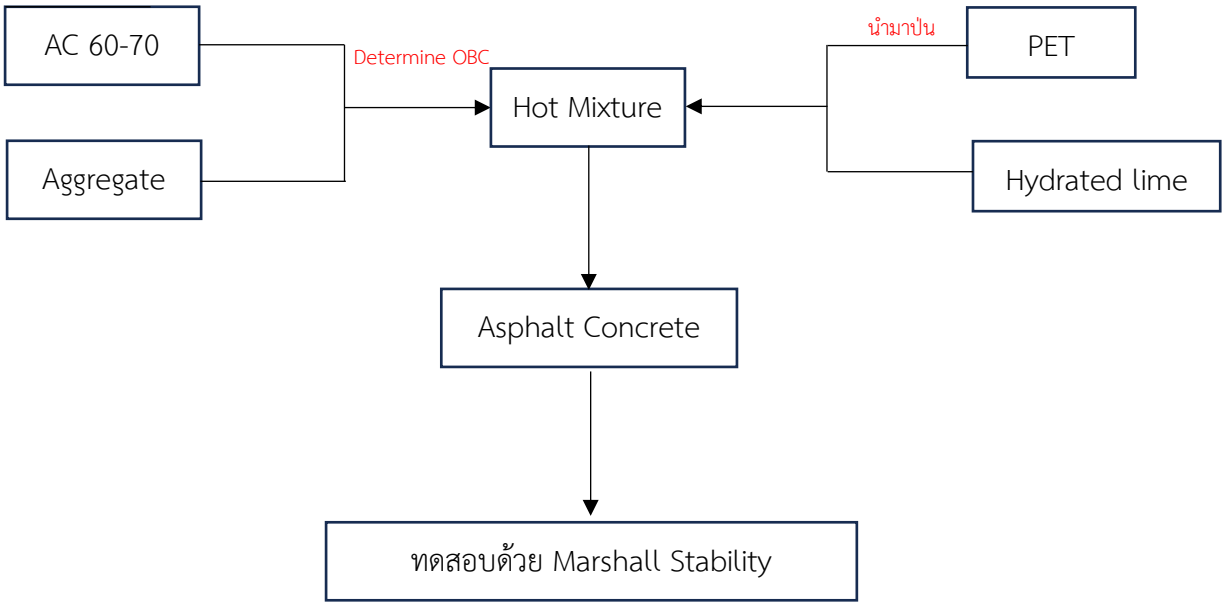
2. ผสม PET ขนาด 0.3 มิลลิเมตรแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียด ปริมาณ 5% ของ OBC หากก้อนตัวอย่างใช้ OBC 63.6 กรัม จะใช้ PET 3.18 กรัม

3. ผสม Hydrated Lime เพิ่มปริมาณ 2 % โดยมวลรวม หากก้อนตัวอย่างหนัก 1,200 กรัม จะต้องผสม Hydrated Lime เพิ่ม 24 กรัม



รูปที่ 3.1 กราฟการกระจายขนาดของมวลรวม (Particle Size Distribution Curve)

3.2.2 การวิธีดำเนินการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก้อนแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 3.2 แสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ที่แช่โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 10% ที่ระยะเวลา 7 วัน

Material Combination	0 (Control)	PET	Hydrated lime	PET + Hydrated lime
ทดสอบ Marshall Starbility	●●●	●●●	●●●	●●●
ทดสอบ Marshall (หลังแช่ NaCl เป็นเวลา 7 วัน)	●●●	●●●	●●●	●●●

4.ผลการวิจัย

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของแต่ละกลุ่มทดสอบ

	Standard	No	PET	Hydrated lime	PET+Hydrated lime
Stability (lb)	1800	2096.83	2551.04	2194.53	2680.86
Density (g/cm)	-	2.368	2.382	2.383	2.384
VFB (%)	70	75.05	77.22	77.40	77.76
Air voids (%)	3-5	3.78	3.34	3.31	3.24
Flow (0.01")	8-16	12.94	12.49	12.80	10.67
VMA (%)	14	15.13	14.65	14.62	14.56
Stability/Flow (lb/0.01")	160	162.04	204.13	171.44	251.18

5. สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากผลการทดลองการเพิ่มพลาสติก (PET) และปูนขาว (Hydrated Lime) ลงในแอสฟัลต์คอนกรีต สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสม PET และปูนขาว โดยค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของกลุ่มที่ไม่ผสมอยู่ที่ 2.368 g/cm³ ขณะที่กลุ่มที่ผสมทั้ง PET และ ปูนขาวมีค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ 2.384 g/cm³ แสดงให้เห็นว่าการเติม PET และปูนขาวช่วยลดปริมาตรช่องว่างภายในโครงสร้างของแอสฟัลต์คอนกรีต ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้นและทนทานต่อแรงกดสูงขึ้น จะทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

5.2 ช่องว่างอากาศ (Air Voids)

ช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม PET และปูนขาวโดย กลุ่มที่ไม่ผสมมีค่า Air Voids เฉลี่ยที่ 3.78% ในขณะที่กลุ่มที่ผสม PET และปูนขาวมีค่า Air Voids ต่ำสุดที่ 3.24% แสดงให้เห็นว่า PET และปูนขาวสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น และมีความทนทานมากขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการผสม PET ซึ่งการที่แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาตรช่องว่างในอากาศน้อย น้ำและอากาศจะซึมผ่านได้ยาก ส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น แต่ถ้าปริมาตรช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ทะลักขึ้นมาที่ผิวบน (เกิดการเยิ้ม)

5.3 ช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA)

ช่องว่างระหว่างมวลรวมของแอสฟัลต์คอนกรีต มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสม PET และปูนขาว โดยกลุ่มที่ไม่ผสมมีค่า VMA เฉลี่ยที่ 15.13% ขณะที่กลุ่มที่ผสม PET และปูนขาวมีค่า VMA ต่ำสุดที่ 14.56% แสดงให้เห็นว่าการผสม PET และปูนขาวสามารถลดช่องว่างระหว่างมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้โครงสร้างแอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่จะเพิ่มผิวสัมผัสของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้ฟิล์มที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนาขึ้น แอสฟัลต์คอนกรีตจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น

5.4 ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Void Filled with Bitumen, VFB)

ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ของแอสฟัลต์คอนกรีต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสม PET และปูนขาว โดยกลุ่มที่ไม่ผสมมีค่า VFB เฉลี่ยที่ 75.05% ขณะที่กลุ่มที่ผสม PET และปูนขาวมีค่า VFB สูงสุดที่ 77.76% แสดงให้เห็นว่า PET และปูนขาวสามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับช่องว่างอากาศ กล่าวคือ จุดที่ช่องว่างอากาศ มีค่าน้อยลง ทำให้ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์มีค่ามากขึ้น แต่หากมีการแทนที่ของแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหายดังกรณีที่ช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น

5.5 เสถียรภาพ (Stability)

เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการผสม PET และปูนขาว โดยกลุ่มที่ไม่ผสมมีค่า Stability เฉลี่ยที่ 2,096.83 lbs. ขณะที่กลุ่มที่ผสม PET และ ปูนขาวมีค่า Stability สูงสุดที่ 2,680.86 lbs. แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับน้ำหนักทนทานต่อการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกดดันสูงและลดการเสียรูปแบบร่องล้อ

5.6 การไหล (Flow)

ค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสม PET และปูนขาว โดยกลุ่มที่ไม่ผสมมีค่า Flow เฉลี่ยที่ 12.94 (0.01") ขณะที่กลุ่มที่ผสม PET และปูนขาวมีค่า Flow ต่ำสุดที่ 10.67 (0.01") แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความหนาแน่นและความแข็งแรงของโครงสร้าง ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกดมากขึ้น ช่วยลดการเสียรูปในระยะยาว

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ฝ่ายทดลองกองวิทยาการและกองสนามบิน กรมช่างโยธาทหารอากาศ ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้และสนับสนุนให้แก่คณะผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ ซึ่งได้รับความดูแลและช่วยเหลือจากอาจารย์เป็นอย่างดีโดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา น.อ. รศ.พงษ์ฤทธิ์ นิติวงศ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ทดลอง ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยและติดตามความก้าวหน้ามาด้วยดีโดยตลอด

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่มีความสนใจและผู้ที่ต้องการศึกษาค้นคว้างานวิจัยเรื่องนี้เพิ่มเติม ท้ายนี้ทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาอันดียิ่งจากทุกท่าน ขออุทิศความสำเร็จและคุณประโยชน์ของการวิจัยครั้งนี้แด่คณาจารย์และ ผู้มีพระคุณที่กล่าวมาข้างต้น ทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] A.Al Ashaibi, Yu Wang, Amjad Albayati, Juliana Byzyka, Miklas Scholz and Laurence Weekes. Thermal Properties of Hydrated Lime-Modified Asphalt Concrete and Modelling Evaluation for Their Effect on the Constructed Pavements in Service. United Kingdom: University of Salford and University of Manchester, 2022

[2] M.Meftah Ben Zair, F.Mohd Jakarni, Ratnasamy Muniandy and Salihudin Hassim. Application of Recycled Polyethylene Terephthalate in Asphalt Pavement Reinforcement. Malaysia: Universiti Putra Malaysia, 2021

[3] Nuha Mashaan, Amin Chegenizadeh and Hamid Nikraz . Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes. Australia: Curtin University, 2021

[4] J.A. Grajales, L.M. Pérez, A. Paul Schwab and Dallas N. Little. Quantum Chemical Modeling of the Effects of Hydrated Lime as a Filler in Bituminous Materials. United States: Texas A&M University, 2021

[5] ภาสกร ไพกุมภัณฑ์ และ กิจติณณ์ มาชู. การปรับปรุงสมรรถนะแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยขยะขวดพลาสติก (PET) ประเทศไทย: โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทรกษัตริยาธิราช, 2021

[6] I.Saeed Al-Haydari and H.Saeed Al-Haydari .Mechanical Properties of Polyethylene Terephathalate-Modified Pavement Mixture. Iraq: Mustansiriyah University and Al-Nahrain University, 2020

[7] A.Mohamady Abdallah, M.Fathy Kamis and M.Ahmed Abdallah. Effect of Hydrated Lime on Asphalt Cement and Asphalt Mixtures Properties. Egypt: Al-Azhar University, 2018

[8] O.Moses Ogundipe and Sukanmi Dada. Determination of the Optimum Lime Content for Asphalt Concrete Using Marshall Mix Design. Nigeria: Ekiti State University, 2016

[9] O.Moses Ogundipe. Marshall Stability and Flow of Lime-Modified Asphalt Concrete. Nigeria: Ekiti State University, 2016

[10] Ahmed F. Al-Tameemi, Yu Wang, Amjad Albayati. Influence of Hydrated Lime on the Properties and Permanent Deformation of the Asphalt Concrete Layers in Pavement. United Kingdom: University of Salford and University of Mancheste, 2015

[11] Bilal Demirel, Ali Yaraş and Huseyin Elçiçek. Crystallization Behavior of PET Materials. Turkey: Erciyes University, Bartin University, and Yıldız Technical University, 2011

[12] กรมทางหลวง, "ทล.-ม. 409/2549 มอดิฟายแอสฟัลต์คอนกรีต (Modified Asphalt Concrete)"

[13] กรมทางหลวง, "ทล.-ม. 408/2532 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)"

[14] กรมทางหลวง, "ทล.-ม. 230/2563 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method)"

[15] กรมทางหลวง, "ทล.-ม. 413/2544 การหาค่าความแน่นของวัสดุเม็ดหยาบ (Bulk Density and Voids in Aggregates)"

[16] กรมทางหลวง, "ทล.-ม. 604/2517 การหาค่าความหนาแน่นและปริมาตรของวัสดุผสมแอสฟัลต์ด้วยวิธีมาร์แชลล์"

ระบบเลเซอร์กำลังสูง: การออกแบบและการสร้างเพื่อการป้องกันระยะใกล้ (Short-Range Defense)

นายกมุทสุพ สังขเกษม[1]*, นายภัคเดช ชาวนาวิก[2] และ นายสหชัย สำเภาเงิน[3]

[1, 2, 3] ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัทอีไอทีเลเซอร์

Mr.Kaamutsup Sungkaksem[1]* , Mr.Pakadech Chaonawig[2] and Mr.Sahachai Sampaongern[3]

[1, 2, 3] R and D team EIT Lasertechnik Ltd

Kaamutsup@eitlaser.com , eit@eitlaser.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกรอบแนวคิดการออกแบบและการสร้างระบบเลเซอร์กำลังสูง (High Energy Laser: HEL) สำหรับการป้องกันเป้าหมายระยะใกล้ ระบบอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยอิงแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีและข้อกำหนดเชิงปฏิบัติการที่ได้จากงานวิจัยและโครงการพัฒนาในระดับนานาชาติ บทความครอบคลุมองค์ประกอบหลัก ได้แก่ สถาปัตยกรรมของเลเซอร์ (solid-state, diode-pumped), ระบบควบคุมลำแสงและการชดเชยบรรยากาศ (beam control & adaptive optics), การจัดการความร้อนและพลังงาน, การบูรณาการบนแพลตฟอร์มเคลื่อนที่ และข้อกำหนดด้านความรุนแรง (lethality) ต่อเป้าหมาย ตลอดจนประเด็นด้านการทดสอบและการดำเนินการจริง ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า HEL ขนาด ~100 kW-class พร้อมระบบ AO และ beam control ที่เหมาะสมสามารถให้ประสิทธิภาพในการป้องกัน RAM ภายในระยะหลายกิโลเมตรภายใต้สภาพบรรยากาศที่เหมาะสม โดยต้องให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพไฟฟ้า-ออปติค (electro-optical efficiency), ความสามารถในการยิงต่อเนื่องแบบซีเควนซ์ และการจัดการความร้อนในสภาพสนามปฏิบัติการ

คำสำคัญ: เลเซอร์กำลังสูง, การป้องกันระยะใกล้, solid-state laser, adaptive optics, beam control, lethality

Abstract

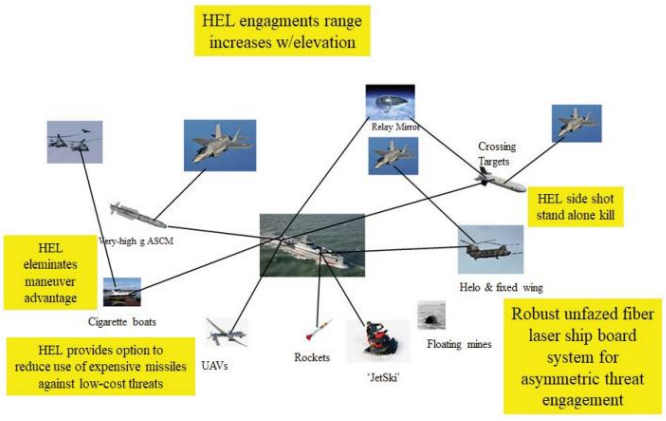
This article proposes a conceptual framework for designing and developing a High Energy Laser (HEL) system for short-range defense against unmanned aerial vehicles (UAVs). The framework is grounded in international development programs and operational requirements observed in previous research projects and defense technology demonstrations. The study highlights essential system components, including solid-state and diode-pumped laser architectures, beam control systems integrated with adaptive optics for atmospheric compensation, energy and thermal management

mechanisms, and mobile platform deployment configurations. Additionally, lethality requirements against airborne targets and field operational testing procedures are discussed. The analytical findings suggest that a ~100 kW-class HEL equipped with an appropriate adaptive optics and beam control subsystem can effectively neutralize RAM (Rocket, Artillery, Mortar) threats within several kilometers under favorable atmospheric conditions. The research emphasizes the importance of electro-optical efficiency, sequential continuous engagement capability, and robust thermal dissipation strategies to ensure sustained operational performance in real-world defense scenarios.

Keywords: High Energy Laser (HEL), Beam Control, Adaptive Optics, UAV Defense, Thermal Management

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของความแม่นยำและความสามารถทำลายล้างอากาศยานไร้คนขับสร้างความต้องการระบบป้องกันแบบใหม่ที่ให้การตอบสนองได้รวดเร็ว มีความแม่นยำสูง และลดความเสียหายจากผลกระทบข้างเคียง อาวุธเลเซอร์กำลังสูง (High Energy Laser, HEL) มีคุณสมบัติพิเศษในการส่งพลังงานไปยังเป้าหมายอย่างรวดเร็ว สามารถปรับระดับผลกระทบได้ตามความต้องการ และมีต้นทุนต่อการทำลาย (cost-per-kill) ต่ำ เมื่อเทียบกับระบบพลศาสตร์เคลื่อนที่แบบเดิม บทความนี้จะสรุปหลักการออกแบบหลัก และแนวทางการสร้างระบบ HEL สำหรับการใช้งานเชิงป้องกันระยะใกล้บนแพลตฟอร์มเคลื่อนที่.



รูปที่ 1 ตัวอย่างของการใช้งานระบบเลเซอร์กำลังสูงที่ใช้ในการป้องกัน การรุกล้ำทางอากาศ (เอกสารอ้างอิง [3])

2. แนวคิดการพัฒนาเทคโนโลยี

แนวทางปัจจุบันมุ่งเน้นที่เลเซอร์ในสถานะของแข็ง (solid-state lasers: SSL) แบบ diode-pumped เนื่องจากความหนาแน่นกำลังต่อมวล (power-to-mass ratio), ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า-ออปติคที่ดีขึ้น และปัญหาการจัดการสารเคมีที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเลเซอร์เชิงเคมี โครงการพัฒนาต่าง ๆ ระบุเป้าหมายเชิงตัวเลข เช่น อุปกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการกำลัง >25 kW และมีเป้าหมายการพัฒนาไปสู่ 100 kW-class สำหรับการใช้งานเชิงยุทธศาสตร์และภาคสนาม.

3. ข้อกำหนดเชิงเทคนิคและการออกแบบระบบ

3.1 สถาปัตยกรรมของแหล่งกำเนิดแสงและการรวมลำแสง

สำหรับการประยุกต์ในภาคสนาม นิยมพิจารณาสถาปัตยกรรมสองแนวทางหลัก: (1) การรวมลำแสงแบบ coherent combining ของหลายโซน (MOPA + coherent beam combining) ซึ่งให้ความยืดหยุ่นในการขยายกำลังและปรับคุณภาพลำแสง และ (2) โมดูลแผ่นเซรามิกหนา (ThinZag-like slab) ที่สามารถสเกลกำลังในช่องเปิดเดียวโดยไม่ต้องรวมลำแสงซับซ้อน ทั้งสองแนวทางมีข้อดี-ข้อจำกัดด้านความเรียบง่ายในการจัดแนว ความทนทาน และการบำรุงรักษา.

3.2 ข้อกำหนดกำลังและประสิทธิภาพ

เป้าหมายการออกแบบทั่วไป: กำลังเฉลี่ยของลำแสงที่มีประสิทธิภาพ ~100 kW (class) ที่ความยาวคลื่นใกล้หนึ่งไมโครเมตร (≈1.06 μm) เพื่อความโปร่งใสในชั้นบรรยากาศและความสามารถในการใช้ออปติกขนาดเล็กกว่าเคมีเลเซอร์ รูปแบบภารกิจกำหนดรูปแบบการยิงเป็นช่วงสั้น (pulsed/semisustained): ตัวอย่างข้อกำหนดการรันไทม์เช่น สามครั้ง 5 วินาที ภายใน 20–33 วินาทีแรก ตามด้วยการยิงเพิ่มเติมที่ duty cycle ~20–25%.

เกณฑ์ประสิทธิภาพ (ตัวอย่างเชิงออกแบบ):

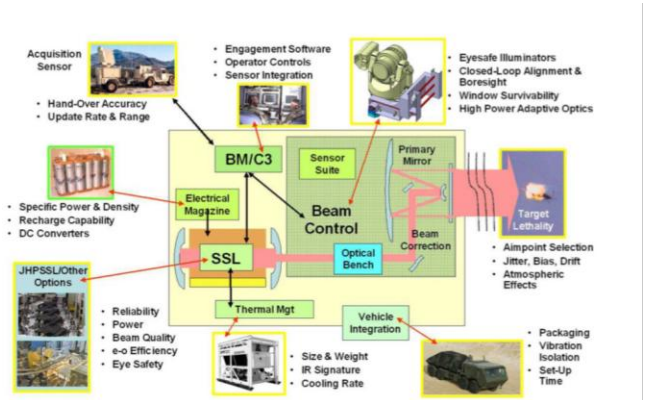
- Electro-optical efficiency (threshold) ≈ 17% (goal 19%) เมื่ออ้างอิงจากประสิทธิภาพ diode array ≈50%.
- คุณภาพลำแสงเป้าหมายในสนาม (power-in-the-bucket) ≤ 2× diffraction limit (เป้าหมาย 1.5×DL).
- ความสามารถในการทำงานซ้ำ (run-time cycle) และการระบายความร้อนที่รองรับการยิงต่อเนื่องแบบซีเควนซ์.

3.3 ระบบควบคุมลำแสงและออปติก (Beam Control & Adaptive Optics)

การควบคุมลำแสงประกอบด้วยเซนเซอร์การได้ภาพหยาบ (coarse acquisition), กล้องติดตามละเอียด (fine tracking), กระจกแก้การเบี่ยงเบน (deformable mirror), และ fast steering mirror สำหรับปลดภาระ tilt. ระบบ AO แบบ target-loop ที่ป้อนกลับความผิดเฟสของคลื่นบน deformable mirror มีบทบาทสำคัญในการลดการแพร่ขยายของลำแสงและขยายระยะปฏิบัติการภายใต้สภาวะบรรยากาศไม่เอื้ออำนวย.

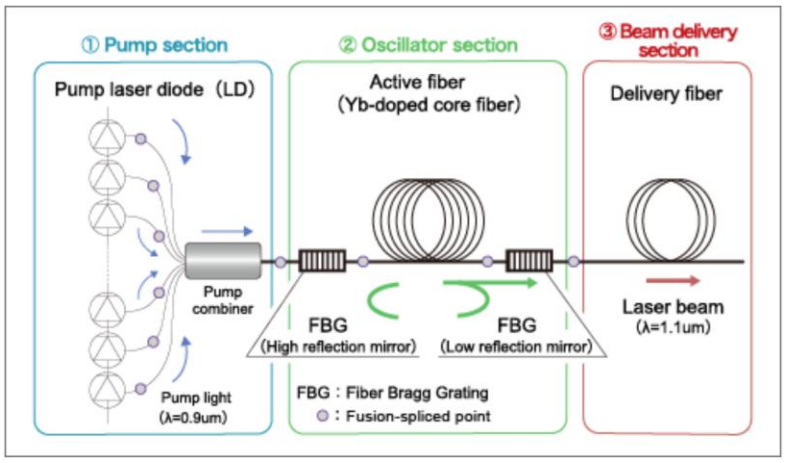
3.4 การจัดการพลังงานและความร้อน

การป้อนพลังงานให้แก่ diode array มักมาจากแหล่งพลังงาน DC ที่มาจากแบตเตอรี่หรือระบบจัดเก็บพลังงานแบบอื่น (power pack) ต้องพัฒนา DC-DC converters ที่มีประสิทธิภาพสูง ขนาดกะทัดรัด และทนทานต่อสภาพแวดล้อมทางทหาร ระบบระบายความร้อนอาจใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของเหลว ซิสเต็มระบายความร้อนด้วยอากาศปรับปรุง หรือโซลูชัน hybrid ขึ้นกับขีดจำกัดน้ำหนักและพื้นที่บนแพลตฟอร์ม.



HEL weapon technology.

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้งานเลเซอร์กำลังสูงสำหรับการป้องกันประเทศ (เอกสารอ้างอิง [1])



รูปที่ 3 หลักการออกแบบของเลเซอร์ระบบไดโอดปั๊มในสถานะของแข็งที่ต่อด้วยสายไฟเบอร์ออปติค
(ที่มารูปภาพ https://www.fiberlaser.fujikura.jp/eng/products/about-fiber-laser.html)

4. การสร้าง ทดสอบ และการประเมินผล

กระบวนการพัฒนาประกอบด้วยการสร้างต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory demonstrator), การทดสอบออปติกและความคงทน (endurance testing), การทดลองภาคสนามที่ HELSTF-style range, และการวัดผลด้าน lethality ต่อเป้าหมาย RAM แบบจำลองและจริง (static and flight tests). เกณฑ์การวัดผลจะรวมถึง: ความแม่นยำในการเดินลำแสง, พลังงานบนเป้าหมาย (fluence), ขนาดจุดบนเป้าหมาย (spot size), และอัตราการทำงานต่อเนื่อง (duty cycle).

5. ประเด็นทางเทคโนโลยีที่สำคัญ

5.1 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศและการชดเชย

ชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดการกระจายตัวของลำแสง (beam spreading), การลอบเคลื่อน (beam wander) และการเปลี่ยนแปลงความเข้ม ซึ่งจำเป็นต้องมี AO และการนำฟังก์ชันพยากรณ์ (prediction) มาช่วยควบคุม การจำลองระบบ-level (เช่น HELCOMES) สามารถใช้ประเมินการปฏิบัติการภายใต้ค่าพารามิเตอร์ทางบรรยากาศต่าง ๆ.

5.2 กลศาสตร์การทำลายและ lethality

กลไกการทำลายเช่น Rapid Cook-Off (RCO) อาศัยการให้ความร้อนจนผิวภายนอกจุดติดของเชื้อเพลิงภายในเป้าหมาย การพัฒนาเกณฑ์ lethality ต้องมีการทดลองแบบ static, dynamic และ flight tests เพื่อสร้างฐานข้อมูลพารามิเตอร์ที่แม่นยำ เช่น พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ (J/cm2) ที่ต้องการเพื่อเกิดความล้มเหลวในโครงสร้างเป้าหมาย.

5.3 ปัญหาเกี่ยวกับความปลอดภัยและปฏิบัติการ

การใช้งาน HEL ในภาคสนามต้องพิจารณาประเด็นด้านความปลอดภัยของบุคลากร (สายตาและระบบอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ), นโยบายการใช้กำลัง และกฎระเบียบการปล่อยคลื่นแสงที่อาจกระทบพลเรือนหรืออากาศยานพลเรือนใกล้เคียง ระบบต้องมีมาตรการป้องกันการเปิดใช้งานโดยไม่ตั้งใจและการปิดกั้นทางอากาศ (airspace coordination).

6. การประเมินสมรรถนะและการทดสอบทางภาคสนาม

การทดสอบสมรรถนะควรประกอบด้วยการทดลองภายใต้สภาวะการมองเห็นต่าง ๆ (visibility), การทดสอบการติดตามเป้าหมายที่ความเร็วและการเร่งต่าง ๆ, รวมถึงการทดสอบการยิงต่อเนื่องตามรูปแบบการใช้งานจริง การวัดผลต้องมีความสามารถในการบันทึกพลังงานบนเป้าหมายและลำดับเวลาของการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย.

รูปที่ 4 แสดงถึงระบบเลเซอร์กำลังสูงที่ติดตั้งอยู่บนรถภาคสนามทางการทหาร (เอกสารอ้างอิง [4])

7. ข้อเสนอแนะและสรุป

HEL เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสำหรับการป้องกันระยะใกล้ โดยเฉพาะต่อกรณี RAM หากออกแบบโดยคำนึงถึงสถาปัตยกรรมที่เหมาะสม ระบบควรรวม: แหล่งกำเนิดแบบ diode-pumped SSL ที่สเกลไปยัง ~100 kW-class, ระบบ

beam control และ AO ที่ผสานการทำนายภาวะบรรยากาศ, ระบบจัดการพลังงาน/ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และการบูรณาการบนแพลตฟอร์มที่มี mobility เพียงพอ. การพัฒนาในอนาคตควรมุ่งไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพไฟฟ้า-ออปติค, ลดน้ำหนัก/ปริมาตรของระบบระบายความร้อน และการยืนยันผลการทำลายผ่านการทดสอบภาคสนามที่กว้างขวาง.

8. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Lavan, "High Energy Laser Systems for Short Range Defense", Acta Physica Polonica A, Vol.115 (2009).

[2] เอกสารเชิงเทคนิคและรายงานทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับ JHPSSL, HEL TD, และการทดสอบ HEL (สรุปโดยผู้เขียน).

[3] Lazov, L., Teirumnieks, E., & Ghalot, R. S. (2021). Applications of laser technology in the Army. *Journal of Defense Management*, *11*(4), 1–8. https://doi.org/10.35248/2167-0374.21.11.210

[4] **西安知**语云科技多维协同激光毁伤,**无人机干**扰打击利器 - 维科号. (n.d.). https://mp.ofweek.com/im/a356714100537

คอนกรีตจากเปลือกหอยนางรม
Concrete form Oyster Shell Waste

อริสมันต์ แสงธงทอง[1], วรพล ผิวแดง[2]และ สาธิต กลิ่นหอม[3]
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
Arisman Saengthongthong[1], Woraphon Pewdang[2], Sathit Klinhom[3]
Civil Engineering Department Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด ทั้งแบบผ่านและไม่ผ่านการเผา เพื่อหาค่ากำลังอัด 7 วัน โดยพบว่าเปลือกหอยนางรมมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายปูนซีเมนต์แต่มีธาตุแคดเมียม ผลทดสอบพบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกหอยนางรม แต่สามารถระบุอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุดคือ 15% ของเปลือกหอยนางรมบดที่ไม่ผ่านการเผาส่วนผสมที่ 15% นี้ให้ค่ากำลังอัดที่ 7 วัน เท่ากับ 173.14 ksc ซึ่งผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ มอก. 213-2560 สำหรับคอนกรีตคุณภาพ C21/24 และสูงกว่าคอนกรีตควบคุมกว่า 90% การใช้เปลือกหอยนางรมที่ไม่ผ่านการเผาในอัตรานี้ยังช่วยลดการปล่อย CO_2 จากการเผาและสามารถลดปริมาณขยะเปลือกหอยนางรมได้ถึง 3.44 ล้านตันต่อปี ดังนั้น การใช้เปลือกหอยนางรมบดที่ไม่ผ่านการเผาที่อัตรา 15% จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยมีความสมดุลทั้งด้านคุณภาพที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับมวลรวมผสมคอนกรีต มอก. 566-2562 และช่วยลดต้นทุนคอนกรีตผสมสำเร็จลงได้ 5.93% ต่อลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ธาตุแคดเนียม, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, เปลือกหอยนางรม

Abstract

This research investigated using heated and non-heated oyster shell powder (OSP) as a cement replacement, finding that compressive strength at 7 days decreased as the substitution level (5% to 50%) increased. The optimal mix was 15% non-heated OSP, which achieved a 7-day compressive strength of 173.14 ksc, exceeding 90% of the control mix and satisfying the TIS 213-2560 (C21/24) standard. Environmentally, using 15% non-heated OSP prevents CO_2 emissions associated with thermal processing and offers a solution for 3.44 million tons of annual oyster shell waste. The mixtures also met the TIS 566-2562 aggregate standards, demonstrating compliance with industrial requirements for general structural concrete applications. In summary, substituting 15% of cement with non-heated OSP is technically viable, environmentally sound, and economically beneficial, reducing concrete production costs by approximately 5.93% per cubic meter.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารทะเลในไทยสร้างขยะเปลือกหอยนางรมจำนวนมาก (ประมาณ 2,139.27 ตันต่อปีในปี 2566) ซึ่งไม่ย่อยสลาย ทำให้เกิดมลพิษและต้องใช้การฝังกลบที่มีค่าใช้จ่ายสูงงานวิจัยนี้จึงมุ่งนำเปลือกหอยนางรมเผาที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงปูนซีเมนต์มาทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต เพื่อแก้ปัญหาขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตปูนซีเมนต์เป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 8 ของปริมาณทั่วโลก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน และการทำเหมืองยังก่อให้เกิดฝุ่นละอองต่อระบบทางเดินหายใจ การใช้เปลือกหอยนางรมเผาเป็นวัสดุทดแทนสามารถช่วยลดปัญหาเหล่านี้ได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีต นอกจากนี้ การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมยังสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต และลดการปล่อยธาตุแคดเมียมที่มีการเจือปนจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเปลือกหอยนางรม โดยมุ่งเน้นศึกษาทฤษฎี หลักการ และเทคโนโลยีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตในด้านวัสดุและกำลังอัด ประเด็นที่ศึกษาประกอบด้วย ชนิดของหอยนางรม คุณสมบัติทางเคมีของเปลือกหอยนางรม กระบวนการเผาเปลือกหอยนางรม องค์ประกอบของส่วนผสมคอนกรีต ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็นดังกล่าว

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหอยนางรม

หอยนางรมเป็นสัตว์ทะเลสองฝาเปลือกแข็งหนา โดยเปลือกส่วนใหญ่ (ประมาณร้อยละ 95) ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งเป็นสารประกอบเดียวกับหินปูน ทำให้มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต การบริโภคหอยนางรมอย่างแพร่หลายทำให้เกิดขยะเปลือกหอยจำนวนมากที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาจึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดของเสียและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตวัสดุก่อสร้าง หอยนางรมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลัก ได้แก่

1.หอยนางรมหนาม (Thorny Oyster, Spondylus spp) เป็นหอยสองฝาที่อาศัยอยู่บริเวณแนวปะการัง มีลักษณะเด่นคือเปลือกคล้ายพัดที่มีหนามยาวแผ่ออกรอบเปลือกฝาด้านหนึ่งยึดติดกับวัตถุแข็ง (มีลักษณะเว้าคล้ายถ้วย) มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 7 เซนติเมตร โดยมีสีเปลือกส่วนใหญ่เป็นสีส้มเมื่อมีชีวิต

2.หอยนางรมพันธุ์เล็ก (Saccostrea commercialis) ที่มีกาบซ้ายใหญ่กว่ากาบขวา ผิวขรุขระ และถูกนำมาใช้ในการวิจัยวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

3.หอยนางรมพันธุ์ใหญ่ (Crassostrea belcheri) หรือหอยตะโกรม ซึ่งมีขนาดใหญ่ ฝาค่อนข้างแบนกว้าง และฝาล่างลึกกว่าฝาบน

2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ (Type of cement)

2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างหลักในกลุ่มปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ผลิตจากการบดปูนเม็ด (แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอลิก) ผสมกับยิปซั่มเพื่อควบคุมระยะเวลาการแข็งตัวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ และการผลิตในไทยต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เล่มที่ 1 มีอยู่ 4 ประเภทได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) เป็นประเภทที่ได้รับความนิยม สูงสุดในไทย เหมาะสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เสา และคาน

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลงทนซัลเฟตได้ปานกลาง มีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่าประเภทที่ 1 และเหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่สัมผัสกับดิน เช่น ฐานรากหรือตอม่อขนาดใหญ่

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบในระยะเวลา อันสั้น เช่น เสาเข็มอัดแรงหรือองค์ประกอบสำเร็จรูป

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (พัฒนากำลังอัดช้า) ใช้ในงานคอนกรีตหลา เช่น โครงสร้างเขื่อนเพื่อป้องกันการแตกร้าวจากความร้อน และ ประเภททนซัลเฟตสูง (มีไตรแคลเซียมอะลูมิเนตไม่เกินร้อยละ 5) เหมาะสำหรับโครงสร้างใต้ดิน

2.2.2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสม (Blended Hydraulic Cement)

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมเกิดขึ้นเพื่อสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนและลดการใช้พลังงาน โดยผลิตจากการผสมปูนเม็ดกับวัสดุผสมเสริม (เช่น เถ้าลอยหรือตะกรัน) เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตให้สูงขึ้น.ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ถูกควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน มอก. 849-2566 และจำแนกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag Cement) ผสม Ground Granulated Blast-furnace Slag ร้อยละ 25-70 มีคุณสมบัติเพิ่มความสามารถในการเทเข้าแบบ, เพิ่มกำลังอัดที่ระยะปลาย, และเพิ่มความทนทานต่อซัลเฟต เหมาะสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป เช่น ถนน สะพาน

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Pozzolan Cement) ผสมสารปอซโซลานร้อยละ 15-40 มีคุณสมบัติคล้าย Slag Cement แต่ทนทานต่อซัลเฟตดีกว่าและลดความร้อนไฮเดรชั่น เหมาะสำหรับงานโครงสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล

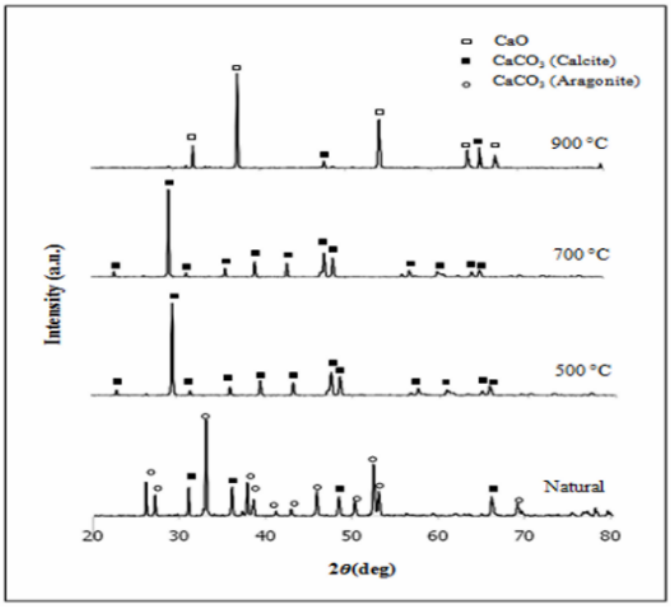
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปรุงแต่งด้วยปอซโซลาน เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมสารปอซโซลานในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

4. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมประเภท Slag-modified Moderate Heat เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-furnace Slag) น้อยกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป

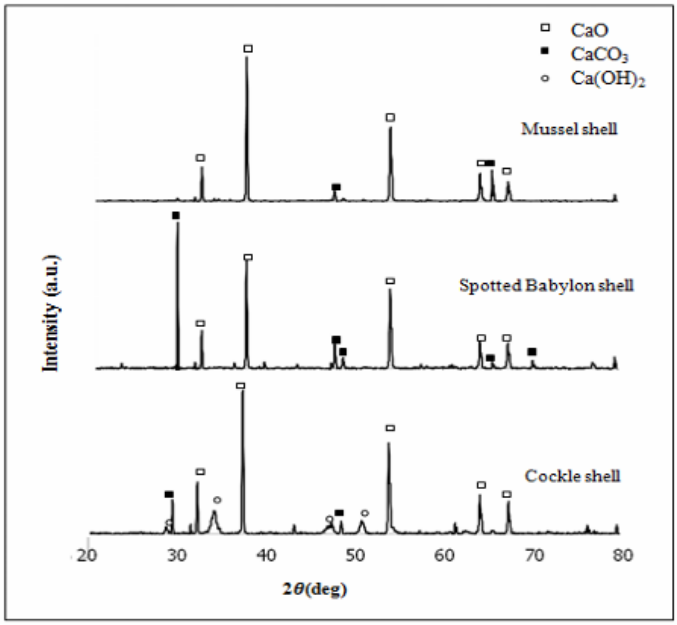
5. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-furnace Slag) มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เหมาะสำหรับงานก่ออิฐผนัง

2.3 การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย (สุภกร บุญยืน และคณะ, 2558) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษากระบวนการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่มีอยู่ในเปลือกหอยทะเล โดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่ หอยหวาน และหอยแครงเป็นวัสดุตัวอย่าง ซึ่งถูกเตรียมในรูปแบบผงละเอียด ก่อนนำไปผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500 700 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดและกรองผ่านตะแกรงขนาด 100 ไมโครเมตร เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดสม่ำเสมอสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แคลเซียมคาร์บอเนตที่สะสมอยู่ในเปลือกหอยมีการเปลี่ยนแปลงทางเฟสไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามลำดับของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett–Teller: BET ยืนยันการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เปลือกหอยทุกชนิดมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของโครงสร้างอะราโกไนต์ (Aragonite) เป็นหลัก โดยเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 500–700 องศาเซลเซียส โครงสร้างจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นแคลไซต์ (Calcite) และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

โดยเฉพาะในกรณีของเปลือกหอยแมลงภู่ ซึ่งให้ผลการเปลี่ยนเฟสที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูงกว่าหอยหวานและหอยแครง ตามลำดับ

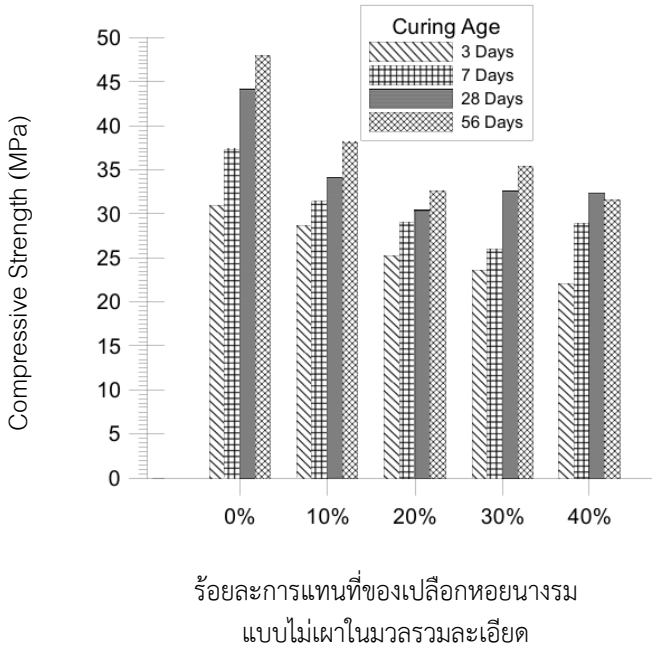


รูปที่ 1 การเลียวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของ เปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 2 การเลียวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของ เปลือกหอยแครง หอยแมงภู่ และหอยหวานที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2.4 ผลกระทบของการทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีตด้วยเปลือกหอยนางรม (Yao-Ming Hong et al, 2567) งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพของการใช้ ผงเปลือกหอยนางรมที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา มาใช้เป็นการทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีต ดำเนินการวิจัยประกอบด้วยการหาค่าความถ่วงจำเพาะของเปลือกหอยนางรมซึ่งมีค่า 2.17 การทดแทนมวลรวมละเอียดด้วยผงเปลือกหอยนางรมในอัตร่ส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 และทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้หลังจากการบ่มเป็นระยะเวลา 56 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผงเปลือกหอยนางรมในคอนกรีต ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง แต่เมื่อใช้ผงเปลือกหอยนางรมแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 40 คอนกรีตมีค่ากำลังอัด 30 MPa ซึ่งตรงตาม มาตรฐานความแข็งแรงของอาคารนอกจากนี้ การใช้ผงเปลือกหอยนางรมแทนที่มวลรวมละเอียดยังส่งผลให้ น้ำหนักของคอนกรีตลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อใช้การทดแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 40 เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะของเปลือกหอยนางรมที่ต่ำกว่าทราย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำผงเปลือกหอยนางรม มาใช้เป็นทางเลือกในการลดขยะจากเปลือกหอยนางรม และสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในมวลรวมละเอียดของคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่ากำลังอัดขอคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเปลือกหอยนางรมแบบไม่เผา

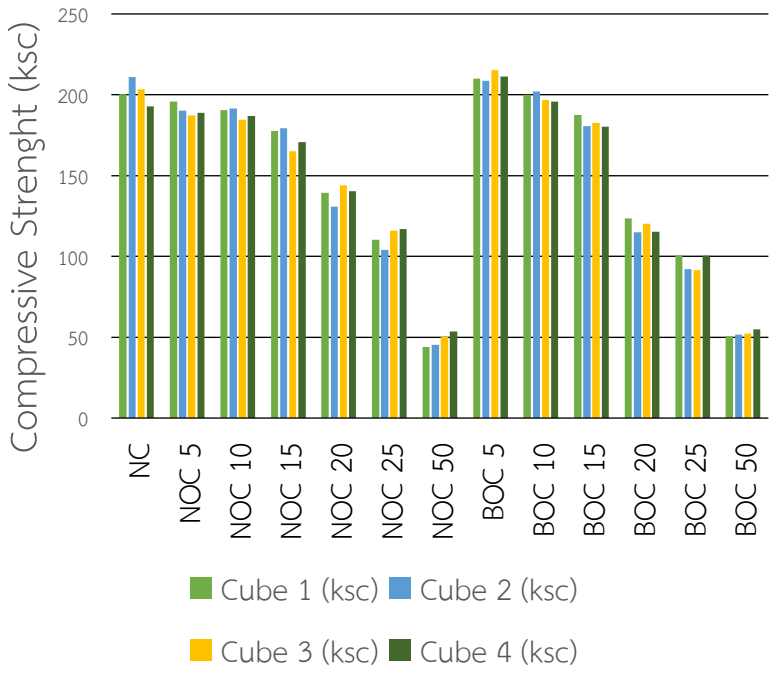
3. การดำเนินการวิจัย

แผนการวิจัยเพื่อพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตจากเปลือกหอยนางรมประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ได้แก่ ศึกษาทฤษฎี เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ ศึกษาอัตราส่วนผสม ทดสอบคุณสมบัติก้อนตัวอย่าง และควบคุมการผลิตตั้งแต่เลือกส่วนผสม ผสมคอนกรีต เข้าแบบ จนได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดใกล้เคียงคอนกรีตทั่วไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในครั้งนี้ดำเนินการโดยใช้เปลือกหอยนางรมบดเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามปริมาณน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลกระทบของการแทนที่ต่อสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบถูกนำเสนอไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังอัดเมื่ออัตราส่วนของวัสดุทดแทนมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีต

4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่ลดลง

การวิเคราะห์ต้นทุนการผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมปกติ 1,787 บาท และส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 15 % ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (OSP) พบว่าต้นทุนรวมแตกต่างกันตามกระบวนการแปรรูป ส่วนผสม OSP ที่ไม่ผ่านการเผามีต้นทุนต่ำที่สุดที่ 1,681 บาท (ลดลงจากส่วนผสมปกติ) เนื่องจากลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง 46 กก. และมีเพียงค่าขนส่ง OSP 46 บาท ในทางตรงกันข้าม ส่วนผสม OSP ที่ผ่านการเผามีต้นทุนรวมสูงกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อยที่ 1,796 บาท เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเผา 115 บาท ต่อ กก. ผลการพิจารณาต้นทุนรวม (รวมค่าแรง) ยืนยันว่าการใช้เปลือกหอยนางรมบดที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาในอัตรา 15 % มีศักยภาพในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตโดยรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับส่วนผสมคอนกรีตผสมทั่วไป

ตารางที่ 1 ตารางสรุปค่าใช้จ่ายในการผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมจากเปลือกหอยนางรม เทียบเคียงกับคอนกรีตปกติ (ไม่รวมค่าแรง)

ค่าใช้จ่ายต่างๆ	ผ่านกระบวนการเผา	ไม่ผ่านกระบวนการเผา	ไม่ผสมหอยนางรม
ค่าปูนซีเมนต์	855	855	1,007
ทรายละเอียด	297	297	297
หินคลุกขนาดเบอร์ 2	483	483	483
การขนส่งเปลือกหอยนางรม	46	46	-
การเผาเปลือกหอยนางรม	115	-	-
รวม	1,796	1,681	1,787

5. สรุป

จากการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเปลือกหอยนางรมบด (OSP) ในอัตราส่วนที่หลากหลาย (ร้อยละ 5 ถึง 50) เพื่อประเมินค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนการทดแทนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดแทนในอัตราส่วนที่ร้อยละ 15 ด้วย OSP ที่ไม่ผ่านการเผาถือเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 173.14 ksc ณ อายุ 7 วัน ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมกว่า 90% และเป็นไปตามเกณฑ์ชั้นคุณภาพ C21/24 ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ มอก. 213-2560 อย่างมั่นคง แม้ว่า OSP ที่ผ่านการเผาจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า (182.77 ksc) เนื่องจากมีการเปลี่ยน $CaCO_3$ เป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า แต่การเลือกใช้ OSP ที่ไม่ผ่านการเผาในอัตรา 15% นี้ยังช่วยลดการปล่อย CO2 ที่เกิดจากกระบวนการเผา และสามารถจัดการขยะเปลือกหอยนางรมได้ถึง 3.44 ล้านตัน ต่อปี ซึ่งเป็นไปตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับมวลรวมผสมคอนกรีต มอก. 566-2562 ในเชิงเศรษฐศาสตร์ การทดแทน 15% นี้ยังช่วยลดต้นทุนรวมในการผลิตคอนกรีตผสมสำเร็จลงได้ประมาณ 5.93% ต่อลูกบาศก์เมตร โดยสรุป จึงยืนยันได้ว่าการใช้ OSP บดที่ไม่ผ่านการเผาในอัตรา 15% เป็นทางเลือกที่สมดุลและยั่งยืนทั้งด้านคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด ด้านเศรษฐกิจ และด้านสิ่งแวดล้อม

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ในการทำวิจัยครั้งนี้ โดยเฉพาะ น.ต. ดร.อริสมันต์ แสงธงทอง ที่ให้คำปรึกษาทางด้านทฤษฎี และได้ติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัย รวมถึงคณะกรรมการ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและติดตามความก้าวหน้าของโครงการวิจัย รวมถึงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบในการดำเนินการวิจัย และแนะนำขณะดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ประชุม คำพุฒ และทวิช กล้าแท้, “การใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยนางรมแทนที่มวลรวมหยาบในงานคอนกรีต,” *วารสารการวิจัยเชิงประยุกต์ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,* ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, หน้า 39-49, กันยายน, 2565.

[2] ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และคณะ, “คุณสมบัติด้านกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของปูนฉาบที่ผสมเปลือกหอยบด,” *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา,* ปีที่ 21, ฉบับที่ 4, หน้า 18-28, 2553.

[3] สุภกร บุญยืน และคณะ, “การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย,* ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 115-122, พฤษภาคม-สิงหาคม, 2558.

[4] Mustakimah Mohamed, Suzana Yusup, Saika Maitra, “Decomposition Study of Calcium Carbonate in Cockle Shell, *Journal of Engineering Science and Technology,* vol. 7, no. 1, pp. 1-10, February, 2012.

[5] The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd, *“ข้อมูล ประเภทของมวลรวม.”* [Online]. Available: http://web.cpac.co.th/en/article (เข้าถึงเมื่อ: 17 กุมภาพันธ์ 2568).

[6] Bunyamin, B., & Mukhlis, A., “Utilization of Oyster Shells as a Substitute Part of Cement and Fine Aggregate in the Compressive Strength of Concrete,” *Aceh International Journal of Science and Technology*, Vol. 9, no. 3, pp. 150–156, December, 2020.

[7] Baddredine, D., Bourdot, A., Maalouf, J., Rateau, O., Abahri, K., & Sebaibi, N., "Valorisation of oyster shell powder in mortars as partial replacement of cement," *Journal of Building Engineering*, vol.*38*, pp.1-5, 2020.

[8] Guimarães, A. C. P. D., "Use of oyster shell (Crassostrea gigas) as aggregate replacement for producing environmentally-friendly concrete," *Master's thesis, Federal University of Santa Catarina*, February, 2019.

[9] Hong, Y.-M., & Choudhury, S. R., "The Substitution Effect of the Fine Aggregate in Concrete with Oyster Shell." *Materials*, vol. 17, no.18, pp.1-22, 2024.

[10] Khing, A., Aye, K., Kenye, K., Nainar, E., & Sangtam, C., "Strengthening of Concrete by using Oyster Shell and Marble Powder'" *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 8, no.4, pp. 8048-8052, November 2019.

แนวทางทำนายระดับน้ำในพื้นที่ขาดข้อมูลดิบ โดยการใช้อัลกอริทึม S_TIDE
A Method for Water Level Prediction in Data-Scarce Areas Using the S_TIDE Algorithm

รณกร สร้อยศรี[1*] และ วาริส บัวขาว[2]
[1, 2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
Ronnakorn Soisee[1*] and Waris Buakhaw[2]
[1, 2]Civil Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy
ronnakorn.ce@gmail.com

บทคัดย่อ

การเข้าถึงข้อมูลระดับน้ำดิบจากสถานีวัดระดับน้ำจำเป็นต้องใช้งบประมาณและมีขั้นตอนการขออนุญาตที่ซับซ้อน ส่งผลให้การศึกษาน้ำขึ้นน้ำลงและการพยากรณ์ระดับน้ำในบางพื้นที่ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์และทำนายน้ำขึ้นน้ำลงโดยไม่อาศัยข้อมูลดิบของระดับน้ำจริง โดยใช้ผลการทำนายน้ำที่มีการเผยแพร่มาเป็นข้อมูลนำเข้าให้กับอัลกอริทึม S_TIDE แล้วทำนายย้อนกลับหาระดับน้ำจริง เพื่อทดสอบความสามารถในการทำนายและการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง สถานีเกาะหลักถูกเลือกเป็นสถานีต้นแบบในการทดสอบและใช้ข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงของปี 2021 ซึ่งเป็นปีที่มีข้อมูลครบถ้วนเป็นต้นแบบในการทดสอบ ผลการตรวจสอบความสามารถของ S_TIDE ด้วยการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงพบว่าองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลสูงคือ K_1 = 51 ซม. และ O_1 = 34 ซม. และจากผลทำนายน้ำปี 2024 พบว่าผลการทำนายน้ำจาก S_TIDE มีความสอดคล้องกับผลการทำนายน้ำของกรมอุทกศาสตร์ โดยมีค่า R^2 = 0.897 และผลการทดสอบการทำนายย้อนกลับโดยใช้ผลการทำนายน้ำของกรมอุทกศาสตร์ของปี 2024 เป็นข้อมูลนำเข้าเพื่อคำนวณหาระดับน้ำในปี 2021 พบว่าผลการทำนายระดับน้ำมีค่า R^2 = 0.937 แสดงให้เห็นว่า S_TIDE สามารถทำนายระดับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นเครื่องมือทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ที่มีข้อมูลจำกัด

คำสำคัญ : น้ำขึ้นน้ำลง, S_TIDE, ทำนายน้ำ, การจัดการน้ำ, การทำนายข้อมูลที่ขาดหาย

Abstract

Access to raw water level data from water level monitoring stations requires substantial budget and involves complex authorization procedures, which prevents continuous tidal and water level forecasting studies in certain areas. This research presents a novel approach to analyze and

predict tidal components without relying on actual raw water level data. The methodology employs published tidal predictions as input data to the S_TIDE algorithm to retrospectively predict actual water levels and verify the predictive capability and tidal component separation. Koh Lak Station was selected as the prototype station for testing using hourly water level data from 2021, the year with complete data coverage. The validation results of S_TIDE's tidal component separation revealed that the dominant constituents with high influence are K1 = 51 cm and O1 = 34 cm. The 2024 water level predictions from S_TIDE demonstrated strong agreement with the Hydrographic Department's predictions, with R^2 = 0.897. Furthermore, the retrospective prediction test using the Hydrographic Department's 2024 tidal predictions as input to calculate water levels in 2021 yielded R^2 = 0.937, indicating that S_TIDE can effectively predict water levels. This demonstrates that S_TIDE serves as a suitable alternative tool for water resource management in areas with limited data availability.

Keywords: Tide, S_TIDE, Water Level Prediction, Water Management, Missing Data Prediction

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำและชายฝั่งอย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น การกัดเซาะชายฝั่งที่รุนแรงขึ้น และความถี่ของปรากฏการณ์น้ำท่วมที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัญหาเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของประชาชน เศรษฐกิจท้องถิ่น และทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ชายฝั่ง การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำและการคาดการณ์ระดับน้ำอย่างถูกต้องจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการวางแผนเชิงสิ่งแวดล้อม การออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน และการเตรียมความพร้อมรับมือกับภัยพิบัติทางธรรมชาติในอนาคต

อย่างไรก็ตาม การศึกษาน้ำขึ้นน้ำลงและการทำนายระดับน้ำในประเทศไทยยังคงเผชิญข้อจำกัดสำคัญ นั่นคือการขาดข้อมูลระดับน้ำดิบที่สามารถเข้าถึงได้ ข้อมูลจากสถานีวัดระดับน้ำจริงหลายแห่งไม่เปิดเผยต่อสาธารณะ ต้องผ่านขั้นตอนการขออนุญาตและใช้งบประมาณสูง อีกทั้งบางสถานียังมีข้อมูลไม่ต่อเนื่องหรือไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้การศึกษาน้ำขึ้นน้ำลงในบางพื้นที่ทำได้ยาก และแบบจำลองที่ได้อาจมีความไม่แน่นอนสูง แม้ว่ากรมอุทกศาสตร์จะเผยแพร่ผลการทำนายน้ำรายสถานีที่ครอบคลุมทั่วประเทศ แต่ข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถใช้แทนข้อมูลระดับน้ำจริงในเชิงวิเคราะห์ได้โดยตรง ทำให้การสร้างแบบจำลองที่อ้างอิงต่อการจัดการทรัพยากรน้ำยังคงมีข้อจำกัดในหลายพื้นที่

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งนำเสนอแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์และทำนายระดับน้ำโดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลระดับน้ำดิบจริง แต่ใช้ผลการทำนายน้ำจากกรมอุทกศาสตร์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่เผยแพร่สู่สาธารณะ มาเป็นข้อมูลนำเข้าให้อัลกอริทึม S_TIDE [1] ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์น้ำขึ้นน้ำลงแบบไม่คงที่ (non-stationary tidal analysis) ที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดจากอัลกอริทึม T_TIDE [2] เพื่อให้มีความยืดหยุ่นและแม่นยำยิ่งขึ้นในกระบวนการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง

การศึกษานี้ได้เลือกสถานีเกาะหลักเป็นสถานีต้นแบบ เนื่องจากมีข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงครบถ้วนในปี 2021 และได้นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบ

น้ำขึ้นน้ำลงหลักที่มีอิทธิพลสูงต่อระดับน้ำในพื้นที่ชายฝั่ง จากนั้นจึงนำอัลกอริทึม S_TIDE มาทำนายระดับน้ำในปี 2024 พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทำนายน้ำของกรมอุทกศาสตร์ เพื่อประเมินความแม่นยำและความสอดคล้องขององค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงที่ได้จากทั้งสองแหล่งข้อมูล

นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้ทำการทำนายย้อนกลับ โดยใช้ผลการทำนายน้ำในปี 2024 มาประเมินความสอดคล้องกับระดับน้ำในปี 2021 เพื่อทดสอบความสามารถของ S_TIDE ในการจำลองระดับน้ำทั้งในทิศทางไปข้างหน้าและย้อนกลับ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อเสนอแนวทางใหม่ในการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่เข้าถึงได้ทั่วไป ร่วมกับเครื่องมือเชิงวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่น เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านข้อมูล และช่วยยกระดับการคาดการณ์ระดับน้ำให้มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการวางแผนด้านสิ่งแวดล้อม การอนุรักษ์ชายฝั่ง และการจัดการภัยพิบัติทางน้ำในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์น้ำขึ้นน้ำลงเป็นพื้นฐานสำคัญของการคาดการณ์ระดับน้ำและการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำชายฝั่ง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic Analysis) เพื่อแยกสัญญาณระดับน้ำออกเป็นองค์ประกอบย่อยตามอิทธิพลของแรงดึงดูดจากดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ [3] เครื่องมือที่นิยมใช้คือ T_TIDE ซึ่งมีความแม่นยำสูง แต่มีข้อจำกัดในการประมวลผลข้อมูลที่ไม่คงที่ (non-stationary data) อัลกอริทึม S_TIDE จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์น้ำขึ้นน้ำลงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถประมวลผลข้อมูลได้ทั้งในเชิงคงที่และไม่คงที่

2.1 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic Analysis Method)

น้ำขึ้นน้ำลงเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงระหว่างโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลให้ระดับน้ำทะเลเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเป็นรอบๆ การวิเคราะห์น้ำขึ้นน้ำลงโดยทั่วไปมักใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic Analysis) โดยสมมติว่าระดับน้ำสามารถแสดงออกเป็นผลรวมของคลื่นไซน์ที่มีคาบและเฟสต่างกัน โดยแต่ละองค์ประกอบ (tidal constituent) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการทำนายระดับน้ำในอนาคตดัง สมการที่ (1)

$$\zeta = \sum_n [(A_n \cos(\omega_n t - B_n)] \quad (1)$$

เมื่อ ζ คือ ความสูงของระดับน้ำ
A_n คือ แอมพลิจูด (Amplitude)
B_n คือ เฟส (Phase)
ω คือ ความถี่พื้นฐานของสัญญาณ
n คือ ลำดับฮาร์มอนิก (harmonic order)
t คือ เวลา

2.2 อัลกอริทึม S_TIDE

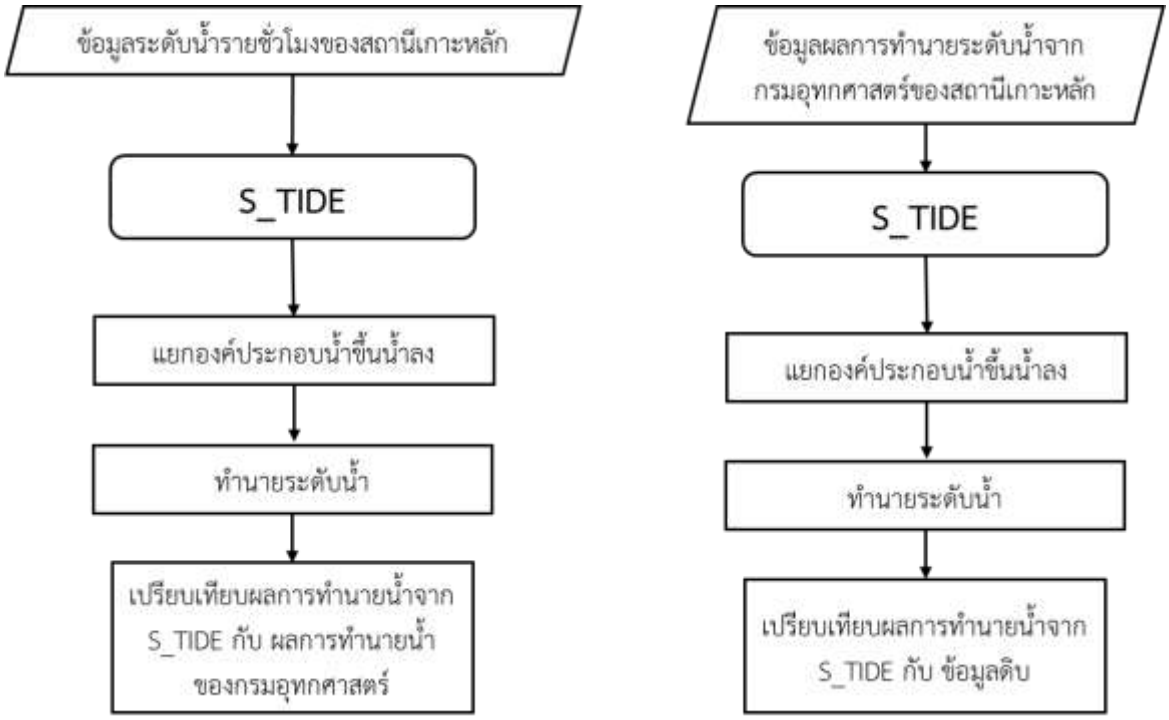
S_TIDE เป็นอัลกอริทึมที่เป็นเครื่องมือที่ทำงานร่วม T_TIDE โดยมีจุดประสงค์ในการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงและพยากรณ์ระดับน้ำทะเล T_TIDE เป็นเครื่องมือวิเคราะห์คลื่นน้ำขึ้นน้ำลงที่ถูกพัฒนาให้ทำงานในรูปแบบของโปรแกรม MATLAB toolbox ซึ่งใช้หลักการของการวิเคราะห์แบบฮาร์มอนิก ร่วมกับการประเมินค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Least Squares ในการหาค่าพารามิเตอร์ของคลื่นน้ำขึ้นน้ำลง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กนตวรรณ อึ้งสกุล และคณะ [4] ได้ศึกษาองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงหลักของอ่าวไทยและทะเลอันดามัน โดยใช้วิธีฮาร์โมนิค พบว่าบริเวณสถานีเกาะหลัก องค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลสูงคือน้ำขึ้นน้ำลงที่มีลักษณะน้ำเดี่ยว โดยเฉพาะองค์ประกอบ K_1 และ O_1

3. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยดัง **รูปที่ 1** แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้อมูล การประมวลผลด้วยอัลกอริทึม S_TIDE และการประเมินผลการทำนาย



(ก) การทำนายน้ำ **(ข)** การทำนายย้อนกลับ

รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมข้อมูล

ใช้ข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงจากสถานีเกาะหลักในปี 2021 เป็นข้อมูลต้นแบบ เนื่องจากเป็นปีที่มีข้อมูลระดับน้ำสมบูรณ์ครบถ้วนดัง **รูปที่ 1 (ก)** โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลดิบเพื่อแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงด้วยอัลกอริทึม S_TIDE จากนั้นทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในการทำนายระดับน้ำของปี 2024

3.2 การทำนายน้ำและการเปรียบเทียบผล

นำผลการทำนายน้ำของปี 2024 จาก S_TIDE มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายน้ำของกรมอุทกศาสตร์ [5] โดยการใช้การเปรียบเทียบให้ค่าความแม่นยำด้วยวิธี R-squared เพื่อแสดงถึงความสอดคล้องของผลการทำนายระดับน้ำระหว่างทั้งสองแหล่งข้อมูล

3.3 การทำนายย้อนกลับ

ในการตรวจสอบความสามารถของแบบจำลองในการทำนายย้อนกลับดัง **รูปที่ 1 (ข)** จะนำผลการทำนายระดับน้ำของปี 2024 ของกรมอุทกศาสตร์มาวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงในปี 2021 โดยการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงด้วยอัลกอริทึม S_TIDE จากนั้นใช้ค่าฮาร์มอนิกที่ได้ในการทำนายระดับน้ำย้อนกลับของปี 2021

4. ผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยที่ใช้สถานีเกาะหลักเป็นพื้นที่ต้นแบบในการทดสอบการทำงานของอัลกอริทึม S_TIDE พบว่าแบบจำลองสามารถวิเคราะห์และทำนายระดับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงจากกรมอุทกศาสตร์ในระดับที่น่าพอใจ

4.1 ผลการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงจากข้อมูลดิบ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงในปี 2021 ด้วยอัลกอริทึม S_TIDE ได้ผลการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงหลักดัง **ตารางที่ 1** ในคอลัมน์ ความสูง (ข้อมูลดิบ) พบว่าองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อระดับน้ำมากที่สุด ได้แก่ K_1 = 51 cm และ O_1 = 34 cm ซึ่งองค์ประกอบทั้งสองมีความสอดคล้องกับลักษณะของน้ำขึ้นน้ำลงที่เป็นรูปแบบที่พบทั่วไปบริเวณอ่าวไทยตอนบน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงหลักของสถานีเกาะหลัก

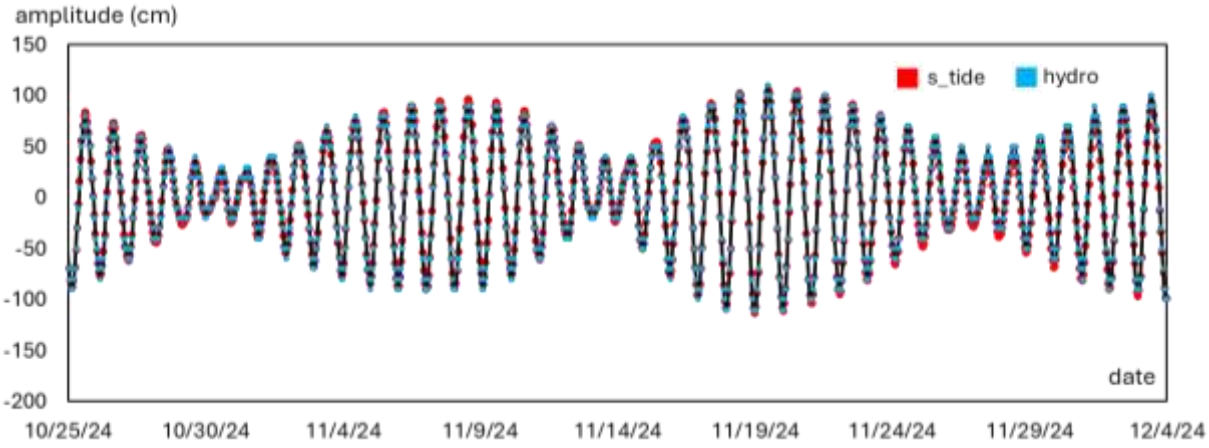
องค์ประกอบ	ความสูง (ข้อมูลดิบ, cm)	ความสูง (การทำนายน้ำ, cm)
Q1	6.22	6.49
O1	34.34	33.71
P1	15.28	15.35
K1	51.13	50.57
N2	1.37	1.47
M2	6.29	6.14
S2	1.46	1.69
K2	0.74	0.67

4.2 ผลการทำนายน้ำปี 2024

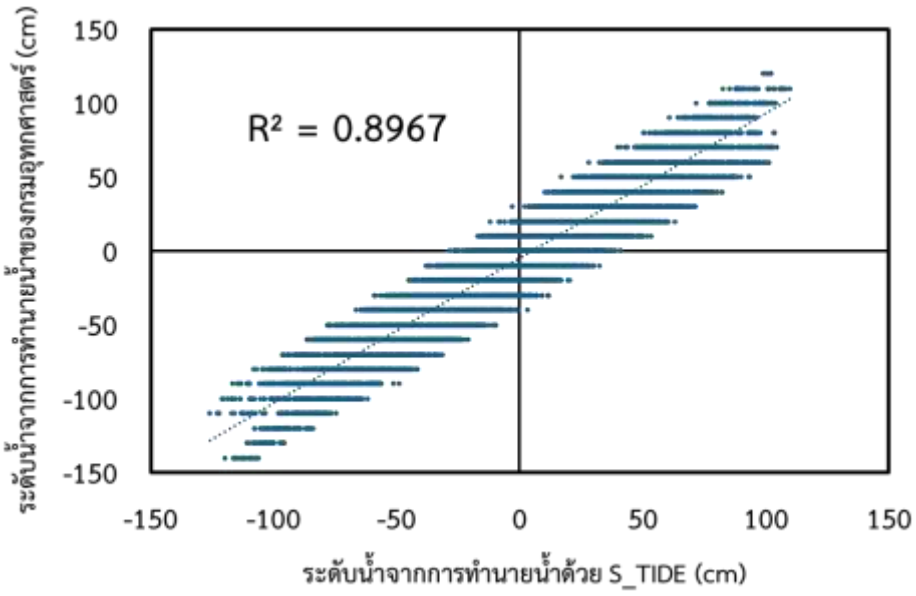
ผลการทำนายระดับน้ำปี 2024 โดยการใช้ระดับน้ำปี 2021 เป็นข้อมูลนำเข้าด้วยแบบจำลอง S_TIDE ตัวอย่างผลการทำนายระดับน้ำเดือน พ.ย. 2024 ดัง **รูปที่ 2** สีแดงคือผลการทำนายน้ำโดย S_TIDE และ สีฟ้าคือผลการทำนายน้ำโดยกรมอุทกศาสตร์ เมื่อนำผลการทำนายน้ำมาทำการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ดัง **รูปที่ 3** พบว่าความสัมพันธ์ของค่าระดับน้ำทั้งสองแหล่งมีค่า R-squared = 0.897 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายแนวโน้มของระดับน้ำได้ใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิงในระดับสูง

4.3 ผลการทำนายย้อนกลับปี 2021

เมื่อนำผลการทำนายน้ำปี 2024 ของกรมอุทกศาสตร์มาเป็นข้อมูลนำเข้าเพื่อทำการทำนายย้อนกลับของข้อมูลระดับน้ำปี 2021 ด้วย S_TIDE ได้ผลการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงหลักดัง **ตารางที่ 1** ในคอลัมน์ ความสูง (การทำนายน้ำ) พบว่า องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงหลักมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการแยกองค์ประกอบ



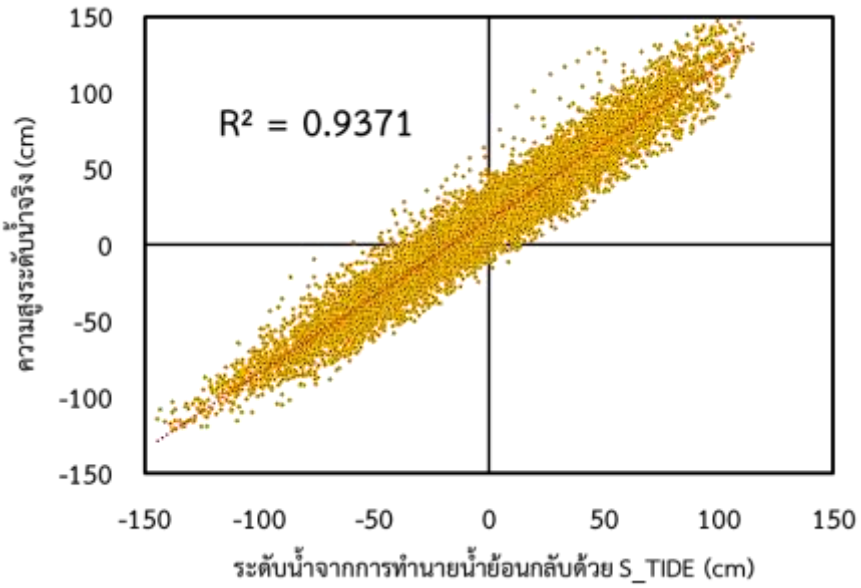
รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลการทำนายน้ำของเดือน พ.ย. 2024



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการทำนายน้ำ

น้ำขึ้นน้ำลงจากข้อมูลดิบ แต่จากการดูค่าค่าองค์ประกอบอื่นๆ พบว่าค่า SA มีค่าประมาณ 22 cm ซึ่งสูงกว่าปกติ ซึ่งอาจเกิดมาจากข้อมูลนำเข้าที่เป็นข้อมูลการทำนายน้ำที่มีความละเอียดน้อย (ทศนิยม 1 ตำแหน่ง) ทำให้อัลกอริทึมมีการปรับค่าการวิเคราะห์ ส่งผลให้มีค่าเกินกว่าค่าปกติ และผลจากการทำนายย้อนกลับดัง **รูปที่ 4** พบว่าความสัมพันธ์ของระดับน้ำที่ทำนายย้อนกลับกับค่าระดับน้ำจริงมีค่า R-squared = 0.937 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง S_TIDE มีความสามารถในการทำนายย้อนกลับที่แม่นยำในระดับสูง

โดยสรุป ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าอัลกอริทึม S_TIDE สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางเสริมในการวิเคราะห์และทำนายระดับน้ำ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านข้อมูลดิบ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำและการเฝ้าระวังผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการทำนายน้ำย้อนกลับ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม S_TIDE เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงและทำนายระดับน้ำในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านข้อมูลดิบ โดยเลือกสถานีเกาะหลักเป็นสถานีต้นแบบในการทดสอบ พบว่าอัลกอริทึม S_TIDE สามารถแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง โดยพบว่าองค์ประกอบหลัก K_1 และ O_1 คือองค์ประกอบที่มีอิทธิพลหลักในการกำหนดลักษณะการขึ้นลงของระดับน้ำ และสามารถทำนายระดับน้ำในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความสอดคล้องกับผลการทำนายของกรมอุทกศาสตร์ที่ระดับ R-squared = 0.897

ผลการทำนายย้อยกลับจากการใช้อัลกอริทึม S_TIDE โดยใช้ข้อมูลนำเข้าคือผลการทำนายระดับน้ำของกรมอุทกศาสตร์ พบว่าอัลกอริทึม S_TIDE สามารถแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงหลักได้ค่าใกล้เคียงกับการแยกองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงจากข้อมูลดิบ แต่มีค่าองค์ประกอบ SA สูงกว่าปกติ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความละเอียดของข้อมูลนำเข้าทำให้มีการปรับค่าแอมพลิจูดสูงกว่าปกติ และมีผลการทำนายระดับน้ำย้อนกลับที่ระดับ R-squared = 0.937

โดยสรุป อัลกอริทึม S_TIDE สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือทางเลือกในการทำนายระดับน้ำในพื้นที่ที่ไม่มีข้อมูลดิบได้จริง อีกทั้งยังมีศักยภาพในการสนับสนุนการวางแผนและบริหารจัดการทรัพยากรน้ำชายฝั่ง การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการคาดการณ์สถานการณ์น้ำในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

แนวทางในอนาคตควรมุ่งเน้นการทดสอบแบบจำลอง S_TIDE กับสถานีที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์แตกต่างกัน เช่น พื้นที่ปากแม่น้ำหรืออ่าวเปิด เพื่อประเมินความยืดหยุ่นของแบบจำลอง รวมทั้งพัฒนาการเชื่อมโยงกับข้อมูลจากแบบจำลองเชิงอุตุนิยมวิทยา เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ระดับน้ำในระยะยาว

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อกรมอุทกศาสตร์ที่ให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันมีค่าในการดำเนินการวิจัยนี้

ขอบคุณคณาจารย์ที่ได้สั่งสอนความรู้ทางสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม รวมถึงความรู้ด้านวิศวกรรมชายฝั่ง ซึ่งเป็นรากฐานความรู้ที่สำคัญในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้าย ขอบคุณอาจารย์ เพื่อนร่วมงาน ผู้บริหารและผู้ให้การสนับสนุนจากใจที่ส่งเสริมให้ผลงานนี้สำเร็จลุล่วง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] H. Pan, “S_TIDE: A MATLAB toolbox for nonstationary tidal analysis,” *Ocean Modelling*, 201

[2] R. Pawlowicz, B. Beamish, and E. Kent, “On the determination of oceanic tides: Single-station methods,” *Progress in Oceanography*, vol. 54, no. 2–4, pp. 157–186, 2002.

[3] กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ, “คู่มือการวัดและทำนายระดับน้ำทะเล,” [ออนไลน์]. Available: https://www.hydro.navy.mi.th/download/Water_Level.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 21 ตุลาคม 2568).

[4] K. Aungsakul, M. Jaroensusasinee, and K. Jaroensusasinee, “Numerical Study of Principal Tidal Constituents in the Gulf of Thailand and the Andaman Sea,” Songklanakarin Journal of Science and Technology, vol. 37, no. 5, pp. 523–530, 2015.

[5] กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ, “มาตราน้ำ / Tide tables,” [ออนไลน์]. Available: https://www.hydro.navy.mi.th/index4.html (เข้าถึงเมื่อ: 4 พฤศจิกายน 2567).

[6] H. M. Phan, Q. Ye, A. J. H. M. Reniers, and M. J. F. Stive, “Analysis of tidal current characteristics in the Upper Gulf of Thailand,” *Continental Shelf Research*, vol. 182, pp. 42–56, 2019.

[7] H. Pan, “A modified tidal harmonic analysis model for short-term constituent resolution,” *Environmental Modelling & Software*, 2023.

Resilient Leader-Follower Drone Swarm Simulation with Failure Recovery and Dynamic Re-election

Dhanasak Bhumichai [1]

[1] Mathematics and Computer Science Department

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Bangkok, Thailand

dhanasak_b@rtaf.mi.th

Abstract

Swarm intelligence is a bio-inspired paradigm in which simple agents collectively exhibit complex, coordinated behaviors through local interactions and decentralized control. This approach has been widely applied to robotics, distributed systems, and autonomous aerial networks due to its inherent scalability, robustness, and adaptability. In this work, we apply swarm intelligence principles to the problem of drone communication and coordination under conditions of random failures. We propose a leader-follower drone swarm model in which each drone moves according to local rules, including alignment with nearby drones and attraction toward a dynamically designated leader. The leader guides overall swarm motion, but may fail randomly, triggering an automatic re-election process to select a new active drone as the leader. Drones can also recover from failure probabilistically, enabling the swarm to maintain continuous operation. To improve visualization and analyze swarm connectivity, all active drones are forced to remain visually linked to the leader, while local neighbor links illustrate short-range interactions. Experimental simulations demonstrate that the proposed approach preserves swarm cohesion, adapts to leader failure, and recovers efficiently after multiple drone failures. Quantitative metrics, including the fraction of drones connected to the leader, the number of active drones over time, and swarm cohesion, are used to evaluate performance. The results highlight the effectiveness of leader-follower dynamics and recovery mechanisms in maintaining functional swarm behavior, providing insights for resilient autonomous aerial systems, cooperative robotics, and distributed networked agents.

Keywords: Swarm Intelligence; Drone cooperation; Resilient swarm behavior

1. Introduction

Swarm Intelligence (SI) is a computational paradigm inspired by the collective behavior of social organisms such as ants, bees, birds, and fish. The ability of swarms to self-organize, adapt, and remain robust in dynamic environments has led to widespread interest in applying these principles to engineering and computational domains [1], [2]. Over the past decade, SI has become foundational in multi-agent coordination, optimization, and autonomous robotic systems, providing scalable and fault-tolerant solutions for distributed problem-solving [3].

With the rapid advancement of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), SI concepts have been increasingly employed in the design of drone swarms—cooperative fleets of UAVs capable of accomplishing complex missions such as area surveillance, disaster response, environmental mapping, and wireless communication relays. Unlike traditional centralized control approaches, swarm-based UAV coordination distributes intelligence across all agents, allowing drones to operate collaboratively and continue functioning even when some agents fail or lose contact [4].

Among the various swarm coordination strategies, the leader–follower model has emerged as one of the most practical and widely adopted approaches. In this configuration, a designated leader drone directs the collective motion, while follower drones maintain positions or orientations relative to the leader. The model simplifies navigation, formation control, and communication management [5]. However, this structure also introduces a critical vulnerability: the leader represents a potential single point of failure. When the leader is damaged or disconnected, the entire swarm may lose synchronization, leading to fragmentation and mission failure [6]. Addressing this limitation requires the integration of resilience mechanisms, including leader re-election, failure recovery, and adaptive communication.

Resilience in UAV swarms refers to the swarm's ability to sustain functionality and cohesion despite the loss or malfunction of individual drones. Various fault-tolerant and adaptive methods have been proposed to improve resilience, including topology reconfiguration, consensus-based control, and bio-inspired adaptation strategies. Some studies employ redundancy in leadership roles [7], while others use dynamic leader selection based on connectivity metrics or energy availability [5]. However, there remains a need for simple, interpretable swarm models that combine leader-follower dynamics, probabilistic failure and recovery, and visualized network connectivity—to help researchers and practitioners understand the underlying swarm resilience behaviors.

In this paper, we present a simulation-based model of a resilient leader-follower drone swarm that integrates random failure, probabilistic recovery, and automatic leader re-election. Each drone operates under local behavioral rules of alignment and leader attraction, while the leader moves independently to guide overall swarm direction. When a drone fails, it becomes inactive and ceases movement, but it may later recover with a given probability. If the leader fails, a new leader is automatically selected from the remaining active drones, ensuring continuous coordination. A forced-linking visualization mechanism ensures that all active drones remain connected to the leader,

clearly illustrating swarm cohesion and communication topology. Our simulation experiments evaluate swarm performance under multiple random failure and recovery conditions. Key metrics include (1) the fraction of drones connected to the leader, (2) the number of active drones over time, and (3) average swarm cohesion. The study contributes a reproducible simulation framework and provides insights for designing fault-tolerant autonomous aerial systems, cooperative robotics architectures, and distributed networked agents capable of self-organization and recovery.

2. Related Work

2.1 Swarm Intelligence Foundations

The concept of Swarm Intelligence (SI) originates from observations of biological collectives such as bird flocks, fish schools, and insect colonies, where complex behaviours emerge from local interactions among simple agents [8]. Computationally, an early milestone was Reynolds' "Boids" model [9], which showed that three simple local rules — separation, alignment, cohesion — yield realistic flocking without central control. Early SI-inspired optimisation models include Particle Swarm Optimization (PSO) [10] and Ant Colony Optimization (ACO) [11], and frameworks such as Fleischer's [12] formalisation of SI introduced concepts like scale-invariant Pareto optimality. These principles have since been applied to robotics, network routing, and distributed sensing, enabling systems to exhibit adaptability, scalability, and robustness without central control [13]. In multi-robot and UAV systems, SI provides a framework for coordination and self-organization, allowing agents to maintain formation, share information, and collectively explore environments. The use of local rules—such as alignment, cohesion, and separation—has been widely studied in swarm robotics for pattern formation, obstacle avoidance, and distributed coverage [14].

2.2 Leader–Follower Models in Drone Swarms

The leader–follower paradigm is a practical and computationally efficient control architecture for multi-agent systems. A designated leader provides guidance or target trajectories, while followers adjust their motion relative to the leader or neighboring drones. This model reduces communication overhead compared to fully distributed schemes and simplifies navigation in large-scale UAV networks [4]. However, classical leader–follower approaches often assume that the leader remains active and functional throughout the mission. This assumption introduces a single point of failure—a limitation that can lead to rapid swarm disintegration if the leader is lost [15]. To address this, researchers have proposed dynamic leader selection and leader re-election algorithms that reassign leadership based on criteria such as energy levels, connectivity, or positional advantage [5], [6]. Other works extend the model using hybrid approaches that combine leader guidance with distributed consensus control, improving robustness under communication uncertainty [16].

2.3 Resilience and Fault Tolerance in UAV Swarms

Resilience and fault tolerance are critical attributes for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarms, particularly in dynamic and adversarial environments. Researchers have extensively explored various strategies to enhance the robustness of UAV swarms against failures and disruptions.

Zuo et al. [5] proposed a voting-based leader election scheme for lead-follow UAV swarms operating under constrained communication conditions. Their method ensures that leadership transitions occur seamlessly in the event of a leader failure, thereby maintaining swarm cohesion and mission continuity. In addition, Zhu et al. [17] introduced a cooperative localization method that utilizes the follower UAV's moving vector for position estimation. This approach enhances the accuracy of follower positioning, which is crucial for maintaining formation integrity and resilience during leader transitions. Adaptive sliding mode fault-tolerant control strategies have been developed to address actuator failures in UAV systems. These methods employ radial basis function neural networks to adjust control inputs dynamically, ensuring stable operation despite faults [18]. Reinforcement learning algorithms have also been applied to UAV swarm control, allowing for fault-tolerant exploration in uncertain environments. These algorithms enable UAVs to adapt to changing conditions and recover from failures autonomously [19]. Comprehensive frameworks for evaluating the resilience of UAV swarms have been proposed, focusing on metrics such as connectivity, cohesion, and mission success rates under failure scenarios. These frameworks provide standardized methods to assess and compare the fault tolerance of different swarm strategies [20].

3. Methodology

3.1 Overview

The proposed simulation framework models a swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating under a leader–follower paradigm with resilience mechanisms against random failures. Each drone (agent) follows simple behavioral rules based on local perception and communication within a limited range, while a designated leader drone directs the swarm’s overall motion. The model integrates three resilience components:

- Probabilistic failure, where drones may become inactive at random time steps;
- Probabilistic recovery, allowing failed drones to reactivate; and
- Leader re-election, ensuring continuous swarm coordination after leader loss.

The simulation aims to analyze swarm cohesion, connectivity, and adaptation when subjected to stochastic disruptions. A visualization layer, implemented using *matplotlib*, displays drone movement, communication links, and leader transitions for interpretability. Figure 1 illustrates the algorithm of the proposed approach.

3.2 Simulation Setup

The simulation is implemented in Python using the *matplotlib.animation* module to dynamically update drone positions and communication links over time.

Each experiment is performed within a bounded two-dimensional area of fixed size AREA_SIZE, where all drones move freely but are constrained to remain within the boundaries. Key parameters are summarized in Table 1.

Algorithm 1: Leader–Follower Drone Swarm with Failure Recovery and Re-election

Input:

- N: number of drones
- A: area size
- r_{comm}: communication range
- P_{fail}: probability of drone failure per step
- P_{rec}: probability of recovery per step
- S: total simulation steps

Output:

- Dynamic swarm topology, number of active drones, and leader connectivity over time

---

Initialization

1. For each drone $i \in \{1, 2, \ldots, N\}$:
   a. Randomly assign position (x_i, y_i) in range $[0, A]$.
   b. Set `state_i = ACTIVE`.
   c. Initialize velocity vector $v_i = (0, 0)$.
2. Designate the drone with smallest ID as **leader**.

Main Simulation Loop (for each time step $t = 1 \rightarrow S$)

1. **Random Failure and Recovery**
   For each drone i:
   - If `state_i = ACTIVE` and $rand() < P_{fail}$: set `state_i = FAILED`.
   - If `state_i = FAILED` and $rand() < P_{rec}$: set `state_i = ACTIVE`.
2. **Leader Validation and Re-election**
   If the current leader is FAILED:
   a. Select a new leader $L = \min\{i \mid state_i = ACTIVE\}$.
   b. Broadcast leader ID to all drones within r_{comm}.
3. **Movement and Coordination**
   For each drone i:
   If `state_i = ACTIVE`:
   a. **Compute attraction toward leader:**
   $F_{leader} = (x_L - x_i, y_L - y_i)$.
   b. **Compute local alignment:**
   For each neighbor j within r_{comm}:
   $F_{align} += (v_j - v_i)$.
   c. **Add small random motion:**
   $F_{rand} = Random(-1, 1)$.
   d. **Update position:**
   $v_i = Normalize(F_{leader} + \alpha F_{align} + \beta F_{rand})$.
   $(x_i, y_i) = (x_i, y_i) + v_i$.
   e. Apply boundary limits: clip (x_i, y_i) to $[0, A]$.
4. **Visualization and Metrics**
   a. Count number of active drones:
   $N_{active}(t) = |\{i \mid state_i = ACTIVE\}|$.
   b. Determine drones connected to leader via communication links.
   c. Record cohesion distance:
   $C(t) = \frac{1}{N_{active}} \sum_{i \in ACTIVE} distance(i, L)$.
5. **End of Step** — Log metrics for plotting and visualization.

Termination

- Output time series of:
  - $N_{active}(t)$: active drones over time
  - $Conn_{leader}(t)$: leader connectivity ratio
  - $C(t)$: swarm cohesion
- End simulation.

Figure 1 Algorithm of the proposed approach

Table 1 Key parameters in the experiment

Parameter	Description	Value
NUM_DRONES	Total number of drones in the swarm	10–20
COMM_RANGE	Communication radius for local interaction	40 units
FAIL_PROB	Probability of random failure per time step	0.03
RECOVER_PROB	Probability of recovery per time step	0.02
AREA_SIZE	Dimension of the simulation space	100 × 100
STEPS	Number of iterations (simulation time)	200–500

Each drone is initialized with random coordinates within the simulation space. Drone movement, failure, and recovery are updated sequentially at each time step.

3.3 Drone Behavioral Model

Each drone i is represented by position (x indicates an active drone. Active drones e: Reynolds'Boids model [9] and adapted for lea

Termination

- Output time series of:
  - $N_{active}(t)$: active drones over time
  - $Conn_{leader}(t)$: leader connectivity ratio
  - $C(t)$: swarm cohesion
- End simulation.

3.3.1 Leader attraction. Each follower moves slightly toward the current leader's position, enforcing global cohesion:

$$V_i \leftarrow V_i + \alpha_L(P_L - P_i) \tag{1}$$

where p_L is the leader's position and α_L is the attraction coefficient.

3.3.2 Alignment. Drones align their velocity with the average velocity of local neighbors within communication range R_c.

$$\mathbf{v}_i \leftarrow \mathbf{v}_i + \alpha_A \frac{1}{N_i} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \tag{2}$$

3.3.3 Random perturbation. To mimic environmental uncertainty, small random noise is added to each movement step.

3.3.4 Boundary reflection. Drones reverse velocity if they approach the simulation area boundary to prevent drift beyond limits.

The leader drone moves independently with slightly higher velocity and random direction changes to guide overall swarm movement.

3.4 Failure and Recovery Mechanisms

At each time step, active drones have a probability P_{fail} of becoming inactive, representing random system failures, communication losses, or environmental interference. Inactive drones cease all movement and communication. Each failed drone has a recovery probability P_{rec} per time step, reflecting system reboot, redundancy recovery, or communication reconnection. If

the leader drone fails, the swarm triggers a leader re-election process, selecting the next active drone (typically the lowest available ID) as the new leader. This ensures continued guidance and prevents swarm fragmentation. The combination of failure, recovery, and leader replacement emulates realistic drone-swarm resilience in uncertain operational conditions [6].

3.5 Communication and Connectivity

Drones communicate with nearby agents within a distance less than COMM_RANGE. Connectivity is represented by edges between pairs of active drones that satisfy the distance threshold. In addition to local connections, a forced-linking mechanism visually connects all active drones to the leader, ensuring that the global swarm topology remains interpretable. This visualization provides insight into whether the swarm maintains global cohesion, even if local connectivity temporarily fluctuates.

3.6 Performance Metrics

To evaluate swarm resilience and behavior, several metrics are computed over time:

3.6.1 Active Drone Ratio

$$R_{active}(t) = \frac{N_{active}(t)}{N_{total}} \tag{3}$$

representing the fraction of drones remaining operational at each step.

3.6.2 Leader Connectivity Ratio

The percentage of active drones directly or indirectly linked to the leader within the communication network.

3.6.3 Swarm Cohesion

The average Euclidean distance of active drones from the leader:

$$C(t) = \frac{1}{N_{active}} \sum_{i=1}^{N_{active}} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_L\| \tag{4}$$

3.6.4 Leader Changes

The number of times the leader is replaced during the simulation.

These metrics collectively assess the swarm's ability to maintain integrity, adapt to failure, and re-establish communication after disruptions.

3.7 Implementation Environment

The experiments were conducted on a standard desktop computer using Python 3.11, matplotlib 3.8 for visualization, and standard random-number libraries. Each run was repeated five times to reduce the effect of stochastic variation. Simulation parameters can be adjusted to analyze sensitivity to communication range, failure probability, and recovery rate.

4. Results and Analysis

4.1 Experimental Overview

The simulation was executed under various configurations to evaluate swarm resilience against random failures. Three main scenarios were considered. First, Baseline (no failure) drones remain active throughout the simulation. Second, Moderate failure (P_{fail}=0.03, P_{rec}=0.02). Lastly, High failure (P_{fail}=0.08, P_{rec}=0.02)

Each experiment was repeated five times to average out stochastic variability. Results focus on three main performance indicators: active drone ratio, leader connectivity, and swarm cohesion.
The simulation area was fixed at 100×100 units, with 15 drones and a communication range of 40 units. Each run lasted 300 iterations, and visualization was generated via *matplotlib.animation* to observe swarm dynamics in real time.

4.2 Visual Observation of Swarm Dynamics

Figure 1 illustrates the swarm trajectories under the moderate-failure setting. The drones initially form a cohesive cluster following the leader's trajectory. As failures occur, some drones become inactive and temporarily drift apart. However, due to recovery and re-election mechanisms, the swarm gradually re-forms around the active leader. When the leader drone fails, a visible transient disruption appears—follower drones momentarily lose direction, causing spatial dispersion. After a few iterations, a new leader is elected (based on the lowest active ID), and the swarm resumes coordinated motion. This process demonstrates self-reorganization, one of the defining characteristics

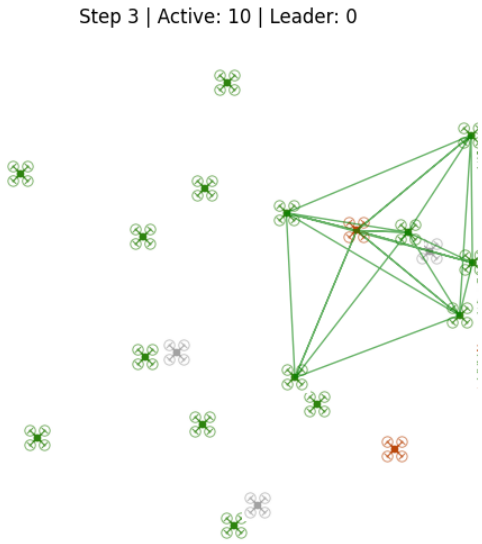


Figure 2 Swarm trajectories and communication links during a moderate-failure scenario.

At higher failure probabilities, the swarm exhibits intermittent fragmentation: several subgroups form, led by local clusters that remain within communication range. Even in such cases, once a majority of drones recover, the system tends to converge toward a single connected cluster. This emergent resilience is a direct consequence of the local communication model and leader re-election logic.

4.3 Quantitative Analysis

4.3.1 Active Drone Ratio

Figure 3(a) plots the ratio of active drones $R_{active}(t)$ over time for all scenarios. In the baseline scenario, the ratio remains at 1.0 throughout the simulation. In the moderate-failure condition, the average ratio stabilizes around 0.82, indicating a balance between failure and recovery. Under high-failure condition, the active ratio oscillates strongly, reaching as low as 0.55 during peak disruption phases. The relatively high steady-state activity under moderate failure demonstrates that the recovery mechanism effectively mitigates permanent loss. This supports the importance of redundant communication and partial autonomy in swarm systems [21].

4.3.2 Leader Connectivity Ratio

Figure 3(b) measures the proportion of active drones connected—directly or indirectly—to the leader. In the moderate-failure setting, connectivity remains above 0.75 for most of the simulation. However, after leader failure events, connectivity briefly drops below 0.5 before recovering. The system's ability to restore connectivity within about 10 steps illustrates rapid reorganization and the robustness of the leader re-election mechanism. In the high-failure scenario, the connectivity metric displays multiple spikes and troughs, reflecting temporary fragmentation into smaller clusters. This pattern is consistent with biological swarm observations, where collective behavior persists even after temporary leader loss [22].

4.3.3 Swarm Cohesion

Figure 3(c) shows average distance $C(t)$ between the leader and active followers.
In the baseline, cohesion stabilizes around 12 units, forming a compact formation. Under moderate failure, temporary leader losses increase cohesion distance to ~20–25 units before reformation. High-failure runs show repeated dispersion phases up to 40 units but consistently reconverge once recoveries occur. This oscillating behavior demonstrates a dynamic equilibrium between dispersion (caused by failures) and aggregation (driven by local attraction and recovery). The swarm thus exhibits emergent adaptation without requiring centralized control.

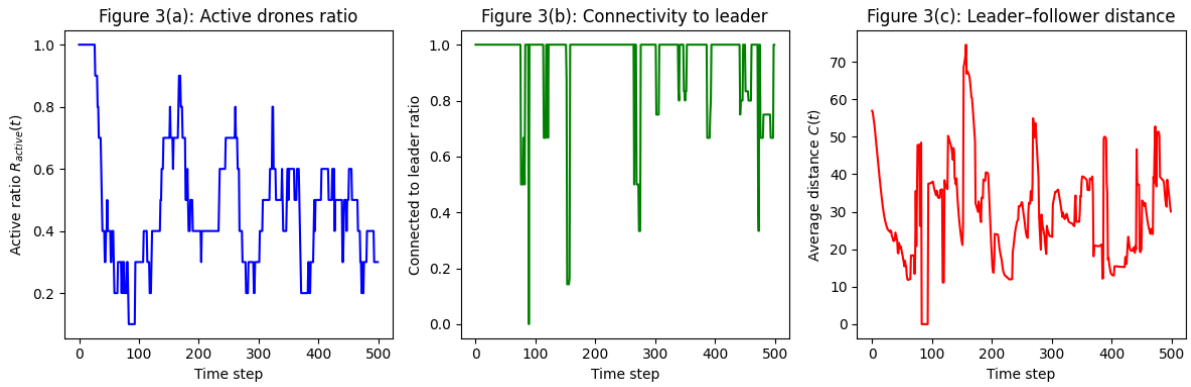


Figure 3 Qualitative analysis.

.

4.4 Effect of Leader Failure and Re-elections

A dedicated experiment was performed where the leader was intentionally damaged at fixed time step 100. Immediately after leader loss, followers exhibited uncoordinated motion and partial scattering, confirming the leader's critical role in maintaining direction. After approximately 8–12 iterations, the re-election mechanism appointed a new leader, after which the swarm re-formed and resumed coordinated motion toward a new trajectory. This recovery phase closely parallels the stigmergic coordination seen in natural swarms—where environmental feedback or local interactions trigger reorganization without explicit messaging [23]. The resilience observed here highlights that even minimal rules (failure detection and re-election) are sufficient to restore order.

4.5 Discussion

The results suggest several implications for real-world swarm robotics and drone coordination: Decentralized fault tolerance — Local decision-making and probabilistic recovery allow the swarm to sustain performance without centralized control.

1. Leader dependence vs. autonomy trade-off. While the leader provides efficient direction, complete dependency can reduce resilience; hybrid leader–distributed strategies may improve robustness.

2. Communication range sensitivity. Larger COMM_RANGE improves recovery speed but increases communication overhead.

3. Visualization as analytical tool. The animation layer helps practitioners observe failure propagation and self-healing behavior, supporting training and IDS (Intrusion Detection System) modeling for networked swarms.

Overall, the swarm exhibits adaptive resilience, characterized by continuous self-reorganization under dynamic environmental uncertainty. These findings align with prior works on adaptive multi-agent coordination [24] and demonstrate the potential of swarm intelligence principles in autonomous drone communication systems.

5. Conclusion and Future Work

5.1 Conclusion

This study presented a simulation-based exploration of swarm intelligence principles applied to drone communication and coordination. The proposed model implemented a leader–follower swarm system capable of self-organization, recovery, and resilience in the presence of random drone failures. Unlike traditional centralized control systems, the swarm relied solely on local interactions and simple behavioral rules to achieve global coordination. Through extensive simulations, the proposed framework demonstrated three main properties. First, the swarm was able to maintain overall cohesion even when individual drones failed, thanks to the recovery mechanism and the adaptive leader re-election process. Second, the system showed rapid reorganization following leader failure events, confirming that distributed consensus and minimal local communication are sufficient for swarm-level recovery. Third, the inclusion of probabilistic recovery allowed inactive

drones to reintegrate into the formation dynamically, producing a continuous cycle of degradation and self-healing, a key property of fault-tolerant distributed systems. The visualization further illustrates how swarm topology evolved over time, revealing emergent connectivity structures, fragmentation, and reconvergence patterns. These patterns are analogous to those found in biological systems and confirm that stigmergic communication—coordination through environmental cues rather than explicit messages—can effectively sustain collective motion in drone networks. The results also showed that moderate failure rates (P_{fail}=0.03) do not significantly impair collective behavior, whereas higher rates (P_{fail}=0.08) can lead to temporary fragmentation but eventual recovery. These findings suggest that resilience in drone swarms depends more on the adaptability of local control policies than on centralized supervision.

In practical terms, this research provides insights into how autonomous drone fleets could operate in unpredictable environments, such as disaster response, surveillance, and distributed sensing. A self-organizing communication strategy ensures that even if individual units fail, the overall mission continues. Moreover, the dynamic visualization and connectivity metrics developed here could support the design of intelligent intrusion detection or anomaly monitoring systems for networked swarms, where correlated failures or unexpected movements may indicate malicious interference.

5.2 Future Work

Several extensions are envisioned to enhance realism and applicability. Future versions will incorporate obstacle-aware navigation, energy consumption models, and heterogeneous agent types (e.g., drones with different sensing ranges or speeds). Integrating machine learning–based adaptive control could enable drones to adjust their cooperation policies based on past experience or environmental feedback. Another promising direction involves connecting this simulation to cyber-defense scenarios, where failure propagation models could be reinterpreted as coordinated cyberattacks or communication disruptions. Finally, the proposed framework could be tested in a physical multi-drone environment using ROS (Robot Operating System) or Gazebo simulators, enabling real-world validation of the self-healing and leader recovery properties observed in this study.

In summary, the findings reaffirm the potential of swarm intelligence as a foundational approach to resilient, decentralized, and adaptive drone communication systems. By leveraging local interactions and emergent behaviors, future drone swarms can become not only autonomous but also collectively intelligent, capable of thriving in uncertain and adversarial conditions.

6. References

[1] J. Wang and G. Beni, “Cellular robotic system with stationary robots and its application to manufacturing lattices,” pp. 132–137, Jan. 2003, doi: https://doi.org/10.1109/isic.1989.238706.

[2] M. Dorigo and M. Birattari, “Swarm intelligence,” Scholarpedia, vol. 2, no. 9, p. 1462, 2007, doi: https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1462.

[3] A. Tahir, J. Böling, M.-H. Haghbayan, H. T. Toivonen, and J. Plosila, “Swarms of Unmanned Aerial Vehicles — A Survey,” Journal of Industrial Information Integration, vol. 16, p. 100106, Dec. 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100106.

[4] Y. Liang, Q. Dong, and Y. Zhao, “Adaptive leader-follower formation control for swarms of unmanned aerial vehicles with motion constraints and unknown disturbances,” Chinese Journal of Aeronautics, Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.03.020.

[5] Y. Zuo, W. Yao, Q. Chang, X. Zhu, J. Gui, and J. Qin, “Voting-Based Scheme for Leader Election in Lead-Follow UAV Swarm with Constrained Communication,” Electronics, vol. 11, no. 14, p. 2143, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/electronics11142143.

[6] H. Zhang, G. Zhang, R. Yang, Z. Feng, and W. He, “Resilient Formation Reconfiguration for Leader–Follower Multi-UAVs,” Applied Sciences, vol. 13, no. 13, p. 7385, Jun. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/app13137385.

[7] W. Y. H. Adoni et al., “Intelligent Swarm: Concept, Design and Validation of Self-Organized UAVs Based on Leader–Followers Paradigm for Autonomous Mission Planning,” Drones, vol. 8, no. 10, p. 575, Oct. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/drones8100575.

[8] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, “Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems.” New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1999.

[9] C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model,” in *Proc. 14th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH ’87)*, Anaheim, CA, USA, 1987, pp. 25–34.

[10] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory,” MHS’95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, doi: https://doi.org/10.1109/mhs.1995.494215.

[11] M. Dorigo and T. Stützle, “Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances,” International Series in Operations Research & Management Science, pp. 311–351, Sep. 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_10.

[12] M. Fleischer, “Foundations of swarm intelligence: From principles to practice,” *arXiv preprint* nlin/0502003, 2005. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/nlin/0502003.

[13] A. Tahir, J. Böling, M.-H. Haghbayan, H. T. Toivonen, and J. Plosila, “Swarms of Unmanned Aerial Vehicles — A Survey,” Journal of Industrial Information Integration, vol. 16, p. 100106, Dec. 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100106.

[14] E. Bahceci and E. Sahin, “Evolving aggregation behaviors for swarm robotic systems: a systematic case study,” pp. 333–340, Aug. 2005, doi: https://doi.org/10.1109/sis.2005.1501640.

[15] D. Cui, H. Li, and R. Wang, “A Deep Reinforcement Learning Based Leader-Follower Control Policy for Swarm Systems,” Communications in Computer and Information Science, pp. 269–280, 2022, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-8915-5_23.

[16] M.-F. Leung, C. A. C. Coello, C.-C. Cheung, S.-C. Ng, and A. K.-F. Lui, “A Hybrid Leader Selection Strategy for Many-Objective Particle Swarm Optimization,” IEEE Access, vol. 8, pp. 189527–189545, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/access.2020.3031002.

[17] X. Zhu, J. Lai, and S. Chen, “Cooperative Location Method for Leader-Follower UAV Formation Based on Follower UAV’s Moving Vector,” Sensors, vol. 22, no. 19, p. 7125, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/s22197125.

[18] P. Zhang, Z. Ma, Y. He, Y. Li, and W. Cheng, “Cooperative Positioning Method of a Multi-UAV Based on an Adaptive Fault-Tolerant Federated Filter,” Sensors, vol. 23, no. 21, p. 8823, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/s23218823.

[19] Y. Zuo, W. Yao, Q. Chang, X. Zhu, J. Gui, and J. Qin, “Voting-Based Scheme for Leader Election in Lead-Follow UAV Swarm with Constrained Communication,” Electronics, vol. 11, no. 14, p. 2143, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/electronics11142143.

[20] X. Zhu, J. Lai, and S. Chen, “Cooperative Location Method for Leader-Follower UAV Formation Based on Follower UAV’s Moving Vector,” Sensors, vol. 22, no. 19, p. 7125, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/s22197125.

[21] I. Chandran and K. Vipin, “Network analysis of decentralized fault-tolerant UAV swarm coordination in critical missions,” Drone Systems and Applications, vol. 12, pp. 1–15, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0101.

[22] I. D. Couzin, J. Krause, N. R. Franks, and S. A. Levin, “Effective leadership and decision-making in animal groups on the move,” Nature, vol. 433, no. 7025, pp. 513–516, Feb. 2005, doi: https://doi.org/10.1038/nature03236.

[23] G. Theraulaz and E. Bonabeau, “A Brief History of Stigmergy,” Artificial Life, vol. 5, no. 2, pp. 97–116, Apr. 1999, doi: https://doi.org/10.1162/106454699568700.

[24] R. Zhang et al., “Multi-Agent Reinforcement Learning for Autonomous Driving: A Survey,” arXiv (Cornell University), Aug. 2024, doi: https://doi.org/10.48550/arxiv.2408.09675.

การวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลอง CFD เพื่อยกระดับความแม่นยำในการคำนวณคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของจรวด

Enhancing Missile Aerodynamic Predictions through Comparative CFD Model Assessment

วศิน เอียงสวาท[1], มงคล แก้วบำรุง[2] และ เวชพงศ์ ชุติชูเดช[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2]สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Wasin Aengsawate[1], Mongkol Kaewbumrung[2] and Vejapong Juttijudata[1*]

[1]Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phranakhon Si Ayutthaya

* Corresponding Author: vejapong.j@gmail.com

บทคัดย่อ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ถูกใช้ในงานด้านวิศวกรรมการป้องกันประเทศอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์สมรรถะของจรวดและขีปนาวุธทันสมัย ด้านความแม่นยำ พิสัยทำการ เสถียรภาพ รวมไปถึงการสร้างความได้เปรียบทางเทคโนโลยี แม้ว่าการทดสอบในอุโมงค์ลมจะให้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ แต่ข้อจำกัดด้านต้นทุน จึงเกิดความจำเป็นอย่างมากในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยด้านจรวดด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการคำนวณของแบบจำลองความปั่นป่วน ประกอบด้วย แบบจำลอง $Shear\ Stress\ Transport\ k-\omega$ (SST), $Realizable\ k-\varepsilon$ (RKE), $Spalart-Allmaras$ (SA) และ $Generalized\ k-\omega$ (GEKO) ในการทำนายผลลัพธ์ด้านอากาศพลศาสตร์ของจรวดย่านความเร็วเหนือเสียงเมื่อจำลองการไหลในสภาวะมุมปะทะและความเร็วแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $Generalized\ k-\omega$ (GEKO) ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด เนื่องจากสามารถปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับทำนายค่าทางอากาศพลศาสตร์ได้แม่นยำมากขึ้น โดยมีความคลาดเคลื่อนเทียบกับผลการทดลองน้อยกว่าการใช้งานแบบจำลองยอดนิยมอย่าง $SST\ k-\omega$ และในขณะที่แบบจำลองอื่น ยังคงมีข้อจำกัดเชิงฟิสิกส์ แนวทางนี้ช่วยสนับสนุนการเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนในการคำนวณที่เหมาะสมกับภารกิจ ลดการพึ่งพาการทดสอบทางกายภาพ และพัฒนางานวิจัยในสาขาวิศวกรรมการป้องกันประเทศด้านวิศวกรรมการบินและอวกาศต่อไปได้

คำสำคัญ: อากาศพลศาสตร์จรวด, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, แบบจำลองความปั่นป่วน, ความเร็วเหนือเสียง, วิศวกรรมป้องกันประเทศ

Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) has become an increasingly crucial tool in defense engineering, particularly for analyzing the performance of modern rockets and missiles to enhance their precision, range, stability, and establish a technological edge. While wind tunnel testing provides reliable data, the immense cost constraints necessitate the urgent application of CFD to advance missile research and development. This research aims to comparatively assess the computational performance of principal turbulence models: $Shear\ Stress\ Transport\ k-\omega\ (SST)$, $Realizable\ k-\varepsilon\ (RKE)$, $Spalart-Allmaras\ (SA)$ and the recent $Generalized\ k-\omega\ (GEKO)$. The objective is to predict the aerodynamic characteristics of a supersonic missile through flow simulations conducted under various angles of attack and velocities. The findings indicate that the $GEKO$ turbulence model yields the highest accuracy, attributed to its flexible parameter tuning capability. It demonstrated significantly less deviation from experimental data compared to the widely used $SST\ k-\omega$ model, while other models still face specific physical limitations. The approach proposed by this research thus forms a crucial foundation for selecting mission-appropriate turbulence models, thereby reducing reliance on costly physical testing and fostering further advancements in aerospace engineering within the defense industry.

Keywords: Missile Aerodynamics, Computational Fluid Dynamics (CFD), Turbulence Models, Supersonic Flow, Defense Engineering

1. บทนำ

ปัจจุบัน การพัฒนาเทคโนโลยีวิศวกรรมการป้องกันประเทศ ด้านจรวดและขีปนาวุธมีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายสำคัญเพื่อเพิ่ม สมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ ความเสถียร และความแม่นยำในการควบคุมการบิน สำหรับปฏิบัติภารกิจสำคัญทางทหาร ส่งผลให้การศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์และพัฒนาองค์ประกอบของจรวด [1-3] ทดแทนการพึ่งพาการทดสอบทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการทดสอบจริง เช่น การทดลองในอุโมงค์ลมหรือการยิงทดสอบจริง มีต้นทุนงบประมาณค่าใช้จ่ายต่อครั้งสูงมาก ใช้เวลานาน และมีข้อจำกัดในด้านสภาวะที่สามารถควบคุมได้ การใช้โปรแกรมคำนวณ CFD จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดต้นทุนและเวลาในการออกแบบ พร้อมทั้งเพิ่มความเข้าใจเชิงลึกต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศรอบลำตัวจรวดในหลากหลายสภาวะ กลายเป็นข้อสนับสนุนการได้เปรียบเชิงเทคโนโลยีการทหารทั้งทางตรงและทางอ้อม

ในขั้นตอนการคำนวณทาง CFD การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models) ถือเป็นหัวใจสำคัญอย่างมาก [4-5] เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวใช้แทนการคำนวณโครงสร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่ไม่สามารถแก้สมการเชิงตรงได้โดยตรง การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมมีผลโดยตรงต่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือใน

การทำนายสมรรถนะของจรวด เช่น แรงยก แรงต้าน การสูญเสียพลังงานจากการไหล และผลกระทบต่อเสถียรภาพการบิน

แบบจำลองที่นิยมใช้คำนวณและมีความน่าเชื่อถือสูง ตัวอย่างแบบจำลอง 1 สมการ $Spalart - Allmaras$ (SA) [6] ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาการไหลทางอากาศยานโดยเฉพาะ กลุ่มแบบจำลอง 2 สมการ ได้แก่ แบบจำลอง $Realizable\ k - \varepsilon$ (RKE) [7], $Shear\ Stress\ Transport\ k - \omega$ (SST) [8] และแบบจำลองรุ่นใหม่ที่ได้รับการพัฒนาล่าสุด $Generalized\ k - \omega$ (GEKO) [9] มีคุณสมบัติปรับค่าคงที่ตัวแปรได้หลายระดับ [10] และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำการคำนวณได้หากปรับได้ชุดค่าพารามิเตอร์เหมาะสม (Optimal Value)

แต่ละแบบจำลองความปั่นป่วนมีข้อได้เปรียบและข้อจำกัดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลและช่วงความเร็วที่สนใจศึกษา งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองความปั่นป่วนในการทำนายสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของจรวดย่านความเร็วเหนือเสียงภายใต้สภาวะมุมปะทะที่แตกต่างกัน วิเคราะห์ผลกระทบของการเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนต่อความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์แรงยก แรงต้าน ที่สัมพันธ์กับข้อมูลการทดลองจริงน่าเชื่อถือ เสนอแนวทางการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบและพัฒนาจรวดในภารกิจทางวิศวกรรมการป้องกันประเทศ

ในเนื้อหาของงานวิจัยฉบับนี้ จะประกอบด้วย ส่วนที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญของการศึกษาและวัตถุประสงค์ของงาน ส่วนที่ 2 ทบทวนเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ และแบบจำลองความปั่นป่วน ส่วนที่ 3 วิธีการวิจัยและขั้นตอนการจำลองทางคำนวณ ส่วนที่ 4 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละแบบจำลอง และส่วนที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และเสนอแนวทางการพัฒนาต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับงานวิจัยด้านการศึกษาจรวด ส่วนที่ 2.1 อธิบายการคำนวณสมรรถนะและการเลือกชนิดจรวด AIM-7 Sparrow เพื่อศึกษาค้นคว้า ส่วนที่ 2.2 อธิบายแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ศึกษาและเปรียบเทียบการคำนวณ แสดงสมการการคำนวณ จุดเด่นและข้อจำกัดของแบบจำลอง

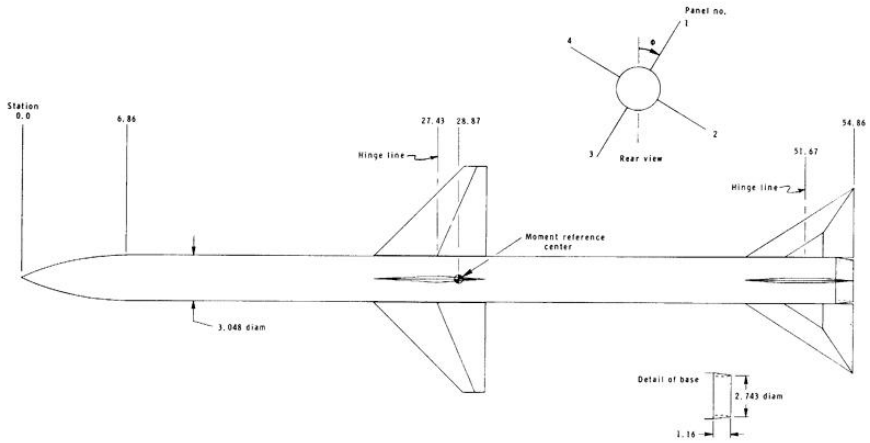
2.1 การคำนวณสมรรถนะของจรวด AIM-7 Sparrow ย่านความเร็วเหนือเสียง

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ จรวด AIM-7 Sparrow ซึ่งเป็นจรวดอากาศสู่อากาศแบบมีเรดาร์กึ่งแอคทีฟนำวิถี (Semi-active Radar Homing, SARH) ระยะปานกลาง [11] มาเป็นแบบจำลองหลักสำหรับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Analysis) เนื่องจากจรวดรุ่นนี้มีการเปิดเผยข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลการทดลองระดับวิชาการและอุตสาหกรรมการบินอย่างเพียงพอ [12] ทำให้สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการคำนวณ CFD ได้อย่างเหมาะสม [13] สามารถใช้เป็นตัวอย่างการศึกษาและสร้างกระบวนการวิจัยได้

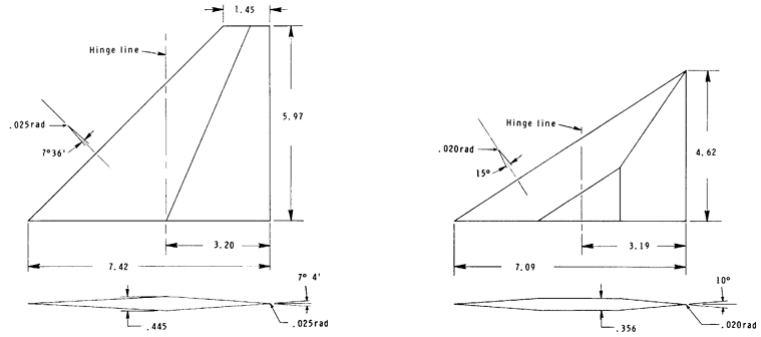
จรวด AIM-7 Sparrow มีโครงสร้างแบบทรงกระบอกพร้อมหัวรบทรงกรวย (Ogive Nose) และครีบควบคุม 4 แผ่นบริเวณท้ายลำตัว แสดงในรูปที่ 1-2 ซึ่งให้คุณสมบัติด้านเสถียรภาพและการทรงตัวในย่านความเร็วเหนือเสียง (Supersonic Regime) ที่เด่นชัด [14] โดยจรวดถูกออกแบบให้ทำงานในช่วงความเร็วประมาณ Mach 2–4 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างการไหล เช่น ช็อค (Shock Wave Interaction) และการแยกตัวในชั้นขอบเขต (Boundary Layer Separation) ที่ส่งผลต่อแรงยก (Lift) แรงต้าน (Drag) และโมเมนต์ตามแนวยาว (Pitching Moment) ของตัวจรวดโดยตรง การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยกแสดงในสมการที่ (1) และสัมประสิทธิ์แรงต้านแสดงในสมการ (2)

$$LIFT\ FORCE = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^2 \times C_L \tag{1}$$

$$DRAG\ FORCE = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^2 \times C_D \quad (2)$$



รูปที่ 1 แบบจำลองจรวด AIM-7 (เอกสารอ้างอิง [1])



รูปที่ 2 รายละเอียดของความยาวปีกและลักษณะแพนอากาศครีบหน้า (ซ้าย) ครีบหลัง (ขวา) (เอกสารอ้างอิง [1])

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models)

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตแบบจำลองที่ศึกษาระดับ RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) เลือกแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือ และใช้งานกันแพร่หลายในบริบทงานวิจัยและเชิงอุตสาหกรรม เพื่อคำนวณผลของการไหลปั่นป่วนที่ไม่สามารถจำลองได้โดยตรง เนื่องจากข้อจำกัดด้านทรัพยากรการคำนวณ แบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์มีหลายประเภท โดยแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน 4 ชนิด ได้แก่ $\boldsymbol{Spalart - Allmaras}$ (SA), $\boldsymbol{Realizable\ k - \varepsilon}$ (RKE), $\boldsymbol{SST\ k - \omega}$ (SST) และ $\boldsymbol{Generalized\ k - \omega}$ (GEKO) ซึ่งแต่ละแบบมีหลักการและจุดเด่นแตกต่างกัน ดังนี้

2.2.1 แบบจำลอง $\boldsymbol{Spalart - Allmaras}$ (SA)

แบบจำลอง SA เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สมการเดียว (One-equation Model) พัฒนาโดย Spalart และ Allmaras ในปี ค.ศ. 1992 [6] เพื่อใช้กับการไหลแบบชิดผิว (Attached Flow) และกรณีการไหลภายนอก (External Flow) เช่น ปีกอากาศยาน จุดเด่นคือใช้ทรัพยากรการคำนวณต่ำและให้ผลแม่นยำในกรณีที่การแยกชั้นการไหลไม่รุนแรง อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำจะลดลงเมื่อเกิดการไหลแยกหรือการไหลปั่นป่วนที่ซับซ้อน รายละเอียดโครงสร้างสมการแสดงตัวอย่าง ดังสมการที่ (3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i)\nabla\cdot(u) = G_\nu + \left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\rho\tilde{\nu})\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right\} + \left\{C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)^2\right\}\right] - Y_\nu - S_{\tilde{\nu}} \quad (3)$$

2.2.2 แบบจำลอง $Realizable\ k-\varepsilon$ (RKE)

แบบจำลอง RKE เป็นแบบสองสมการ (Two-equation Model) ที่ใช้พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) และอัตราการสูญเสียพลังงาน (ε) ในการคำนวณ [7] มีการปรับปรุงจากแบบมาตรฐานเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขทางกายภาพของการไหลมากขึ้น (Realizability Condition) ทำให้สามารถจำลองการไหลที่มีการหมุนวนหรือการไหลรอบวัตถุได้ดี แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการทำนายการแยกชั้นการไหลขนาดใหญ่ และการไหลแบบมีความดันย้อนกลับ (Adverse Pressure Gradient) รายละเอียดโครงสร้างสมการ แสดงในสมการ (4) – (8)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = P_k - \rho\epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon U_i) = C_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}P_k - C_{\varepsilon2}\frac{\varepsilon}{k}\rho\epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] \quad (5)$$

$$\mu = C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$P_k = \tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i'u_j'} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (8)$$

2.2.3 แบบจำลอง $Shear\ Stress\ Transport\ k-\omega$ (SST)

แบบจำลอง SST พัฒนาโดย FR. Menter ผู้เชี่ยวชาญด้านแบบจำลองความปั่นป่วน มีการนำเสนอแนวคิดครั้งแรกในปี ค.ศ. 1994 จุดเด่นของแบบจำลองที่ทำให้ได้รับการยอมรับในวงกว้าง คือการ รวมข้อดีของแบบ $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ เข้าด้วยกัน [8] กล่าวคือใช้รูปแบบ $k-\omega$ ใกล้ผิวผนังเพื่อให้คำนวณแรงเฉือนและการแยกชั้นได้ดี และเปลี่ยนเป็น $k-\varepsilon$ ในบริเวณการไหลภายนอกเพื่อลดผลกระทบของสภาวะขอบเขต (Boundary Layer) แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงมาก ให้ผลแม่นยำทั้งในกรณีการไหลชิดผิวและการแยกชั้นการไหล รายละเอียดโครงสร้างของแบบจำลอง แสดงในสมการ (9) – (12)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = P_k - C_\mu\rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i\omega) = C_{\omega1}\frac{\omega}{k}P_k - C_{\omega2}\rho\omega^2 + \rho(1-F_1)CD + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho\nu_t = \rho\frac{k}{max(\omega, F_2S/a_1)} \quad (11)$$

$$CD = \frac{2}{\sigma_\omega}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \quad (12)$$

2.2.4 แบบจำลอง $Generalized\ k-\omega$ (GEKO)

แบบจำลอง GEKO เป็นแบบจำลองรุ่นใหม่ที่พัฒนาโดย FR. Menter และเปิดให้ใช้งานเฉพาะโปรแกรมในเครือของบริษัท ANSYS โดยมีพื้นฐานจากแบบ $k-\omega$ แต่เพิ่มพารามิเตอร์การปรับแต่ง (Calibration

Parameters) ทั้งหมด 6 ชนิด [9] เพื่อให้ผู้ใช้สามารถปรับสมรรถนะของแบบจำลองให้เหมาะสมกับประเภทของการไหล เช่น การไหลรอบวัตถุ การไหลในท่อ หรือการไหลในชั้นขอบเขต ทำให้มีความยืดหยุ่นและแม่นยำสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองมาตรฐานทั่วไป สมการที่ (13) – (17) แสดงโครงสร้างการพัฒนาแบบจำลอง

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_{\mathrm{j}} k)}{\partial x_{\mathrm{j}}}=P_{\mathrm{k}}-C_{\mu}\rho k\omega+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\left(\mu+\frac{\widetilde{\mu_t}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right] \tag{13}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_{\mathrm{j}}\omega)}{\partial x_{\mathrm{j}}}=C_{\omega 1}P_{\omega}-C_{\omega 2}\rho F_{MIX}\omega^{2}+\rho F_{NW}CD+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\left(\mu+\frac{\widetilde{\mu_t}}{\sigma_{\omega}}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right] \tag{14}$$

$$\widetilde{\mu_t}=\ \mu_T=\rho\frac{k}{\max(\omega,S/C_{Realize})} \tag{15}$$

$$\tau_{ij}^{EV}=2\mu_T S_{ij}-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{16}$$

$$CD=\frac{2}{\sigma_{\omega}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \tag{17}$$

ตามรายงานในคู่มือผู้ใช้งาน [15] ได้แสดงบทบาทหน้าที่ของพารามิเตอร์ในการปรับแต่งเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองการไหล อันเป็นเอกลักษณ์เฉพาะแบบจำลอง GEKO ดังนี้

- C_{SEP}: ใช้ควบคุมพฤติกรรมการไหลแยกตัว
- C_{NW}: สำหรับการจำลองความเค้นเฉือนที่ผนังและการถ่ายเทความร้อน
- C_{MIX}: ปรับอัตราการแผ่ขยายของชั้นผิวเฉือนอิสระ
- C_{JET}: ปรับเฉพาะกับการไหลที่มีลักษณะเจ็ต
- C_{CORNER}: ใช้สำหรับปรับการจำลองการไหลทุติยภูมิ
- C_{CURV}: สำหรับการแก้ไขผลของความโค้ง

3. การดำเนินการวิจัย

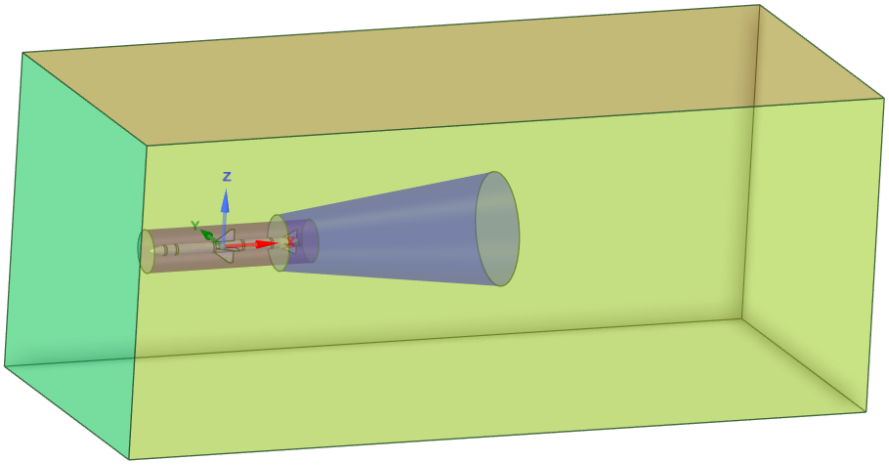
ในหัวข้อนี้ได้อธิบายเนื้อหาการตั้งค่าทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบด้วยส่วนที่ 3.1 การตั้งค่าโดเมนการคำนวณ (Computational Domain) ส่วนที่ 3.2 การสร้างกริด (Grid Generation) และส่วนที่ 3.3 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เพื่อให้เกิดความเข้าใจและแสดงการกำหนดค่าที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดง

3.1 การตั้งค่าโดเมนการคำนวณ (Computational Domain)

ในแบบจำลอง AIM-7 Sparrow ในงานวิจัยนี้ได้ถูกสร้างขึ้นจากไฟล์เรขาคณิต STL ที่ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวเชิงเรขาคณิต [16] ในโปรแกรม ANSYS SpaceClaim เพื่อให้ได้แบบจำลองเรขาคณิตที่ปิดผิวสมบูรณ์ (Water-tight Geometry) เหมาะสมกับการวิจัย

การจำลองการไหลภายนอก (External Flow) รอบขีปนาวุธ AIM-7 Sparrow ภายใต้สภาวะความเร็วเหนือเสียง Mach 2.5 จำเป็นต้องสร้างขอบเขตการคำนวณ (Computational Domain) ที่มีขนาดเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากคลื่นสะท้อน (Shock Reflection) และปรากฏการณ์ปิดกั้นการไหล (Blockage Effect) [14] โดเมนที่ใช้ในงานนี้เป็นโดเมนแบบสามมิติ รูปทรงปริซึมสี่เหลี่ยม (3D Rectangular Far-Field Domain) ครอบจรวด

ดังแสดงในรูปที่ 3 กำหนดระยะห่างขอบเขตจากตัวกระสุนตามคำแนะนำในงานวิจัยด้านพลศาสตร์ของไหลความเร็วสูง [18-19] กำหนดระยะทางด้านหน้าตัวกระสุนถึงขอบโดเมนทางเข้า (Inlet) 3.5L ระยะทางด้านท้ายถึงขอบโดเมนทางออก (Outlet) 10L และระยะห่างด้านข้างถึงผนังโดเมน 3L โดยที่ L คือความยาวตัวขีปนาวุธ

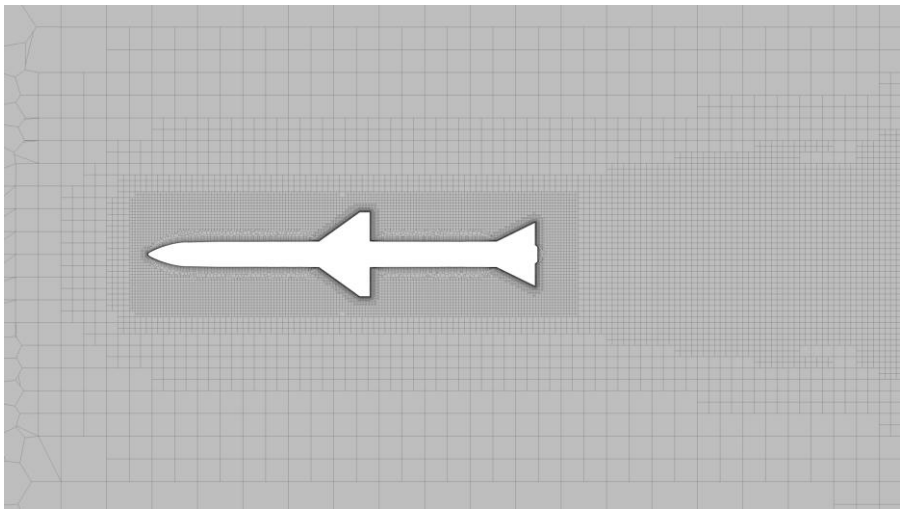


รูปที่ 3 แบบจำลองจรวด AIM-7 และการกำหนดโดเมนของการไหล

3.2 การสร้างกริด (Grid Generation)

การสร้างกริดได้ดำเนินการในโปรแกรม ANSYS Fluent Meshing โดยใช้โครงสร้างกริดแบบผสม (Hybrid) ชนิด Poly-Hexcore ซึ่งเป็นกริดผสมระหว่างเซลล์ Polyhedral และ Hexahedral ซึ่งให้ความสมดุลระหว่างความละเอียดใกล้ผิวผนังและประสิทธิภาพการคำนวณความแม่นยำสูงและคงความเสถียรในการคำนวณสำหรับการไหลความเร็วสูงที่มีคลื่นช็อค (Shock Wave) [1] บริเวณผิวจรวดได้เพิ่มชั้นกริดแบบปริซึม (Prism Layers) จำนวน 10 ชั้น เพื่อจำลองชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity Boundary Layer) ให้ถูกต้องทางฟิสิกส์โดยควบคุมค่า ($Y^+ < 1$)

นอกจากนี้ยังได้เพิ่มความละเอียดของโครงข่ายในบริเวณวิกฤต เช่น ส่วนหัวกระสุน (Nose Cone) และครีบ (Fins) ด้วยกล่องความหนาแน่นเทียม (Density Box) 2 ชั้นเพื่อเพิ่มความละเอียดในการจับคลื่นช็อค (Shock Wave Interaction) และการไหลแยกตัว (Flow Separation)



รูปที่ 4 การสร้างกริดแบบ Poly-Hexcore

3.3 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ในการคำนวณ เนื่องจากเป็นการแก้สมการภายใต้สภาวะการไหลเหนือเสียงความเร็วสูง (Supersonic Flow) ฉะนั้นการจำลองได้ใช้ตัวแก้สมการแบบ Density-Based Implicit Solver โดยเลือกชนิดของไหลสมมติให้ก๊าซเป็นอากาศอุดมคติ (Ideal Gas) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่: Inlet เลือกเป็น Pressure Far-Field ที่ Mach 2.5, Outlet: Pressure Outlet พร้อม Non-reflecting Boundary Condition ในผิวจรวดเลือกชนิด Wall แบบ No-Slip ในส่วนของผนังด้านข้าง: Symmetry Plane เพื่อจำลองการไหลที่สมมาตร

3.3.1 การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models Selection)

ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนหลัก 4 แบบ ได้แก่ SA, RKE, SST, และ GEKO เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำนายแรงต้าน (Drag Coefficient) และแรงยก (Lift Coefficient) ตั้งค่าผ่านตัวเลือก Viscous Model

3.3.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (GEKO Parameters Tuning)

จากการทบทวนวรรณกรรม [9,14] สามารถสรุปได้ว่า C_{SEP} เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำปรับแต่งค่าในช่วงค่ามากที่สุด น้อยที่สุด แสดงในตารางที่ 1 ปรับตั้งค่าพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์เดียวในการจำลองการไหล เพื่อทำนายการไหลผ่านจรวด ในย่านความเร็วเหนือเสียง และต้องการคำนวณปริมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงยก

ตารางที่ 1 การตั้งค่าแบบจำลอง GEKO ด้วยการปรับแต่งพารามิเตอร์

แบบจำลอง	C_{SEP}	C_{NW}	C_{MIX}	C_{JET}	C_{CORN}	C_{CURVE}
GEKO-0.7	0.7	0.5	0.3	0.9	1.0	1.0
GEKO-1.5	1.5	0.5	0.3	0.9	1.0	1.0
GEKO-2.0	2.0	0.5	0.3	0.9	1.0	1.0
GEKO-2.2	2.2	0.5	0.3	0.9	1.0	1.0
GEKO-2.5	2.5	0.5	0.3	0.9	1.0	1.0

การตั้งค่า เฉพาะกรณี C_{SEP} = 1.75 ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงแบบจำลอง SST และการตั้งค่า C_{SEP} = 1.0 ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงแบบจำลอง RKE ในขณะที่พารามิเตอร์อื่นใช้ค่าตั้งต้น (Default) จากโปรแกรม กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะพิจารณาเฉพาะการตั้งค่าในตารางที่ 1 เท่านั้น หรือใช้อ้างอิงสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะตำแหน่ง (Local Optimization)

4. ผลการวิจัย

4.1 การตรวจสอบความถูกต้อง (Verification and Validation)

จากการสร้างกริดแบบไฮบริด Poly-Hexcore ผลการลู่เข้าของคำตอบแบบไม่ขึ้นกับกริด (Grid Independent) เมื่อพิจารณากรณีไหลด้วยมุมปะทะ 0 องศา ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 2 จำนวนเซลล์ประมาณ 1.6 ล้านเซลล์ให้ผลการลู่เข้าสมดุล (Converged) และเสถียรภาพของแรงอากาศพลศาสตร์ที่ดี และกำหนดใช้เป็นจำนวนหลักในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2 Grid Independence Study

ชนิดกริด	จำนวนเซลล์	% ผลต่างคำตอบ C_D เมื่อเทียบกับกริดชนิด Medium
Coarse	1,055,400	28.9%
Medium	1,654,800	-
Fine	2,730,828	10.9%

4.2 การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือก จรวด AIM-7 Sparrow ผลการทดลองเทียบกับงานวิจัย [17] ทดลองในอุโมงค์ลมของจรวด Sparrow III (AIM-7) รุ่นที่ปรับให้ใช้ระบบควบคุมแบบปีก (Wing-Control) เพื่อเปรียบเทียบกับรุ่นควบคุมท้าย (Tail-Control) ซึ่งเคยรายงานในเอกสาร NASA TMX-2666 (1972) การทดสอบดำเนินการใน Langley Unitary Plan Wind Tunnel ที่ช่วงความเร็ว Mach 1.50 ถึง 4.60 ซึ่งอ้างอิงและพิจารณาเฉพาะความเร็วที่ Mach 2.5 และมุมปะทะ (Angle of Attack) โดยใช้หัววัดแรงแบบหกองค์ประกอบในการวัดแรงยก แรงต้าน และโมเมนต์ของแบบจำลองจรวด

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่มุมปะทะ 0 องศา

แบบจำลอง	C_D จากโปรแกมคำนวณ	% Error เทียบกับผลการทดลอง
SST	0.101139	1.65%
RKE	0.101886	2.40%
SA	0.100463	2.75%
GEKO-0.7	0.102314	2.83%
GEKO-1.5	0.101387	1.89%
GEKO-2.0	0.101015	1.52%
GEKO-2.2	0.100908	1.42%
GEKO-2.5	0.100848	1.55%

การปรับค่าสัมประสิทธิ์ C_{SEP} มีผลอย่างมากต่อการทำนายค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ โดยเมื่อพิจารณาการปรับค่าที่ C_{SEP} = 2.2 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการทำนายลักษณะการแยกชั้นการไหล (Flow Separation) รอบลำตัวจรวดย่านความเร็วเหนือเสียง ซึ่งส่งผลต่อแรงต้านโดยเฉพาะในบริเวณท้ายลำตัวที่มีการเกิดกระแสย้อนกลับและความดันต่ำ

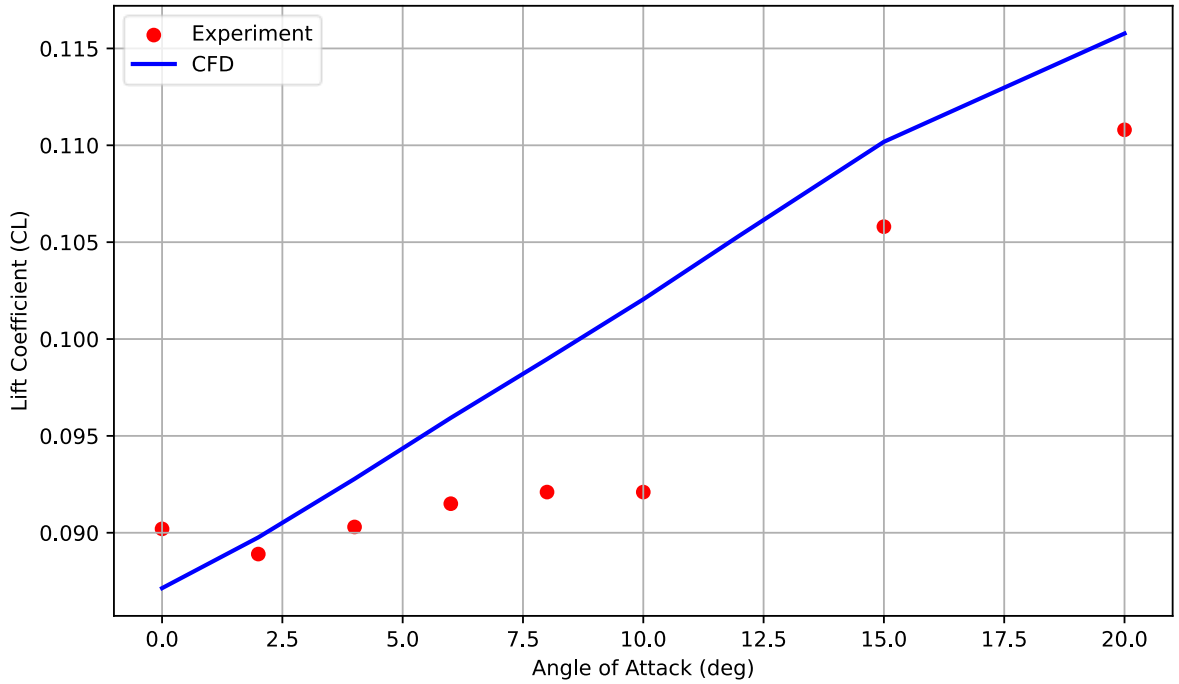
พารามิเตอร์ C_{SEP} ทำหน้าที่ควบคุมความไวของแบบจำลองต่อการเกิดการแยกชั้น ผลการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ C_{SEP} ต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ในแบบจำลอง GEKO พบว่า เมื่อเพิ่มค่า C_{SEP} จาก 0.7 เป็น 2.5 ค่า C_D มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่ค่าความแตกต่างของ C_L มีน้อยมากและคงที่อยู่ราว 0.0013 แสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับกรณีมุมปะทะ 0 องศาที่แรงยกโดยรวมมีค่าน้อย การลดลงของแรงต้านเมื่อ C_{SEP} เพิ่มขึ้นสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองทำนายให้การแยกชั้นการไหล (Flow Separation) บริเวณท้ายลำตัวเกิดช้า

ลง ทำให้แรงดันท้ายเพิ่มขึ้นและลดขนาดลมหมุน (Wake) ส่งผลให้แรงต้านจากความดัน (Pressure Drag) ลดลง โดยค่าพารามิเตอร์ในช่วง $C_{SEP} \approx 2.0–2.2$ ให้ค่าการทำนายที่สมดุลและมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีฟิสิกส์ของการไหลเหนือเสียงรอบวัตถุสมมาตร

อย่างไรก็ตาม การปรับค่าที่มากหรือน้อยเกินไปอาจทำให้การจำลองตำแหน่งของคลื่นช็อกและบริเวณช็อค (Shock-induced Separation) คลาดเคลื่อนจากพฤติกรรมจริงของการไหล ผลการคำนวณด้วยการปรับตั้งค่า C_{SEP} แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวในการเพิ่มความแม่นยำเชิงฟิสิกส์ของแบบจำลอง GEKO สำหรับการคำนวณแรงต้านของจรวดย่านเหนือเสียง

4.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงยก

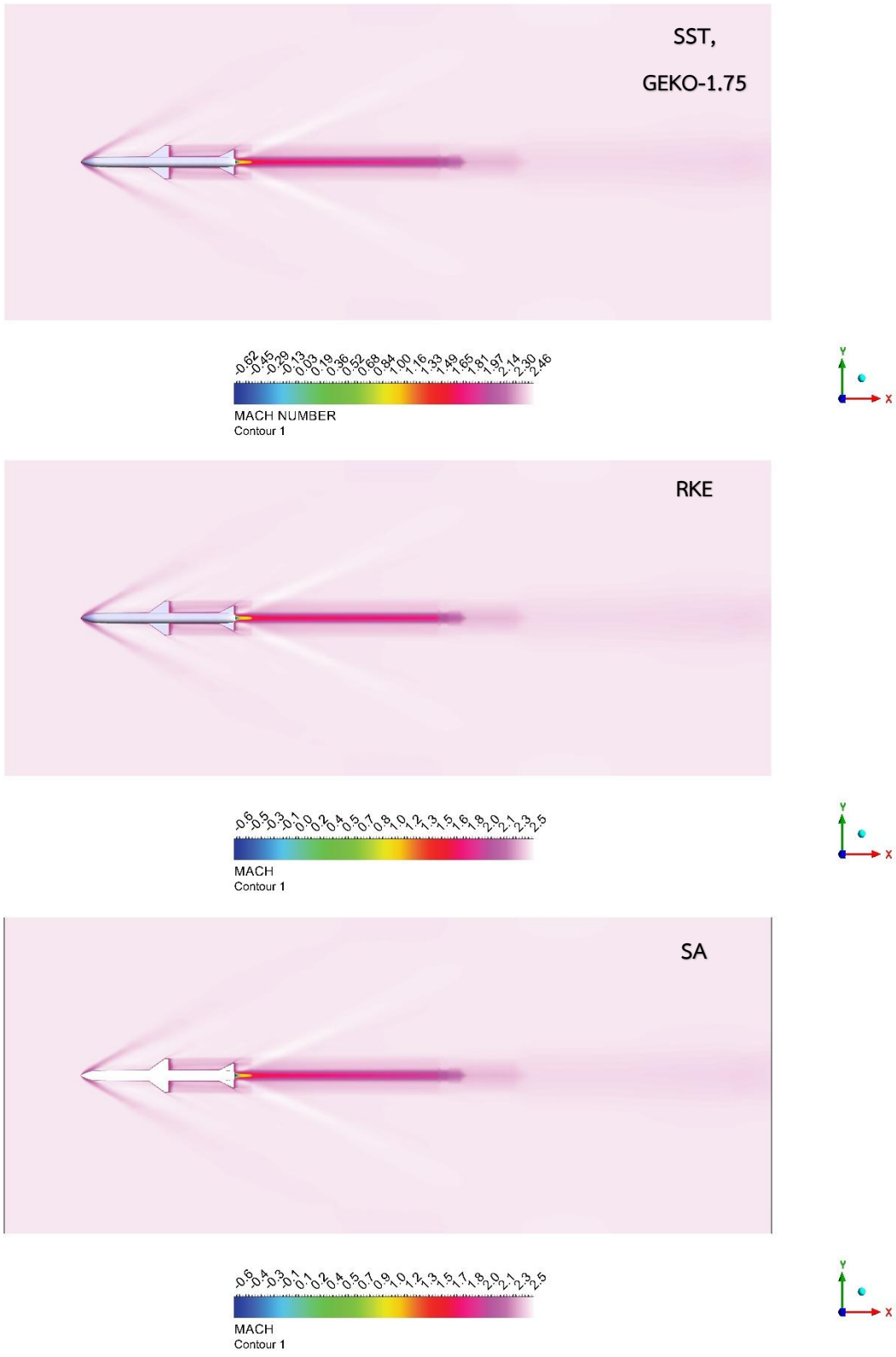
ผลการทดลองจริง [17] และการจำลองการไหลด้วย CFD ในแบบจำลองการไหลชนิด GEKO-2.2 แสดงให้เห็นแนวโน้มในทิศทางเดียวกันของสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะ แสดงในรูปที่ 5 เมื่อมุมปะทะเพิ่มสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การคำนวณมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 8% แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งแบบจำลอง GEKO ให้ความแม่นยำสูงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะและสัมประสิทธิ์แรงยก

4.4 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพการไหลด้วยการจำลอง (Flow Visualization)

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของลักษณะการไหล (Flow Visualization) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ของอากาศรอบลำตัวจรวด AIM-7 Sparrow ภายใต้สภาวะการไหลเหนือเสียงที่ Mach 2.5 และมุมปะทะ ใช้ผลการจำลองจากแบบจำลองความปั่นป่วน ได้แก่ SA, RKE, SST และ GEKO เพื่อสังเกตโครงสร้างของคลื่นกระแทก (Shock Wave), การแยกชั้นการไหล (Flow Separation), และกระแสปั่นป่วนบริเวณครีบควบคุมและฐานของจรวด แสดงผลลัพธ์ของความเร็วเทียบกับความเร็วเสียง (Mach) ในรูปที่ 6

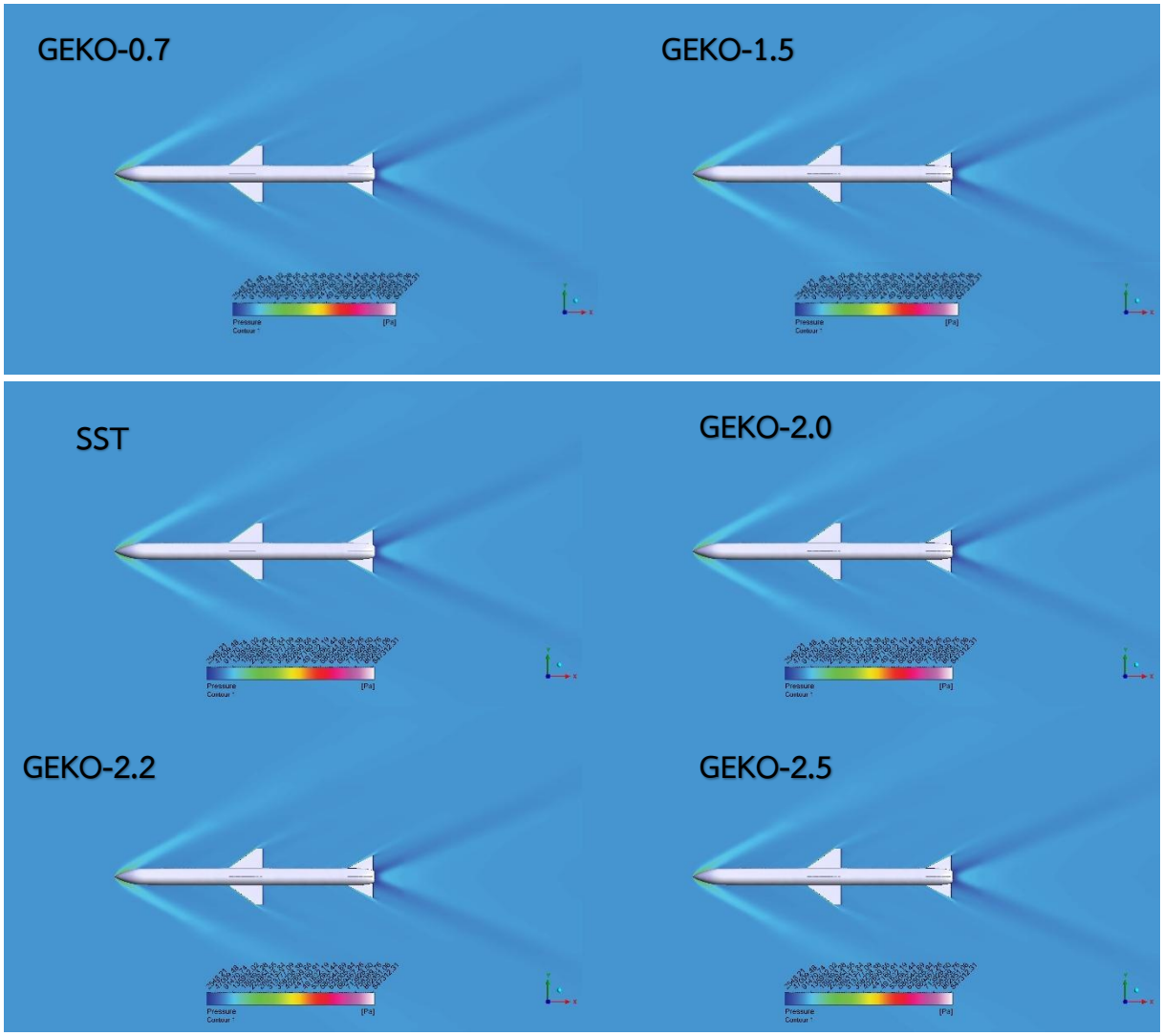


รูปที่ 6 ความเร็ว (Mach) ในการไหล

จากการจำลองพบว่า แบบจำลอง SST และ GEKO เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานจากสมการ $k-\omega$ สามารถทำนายรูปแบบของคลื่นช็อกและการไหลแยกได้สอดคล้องกับหลักการทางฟิสิกส์มากที่สุด โดยเฉพาะในบริเวณหัวรบและขอบครีบ ซึ่งเกิดการรวมตัวของคลื่นช็อกหลักและคลื่นสะท้อน (Shock Interaction Zone) อย่าง

ชัดเจน ส่วนแบบจำลอง SA และ RKE ให้ลักษณะการไหลที่ราบเรียบเกินจริง ส่งผลให้ไม่สามารถระบุขอบเขตการแยกของชั้นขอบเขตอากาศได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร

ในกรณีมุมปะทะเพิ่มขึ้น การไหลบริเวณด้านบนของตัวจรวดเกิดบริเวณแรงดันต่ำและการแยกตัวของกระแสลมขนาดใหญ่ (Large Flow Separation) ซึ่ง GEKO สามารถจำลองและติดตามแนวกระแสได้ต่อเนื่องมากกว่าแบบจำลองอื่น ทำให้การทำนายแรงยกและแรงต้านมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด



รูปที่ 7 การจำลองความดัน (Pressure Contour)

ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพยืนยันแนวโน้มเดียวกับผลเชิงปริมาณในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ว่าแบบจำลอง GEKO ที่ปรับค่า C_{SEP} ในช่วง 2.0 – 2.2 เป็นแบบจำลองที่ให้ความสมดุลระหว่างความละเอียดเชิงฟิสิกส์และความเที่ยงตรงในเชิงตัวเลขสูงสุด เหมาะสมสำหรับการจำลองอากาศพลศาสตร์ของจรวดย่านความเร็วเหนือเสียง

5. สรุปผล

การศึกษาการไหลย่านความเร็วเหนือเสียงผ่านจรวด AIM-7 Sparrow นี้ได้ดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองความปั่นป่วนหลัก 4 แบบ ได้แก่ $\boldsymbol{Spalart-Allmaras}$ (SA), $\boldsymbol{Realizable\ k-\varepsilon}$ (RKE), $\boldsymbol{SST\ k-\omega}$ (SST) และ $\boldsymbol{Generalized\ k-\omega}$ (GEKO) สำหรับการทำนายสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของจรวด

AIM-7 Sparrow ในย่านความเร็วเหนือเสียง (Mach 2.5) เพื่อหาความเหมาะสมของแบบจำลองในการใช้งานด้านวิศวกรรมการป้องกันประเทศและการออกแบบจรวดที่ต้องการความแม่นยำสูง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นแบบจำลองตระกูล $k-\omega$ โดยเฉพาะ SST และ GEKO แสดงความสามารถสูงกว่ากลุ่มแบบจำลองอื่นในการทำนายแรงยกและแรงต้าน เนื่องจากสามารถจำลองพฤติกรรมของคลื่นช็อกและการแยกชั้นขอบเขตอากาศได้อย่างสอดคล้องกับฟิสิกส์ของการไหลเหนือเสียง [19]

แบบจำลอง GEKO แสดงความยืดหยุ่นสูงที่สุดจากการให้ผู้ใช้ปรับพารามิเตอร์ได้หลายค่า ทำให้สามารถปรับแต่งความไวของการแยกชั้นการไหลให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของจรวดได้อย่างเหมาะสม โดยในการศึกษานี้พบว่าการตั้งค่า ค่าพารามิเตอร์ ≈ 2.0 – 2.2 ให้ผลการคำนวณแรงยกและแรงต้านที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับข้อมูลการทดลอง การปรับพารามิเตอร์ของ GEKO ส่งผลให้ลดความคลาดเคลื่อนของแรงต้าน (Drag Coefficient) ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสามารถจำลองการเกิดและการรวมตัวของกระแสย้อนกลับบริเวณท้ายลำตัว (Base Flow Recirculation) ได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงดันท้ายและค่า Pressure Drag

การวิเคราะห์เชิงภาพการไหล (Flow Visualization) ยืนยันผลทางเชิงตัวเลข โดยแบบจำลอง GEKO สามารถจำลองแนวคลื่นช็อก การแยกชั้น และกระแสไหลบริเวณครีบได้อย่างต่อเนื่องและเป็นธรรมชาติ สะท้อนถึงความสอดคล้องของแนวทางการจำลองกับพฤติกรรมจริงของอากาศพลศาสตร์จรวด

แนวทางการใช้แบบจำลอง GEKO ที่ผ่านการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับงานออกแบบและวิจัยด้านจรวดหรือขีปนาวุธในอนาคต ช่วยลดการพึ่งพาการทดสอบทางกายภาพและลดต้นทุนการวิจัยในระยะยาว เปิดโอกาสให้พัฒนาต่อยอดงานนี้ด้วยการหาชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimal Parameters) ศึกษาความไว (Sensitivity) ของพารามิเตอร์ที่ทำหน้าที่ในการคำนวณและจำลองการไหลจะเพิ่มประสิทธิภาพในเชิงงานวิจัยได้

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษา และศูนย์วิจัย ASTRA Lab (Aero-thermo Science & Technology Research Advancement) ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับการให้คำแนะนำด้านการศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ว. เจียจันทร์, น. สุขุประการ, “การวิเคราะห์ค่าอากาศพลศาสตร์ของจรวดความเร็วเหนือเสียงขนาด 2.75 นิ้ว โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Aerodynamic Analysis of Supersonic 2.75 inch Fin-Stabilized Rocket using Computational Fluid Dynamics),” วารสารวิชาการนายเรืออากาศ, ปีที่ 13, ฉบับที่ 13, หน้า 35–44, พ.ย. 2560.

[2] D. A. Frostbutter, B. E. McGrath, and R. P. Rogér, “Computational Fluid Dynamics in Missile Engineering,” *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 22, no. 3, pp. 289-301, 2001.

[3] S. Abuhanieh and H. U. Akay, “Numerical Investigation of Store Separation from Cavity Problems at High Speeds,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. XX, no. X, pp. 1-13, Jul. 2023, doi: 10.1177/09544100231203404.

[4] วรางค์รัตน์ จันทสาโร, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD): ความรู้ที่จำเป็นสำหรับวิศวกร, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2568.

[5] เวชพงศ์ ชุติชูเดช, อากาศพลศาสตร์อัตราเร็วต่ำ, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ, 2554.

[6] P. R. Spalart and S. R. Allmaras, “A one-equation turbulence model for aerodynamic flows,” AIAA Journal, vol. 94, no. 439, pp. 5-21, 1992.

[7] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, “A new k–**ε** eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation,” Computers & Fluids, vol. 24, no. 3, pp. 227–238, 1995.

[8] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” AIAA Journal, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, Aug. 1994.

[9] F. R. Menter and A. Matyushenko. “Generalized k– **ω** (GEKO) Two-Equation Turbulence Model.” AIAA Journal 1-17, 2025

[10] W. Aengsawate, M. Kaewbumrung, V. Juttijudata, “Multi-Level Exploitation of the GEKO Turbulence Model: Optimization Framework and Practical Guidelines for CFD,” Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 2026.

[11] P. Carfagna, E. Castoldi, M. Dotti, F. Gigante, T. Messa, and A. Turano, “AIM-7M Sparrow: Conceptual design for upgrades in Range, Velocity and Maneuverability,” Dip. Scienze e Tecnologie Aerospaziali, Politecnico di Milano, 2018.

[12] U.S. Navy, Naval Weapons Center, Corona Laboratories, “Air-to-Air Missile System I, Appendix II: Report of Task Team Two,” Corona, CA, Nov. 1968.

[13] N. Juliawan, L. V. T. Nguyen, N. V. Nguyen, M. Tyan, S. Kim, and J.-W. Lee, “Enhancement of Aerodynamics DB in Non-linear Region using CFD for Efficient AGM 6 DOF Simulation,” in KSAS 2016 Fall Conference Proceedings, Seoul, Korea, Nov. 2016.

[14] N. V. Yavuzturk, M. Bent, and U. C. Kucuk, “Simulation Study for the Comparison of 3 & 4 Fin Controlled Air Vehicles,” 2018 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum, Kissimmee, FL, USA, Jan. 8–12, 2018, doi: 10.2514/6.2018-0428.

[15] F. R. Menter and A. Matyushenko, “Generalized k–**ω** (GEKO) Two-Equation Turbulence Model,” AIAA J., pp. 1–17, 2025, doi: 10.2514/1.J065393.

[16] J. Smith, “Ansys Fluent: CFD Simulation Fundamentals,” Udemy [Online] . Available: https://www.udemy.com (Accessed: 25 ตุลาคม 2568).

[17] W. J. Monta, “Supersonic Aerodynamic Characteristics of a Sparrow III Type Missile Model with Wing Controls and Comparison with Existing Tail-Control Results,” NASA Technical Paper 1078, Langley Research Center, Hampton, VA, Nov. 1977.

[18] J. D. Anderson, Modern Compressible Flow With Historical Perspective, 3rd ed., McGraw-Hill, 2003.

[19] D. C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, 3rd ed. La Cañada, CA: DCW Industries, 2006, pp. 45–80.

การทบทวนงานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณของใบพัดอากาศยานไร้คนขับความเร็วต่ำ

Literature Review of Computational Aeroacoustics of Low-Speed UAV Propellers

วรนภ ไหลตระกูล[1] และ ชินภัทร ทิพโยภาส[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Woranop Laitrakun[1] and Chinnapat Thipyopas[1*]

[1]Department of Aerospace Engineering, Kasetsart University

[*] CorresponseAuthor: fengcpt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ทำงานในย่านความเร็วต่ำมักถูกนำมาใช้ในภารกิจทางทหาร เช่น การลาดตระเวนและสอดแนม ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการควบคุมเสียงจากใบพัดเพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับ เสียงจากใบพัดสามารถแบ่งได้เป็นเสียงโทนัล (Tonal noise) ที่สัมพันธ์กับความถี่ของการผ่านใบพัด (Blade Passing Frequency: BPF) และเสียงบรอดแบนด์ (Broadband noise) ที่เกิดจากกระแสวนที่ปลายใบพัด (Tip vortex) บทความนี้เป็นการทบทวนแนวทางและความก้าวหน้าจากงานวิจัย การคำนวณอากาศพลศาสตร์เสียง (Computational Aeroacoustics) ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสียงสำหรับใบพัดความเร็วต่ำ โดยบทความนี้มุ่งเน้นไปที่เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วนที่สำคัญ ได้แก่ Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES) และ Hybrid RANS–LES ซึ่งแต่ละแบบจำลองให้ความละเอียดและต้นทุนการคำนวณที่แตกต่างกัน นอกจากนี้สมการที่ใช้ในการทำนายเสียงมีความน่าเชื่อถือหลายระดับ (Multi-Fidelity) ที่ใช้ในปัจจุบันได้ถูกกล่าวถึงในบทความนี้ เช่น แบบจำลองของ Lighthill และ Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์ผลลัพธ์ เช่น การหาสเปกตรัมความถี่ ระดับความดันเสียง (SPL) และรูปแบบการกระจายเสียงรอบใบพัด

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, ใบพัด, การคำนวณอากาศพลศาสตร์เสียง, แบบจำลองความปั่นป่วน, เสียงโทนัล, เสียงบรอดแบนด์

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) operating at low speeds are widely operated in military surveillance and reconnaissance missions, where minimizing propeller noise is important for maintaining stealth and mission effectiveness. Propeller-generated noise is generally classified into tonal noise, which corresponds to the blade passing frequency, and broadband noise, resulting from turbulence that is produced from tip vortex. This paper reviews the current approaches and advancements in Computational Aeroacoustics (CAA) applied to the prediction and analysis of low-speed propeller noise. This paper focuses on turbulence modeling techniques, including Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES), and Hybrid RANS–LES methods, each model offering distinct trade-offs between computational cost and accuracy. Furthermore, the study discusses acoustic prediction models Different Fidelity Levels such as Lighthill's and Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) equations, as well as propeller CAA post-processing techniques including in this paper, frequency spectrum analysis, sound pressure level (SPL), and noise directivity patterns.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Propeller, Computational Aeroacoustics (CAA), Turbulence Modeling, Tonal Noise, Broadband Noise

1. บทนำ

ในปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในภารกิจทางการทหารและการรักษาความมั่นคงของชาติ ไม่ว่าจะเป็นการลาดตระเวน, การสอดแนม และการเฝ้าระวัง ซึ่งหัวใจสำคัญของภารกิจเหล่านี้คือความสามารถในการหลบซ่อนจากการถูกตรวจจับ (Stealth) โดยเฉพาะการตรวจจับทางเสียง สำหรับ UAV ที่ขับเคลื่อนด้วยใบพัด แหล่งกำเนิดเสียงหลักนั้นมาจากการหมุนของใบพัด ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทหลัก คือ เสียงโทนัล (Tonal noise) และ เสียงบรอดแบนด์ (Broadband noise) เสียงโทนัลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการหมุนตามคาบของใบพัดและแสดงยอดสเปกตรัมที่ชัดเจนที่ความถี่การผ่านใบพัด (Blade Passing Frequency: BPF) ในขณะที่เสียงบรอดแบนด์เกิดจากความไม่เสถียรของกระแสอากาศและความปั่นป่วน (Turbulence) ที่ปะทะกับพื้นผิวใบพัด รวมถึงกระแสวนที่ปลายใบ (Tip vortex) [1] อย่างไรก็ตาม สำหรับใบพัด UAV ขนาดเล็กที่ทำงานในย่านความเร็วต่ำ (Low Reynolds Number) นั้นมีความซับซ้อนทางอากาศพลศาสตร์สูงกว่าใบพัดอากาศยานทั่วไป เนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนผ่านการไหล (Laminar-to-Turbulent Transition) และการเกิดฟองอากาศจากการแยกตัวแบบลามินาร์ (Laminar Separation Bubble: LSB) ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดเสียงบรอดแบนด์ที่สำคัญและยากต่อการทำนาย ในอดีต การทำนายเสียงใบพัดมักใช้วิธีการกึ่งประจักษ์ (Semi-empirical models) เช่น ทฤษฎีของ Gutin หรือ Hanson [2] ซึ่งคำนวณจากพารามิเตอร์พื้นฐาน เช่น แรงขับและรูปทรงเรขาคณิต วิธีการเหล่านี้มีความรวดเร็วและเหมาะสำหรับการออกแบบเบื้องต้น แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถจำลองกลไกการเกิดเสียงบรอดแบนด์ที่ซับซ้อนจากการไหลแบบปั่นป่วนได้แม่นยำเพียงพอ จึงมีความจำเป็นต้องใช้วิธี อากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณ (Computational Aeroacoustics: CAA) ซึ่งผนวกระเบียบวิธี พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เข้ากับสมการเปรียบเทียบทางเสียง (Acoustic Analogy) เช่น Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของ CAA นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการจำลองสนามการไหล (Flow Field) ของ CFD เป็นหลัก โดยเฉพาะการเลือกใช้ แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) ที่เหมาะสม แบบจำลองมาตรฐานอย่าง Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) อาจให้ผลดีในการทำนายเสียงโทนัลและแรงทางอากาศพลศาสตร์เฉลี่ย แต่ในหลายกรณีกลับล้มเหลวในการจับโครงสร้างกระแสวนความละเอียดสูงที่เป็นต้นกำเนิดของเสียงบรอดแบนด์ ด้วยเหตุนี้ บทความนี้จึงมุ่งเน้นทบทวนสถานะปัจจุบันของเทคนิค CAA สำหรับใบพัด UAV ความเร็วต่ำ โดยเน้นวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองความปั่นป่วนรูปแบบต่างๆ ตั้งแต่ RANS, Hybrid RANS-LES ไปจนถึง Transition Models เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีการคำนวณที่สมดุลระหว่างความแม่นยำและต้นทุนทางคอมพิวเตอร์

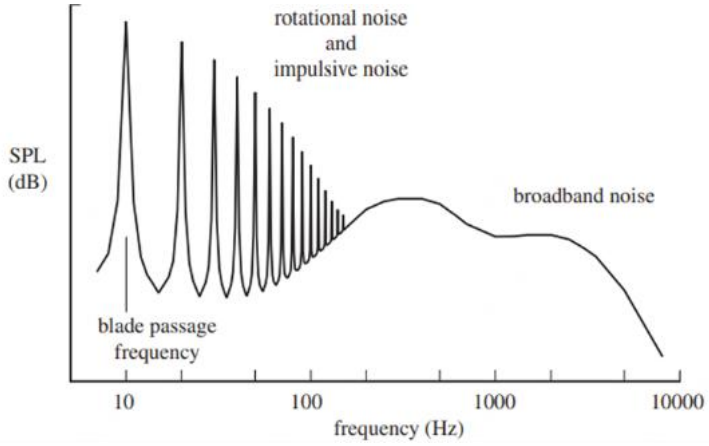
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักพื้นฐานของอากาศพลศาสตร์เสียง

อากาศพลศาสตร์เสียงเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดและแพร่กระจายของเสียง เมื่อของไหลเคลื่อนที่หรือไหลผ่านวัตถุ โดยมีพื้นฐานจากแนวคิดของ Lighthill ซึ่งเป็นสมการอุปมาทางเสียง (Acoustic Analogy) [4] ที่เชื่อมสมการนาเวียร์–สโตกส์ (Navier–Stokes) เข้ากับสมการคลื่นเสียง โดยต่อมาสมการนี้ได้มีการต่อยอดเป็นกรณีที่วัตถุคงที่ (Fixed control surface) และวัตถุมีการเคลื่อนที่ (Moving control surface) นั้นคือ Curle และ Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) ตามลำดับ [4] เสียงจากการไหลสามารถจำแนกตามลักษณะแหล่งกำเนิดได้เป็นแบบ monopole, dipole, และ quadrupole ซึ่งทั้ง 3 ลักษณะของแหล่งกำเนิดนั้นเกิดขึ้นทั้งหมดในการพิจรณาเสียงเมื่อใบพัดของ UAV นั้นเกิดการหมุน ซึ่งแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์เสียงที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นรากฐานของ CAA ทั้งหมด

2.2 กลไกการเกิดเสียงของใบพัด

จากบทนำประเภทของเสียงที่เกิดขึ้นจากใบพัด UAV นั้นสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ เสียงโทนัล (Tonal Noise) และ เสียงบรอดแบนด์ (Broadband Noise) ซึ่งจากที่กล่าวไปข้างต้นเสียงโทนัลเป็นลักษณะของเสียงที่มีความถี่เฉพาะ เช่น BPF และ ฮาร์มอนิกของตัวใบพัด โดยที่เสียงโทนัลนั้นเกิดมาจากการหมุนตามคาบของใบพัดที่ทำให้แรงและความหนาใบพัดเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ รวมไปถึง กระแสวนที่พัดผ่านใบพัด (blade-vortex interaction noise) ซึ่งเป็นโทนที่คงที่ ส่วนเสียงบรอดแบนด์นั้นเป็นลักษณะของเสียงที่มีความถี่ที่กระจายไปหลายย่านความถี่ โดยเกิดมาจากการไหลที่ไม่สม่ำเสมอรอบใบพัดทำให้กระแสอากาศชนกับขอบท้ายของใบพัด (trailing edge noise), กระแสอากาศที่ไหลออกมาจากใบพัดอย่างไม่เป็นจังหวะ และกระแสวนของอากาศก่อนหน้าที่กระทบกับใบพัด (blade-wake interaction noise) [5,6] ซึ่งลักษณะของทั้งเสียงโทนัลและเสียงบรอดแบนด์ที่เกิดจากใบพัดนั้นเป็นไปตามรูปที่ (1)



รูปที่ 1 ลักษณะของเสียงโทนัลซึ่งพิจารณาจาก BPF และ ฮาร์มอนิกของตัวใบพัดและเสียงบรอดแบนด์

2.3 สมการแบบจำลองทางเสียง

วิธีการของ Ffowcs-Williams and Hawkings (FWH) ตามสมการที่ (1) เป็นแบบจำลองทางเสียงที่ได้รับการต่อยอดมาจาก Lighthill ซึ่งในแบบจำลองนี้ได้มีการเพิ่มขีดจำกัดของ Lighthill โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขการคำนวณของวัตถุที่เคลื่อนที่ได้ โดยที่ในกรณีของการจำลองเสียงที่เกิดจากใบพัดนั้นการใช้แบบจำลอง FWH นั้นสามารถครอบคลุมผลลัพธ์ที่แม่นยำและถูกต้องมากกว่า Lighthill โดยที่ FWH จะแปลงสมการคลื่นเสียงทั่วไปให้อยู่ในรูปที่รวมผลของสามแหล่งกำเนิดเสียงหลัก ซึ่งประกอบไปด้วย turbulence shear stress, momentum fluctuations และ volume fluctuations ซึ่งอยู่ในสามพจน์ด้านขวามือของสมการ (1) [2]

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}(T_{ij} H) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j \delta) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_n \delta) \qquad (1)$$

สำหรับการคำนวณเสียงในบริวณสนามไกล (Far-field) จะทำโดยการอินทิเกรตค่าบนพื้นผิวของวัตถุโดยใช้ Green's function สำหรับกรณีที่ Mach number ต่ำ แหล่งกำเนิดเสียงหลักจะมาจากพื้นผิวของวัตถุ (Dipole source) ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะผิวของใบพัดในการอินทิเกรตสมการ FW-H [7]ในทางกลับกัน สำหรับการออกแบบเบื้องต้นที่ต้องการความรวดเร็ว มักใช้วิธีการกึ่งประจักษ์ (Semi-empirical methods) หรือ แบบจำลองความละเอียดต่ำ (Low-fidelity models) เช่น ทฤษฎีของ Gutin และ Hansonโดย วิธีการของ Gutin ถือเป็นแบบจำลองยุคแรกเริ่มที่คำนวณเสียงโดยพิจารณาจากแรงขับและแรงบิด สภาวะคงที่ (Steady loading) โดยสมมติให้แรงทางอากาศพลศาสตร์กระจุกตัวอยู่ที่รัศมีประสิทธิผลของใบพัด [7] ดังแสดงความสัมพันธ์พื้นฐานในสมการที่ (2) ส่วน วิธีการของ Hanson ได้พัฒนาต่อยอดโดยนำผลของความหนาใบพัด (Thickness noise) และลักษณะของแหล่งกำเนิดเสียงแบบไม่เป็นจุด (Non-compact source) มาพิจารณาในโดเมนความถี่ (Frequency domain)

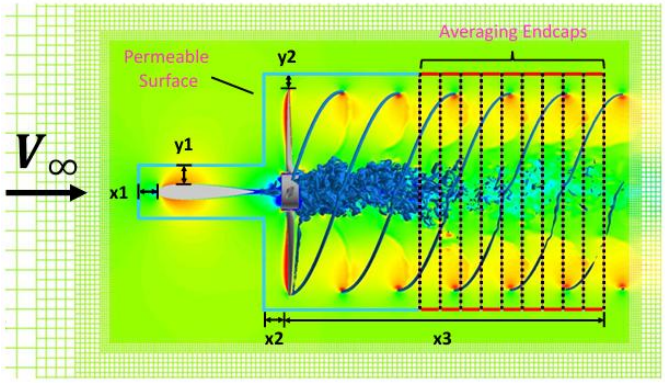
อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของทั้งสองวิธีคือการตั้งสมมติฐานบนพื้นฐานของภาระกรรมที่คงที่หรือเป็นคาบ (Steady or Periodic loading) ทำให้สามารถทำนายได้เพียงเสียงโทนัล (Tonal noise) ที่ความถี่ผ่านใบพัด (BPF) เท่านั้น แต่ไม่สามารถจับลักษณะของเสียงบรอดแบนด์ (Broadband noise) ที่เกิดจากความปั่นป่วน (Turbulence) และการหลุดของกระแสอากาศ (Flow separation) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นไปที่การใช้สมการ FW-H ร่วมกับข้อมูลการไหลที่มีความละเอียดสูงจาก CFD เพื่อแก้ปัญหานี้

2.4 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model)

ในงานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณ (Computational Aeroacoustics) ความแม่นยำในการทำนายเสียงนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการจำลองความปั่นป่วนของอากาศ ทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) จึงมีบทบาทสำคัญในการทำนายทั้งแรงอากาศพลศาสตร์และเสียงที่เกิดขึ้น ซึ่งโมเดลความปั่นป่วนที่นิยมใช้นั้นได้แก่ Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES), Hybrid RANS–LES รวมไปถึง transition model ที่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาในงานวิจัยด้านใบพัด โดยที่ RANS เป็นโมเดลที่นิยมใช้อย่างมากในงานด้าน CAA โดยที่ทั้งสี่โมเดลที่ได้กล่าวไปนั้นมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่ง RANS นั้นสามารถจำลองได้อย่างรวดเร็วและใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำ โดยที่ RANS นั้นประกอบไปด้วยหลากหลายโมเดลย่อย เช่น k–ε และ k–ω SST ซึ่งเป็นโมเดลที่งานด้าน CAA นิยมใช้ รวมไปถึงโมเดลอื่นๆ แบบจำลอง LES แบ่งกระแสวนตามขนาด โดยคำนวณกระแสวนขนาดใหญ่โดยตรง (resolved eddies) และใช้แบบจำลองย่อย (sub-grid scale model) เช่น Smagorinsky หรือ WALE สำหรับกระแสวนขนาดเล็ก วิธีนี้สามารถจำลองการความปั่นป่วนของอากาศที่ได้อย่างแม่นยำทำให้เหมาะกับการวิเคราะหเสียงในบริเวณสนามไกล (far-field) รวมไปถึงเสียงแบบบรอดแบนด์ [2] ซึ่งแบบจำลอง LES นั้นจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่สูง ทำให้มีการนำโมเดลทั้งสองมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน (Hybrid RANS–LES) โดยใช้ RANS ในบริเวณใกล้ผิววัตถุ (boundary layer) ที่การไหลมีลักษณะเรียบ และใช้ LES ในบริเวณไหลอิสระ (separated flow) ที่มีกระแสวนรุนแรง วิธีนี้ช่วยลดต้นทุนในการคำนวณลง แต่ยังคงความละเอียดของการไหลไม่คงที่ได้ดี และอีกหนึ่งโมเดลที่งานด้าน CAA นิยมใช้คือ Transition Model ซึ่งการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำของ UAV นั้นการไหลของอากาศที่เปลี่ยนจากลามีนา (laminar) ไปยัง การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ส่งผลต่อการเกิดเสียง ทำให้โมเดลนี้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยทำนายผลของเสียงบรอดแบนด์บริเวณขอบท้ายใบพัด (trailing edge noise) โดยที่ในส่วนถัดไปของบทความนี้ได้มีการพูดถึงงานวิจัยต่างๆที่ได้นำแต่ละโมเดลมาประยุกต์

2.5 แนวทางการกำหนดตำแหน่งพื้นผิวการอินทิเกรต FW-H

การประยุกต์ใช้วิธี Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) แบบพื้นผิวซึมผ่านได้ (Permeable Surface) จำเป็นต้องมีการกำหนดการสร้างพื้นผิวสมมติล้อมรอบใบพัดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ โดยพื้นผิวนี้ทำหน้าที่เก็บข้อมูลความผันผวนของของไหลเพื่อนำไปคำนวณการแผ่กระจายเสียง ทั้งนี้ การวางตำแหน่งพื้นผิวต้องรักษาสมดุลระหว่างการครอบคลุมแหล่งกำเนิดเสียงเชิงปริมาตร (Volume sources) ทั้งหมดกับการอยู่ในบริเวณที่ mesh ยังคงมีความละเอียดสูงเพียงพอที่จะจับพฤติกรรมการไหลได้ นอกจากนี้ ความละเอียดเชิงพื้นที่บนพื้นผิวต้องมีความหนาแน่นไม่น้อยกว่าสองจุดต่อความยาวคลื่นเสียงที่สั้นที่สุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อน อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงปัญหาเสียงเทียม (Spurious noise) ที่เกิดจากกระแสอากาศ (Wake) ไหลตัดผ่านพื้นผิว ซึ่งนิยมแก้ไขโดยการออกแบบพื้นผิวส่วนปิดท้าย (Endcap) แยกออกมา เพื่อให้สามารถคัดกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวออกจากการวิเคราะห์ผลลัพธ์สุดท้ายได้ [3] โดยที่ได้มีการแสดงตัวอย่างในรูปที่ (2)



รูปที่ 2 รูปร่างของ Permeable Surface ในงานวิจัยที่ศึกษา CAA ของ Wing-Propeller

3. การทบทวนงานวิจัย (Literature review)

ในส่วนของการทบทวนงานวิจัยซึ่งเป็นส่วนหลักของบทความนี้ได้แบ่งออกเป็นสี่ส่วนหลักซึ่งแบ่งตามประเภทของงานวิจัยที่อยู่ในขอบเขตงานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณของใบพัด ได้แก่ 1. การเปรียบเทียบแบบจำลองทางเสียง 2. การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วน 3. ผลและการวิเคราะห์ที่แต่ละงานวิจัยเลือกศึกษา

3.1 งานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณของใบพัดที่เปรียบเทียบแบบจำลองทางเสียง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำแบบจำลองของเสียงที่มีความน่าเชื่อถือหลายระดับ (multi-Fidelity) มาใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ในเชิงของเสียง โดยงานของ (Huang et al.) ในปี 2024 [8] และ ในปี 2025 [2] ได้มีการนำเสนอกรอบการประเมินหลายระดับความละเอียด (multi-fidelity framework) เพื่อศึกษาว่าในแต่ละแบบจำลองที่มีระดับความละเอียดที่แตกต่างกันนั้นมีความแม่นยำในการคำนวณและมูลค่า (cost) ในการคำนวณที่แตกต่างกันอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [2] และ กรอบการประเมินหลายระดับความละเอียด (multi-fidelity framework) โดยที่แบบจำลองเสียงสามระดับที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะได้แก่ ระดับความแม่นยำสูง (High-fidelity) Ffowcs-Williams & Hawkings (FWH) ระดับความแม่นยำปานกลาง (Medium-fidelity) Hanson’s method และระดับความแม่นยำต่ำ (Low-fidelity) Gutin’s method โดยที่ทั้งสองงานนี้ได้ใช้ ใบพัด Clark-Y ที่ติดตั้งบน nacelle ขนาด 9 นิ้วในการเปรียบเทียบ รวมถึงใช้ LES (Large Eddy Simulation) แบบ กริดแบบหยาบ (coarse grid) ในการคำนวณ และสภาวะทดสอบ Re = 48000, M = 0.231, J = 0.485 ซึ่งผลลัพธ์ของแต่ละแบบจำลองนั้นได้มีการเปรียบเทียบในตารางที่ (1)

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละแบบจำลอง

แบบจำลองเสียง	ระดับความละเอียด	ประเภทของเสียงที่สามารถจับได้	ความคลาดเคลื่อน	มูลค่าในการคำนวณ (computational cost)
FWH	สูง	Tonal และ Broadband noise	คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2 เดซิเบล	สูง (อัตราส่วนเวลา = 10^4)
Hanson	กลาง	Tonal noise	คลาดเคลื่อนประมาณ 0.2 เดซิเบล	กลาง (อัตราส่วนเวลา = 10^1)
Gutin	ต่ำ	Tonal (1st harmonic)	คลาดเคลื่อนมาก	ต่ำ (อัตราส่วนเวลา =1)

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้นได้ข้อสรุปว่ากรอบการคำนวณในด้านอากาศพลศาสตร์เสียงนั้นวิธีการของ FWH นั้นเป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากที่สุดเนื่องจากสามารถจับได้ทั้ง tonal และ broadband noise แต่มีมูลค่าในการคำนวณที่สูงมากเมื่อเทียบกับอีกสองวิธี และวิธีของ Hanson นั้นสามารถจับ tonal noise ได้แต่ไม่สามารถจับ broadband noise ได้ ซึ่งมีมูลค่าในการคำนวณที่น้อยกว่าวิธีแรกทำให้เหมาะกับการออกแบบเชิงแนวคิดมากกว่าการออกแบบเชิงรายละเอียด ส่วนวิธีของ Gutin มีความแม่นยำจำกัด ใช้ได้เฉพาะทิศทาง 90องศา ถึง 120 องศา และให้ค่าระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level : SPL) เฉลี่ยที่ต่ำกว่าความจริง [2] ซึ่งสามารถสร้างกรอบในการเลือกใช้วิธีในงานด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณได้ดี

3.2 งานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณของใบพัดที่เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วน

จากที่ผู้เขียนได้ทำการสำรวจแบบจำลองความปั่นป่วนที่งานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณนั้นมักจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RANS, LES รวมไปถึง Hybrid RANS–LES ซึ่งในบทความนี้ได้มีการนำแบบจำลองทั้งสามมาพูดถึง นอกจากนี้ยังมีการพูดถึงแบบจำลองอื่นๆที่มีการใช้งานในงานวิจัยด้านอื่นแต่อาจจะยังไม่ถูกนำมาใช้งานด้านใบพัด

3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RANS

แบบจำลอง RANS ที่มีการนำมาใช้อย่างมากในงานด้าน CFD และ CAA นั้นคือ SST k–**ω** ซึ่งเป็นแบบจำลองที่รวมข้อดีของแบบจำลอง k-**ε** และ k-**ω** เข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถจำลองการไหลได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งเหตุผลแบบจำลองนี้เป็นที่นิยมเนื่องมาจากสามารถคำนวณการไหลที่มีความชันความดันย้อนกลับ (adverse pressure gradients) ได้ดี ซึ่งพบมากในปัญหาในด้านอากาศพลศาสตร์เสียง ทำให้จำลองการแยกตัวของการไหลได้แม่นยำ [9] ซึ่งงานวิจัยของ (Klimczyk และ Sieradzki) ในปี 2023 ที่ได้ใช้ SST k–**ω** ในการ optimization และ วิเคราะห์ใบพัด UAV รวมถึงการคำนวณเสียง tonal ผ่านสมการ FW-H ซึ่งได้ผลสรุปว่า RANS แบบ SST ให้ความสมดุลระหว่างความเร็วในการคำนวณและความแม่นยำสำหรับการออกแบบหลายตัวแปรในงานด้านเสียง [11] นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีแบบจำลอง k–**ω** แบบใหม่ที่ยังไม่ถูกนำมาใช้ในงานด้านอากาศพลศาสตร์เสียงมากนักโดยเฉพาะงานในด้านใบพัด นั่นคือ GEKO Model (Generalized k–**ω**) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจาก SST k–**ω** โดยเพิ่มตัวแปรอิสระเพื่อให้สามารถปรับแบบจำลองให้เหมาะกับการแยกการไหล (separation), การไหลโค้ง, การผสมอิสระ และการไหลในเจ็ต โดยที่สามารถตั้งค่าตัวแปร เช่น C_{sep}=1 จะสามารถประมาณเป็น k–**ε**, C_{sep} =1.75 จะสามารถประมาณเป็น SST

k–ω [12] ซึ่งในงานวิจัยของ (Zore) ในปี 2020 นั้นได้มีการนำ GEKO Model มาประยุกต์ใช้ในด้าน CAA นั่นคือ ทำนายเสียงที่เกิดขึ้นจากกระจกรถยนต์ แสดงให้เห็นว่าหากมีการกำหนดตัวแปรอิสระให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหานั้น สามารถเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ในด้านเสียง [10] ซึ่งในปัจจุบันยังไม่ได้มีการนำ GEKO Model มาปรับใช้กับงานในด้าน CAA ของใบพัด UAV ทำให้ประเด็นนี้สามารถนำมาปรับใช้ได้ในอนาคต

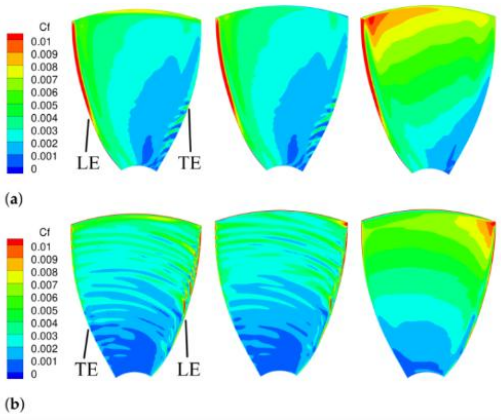
3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ LES และ Hybrid RANS–LES

LES (Large Eddy Simulation) ใช้การคำนวณแบบความละเอียดสูงโดยจำลอง vortices ขนาดใหญ่โดยตรง เหมาะสำหรับงานจำลองเสียงของใบพัดที่ต้องการความแม่นยำสูง ซึ่ง full LES นั้นจำเป็นต้องใช้กริดที่มีความละเอียดมากโดยเฉพาะบริเวณใกล้ผนัง (near-wall region) รวมไปถึงใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่สูงมากทำให้งานด้าน CAA ที่จำเป็นต้องการความแม่นยำของผลลัพธ์เลือกที่จะใช้ Hybrid RANS–LES เพื่อลดต้นทุนในการคำนวณแทน โดยที่ Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES) ถูกนำมาปรับใช้กับการคำนวณเสียงของใบพัดรวมกับ FW-H ในงานของ (A. Broatch et al.) ในปี 2024 ซึ่งแบบจำลอง IDDES สามารถจับกระแสวน (Vortex) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดเสียง Blade–Vortex Interaction (BVI) และสามารถทำนายเสียงบรอดแบนด์ได้ดี แม้ว่าใช้ต้นทุนในการคำนวณที่น้อยกว่า LES [12] นอกจากนี้งานของ (Zore) ในปี 2020 ที่ได้กล่าวไปใน (3.2.1) นั้นได้นำ Stress-Blending Eddy Simulation (SBES) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแบบจำลองชอง Hybrid RANS–LES ที่ต่อยอดมาจาก DES (Detached Eddy Simulation) โดยเพิ่มฟังก์ชัน shielding function (f_{SBES}) ทำให้สามารถแยกบริเวณ RANS และ LES ได้อย่างชัดเจน (RANS บริเวณใกล้ผนัง กับ LES ใน bulk flow โดยนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับ GEKO Model [10] ทำให้แบบจำลอง SBES มีประสิทธิภาพสูงในกรณีการไหลที่มีการแยกตัวรุนแรง (highly separated shear layers) ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านใบพัดได้ในอนาคต

3.2.3 แบบจำลอง Transition Models

ในปัญหาด้านใบพัดของอากาศยานไร้คนขับความเร็วต่ำไม่ได้มีแค่ความปั่นปวนของอากาศเท่านั้นที่เกิดขึ้น แต่ยังมีการเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบเรียบ (Laminar) ไปยัง การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งสิ่งนี้เรียกว่า Laminar-to Turbulent Transition ซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำ Transition Models มาใช้กับงานในด้าน CFD แต่ยังไม่ได้มีการนำมาใช้กับ CAA มากนัก ซึ่งในงานของ (Edoardo Grande et al.) ในปี 2022 ได้มีการนำเสนอผลการทดลองของใบพัดความเร็วต่ำ ซึ่งจะเกิด Laminar Separation Bubble (LSB) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง transition โดยจะส่งผลโดยตรงกับเสียงบรอดแบนด์ แสดงให้เห็นว่าในงานที่ต้องการลดเสียงใบพัด การบังคับให้ transition บนใบพัดเกิดไวขึ้นสามารถช่วยลดเสียงบรอดแบนด์ลงได้ [13] และใน CAA แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาผลของ transition อย่าง RANS ที่พิจารณาแค่ช่วง turbulent จะไม่สามารถจับ LSB นี้ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลอง transition นั้นจะช่วยจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนใบพัดได้ ทำให้สามารถคำนวณเสียงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

และในปี 2024 งานวิจัยของ (Liu et al.) นั้นได้มีการนำแบบจำลอง transition มาใช้กับงานในด้านอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic) Rim-driven thruster (RDT) โดยที่เปรียบเทียบ แบบจำลอง transition สองแบบ นั่นคือ γ–Reθ และ k–kL–ω กับ SST k–ω พบว่า แบบจำลอง transition ทั้งสองแบบให้ผลของแรงขับของ RDT ที่แม่นยำกว่าแบบจำลอง turbulent โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ (3) จะเห็นว่าบริเวณปลายใบพัด (blade tip) แบบจำลอง transition ซึ่งอยู่ในสองรูปทางซ้ายมือ สามารถจับค่าความฝืดผิว (skin friction) ได้ดีกว่า turbulent แต่ในส่วนการเปรียบเทียบแบบจำลอง transition [9] แต่ละแบบนั้นยังไม่สามารถระบุได้ว่าแบบจำลองใดมีความแม่นยำมากกว่า และจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อยืนยันผล



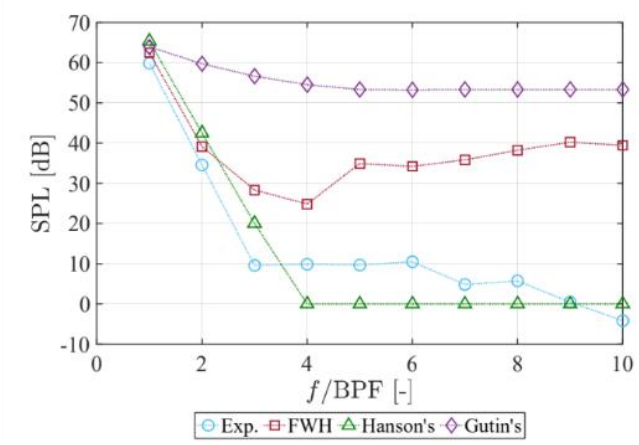
รูปที่ 3 ผลของค่าความฝืดผิว (skin friction) จากสามแบบจำลองได้แก่ γ–Reθ และ k–kL–ω กับ SST k–ω [9]

3.3 ผลลัพธ์ในเชิงอากาศพลศาสตร์เสียงที่งานวิจัยนำมาใช้ในการวิเคราะห์

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลลัพธ์ในเชิงอากาศพลศาสตร์เสียงเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญในการอธิบายลักษณะของเสียงที่เกิดจากอากาศพลศาสตร์ โดยที่ระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level: SPL) โดยคำนวณจากค่าความดันไม่คงที่ซึ่งได้จากสมการ Ffowcs–Williams–Hawkings (FW–H) เพื่อประเมินระดับเสียงที่สนามไกล (far-field) ตัวแปรนี้ใช้เปรียบเทียบระดับเสียงของใบพัดในเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ความเร็วรอบ มุมปะทะ หรือรูปทรงใบพัด ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2) โดยที่ มีค่าเท่ากับ 2e-5 [Pa] และ คือ ความดันของเสียง [Pa]

$$SPL = 10\log\left(\frac{P_a^2}{P_0^2}\right)[db] \tag{2}$$

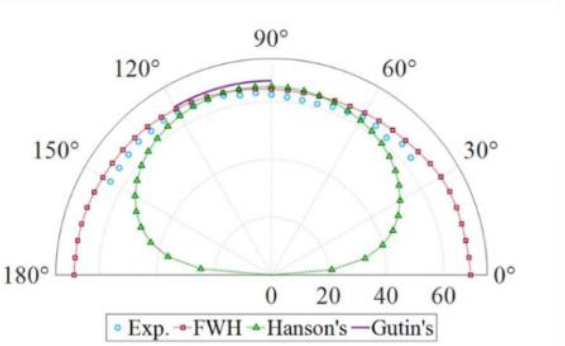
ซึ่งตามงานวิจัยของ (Huang et al.) ในการประเมินเสียงโทนัลโดยสามารถพิจารณาจาก BPF ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของเสียงโทนัล โดยนำมาเปรียบเทียบกับ SPL ตามรูปที่ (4) ซึ่งในงานนี้ได้มีการเปรียบเทียบการทดลองกับวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือหลายระดับ (multi-Fidelity) [6]



รูปที่ 4 กราฟสเปกตรัมของเสียงโทนัลซึ่งเปรียบเทียบระหว่าง SPL กับ ความถี่ที่ normalized โดย BPF

ค่าระดับความดันเสียงรวม (OASPL) ตามสมการที่ (3) ใช้เพื่ออธิบายความเข้มรวมของเสียงจากใบพัดในช่วงความถี่กว้าง โดยคำนวณจากฮาร์มอนิก (harmonic) 10 ความถี่แรกของ blade passing tone โดยที่ OASPL เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองทางเสียง โดยเฉพาะเมื่อต้องการดูผลรวมของเสียงจากทุกย่านความถี่ และ ทิศทางการแผ่เสียง (directivity) โดย OASPLทั้งเป็นการวิเคราะห์ทั้ง tonal และ broadband [6]

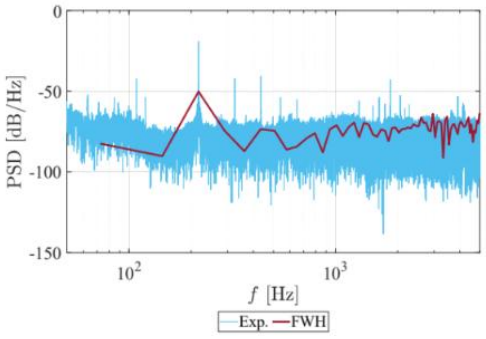
$$OASPL = 10\log\left(\int \frac{P_a^2\, df}{P_0^2}\right)[db] \tag{3}$$



รูปที่ 5 การกำหนดทิศทางของ far-field OASPL โดยเปรียบเทียบกับการทดลอง

ตามรูปที่ (5) จะเห็นว่าเนื่องจาก OASPL นั้นเป็นการพิจารณาทั้งผลลัพธ์ที่รวมทั้ง tonal และ broadband components ทำให้วิธี FW–H จะให้ความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลองที่พิจารณาเฉพาะ tonal noise อย่างวิธีของ Hanson โดยแบบจำลอง FW–H สามารถทำนายระดับเสียงได้แม่นยำในย่านความถี่ต่ำถึงกลาง โดยเฉพาะที่ BPF และฮาร์มอนิกแรก อย่างไรก็ตาม พบว่ามีการคำนวณค่า SPL ได้สูงเกินจริงในย่านความถี่สูง ซึ่งเกิดจากการที่แบบจำลอง LES มีแนวโน้มทำนายการสั่นของความดันบนผิวใบพัดสูงเกินจริง ทำให้ค่าที่คำนวณได้จาก FW–H แสดงระดับเสียงที่มากกว่าการทดลองจริงในช่วงความถี่ดังกล่าว [6]

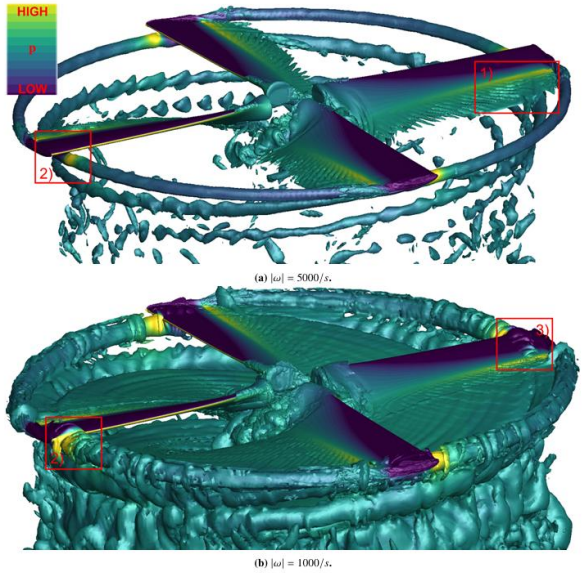
นอกจาก SPL และ OASPL แล้วในงานนี้ยังมีการพูดถึง Power Spectral Density (PSD) โดยแบบจำลอง FW–H สามารถจับลักษณะของสเปกตรัมเสียงจากใบพัดได้ดี โดยทำนายความถี่หลัก (BPF และฮาร์มอนิก) ได้ตรงกับการทดลอง และยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสัดส่วนเสียงโทนัลกับบรอดแบนด์ในแต่ละทิศทางการสังเกต ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำนายเสียงโดยรวมของใบพัด ตามรูปที่ (6) [6]



รูปที่ 6 Power Spectral Density (PSD) ที่เปรียบเทียบกับการทดลอง

นอกจากนี้ Directivity Pattern และ Pressure Fluctuation Contours นั้นสามารถแสดงให้เห็นของระดับเสียงในทิศทางต่าง ๆ รวมไปถึงการกระจายของความดันไม่คงที่รอบใบพัดซึ่งได้มีการถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์

นอกเหนือจากการพิจารณาค่าระดับความดันเสียง (SPL) การวิเคราะห์โครงสร้างกระแสวน (Vortex Visualization) ผ่านเกณฑ์ Q-criterion ถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ซับซ้อน ดังที่งานวิจัยล่าสุดของ Thurman et al. (2024) ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า การแสดงภาพโครงสร้างกระแสวนช่วยให้สามารถค้นพบแหล่งกำเนิดเสียงใหม่แบบ Blade-Wake Back-Scatter ซึ่งเกิดจากการกระเจิงของคลื่นเสียงเมื่อกระทบกับกระแสวนท้ายใบ (Wake) ได้ การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ Vortex เช่น การหลุดตัวของกระแสอากาศ (Shedding) และการม้วนตัวของกระแสวนปลายใบ (Tip vortex formation) [16] จึงเป็นวิธีเดียวที่จะยืนยันได้ว่าแบบจำลอง CAA ที่ใช้ (โดยเฉพาะ Hybrid RANS-LES) สามารถจับกลไกการเกิดเสียงบรอดแบนด์ในย่าน Reynolds number ต่ำได้อย่างถูกต้องตามหลักฟิสิกส์



รูปที่ 7 การแสดงผลของ โครงสร้างกระแสวน ผ่านเกณฑ์ Q-criterion

4. สรุป

ในบทความนี้เป็นการทบทวนแนวทางการคำนวณและวิเคราะห์ทางอากาศพลศาสตร์เสียงของใบพัดในย่านความเร็วต่ำ (Low-speed UAV Propeller) โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้แบบจำลองเชิงคำนวณ (Computational Aeroacoustics: CAA) เพื่อทำความเข้าใจกลไกการเกิดเสียง ทั้งในส่วนของเสียงเชิงโทนัล (Tonal noise) ที่สัมพันธ์กับความถี่ผ่านใบพัด (Blade Passing Frequency: BPF) และเสียงบรอดแบนด์ (Broadband noise) ที่เกิดจากการปะทะระหว่างกระแสวนกับขอบใบพัด จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆ พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models) มีผลอย่างมากต่อความถูกต้องของการคำนวณเสียง โดยแบบจำลอง Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) เช่น SST k–ω มีความเหมาะสมกับการคำนวณทั่วไป แต่ไม่สามารถจำลองโครงสร้างกระแสวนแบบไม่คงที่ได้ ในขณะที่ Large Eddy Simulation (LES) ให้ความละเอียดสูงแต่ต้องใช้ทรัพยากรมาก การประยุกต์แบบลูกผสม เช่น Hybrid RANS–LES (IDDES, SBES) จึงเป็นทางเลือกที่สมดุล ซึ่งสามารถจับพฤติกรรมการไหลที่เป็นต้นกำเนิดเสียงได้ดีโดยลดต้นทุนการคำนวณ ส่วนการใช้ Transition Model เช่น γ–Reθ และ k–kL–ω เป็นสิ่งสำคัญในกรณีใบพัดที่ทำงานในย่าน Reynolds number ต่ำ เพราะช่วยจำลองการเกิด Laminar Separation Bubble (LSB) ซึ่งเป็น

แหล่งกำเนิดเสียงบรอดแบนด์หลักของใบพัด UAV รวมไปถึงในบทความนี้ได้มีการกล่าวถึงการวิเคราะห์ผล CAA พบว่าตัวแปรเสียงที่สำคัญได้แก่ Sound Pressure Level (SPL), Overall Sound Pressure Level (OASPL), Frequency Spectrum, Directivity, และ Pressure Fluctuation Contour ซึ่งสามารถใช้ระบุลักษณะการเกิดเสียงและทิศทางการแผ่ของเสียงได้อย่างชัดเจน รวมไปถึงการวิเคราะห์เสียงบรอดแบนด์ผ่านโครงสร้างกระแสวน

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนให้เกิดแนวทางและองค์ความรู้รวมไปถึงทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการเขียนงานการทบทวนงานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์เสียงเชิงคำนวณของใบพัดอากาศยานไร้คนขับความเร็วต่ำ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] X. Huang, Y. Li, X. Zhang, and P. Zhou, “An investigation of the noise characteristics of a small-scale rotor in axial descent,” in *Proc. 52nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2023)*, Chiba, Greater Tokyo, Japan, Aug. 2023,

[2] G. Huang, A. Sharma, X. Chen, A. Riaz, and R. Jefferson-Loveday, “Numerical predictions of low-Reynolds-number propeller aeroacoustics: Comparison of methods at different fidelity levels,” *Aerospace*, vol. 12, no. 2, art. no. 154, Feb. 2025.

[3] A. S. B. Patterson and M. J. Smith, “Evaluating the permeable surface approach for wing-propeller aeroacoustics using high-fidelity CFD,” in *AIAA Scitech 2019 Forum*, San Diego, CA, USA, Jan. 7–11, 2019.

[4] A. Hirschberg and S. W. Rienstra, *An Introduction to Aeroacoustics*. Eindhoven, The Netherlands: Eindhoven Univ. Technol., 2004.

[5] G. Huang, A. Sharma, X. Chen, A. Riaz, and R. Jefferson-Loveday, “Framework for multi-fidelity assessment of open rotor propeller aeroacoustics,” in *30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf.*, Rome, Italy, Jun. 4–7, 2024.

[6] S. V. Madhusudhana, M. Ravi Kumar, A. Biswas, A. S. Hosamani, Prajwalkumar, and S. T. Vijay, “Aeroacoustics analysis of propeller blade,” *ACS J. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–24, Mar. 2024.

[7] B. Liu, M. Vanierschot, and F. Buysschaert, “Comparison study of the the k – kL – ω and γ – Reθ transition models in the open-water performance prediction of a rim-driven thruster,” *Int. J. Turbomach. Propuls. Power*, vol. 9, no. 1, p. 2, Jan. 2024.

[8] K. K. Chode, H. Viswanathan, K. Chow, and H. Reese, “Automotive aerodynamic noise prediction using scale-resolved stress-blended eddy simulation,” in *NOISE-CON 2020*, Chicago, IL, USA, Oct. 2020, pp. 42–52.

[9] W. Klimczyk and A. Sieradzki, “RANS-based aeroacoustic global sensitivity study and optimization of UAV propellers,” *Aerospace*, vol. 10, no. 3, art. no. 306, Mar. 2023.

[10] A. Broatch, R. Navarro, J. García-Tíscar, and F. N. Ramírez, “Evaluation of different FW-H surfaces and modal decomposition techniques for the acoustic analysis of UAV propellers through detached eddy simulations,” *Aerospace Sci. Technol*., vol. 146, art. no. 108956, Feb. 2024.

[11] E. Grande, D. Ragni, F. Avallone, and D. Casalino, “Laminar separation bubble noise on a propeller operating at low Reynolds numbers,” in *28th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf*., Southampton, U.K., Jun. 14–17, 2022.

[12] F. R. Menter, “A numerical investigation of the turbulent flow around a scale model JBC hull using the generalized k– **ω** (GEKO) turbulence model,” TUHH Universitätsbibliothek, Hamburg, Germany, 2021. [Online]. Available: https://tore.tuhh.de/handle/11420/10463

[13] C. S. Thurman, N. S. Zawodny, and L. V. Lopes, “Prediction of broadband blade-wake back-scatter noise from a hovering ideally twisted rotor using OVERFLOW2,” in *AIAA SCITECH 2024 Forum*, Orlando, FL, USA, Jan. 8–12, 2024.

การวิเคราะห์ด้านอากาศพลศาสตร์และเสียง ของใบพัดอสมมาตรสำหรับอากาศยานไร้คนขับ
Aerodynamic and Acoustic Analysis of Asymmetrical Propeller for UAVs

ผศ.ดร. ชินภัทร ทิพโยภาส[1], นาย ธัญเทพ อัศวบุญมี[1] ,นาย สิรภพ โชคชัยปัถมาพร[1*], Julette Hermann[2] และ Nathan Da Rugna[3]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2] ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ Université d'Orléans

[3] ภาควิชาวิศวกรรม ENSTA Bretagne

Chinnapat Thipyopas[1], Thanyatep Assawaboonmee[1], Siraphob Chokchaipatthamaphorn[1*], Julette Hermann[2] and Nathan Da Rugna[3]

[1] Department of Aerospace Engineering Kasetsart University

[2] Department of Aerospace Engineering Université d'Orléans

[3] Department of Engineering ENSTA Bretagne

siraphob.chok@ku.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน การเติบโตของอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนทั่วโลกอย่างรวดเร็ว นำมาซึ่งความท้าทายด้านมลภาวะทางเสียงอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตเมือง เนื่องจากเสียงโทน หรือ Tonal Noise ที่เกิดจากใบพัดสร้างความรำคาญอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้มีการศึกษาและออกแบบใบพัดที่ช่วยลดเสียงได้หลายรูปแบบ หนึ่งในรูปร่างของใบพัดที่เริ่มมีการศึกษาเพื่อลดเสียงโทนนั่นคือ ใบพัดอสมมาตร หรือ Asymmetrical Propeller อย่างไรก็ตาม ใบพัดอสมมาตร มักนำไปสู่ แรงขับที่ลดลง และเพิ่มระดับเสียงความถี่กว้าง หรือ Broadband Noise ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษา และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านอากาศพลศาสตร์และเสียง ของใบพัดอสมมาตร ซึ่งมีการปรับแต่งการออกแบบ ด้วยระยะห่างของใบพัดตามแนวแกนตั้ง หรือ Axial Spacing โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD ร่วมกับทฤษฎีของ Ffowcs-Williams Hawkins การจำลองได้ตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองอ้างอิงของ NASA AMES ผลลัพธ์ที่คาดหวังจะช่วยระบุการออกแบบของใบพัดอสมมาตร ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดเสียงรบกวนได้สูงสุด โดยมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพน้อยที่สุด

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, ใบพัดอสมมาตร, อากาศพลศาสตร์, เสียงโทน, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Abstract

The rapid global growth of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or drones presents an urgent challenge regarding noise pollution, particularly in urban areas. This is primarily because of the tonal noise generated by the propellers that creates significant annoyance. Consequently, various noise reducing propeller designs have been studied. One of the configurations that has been increasingly investigated for tonal noise reduction is the Asymmetrical Propeller. However, the use of asymmetrical propellers often leads to reduced thrust and increased levels of broadband noise. Therefore, this research proposes a study and analysis of the aerodynamic and acoustic performance of asymmetrical propellers that incorporate design modifications using axial spacing. This analysis is performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) coupled with the Ffowcs-Williams Hawkins (FW-H) analogy. The simulation setup is validated by comparison with reference experimental results from NASA AMES. The anticipated results will help identify the optimal asymmetrical propeller design to achieve maximum noise reduction with minimal impact on performance.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Asymmetrical Propeller, Aerodynamic, Tonal Noise, CFD

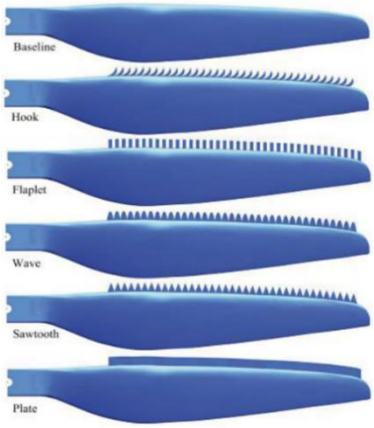
1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ความนิยมของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) หรือระบบอากาศยานไร้คนขับ (UAS) ที่มักเรียกกันว่า “โดรน” ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วโลก อันเป็นผลมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ราคาที่เข้าถึงได้มากขึ้น การประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้โดรน ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และผลผลิตในภาคต่างๆ โดยเฉพาะพื้นที่ในเมือง เช่น ใช้โดรนตรวจสอบโครงสร้างภายนอกของสิ่งปลูกสร้าง การตรวจตราเฝ้าระวังและรักษาความปลอดภัย และการขนส่ง เป็นต้น [1]

ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และอสังหาริมทรัพย์ โดรนหลายใบพัด (Multi-Rotor Drone) ถูกใช้ในการสำรวจพื้นที่ขนาดใหญ่ เพื่อปรับปรุงการบริหารโครงการและลดต้นทุน ขณะที่โดรนแบบไฮบริด (Hybrid Drone) ซึ่งผสมผสานคุณสมบัติของโดรนปีกตรึง (Fixed-Winged Drone) และหลายใบพัด ก็ถูกนำมาใช้ด้านการขนส่ง เพื่อการขึ้นลงแนวดิ่งที่มีประสิทธิภาพในพื้นที่เมืองแออัด ช่วยให้การขนส่งรวดเร็วขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

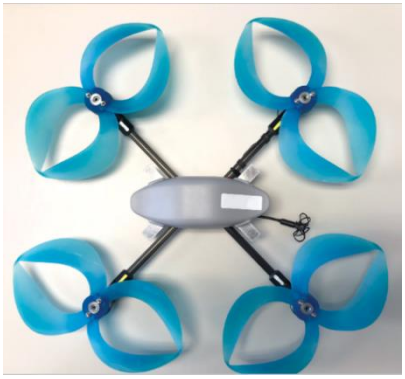
อย่างไรก็ตาม หนึ่งในความท้าทายที่สำคัญจากการใช้โดรนเพิ่มขึ้นคือ มลพิษทางเสียง ซึ่งส่งผลกระทบต่อชุมชน สัตว์ป่า และการปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านเสียง งานวิจัยหลายฉบับระบุว่า เสียงโดรน สร้างความรบกวนมากกว่าเสียงจราจรหรืออากาศยานมีคนขับ เนื่องจากเสียงจากโดรนเหล่านี้ มีองค์ประกอบความถี่สูงและเสียงโทน (Tonal Noise) ที่โดดเด่นจากเสียงพื้นหลังในเมือง คุณลักษณะเสียงที่เป็นเอกลักษณ์นี้ทำให้เสียงจากโดรน รับรู้ได้ชัดเจนและรำคาญกว่า ซึ่งนำไปสู่ปัญหาการรบกวนในชีวิตประจำวันในอนาคต เมื่อโดรนเป็นที่แพร่หลายมากยิ่งขึ้นไปอีก [2]

เพื่อลดปัญหาดังกล่าว นักวิจัยได้พัฒนาเทคนิคหลากหลายในการลดเสียงโดรน โดยมุ่งเน้นไปที่ การออกแบบใบพัด ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดเสียงหลัก ที่ทำให้เกิดเสียงโทน ความก้าวหน้าในด้านอากาศพลศาสตร์ทำให้เกิดการออกแบบใบพัดที่เงียบขึ้น โดยใช้วัสดุและรูปทรงที่ช่วยลดการกำเนิดเสียง ตัวอย่างเช่น การประยุกต์แนวคิดชีวเลียนแบบ (Biomimicry) จากการบินเงียบของนกฮูก ส่งผลให้ได้ใบพัดที่มีขอบใบหยัก (Serrated Edges) และรูปทรงใบพัดที่ช่วยสลายกระแสลมปั่นป่วน (Vortices) ซึ่งเป็นต้นเหตุของเสียงรบกวน [3]



รูปที่ 1 การออกแบบใบพัดที่มีขอบใบหยัก [3]

อีกแนวทางหนึ่งคือการใช้ Gurney Flap แผ่นเล็กๆที่ติดตั้งบริเวณขอบใบพัด ซึ่งช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและลดเสียงโดยลดการแยกตัวของกระแสวน นอกจากนี้ ใบพัดแบบ Toroidal ซึ่งมีใบพัดเชื่อมต่อเป็นวงปิดคล้ายโดนัท ก็ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการ MIT Lincoln Laboratory เพื่อแก้ปัญหาเสียงจากกระแสวนที่ปลายใบพัด ช่วยให้โดรนทำงานได้เงียบขึ้นโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพแรงขับ [4, 5]



รูปที่ 2 ใบพัดที่ติดตั้ง Gurney Flap (ซ้าย) และใบพัดแบบ Toroidal (ขวา)

นวัตกรรมสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการลดเสียงโดรนคือ ใบพัดอสมมาตร ซึ่งแตกต่างจากแบบสมมาตรโดยมีมุม หรือรูปทรงของใบที่ไม่เท่ากัน ใบพัดเหล่านี้ทำงานโดยการกระจายพลังงานเสียงไปตามความถี่หลายช่วง เพื่อช่วยลดความดังของความถี่โทนได้ แนวคิดนี้รู้จักกันในชื่อใบพัดกรรไกร (Scissors Propeller) ซึ่งใช้ในเฮลิคอปเตอร์รุ่น AH-64 Apache เพื่อช่วยลดเสียง แต่ถึงแม้ว่าใบพัดอสมมาตรจะมีศักยภาพในการลดเสียง แต่การศึกษาด้านรูปทรงและสมรรถนะยังมีไม่มาก ปัจจุบันมีการเริ่มทดลองใช้ในโดรนเช่น ใบพัด “Hummingbird” ของบริษัท Zipline [6] ซึ่งใช้ใบพัดอสมมาตรเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะด้านเสียงในโดรนแบบหลายใบพัด อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยที่เผยแพร่ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการลดเสียงและผลกระทบต่อสมรรถนะ ทำให้ยังเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่ควรศึกษาเพิ่มเติม

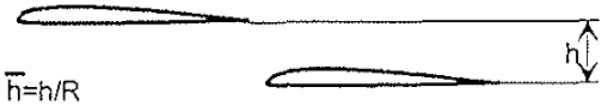
งานวิจัยของ Usov et al. [7] ได้ทดลองใบพัดสองใบแบบอสมมาตร โดยปรับระยะมุมใบ (Blade Spacing) ระหว่าง 30° ถึง 90° พบว่าแม้การปรับระยะมุมใบไม่เท่ากันช่วยกระจายพลังงานเสียงในย่านความถี่ที่กว้างขึ้น แต่ก็ทำให้ประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะเมื่อระยะมุมใบแคบ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการหาจุดสมดุลระหว่างการลดเสียง กับประสิทธิภาพด้านอากาศพลศาสตร์

รูปที่ 3 ใบพัดอสมมาตร “Humming Bird” ของบริษัท Zipline

อีกแนวทางที่น่าสนใจคือการปรับ ระยะตามแกน (Axial Spacing) หรือระยะห่างระหว่างใบพัดตามแนวแกนตั้ง ซึ่งเคยถูกศึกษาในใบพัดกรรไกรและแบบ Coaxial พบว่าการปรับระยะดังกล่าวสามารถช่วยลดการปั่นป่วนของกระแสลมและลดเสียงได้ การศึกษาการปรับแต่งรูปร่างของใบพัดอสมมาตร โดยใช้ระยะตามแกนจึงเป็นแนวทางใหม่ที่อาจช่วยเพิ่มความเงียบโดยไม่ลดแรงขับมากนัก

รูปที่ 4 ใบพัดอสมมาตร จากงานวิจัยจของ Usov et al.

ดังนั้น การผสานการออกแบบใบพัดอสมมาตรเข้ากับการปรับระยะตามแกน จึงอาจเป็นแนวทางใหม่ในการลดเสียงโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคงสมดุลกับสมรรถนะด้านอากาศพลศาสตร์ไว้ ซึ่งเป็นหัวข้อวิจัยที่ทางทีมวิจัยสนใจ แล้วจะนำมาศึกษาโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (Computational Fluid Dynamic) เป็นเครื่องมือ ในการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงยกและเสียงของใบพัดอสมมาตร



รูปที่ 5 ระยะตามแกน หรือ Axial Spacing

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งกำเนิดเสียงจากโดรนและใบพัด

เสียงจากโดรนส่วนใหญ่เกิดจากใบพัดและมอเตอร์ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กับอากาศรอบข้าง แหล่งกำเนิดเสียงสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักคือ

2.1.1 เสียงจากการหมุนของใบพัด หรือเสียงโทน (Tonal Noise)

เป็นแหล่งเสียงหลักที่เกิดจากแรงดันอากาศที่เปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะขณะใบพัดหมุน เกิดเป็นเสียงที่มีความถี่คงที่ เรียกว่า “ความถี่การผ่านของใบพัด” (Blade Passage Frequency: BPF) และฮาร์มอนิกของมัน เสียงชนิดนี้เกิดจากแรงยกและแรงต้านที่เปลี่ยนแปลงเป็นคาบระหว่างการหมุน ความเข้มของเสียงจะแปรผันตามกำลังสองของความเร็วปลายใบพัด และมักกระจุกตัวอยู่ที่ความถี่จำเพาะ

2.1.2 เสียงย่านกว้าง (Broadband Noise)

เกิดจากกระแสลมปั่นป่วนรอบใบพัด ทำให้เกิดเสียงหลายความถี่พร้อมกัน แบ่งสาเหตุได้ดังนี้

- การแยกตัวของกระแสลมที่ขอบท้ายใบพัด (Trailing edge turbulence) ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันไม่คงที่
- กระแสวนปลายใบพัด (Tip vortices) ที่เกิดจากปลายใบพัดหมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการปั่นป่วนของอากาศและเสียง

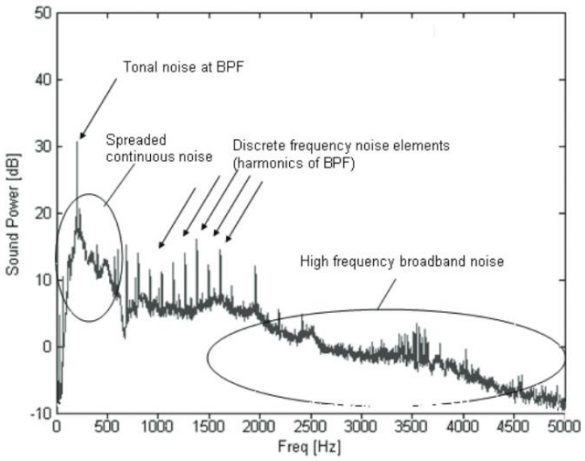
เสียงประเภทนี้กระจายกว้างในย่านความถี่สูงและยากต่อการควบคุม โดยขึ้นอยู่กับรูปทรงใบพัด ความเร็วการหมุนและความปั่นป่วนของอากาศขาเข้า

2.1.3 เสียงจากการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Noise)

เกิดจากการที่กระแสลมจากใบพัดไปกระทบกับโครงสร้างของโดรน เช่น แขนหรือตัวลำ รวมถึงการรบกวนกันของใบพัดหลายตัว เช่น

- **Blade–body interaction noise**: เมื่อกระแสอากาศจากใบพัดชนโครงสร้างโดรน

- **Blade–blade interaction noise**: เมื่อกระแสอากาศจากใบพัดหนึ่งไปรบกวนอีกใบในโดรนหลายใบพัด โดยทั่วไป เสียงใกล้แหล่งกำเนิดจะถูกครอบงำด้วย tonal noise ขณะที่ broadband และ interaction noise จะเด่นในระยะไกล การเข้าใจแหล่งกำเนิดเหล่านี้จึงเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาเทคนิคการลดเสียง เช่น การปรับรูปทรงใบพัด หรือระบบควบคุมเสียงเชิงรุก (Active Noise Control: ANC)



รูปที่ 6 Spectrum เสียงของใบพัด [8]

2.2 ระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level หรือ SPL) และระดับความดันเสียงรวม (Overall Sound Pressure Level หรือ OASPL)

ระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level: SPL) คือการวัดความเข้มของเสียงในแต่ละความถี่ คำนวณได้จากสมการ

$$SPL(f) = 20\log_{10}\left(p(f)/p_{ref}\right) \tag{1}$$

- $p(f)$ คือค่ารากกำลังสองของแรงดันผันผวนที่ความถี่ f
- p_{ref} คือแรงดันอ้างอิง ซึ่งโดยทั่วไปคือ 20 μPa สำหรับอากาศ

ส่วนระดับรวมของความดันเสียง (OASPL) คือค่ารวมของระดับความดันเสียงทั้งหมดในทุกความถี่ ซึ่งคำนวณจาก

$$OASPL = 10\log_{10}\left(\int_0^{f_{upper}} 10^{SPL(f)/10}\, df\right) \tag{2}$$

2.3 ทฤษฎี Ffowcs-Williams Hawkins (FW-H)

ทฤษฎี FW-H เป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอะคูสติกอากาศพลศาสตร์ เพื่อทำนายเสียงที่เกิดจากการไหลไม่คงที่ เช่น ใบพัดและไอพ่น โดยขยายจากทฤษฎีของ Lighthill เพื่อรวมผลของขอบเขตของวัตถุแข็ง สมการทั่วไปคือ

$$\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t}\left[\rho_0 U_i \delta(f)\right] + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[T_{ij}\delta(f)\right] + \frac{\partial^2}{\partial i \partial x_j}\left[\rho u_i' u_j' H(f)\right] \tag{3}$$

2.4 แบบจำลองความปั่นป่วนใน CFD (Turbulence Model)

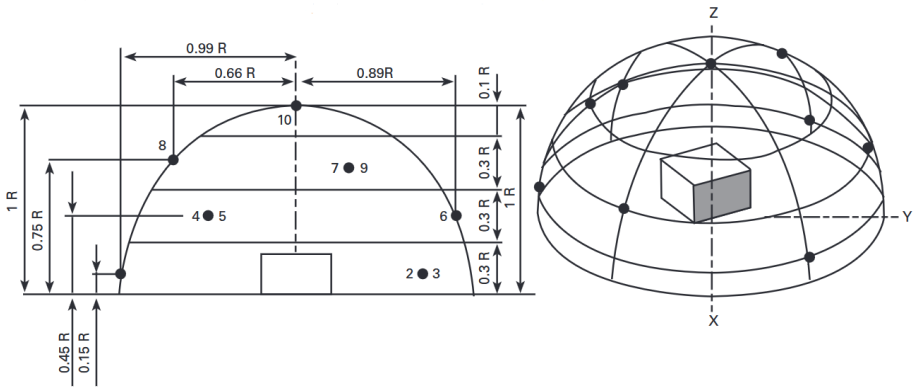
แบบจำลองความปั่นป่วนหลักที่ใช้คือ

- **RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes)**
- **LES (Large Eddy Simulation)**

RANS จะจำลองค่าเฉลี่ยเวลา เหมาะกับงานวิศวกรรมทั่วไปที่ไม่ต้องการรายละเอียดสูง ขณะที่ LES จะจำลองกระแสปั่นป่วนขนาดใหญ่โดยตรง แม้จะใช้เวลาและทรัพยากรคำนวณสูงกว่า แต่ให้ความแม่นยำสูงกว่าในกรณีการไหลไม่คงที่

2.5 ตำแหน่งผู้สังเกตเสียง (Noise Observer Position)

ตามมาตรฐาน ISO 3746:2010 [9] ว่าด้วย “การกำหนดระดับพลังเสียงของแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้แรงดันเสียง” ซึ่งใช้พื้นผิวครอบคลุมรอบแหล่งกำเนิดเสียงในสภาวะระยะไกล (far-field) เพื่อให้ผลการวัดมีความสม่ำเสมอ



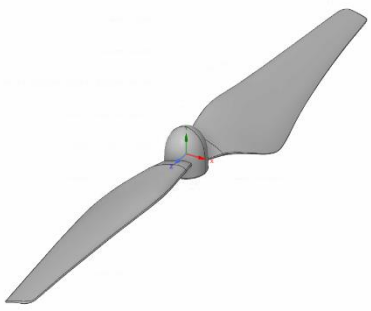
รูปที่ 7 ตำแหน่งไมโครโฟน ตามมาตรฐาน ISO 3746:2010

3. การดำเนินการวิจัย

ทางทีมวิจัยจะศึกษาการผสานการออกแบบใบพัดอสมมาตรเข้ากับการปรับระยะตามแกน โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD เป็นเครื่องมือ ในการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงยกและเสียงของใบพัดอสมมาตร โดยโปรแกรมที่ใช้คือ Ansys 2023 R1

3.1 โมเดลใบพัดที่ใช้ในการจำลอง

ทางทีมวิจัยใช้โมเดลใบพัด DJI 9450 ซึ่งถูกใช้ในโดรน DJI Phantom 3 โดย Download จาก GrabCAD ในการตรวจสอบความถูกต้อง จะเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลจากการทดลองของ NASA AMES โดยสร้างโดเมนแบบหมุนและโดเมนคงที่เพื่อจำลองการไหล



รูปที่ 8 ใบพัด DJI 9450

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและสภาวะทำงานของใบพัด

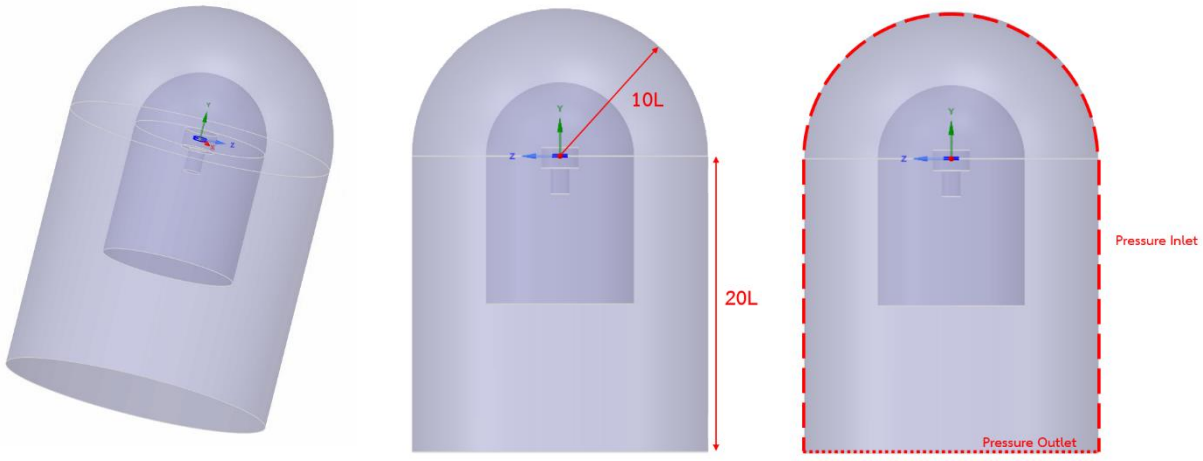
Parameter	Value
Drone	DJI-Phantom 3/Phantom 3 Pro
Rotor	DJI-9450
Average Chord (C_{avg})	0.025 m
Rotor Diameter	0.239 m
Operation Phase	Hover
Operating Condition	Sea Level
RPM	6000

3.2 การสร้างโดเมนและการเมช

โดเมนจำลองถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน ได้แก่

- โดเมนหมุน (Rotating Domain) เป็นโดเมนทรงกระบอกขนาดเล็กซึ่งครอบคลุมใบพัดทั้งหมด
- โดเมน BOI (Body of Influence) เป็นโดเมนรูปทรงกระบอก และรูปกระสุนล้อมรอบโดเมนหมุน สำหรับช่วยเรื่องความละเอียดในการเมช
- โดเมนคงที่ (Stationary Domain) เป็นโดเมนรูปกระสุนขนาดใหญ่ที่สุด

ขนาดของโดเมนหมุนคือ L = 1.1D = 0.263 m และขนาดของโดเมนคงที่ถูกออกแบบให้มีรัศมี 10L และมีความยาวตามแกนตั้งอยู่ที่ 20L ขอบเขตด้านนอกถูกกำหนดให้เป็น Pressure Inlet และ Pressure Outlet ตามรูปที่ 9 โดเมนหมุนและคงที่เชื่อมต่อกันด้วย Interface แบบ Sliding Mesh เพื่อจำลองการหมุนของใบพัดขณะที่กระแสลมรอบข้างคงที่



รูปที่ 9 โดเมนสำหรับการจำลอง

ในการเมช จะกำหนดขนาดเมชที่แตกต่างกันโดยเพิ่มความละเอียดของโดเมนหมุนทั้งหมด 6 ความละเอียด สำหรับการตรวจสอบ Mesh Independence และการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง และตั้งค่าให้ Inflation Layer ได้ค่า Y+ ≈ 1 ซึ่งเหมาะสมกับการจำลองที่ต้องใช้ความละเอียดของเมชสูง

ตารางที่ 2 ขนาดของเมช

Mesh	Curvature Size (m)	Total Element * 10^6
1	0.00033	2.45
2	0.00022	3.58
3	0.00011	4.98
4	0.000088	5.93
5	0.000066	7.40
6	0.000033	9.11

3.3 การตั้งค่าการจำลอง

ในการจำลอง จะใช้ Turbulence Model เป็น SST k-ω โดยเริ่มจากการจำลอง Steady แล้วจำลอง Transient โดยทั้งสองการจำลองนี้จะต่อเนื่องกันแต่ใช้การตั้งค่าที่แตกต่างกัน ในการจำลอง Steady จะใช้จำนวน Iteration ทั้งหมด 500 iteration เพื่อให้ค่าการไหลเข้าสู่สมดุลเริ่มต้น แล้วจึงจำลอง Transient โดยจำลองทั้งหมด 3600 Time Step ซึ่งในแต่ละ Time Step จะเกิดการหมุนของใบพัดไป 3° ทำให้ท้ายสุดแล้วจะเกิดการหมุนทั้งหมด 30 รอบ และใช้เวลาไปทั้งหมด 0.3 วินาที และค่าแรงขับที่ได้จะเก็บค่าเฉลี่ยจากการหมุน 3 รอบสุดท้าย

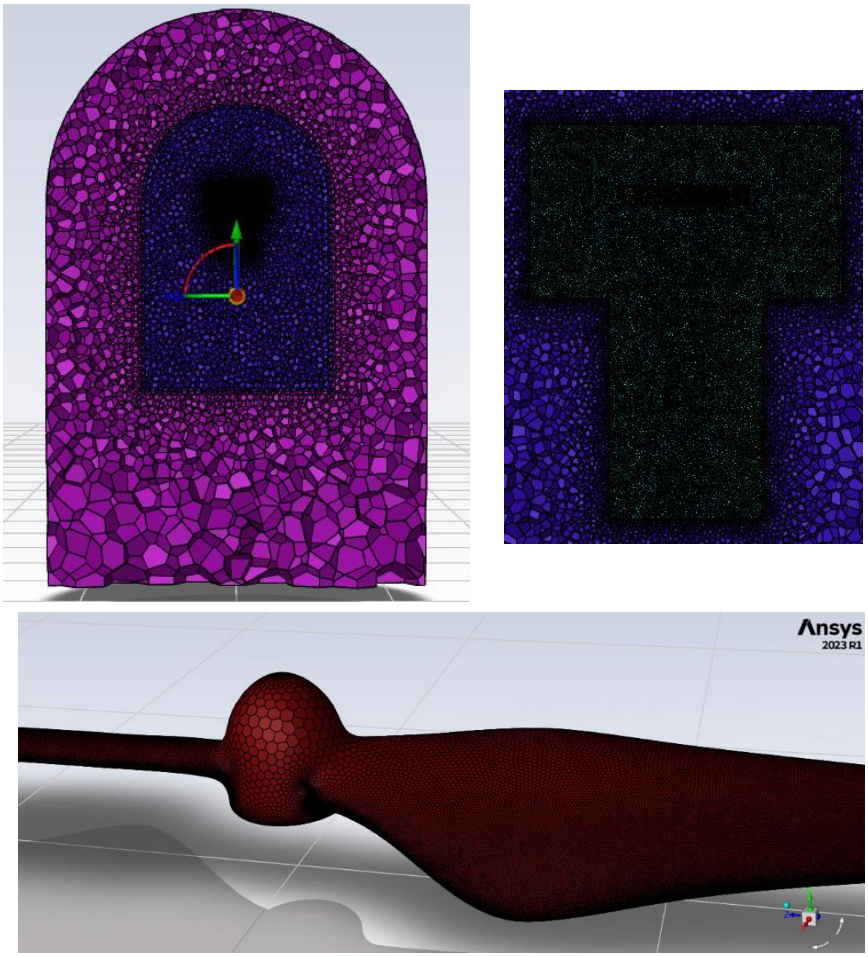
ตารางที่ 3 การตั้งค่าของการจำลอง Steady และ Transient

Parameters	Steady	Transient
Viscous Model	SST k-ω	SST k-ω
Acoustic Model	-	Ffowcs-Williams Hawkins
Scheme	SIMPLE	COUPLED
Pressure and Momentum Function	PRESTO! and QUICK	2nd Order
Pressure Under Relax	0.5	0.7
Momentum Under Relax	0.5	0.7
Residual	1e-6	1e-6
Iteration	500	10/Time Step
Time Step	-	3600
Time Step Size (s)	-	8.333e-5

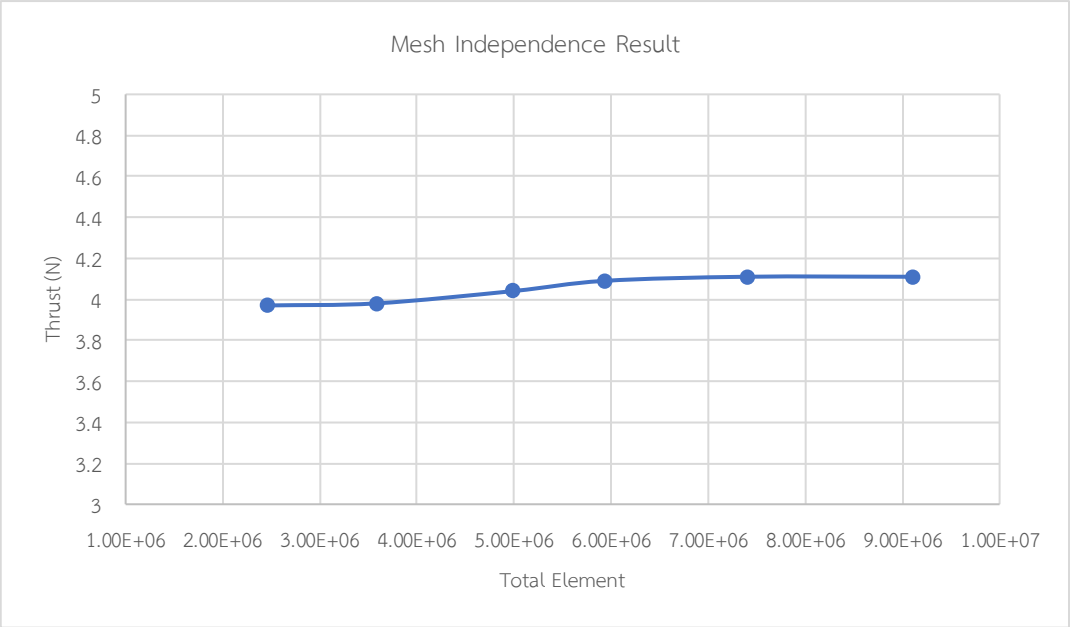
3.4 Mesh Independence, Time Step Independence และการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง (Validation)

จากการกำหนดขนาดเมชที่แตกต่างกันโดยเพิ่มความละเอียดของโดเมนหมุนทั้งหมด 6 ความละเอียด และค่าแรงขับที่ได้จะเก็บค่าเฉลี่ยจากการหมุน 3 รอบสุดท้าย โดยนำแรงขับที่ได้มาคำนวณหา สัมประสิทธิแรงขับหรือ C_T โดยใช้สมการ (4) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจาก NASA AMES [10]

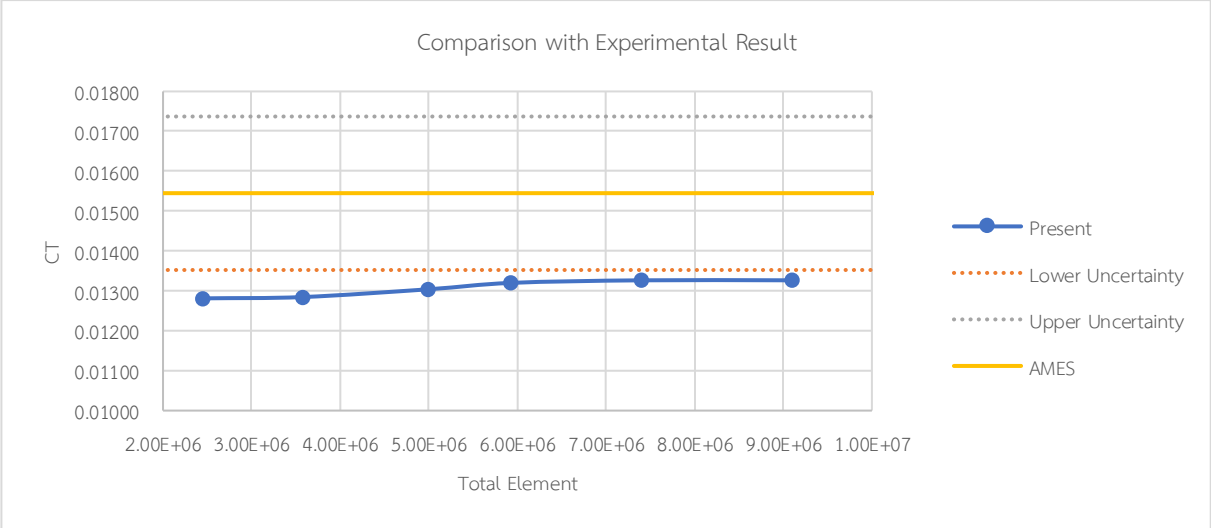
$$C_T = T/(\rho A(\Omega R)^2) \tag{4}$$



รูปที่ 10 เมชสำหรับการจำลอง



รูปที่ 11 ผลการจำลอง Mesh Independence



รูปที่ 12 เปรียบเทียบผล Mesh Independence กับผลการทดลองจาก NASA AMES

จากผล Mesh Independence พบว่าแรงขับเริ่มลู่เข้าเมื่อใช้การตั้งค่าเมชที่ 5 ตามตารางที่ 2 โดยรวมมีขนาดเมชอยู่ที่ 7.4 ล้านเมช และเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการทดลองจาก NASA AMES พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เฉลี่ยของ AMES จะได้ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 14.2% และเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ Lower Uncertainty จะได้ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.9% ค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้เกิดมาจากหลายปัจจัย เช่น ข้อจำกัดของโปรแกรมจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองจริง การตั้งค่า หรือเทคนิคในการเมช เป็นต้น ซึ่งสามารถเป็นช่องทางในการพัฒนาความแม่นยำในการจำลองได้ แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดทางเวลา ทางทีมวิจัยจึงใช้การตั้งค่าเมชที่ 5 นี้ ในการจำลองและวิเคราะห์ขั้นตอนต่อๆไป

ในการจำลอง Time Step Independence จะกำหนดให้มีองศาเพิ่มเติม ต่อการคำนวณ 1 Time Step นั่นคือ 1° และ 5° เมื่อจำลองเสร็จแล้วจะเปรียบเทียบแรงขับ และเลือก Time Step ที่เหมาะสมในการจำลองต่อไป

ตารางที่ 4 ผลการจำลอง Time Step Independence

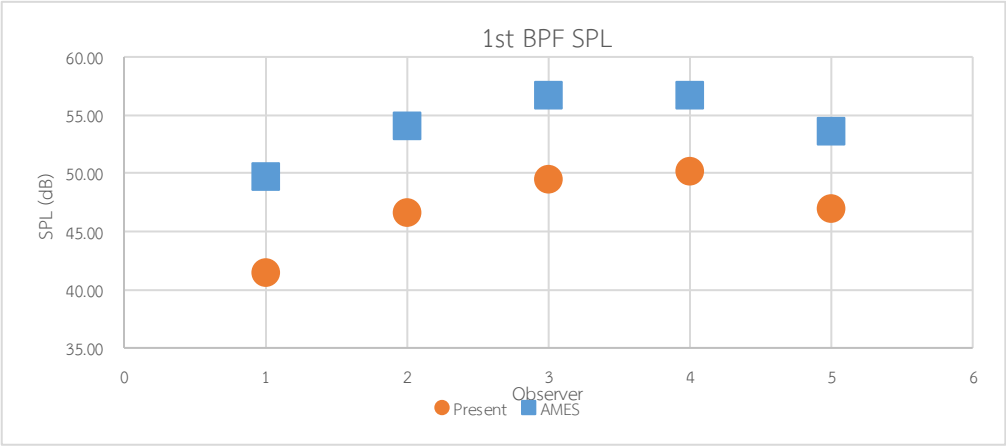
Time Step Independence	Rotation	Thrust (N)
1	1° per time step	4.11
2	3° per time step	4.11
3	5° per time step	4.04

จากการจำลองพบว่าการจำลองโดยใช้ 1° ต่อ Time Step นั้นไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับการจำลองโดยใช้ 3° ต่อ Time Step ทางทีมวิจัยจึงเลือกใช้ 3° ต่อ Time Step เช่นเดิมเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการจำลองนั้นเร็วกว่ามาก และมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าการจำลองโดยใช้ 5° ต่อ Time Step

ในการตรวจสอบความถูกต้องนั้น นอกจากจะเปรียบเทียบผลลัพธ์ด้านแรงขับแล้ว ยังต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ด้านเสียงด้วย โดยในการจำลอง จะกำหนดตำแหน่งของ Observer ทั้งหมด 5 ตำแหน่งเพื่อตรวจจับเสียง ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกัน จากการทดลองของ NASA AMES แล้วจึงเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ โดยใช้ค่าความดันเสียง (SPL) ที่ ความถี่การผ่านของใบพัด (BPF) ตำแหน่งแรก จะอยู่ที่ความถี่ 200 Hz และจะเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จาก NASA AMES เช่นกัน

ตารางที่ 5 ตำแหน่งของ Observer

Observer	X Position (m)	Y Position (m)	Z Position (m)
45°	0	1.347	1.347
67.5°	0	0.729	1.760
90°	0	0	1.905
112.5°	0	-0.729	1.760
135°	0	-1.347	1.347

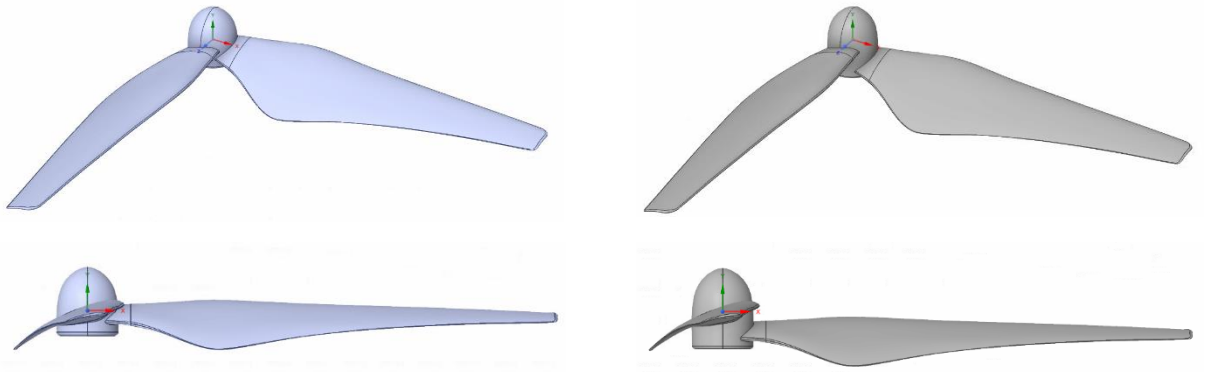


รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลเสียงที่ 1st BPF กับผลการทดลองจาก NASA AMES

จากการจำลองพบว่าผลของเสียงนั้นมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับผลการทดลองจาก AMES และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 14.0% ค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้เกิดมาจากหลายปัจจัย เช่น ข้อจำกัดของโปรแกรมจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองจริง การตั้งค่า หรือเทคนิคในการเมช เป็นต้น ซึ่งสามารถเป็นช่องทางในการพัฒนาความแม่นยำในการจำลองได้

3.5 การจำลองใบพัดอสมมาตร

ในการตั้งค่าการจำลองใบพัดอสมมาตรนั้น จะใช้การตั้งค่าตามที่ได้กล่าวมาจากขั้นตอน Mesh Independence, Time Step Independence และการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง ซึ่งใบพัดอสมมาตรที่นำมาจำลองนั้น คือใบพัด DJI9450 ที่ได้รับการปรับแต่งให้มีระยะมุมใบ (Blade Spacing) อยู่ที่ 90° โดยจะมีทั้งหมด 2 ใบ ใบพัด A จะไม่มีการปรับแต่งระยะตามแกน (Axial Spacing) และใบพัด B จะมีการปรับแต่งให้มีระยะ Axial Spacing อยู่ที่ 4 mm ในการจำลองจะเทียบผลแรงขับ และเสียงในรูปแบบกราฟและ ค่าระดับความดันเสียงรวม (OASPL) โดยเปรียบเทียบผลกับใบพัด DJI9450 ดั้งเดิมที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 14 ใบพัดอสมมาตร A ไม่มี Axial Spacing (ซ้าย) และใบพัดอสมมาตร B มี Axial Spacing 4 mm (ขวา)

4. ผลการวิจัย

จากการจำลองพบว่า ผลแรงขับของทั้ง 2 ใบพัด เมื่อนำไปเทียบกับใบพัด DJI9450 ดั้งเดิมที่ได้จากการจำลองแล้ว ใบพัดทั้ง 2 มีแรงขับที่มากกว่า แต่ OASPL ของทั้ง 2 ใบพัดนั้น เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน

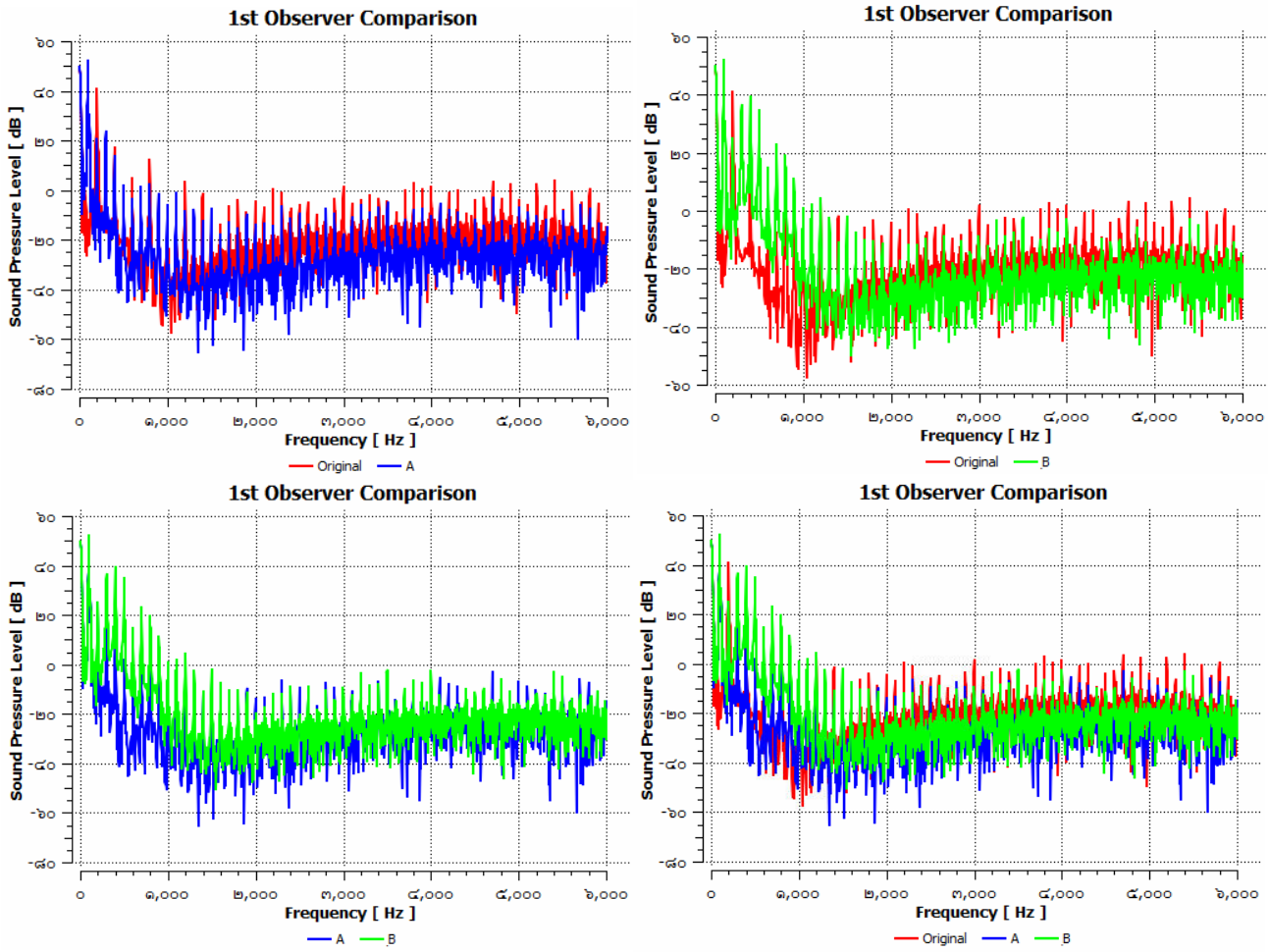
ตารางที่ 6 ผลแรงขับจากการจำลองใบพัดอสมมาตร

Propeller	Thrust (N)
Original	4.11
A	4.18
B	4.20

ตารางที่ 7 ผล OASPL จากการจำลองใบพัดอสมมาตร

Observer	OASPL (dB)		
	Original	A	B
1	49.11	59.22	59.58
2	53.52	62.49	62.64
3	56.54	64.90	64.95
4	57.16	65.99	66.00
5	54.37	65.06	65.06

แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลของเสียง จากกราฟความถี่ทั้งหมดพบว่า ใบพัด A มีการกระจายแรงดันเสียงไปยังความถี่ที่มากกว่า ทำให้ความดังในแต่ละความถี่น้อยกว่าใบพัดดั้งเดิม แต่ไม่ได้น้อยกว่ามากนัก ทำให้เมื่อคำนวณ OASPL ออกมาแล้ว ใบพัด A มีความดังมากกว่า โดยเฉลี่ยถึง 8 dB ส่วนใบพัด B ที่มีการปรับแต่งด้วย Axial Spacing นั้น มีความดันเสียงที่มากกว่าใบพัดดั้งเดิมในช่วงความถี่ต่ำ (Tonal) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ OASPL มีความดังมากที่สุด



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบ SPL ระหว่างใบพัดอสมมาตร A B และใบพัด DJI 9450 Original

โดยสรุปแล้วจากการจำลอง พบว่าการปรับแต่งใบพัดอสมมาตร ทำให้เกิดการกระจายแรงดันเสียงไปยังความถี่ที่มากกว่า ทำให้ความดังในแต่ละความถี่น้อยกว่าใบพัดดั้งเดิม แต่ในช่วงความถี่ต่ำนั้น ไม่ได้ลดเสียงอย่างมีนัยสำคัญมากนัก ทำให้ OASPL โดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าใบพัดดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การจำลองได้แสดงให้เห็นว่า ใบพัดทั้งสองใบสามารถลดเสียงช่วงความถี่สูงได้ดีกว่าใบพัดดั้งเดิม และยังเป็นการเปิดช่องทางให้มีการศึกษาต่อไป เช่น ศึกษา Axial Spacing ควบคู่ไปกับ Blade Spacing องศาเพิ่มเติมเช่น 30° หรือ 60° ซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการปรับแต่งใบพัด ที่สามารถส่งผลต่อแรงดันเสียงของใบพัดได้

5. สรุป

จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ CFD ด้วยโปรแกรม Ansys 2023 R1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์และเสียงของใบพัดอสมมาตร ที่ได้รับการปรับแต่งด้วยระยะตามแกน (Axial Spacing) โดยเปรียบเทียบกับใบพัด DJI 9450 ดั้งเดิม พบว่าใบพัดอสมมาตร มีแรงขับที่สูงกว่าใบพัดเดิม แต่ความดันเสียงรวม (OASPL) ก็เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉลี่ยสูงกว่าใบพัดเดิมถึง 8 dB เนื่องจากใบพัดอสมมาตรมีแนวโน้มที่จะกระจายเสียงไปยังความถี่ที่มากกว่าในช่วงความถี่ต่ำ (Tonal Noise) แต่ความดันเสียงไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากการสังเกตก็พบว่าใบพัดอสมมาตร สามารถลดเสียงช่วงความถี่สูงได้ (Broadband Noise) เมื่อเปรียบเทียบกับใบพัดดั้งเดิม ผลการวิจัยนี้เปิดช่องทางให้มีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น การศึกษา Axial Spacing ควบคู่ไปกับ Blade Spacing ในองศาอื่นๆ เช่น 30° หรือ 60° ซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการปรับแต่งใบพัด ที่สามารถส่งผลต่อแรงดันเสียงของใบพัดได้ดีขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางทีมวิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อผู้ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยเฉพาะ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่รวมถึงการอำนวยความสะดวก ในการเข้าถึงและใช้งาน Supercomputer Cluster WATA เพื่อใช้ในการคำนวณและจำลองผลที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Latest Developments and Social Acceptance of Drones as Part of Urban Air Mobility. 2023.; Available from: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/resources/case-studies/latest-developments-and-social-acceptance-drones-part-urban-air-mobility_en.

[2] Schaffer, B., et al., *Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans-A Systematic Review.* Int J Environ Res Public Health, 2021. 18(11).

[3] Mane, M.V., et al., *A Comprehensive Review on Advancements in Noise Reduction for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs).* Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2024. 12(S2): p. 1375-1397.

[4] Noda, R., et al., *Characterization of the low-noise drone propeller with serrated Gurney flap.* Frontiers in Aerospace Engineering, 2022. 1.

[5] *Toroidal Propeller*. 2024; Available from: https://www.ll.mit.edu/partner-us/available-technologies/toroidal-propeller-0.

[6] Rober, M. *Amazing Invention- This Drone Will Change Everything*. 2023.

[7] Usov, D., et al., *Aerodynamics and Acoustics of Asymmetric Propellers With Uneven Blade Spacing*. 2024.

[8] Contributors, W. *Engineering Acoustics: Noise from Cooling Fans*.

[9] *Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*. 2010, International Organization for Standardization.

[10] Russell, C., et al., *Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles*. NASA Ames Research Center. 2016.

การพัฒนาต้นแบบการปลูกผักไฮโดรโพนิกส์เพื่อการพึ่งพาตนเองในชุมชน กรณีศึกษา หมู่บ้านเทพประทาน จังหวัดนครนายก

Development of a Hydroponic Vegetable Cultivation Model for Self-Sufficiency in Communities Case Study: Theppathan Village, Nakhon Nayok Province

พ.อ.ผศ. สามารถ พรเจริญ[1], นนร.อัครวิชช์ ว่องวัฒนโรจน์[2], นนร.สิทธิศักดิ์ พรมศรีธรรม[2] , นนร.ปรินทร์ ภู่ตระกูล[2], นนร.สุรรัฐ ศรีวนิชย์[2], นนร.ภาวพุทธิ์ โสจะ[2] , นนร.ปุณญพัฒน์ สมานหมู่[2], นนร.สิริวัฒน์ จำสอน[2]

[1]อาจารย์ กองวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก
Email: Samart.po@crma.ac.th
[2]นักเรียนนายร้อย สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก
Email: akkarawich015@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือ1.เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบการปลูกผักไฮโดโปนิกส์ในชุมชนโดยเน้นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีความทันสมัยเพื่อให้ชุมชนสามารถพึ่งตนเองได้ด้านการผลิตอย่างยั่งยืน 2. เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการปลูกผักไฮโลโพนิกส์ระหว่างระบบน้ำนิ่มแบบดั้งเดิมกับระบบNFT ที่ควบคุมด้วยเทคโนโลยี IOTวิธีการศึกษาประกอบด้วย1. หาสูตรน้ำหมักชีวภาพที่ดีที่สุดโดยการทดลองกับระบบน้ำนิ่งแบบดั้งเดิม2. กระบวนการวิจัยแบบมีส่วนร่วมและการทบทวนวรรณกรรมย้อนหลัง 5 ปี เพื่อหาเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เหมาะสมต่อชุมชน 3.เลือกระบบการควบคุมอัตโนมัติและระบบการปลูกแบบNFTในการปลูกผักไฮโดโปดิกในชุมชนเทพประทานจังหวัดนครนายก4.ทำการวิเคราะห์ค่าไนเตรต จากนั้นกระบวนการวิจัยสุดท้ายก็จะเป็นการเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการปลูกผักแบบดั้งเดิมคือระบบน้ำนิ่งกับระบบใหม่ที่ได้พัฒนาเป็นต้นแบบและออกแบบมา ผลการวิจัยพบว่าสูตรหมักชีวภาพที่ดีที่สุดคือน้ำหมักชีวภาพจากปลาซึ่งจากการวิเคราะห์ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของผักพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับปุ๋ยอินทรีย์น้ำ จากนั้นได้เลือกระบบการปลูกผักแบบ NFT ที่มีการควบคุมแบบอัตโนมัติทำการปลูกผักโดยใช้สูตรอาหารร่วมระหว่างธาตุอาหาร AB กับน้ำหมักชีวภาพ จากเศษปลาพบว่าผักกาดหอมกรีนคอสที่ปลูกมีการ เจริญเติบโตที่ดีและผักที่ได้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและมีค่าไนเทรตตกค้างไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด (มาตรฐานEU) เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ต่อรอบการปลูกพื้นที่ 1 ตารางเมตร พบว่า ระบบการปลูกที่มีการควบคุมอัตโนมัติมีผลผลิตเท่ากับ 4.5 กก/ตร.ม.มีรายได้ต่อรอบเท่ากับ 450 บาท, ผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ -74.28 %,จุดคุ้มทุนในรอบที่ 4-5 และความคงที่ของคุณภาพผลผลิตสูง ในขณะที่ ระบบการปลูกแบบดั้งเดิม(น้ำนิ่ง)มีผลผลิตเท่ากับ 3.6 กก/ตร.ม.มีรายได้ต่อรอบเท่ากับ 360 บาท, ผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ -60 %,จุดคุ้มทุนในรอบที่ 6-7 และความคงที่ของคุณภาพปานกลาง จากการวิเคราะห์พบว่า ระบบอัตโนมัติ มีต้นทุนเริ่มต้นสูงกว่าแต่ให้ผลผลิตที่มากกว่าและมีความมั่งคงทั้งทางด้านการดูแลรักษาและการคุณภาพของผักที่ปลูก ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ทำให้ชุมชนมีความรู้

ความเข้าใจในเทคโนโลยีสมัยใหม่ในการปลูกผักไฮดรโปนิกส์นอกจากนี้แล้วยังช่วยยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ให้ดีขึ้นและมีความคุ้นเคยกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ทางด้านการเกษตรมากขึ้นอันส่งผลต่อการพึ่งพาตนเองได้ ในอนาคต

คำสำคัญ น้ำหมักชีวภาพ, ระบบสมาร์ทฟาร์ม, ความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

Abstract

This research aimed to develop a prototype of a community-based hydroponic vegetable cultivation system utilizing modern technology to promote sustainable self-reliance and to evaluate the economic feasibility between a traditional static hydroponic system and an IoT-controlled NFT (Nutrient Film Technique) system. The study was conducted in Thepprathan Community, Nakhon Nayok Province, Thailand, employing participatory research and recent technological reviews to identify appropriate innovations for community application. The first phase focused on identifying the most effective biological nutrient extract by testing different bio-fertilizer formulations in a traditional hydroponic setup. Fish-based bio-extract was found to provide the optimal nutrient balance, closely resembling the nutrient profile of standard organic liquid fertilizers. Subsequently, the optimized extract was combined with AB nutrients and applied in an IoT-controlled NFT hydroponic system designed to monitor and regulate EC, pH, and environmental conditions in real time.

Results indicated that lettuce (*Lactuca sativa var. Green Cos*) grown in the IoT-controlled NFT system achieved superior growth, freshness, and safety, with nitrate levels below EU regulatory standards. The economic analysis revealed that, although the automated system required higher initial investment, it yielded greater productivity (4.5 kg/m² per cycle), faster economic return (break-even at 4–5 cycles), and more stable crop quality compared to the traditional static system (3.6 kg/m² per cycle; break-even at 6–7 cycles). Overall, the IoT-controlled NFT system demonstrated both technical and economic superiority, promoting efficient resource use and long-term sustainability. The project not only improved community understanding of modern agricultural technologies but also enhanced economic resilience and self-reliance. This research contributes to sustainable agricultural innovation aligned with the UN Sustainable Development Goals.

Keywords: Bio-fermented fertilizer, Smart farming system, Economic feasibility

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาด้านการผลิตอาหารและการพึ่งพาตนเองของชุมชนในพื้นที่ชนบทและเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว กลายเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาอย่างจริงจัง โดยเฉพาะในช่วงที่สถานการณ์ทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมมีความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น การลดลงของพื้นที่การเกษตร การขาดแคลนทรัพยากรน้ำ และการเพิ่มขึ้นของต้นทุนในการผลิตอาหาร การปลูกผักไฮโดรโพนิกส์ซึ่งเป็นระบบการปลูกพืชในน้ำที่มีสารอาหารได้กลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพึ่งพาตนเองในชุมชน เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้พื้นที่น้อย ลดการใช้น้ำ และไม่ต้องใช้ดินในการปลูก [1] อย่างไรก็ตามการนำระบบการปลูกผักไฮโดรโพนิกส์ไปใช้ในชุมชนยังมีข้อจำกัดด้านความรู้และการมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชน โดยเฉพาะในชุมชนที่อาจไม่คุ้นเคยกับเทคโนโลยีใหม่ๆ หรือไม่สามารถเข้าถึงทรัพยากรและเครื่องมือในการทำการเกษตรสมัยใหม่ได้ ดังนั้น การเข้าชุมชนเพื่อช่วยแก้ปัญหา รวมทั้งการถ่ายทอดเทคโนโลยีการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบสมัยใหม่ก็จะส่งผลต่อการพัฒนาองค์ความรู้ที่ทันสมัยต่อชุมชนนอกจากนี้แล้วยังส่งเสริมความคุ้นเคยต่อเทคโนโลยีสมัยใหม่ต่อชาวบ้านเกษตรกรผู้ปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ในชุมชนเทพประทานจังหวัดนครนายกได้ในอนาคต เพื่อเกิดการพัฒนาที่ยั่งยืนสืบไป

การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาต้นแบบระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ที่สามารถใช้งานได้จริงในชุมชนโดยบูรณาการเทคโนโลยี IOTเข้ากับระบบการปลูกผักไฮโดรโบนิกส์แบบ NFT เพื่อสร้างระบบควบคุมการปลูกผักแบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผัก อันส่งผลต่อการพึ่งพาตนเองทางด้านอาหารของชุมชนได้อย่างยั่งยืน นอกจากนี้การวิจัยนี้ยังได้บูรณาการองค์ความรู้ทางด้านเศรษฐกิจหมุนเวียนชีวภาพ (Circular Bioeconomy) โดยใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลา เป็นแหล่งธาตุอาหารทางเลือกต่อผักเป็นการลดใช้ปุ๋ยเคมีและสร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสียในครัวเรือน [2] เป้าหมายหลักของการศึกษานี้คือ การสร้างต้นแบบการปลูกผักที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ เน้นการมีส่วนร่วมของชุมชนโดยมีการเรียนรู้ร่วมกันและแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีการเกษตรโดยนักเรียนนายร้อยซึ่งเป็นคนรุ่นใหม่กับชาวบ้านในชุมชนเทพประทาน ซึ่งอาศัยอยู่ในพื้นที่โดยรอบโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ซึ่งมีผลดีต่อผู้วิจัยเองคือนักเรียนนายร้อยที่ได้มีการเรียนรู้นอกห้องเรียน มีปฏิสัมพันธ์ที่ดีต่อชุมชน อันส่งผลประโยชน์ต่อกองทัพบกและประเทศไทยในอนาคต นอกจากนี้ การศึกษานี้จึงถือเป็นการผสมผสานนวัตกรรมการเกษตรสมัยใหม่เข้ากับภูมิปัญญาท้องถิ่นเพื่อสร้างความเข้มแข็งและความยืดหยุ่นของชุมชนในยุคดิจิทัล ทั้งยังมีส่วนช่วยต่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการสร้างระบบการผลิตอาหารที่มั่นคงอย่างยั่งยืนในระบบโลก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปลูกพืชแบบ NFT (Nutrient Film Technique)

ระบบการปลูกพืชแบบ NFT (Nutrient Film Technique) เป็นระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ที่ให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชอย่างต่อเนื่องในชั้นบางๆ เพื่อให้รากพืชได้รับทั้งธาตุอาหารและออกซิเจนในปริมาณที่เหมาะสม [3] การออกแบบรางปลูกในระบบนี้ควรมีความลาดเอียงประมาณ 1–3 องศา เพื่อให้น้ำสามารถหมุนเวียนได้ทั่วถึงและไม่เกิดการขังที่รากพืช [4]

หลักการสำคัญคือ การรักษาสมดุลของ ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และ ค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH) ให้อยู่ในช่วงที่พืชต้องการ โดยทั่วไปผักกาดหอมกรีนคอสจะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่า EC ระหว่าง 0.8–2.0 mS/cm และค่า pH อยู่ในช่วง 5.5–7.0 การควบคุมค่าทั้งสองนี้มีผลโดยตรงต่อการดูดซึมธาตุอาหารของพืช และมีผลต่อคุณภาพของผลผลิตในระยะเก็บเกี่ยว [5]

นอกจากนี้ ระบบ NFT ยังช่วยลดการใช้น้ำได้มากกว่าการปลูกแบบดินทั่วไปถึง 80% และสามารถควบคุมปัจจัยการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) ที่ต้องการผลผลิตสูงในพื้นที่จำกัด

2.2 การควบคุม EC, pH และสภาวะแวดล้อมด้วยเทคโนโลยี IoT

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ในระบบฟาร์มอัจฉริยะ ช่วยให้สามารถตรวจวัดและควบคุมค่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น, แสงสว่าง, pH และ EC ได้แบบเรียลไทม์ โดยใช้เซนเซอร์เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino หรือ ESP8266 ซึ่งสามารถส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์เพื่อวิเคราะห์และแสดงผลผ่านสมาร์ตโฟน [6]

การควบคุมค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นระบบ ป้อนกลับอัตโนมัติ (Closed-loop System) ซึ่งใช้หลักการควบคุมแบบ PID เพื่อปรับระดับสารละลายและน้ำให้สมดุลโดยอัตโนมัติ [7] งานวิจัยในประเทศไทยได้พัฒนา “ต้นแบบระบบควบคุมไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะ” ซึ่งสามารถปรับค่า EC และ pH ได้อัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันมือถือ โดยพบว่าผลผลิตเฉลี่ยของผักกาดหอมเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบเดิม [6] ในมิติของพลังงานและสิ่งแวดล้อม ระบบ Smart Farm ที่ใช้ IoT ยังช่วยลดต้นทุนแรงงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการน้ำได้มากกว่า 30% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่อัตโนมัติ [8] ซึ่งเป็นจุดเด่นสำคัญที่ทำให้ Smart Farm ได้รับการส่งเสริมให้เป็นเทคโนโลยีเกษตรแห่งอนาคตในชุมชนไทย

2.3 น้ำหมักชีวภาพและการใช้ในระบบ NFT

น้ำหมักชีวภาพเป็นแหล่งธาตุอาหารอินทรีย์ที่ผลิตจากวัตถุดิบเหลือใช้ในครัวเรือน เช่น เศษผัก ผลไม้ หรือเครื่องในปลา ซึ่งมีธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), และโพแทสเซียม (K) อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช [9]

จากการศึกษาของ สุภาพ ราชา [8] พบว่า น้ำหมักจากเศษปลานิลที่ผสมกับเศษผัก สามารถใช้แทนปุ๋ยน้ำในระบบ NFT ได้บางส่วน โดยไม่ทำให้คุณภาพของผักลดลง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนปุ๋ยเคมีได้มากถึง 25% และลดปริมาณไนเตรตตกค้างในผักกาดหอมได้ต่ำกว่ามาตรฐานสากล (ไม่เกิน 2,500 มก./กก.)
ในขณะเดียวกัน การผสมระหว่าง น้ำหมักชีวภาพกับปุ๋ยเคมีสูตร AB ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (20:80) ช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารครบถ้วนทั้งในรูปอินทรีย์และอนินทรีย์ และยังเพิ่มจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยสลายสารอาหารในระบบ NFT ได้ดีขึ้น [9] ซึ่งเป็นการผสมผสานแนวคิดเกษตรอินทรีย์และเทคโนโลยีอัจฉริยะเข้าด้วยกันอย่างลงตัว

2.4 ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์การผลิตและการวิเคราะห์ความคุ้มทุน

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ Smart Farm สามารถอธิบายได้ด้วยหลักของ เศรษฐศาสตร์การผลิต (Production Economics) และ การวิเคราะห์ต้นทุน–ผลตอบแทน (Cost–Benefit Analysis: CBA**)** โดยพิจารณาต้นทุนคงที่ (Fixed Cost), ต้นทุนผันแปร (Variable Cost), รายได้รวม (Total Revenue) และกำไรสุทธิ (Net Profit) [10]

งานวิจัยของ [6] พบว่า ระบบ Smart Farm ที่ใช้ IoT ในการควบคุมสารละลายและสภาพแวดล้อม ช่วยลดต้นทุนแรงงานได้ถึง 35% และลดการสูญเสียผลผลิตจากปัญหาความแปรปรวนของอุณหภูมิได้มากกว่า 20% ในขณะที่อัตราผลตอบแทนการลงทุน (ROI) เพิ่มขึ้นจาก 1.32 เท่า เป็น 1.78 เท่า ภายในรอบการผลิต 3 เดือน ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่มีความคุ้มค่าในระยะยาว

นอกจากนี้ การใช้ระบบอัตโนมัติยังเพิ่มความสม่ำเสมอของผลผลิต ทำให้ผักมีคุณภาพดีและขายได้ราคาสูงกว่าในตลาดทั่วไป โดยเฉพาะผักกาดหอมพันธุ์ Green Cos ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ตลาดต้องการตลอดทั้งปี[11]

3. การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายในพื้นที่ชุมชนเทพประทาน ตำบลพรหมณี อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก โดยใช้ระบบปลูก ผักไฮโดรโปนิกส์ 2 รูปแบบ ได้แก่

1. ระบบการปลูกผักแบบน้ำนิ่งแบบ ดั้งเดิม ของเกษตรกรในชุมชนเทพประทานที่มีอยู่เดิม
2. ระบบ NFT ควบคุมอัตโนมัติแบบ Smart Farm ที่มีการควบคุมค่า pH, EC และความชื้นอากาศผ่านระบบ IoT แบบ Real-time ที่พัฒนาและสร้างเป็นต้นแบบเพื่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับเกษตรกร

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1.ระบบปลูก แบบน้ำนิ่งแบบ ดั้งเดิม ขนาด 1x1 เมตร จำนวน 1 แปลง
2.ระบบปลูก NFT แบบควบคุมอัตโนมัติ (Smart Farm) ขนาดเท่ากัน จำนวน 1 แปลง
3.ชุดควบคุมอัตโนมัติ (IoT Control Unit) ประกอบด้วย เซนเซอร์วัด pH,เซนเซอร์วัด EC, เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22),ระบบบันทึกข้อมูล Real-time ผ่าน Cloud ด้วยแอปพลิเคชัน Blynk
4. ต้นกล้าผักกาดหอมกรีนคอส อายุ 14 วัน จำนวน 100 ต้น
5. สารละลายธาตุอาหารสูตร A และ B ที่เหมาะสมกับการปลูกผักกาดหอมกรีนคอส และน้ำหมักชีวภาพ
6.เครื่องมือวัดทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ตารางต้นทุน-ผลตอบแทน และแบบบันทึกค่าใช้จ่ายการผลิต

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

1.การเตรียมระบบปลูกและอุปกรณ์

1.ติดตั้งระบบ NFT ทั้งสองระบบให้มีโครงสร้างเหมือนกัน

2.ตรวจสอบความพร้อมของปั๊มและการไหลของสารละลายให้คงที่

3.ปรับค่าพื้นฐานของสารละลายให้มีค่า pH = 6.0 ± 0.5 และ EC = 1.5–2.0 mS/cm

2. การปลูกและดูแลรักษา

1. ปลูกต้นกล้าผักกาดหอมกรีนคอสในระบบทั้งสองระบบ

2.ระบบ Smart Farm จะมีการตรวจวัดและปรับค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ

3.ระบบดั้งเดิมจะปรับด้วยมือโดยใช้เครื่องวัด pH และ EC

3 การเก็บข้อมูล

1.เก็บข้อมูล เป็นระยะเวลา 45 วัน โดยบันทึกค่าต่างๆ ในการเจริญเติบโตได้แก่ ความสูง, จำนวนใบ, น้ำหนักสด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์สภาพแวดล้อม ได้แก่ pH, EC, อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น

2.ต้นทุนการผลิตและผลผลิตรวม

4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1.วิเคราะห์เชิงสถิติด้วย ANOVA เพื่อเปรียบเทียบหาสูตรน้ำหมักที่ดีที่สุดต่อการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์

2.วิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ดังต่อไปนี้ ต้นทุนรวม, กำไรสุทธิ และอัตราผลตอบแทนการลงทุน

3. นำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟ และตารางทางเศรษฐศาสตร์

4. ผลการวิจัย

การดำเนินโครงงานวิจัยเรื่องนี้ มีผลการวิจัยและการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ดังนี้

4.1 การทดลองหาสูตรน้ำหมักชีวภาพที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์

ผู้วิจัยและเกษตรกรผู้ปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ในชุมชนเทพประทานได้ ทำการทดลองปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยระบบน้ำนิ่งด้วยน้ำหมักชีวภาพสูตรต่างๆ ดังรูปที่ 1 ผลการทดลองที่ได้นำไปวิเคราะห์โดยใช้สถิติANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ ระหว่างชุดทดลองด้วยวิธี Turkey's Multiple Comparison Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ผลดังแสดงตารางที่ 1

รูปที่ 1 แสดงการปลูกผักกาดหอมกรีนคอสด้วยระบบน้ำนิ่งด้วยน้ำหมักชีวภาพสูตรต่างๆร่วมกับสารละลาย AB

ตารางที่ 1 สูตรปุ๋ยจากน้ำหมักชนิดต่าง ๆ

ชนิดของน้ำหมัก	จำนวนใบต่อต้น	ความยาวใบ (เซนติเมตร)	น้ำหนักสด (กรัม)	ความยาวราก (เซนติเมตร)
สารละลาย AB (ชุดควบคุม)	5.0±0.3 [a]	7.61±0.56 [a]	19.55±0.86 [a]	3.62±0.53 [a]
น้ำหมักจากปลาและสารละลาย AB	13.5±1.0 [b]	11.38±0.96 [b]	71.97±5.50 [b]	5.50±0.48 [a]
น้ำหมักจากเปลือกผลไม้และสารละลาย AB	10.5±0.5 [b]	9.73±0.87 [b]	53.77±5.14 [c]	4.52±0.45 [a]
น้ำหมักสูตรไข่และสารละลาย AB	12.0±1.5 [b]	12.45±0.65 [b]	64.25±10.25 [b]	5.74±0.68 [a]

พบว่าประสิทธิภาพของน้ำหมักจากปลามีจำนวนใบ ความยาวของใบ และน้ำหนักสดมากที่สุดนั้น ทั้งนี้เนื่องจาก น้ำหมักจากปลามีปริมาณของ ค่า total nitrogen (%) สูงที่สุด และมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 21/1 ซึ่งกรมพัฒนาที่ดิน(2550) ได้กำหนดค่า C/N ratio ที่เหมาะสมควรอยู่ ที่ไม่เกิน 30/1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของราชา สุภาพ [8] ที่ศึกษาผลของการใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาร่วมกับสารละลายธาตุ AB ในการปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊ก ด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ NFT พบว่า ผักกาดหอมกรีนโอ๊กมีการเจริญเติบโตและผลผลิตที่ดี

4.2 คุณสมบัติของน้ำหมักจากปลา เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ

คุณสมบัติของน้ำหมักจากปลา เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ พบว่า น้ำสกัดจากน้ำหมักจากเศษปลา มี ค่า N,P,K ตรงตามมาตรฐานของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ ยกเว้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีค่า 4.3 ค่าการนำไฟฟ้า(EC) ที่มีค่า 2.21 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์น้ำเล็กน้อย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์น้ำกับน้ำหมักจากเศษปลา

ลำดับ	รายการ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐาน*	ผลวิเคราะห์
1	ค่าการนำไฟฟ้า(EC)	mS/cm	≤ 2.0	2.00
2	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	≤ 4	4.3
3	Total N (%)	mg/L	≥ 0.5 %	0.75 %
4	Total P_2O_5	mg/L	≥ 0.5 %	0.56 %
5	Total K_2O	mg/L	≥ 0.5 %	1.52 %

หมายเหตุ * หมายถึง ค่ามาตรฐานของกลุ่มควบคุมปุ๋ย สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2555)

4.3 เลือกเทคโนโลยีทางการเกษตรสมัยใหม่ที่ใช้ปลูกผักไฮโดรโปนิกส์

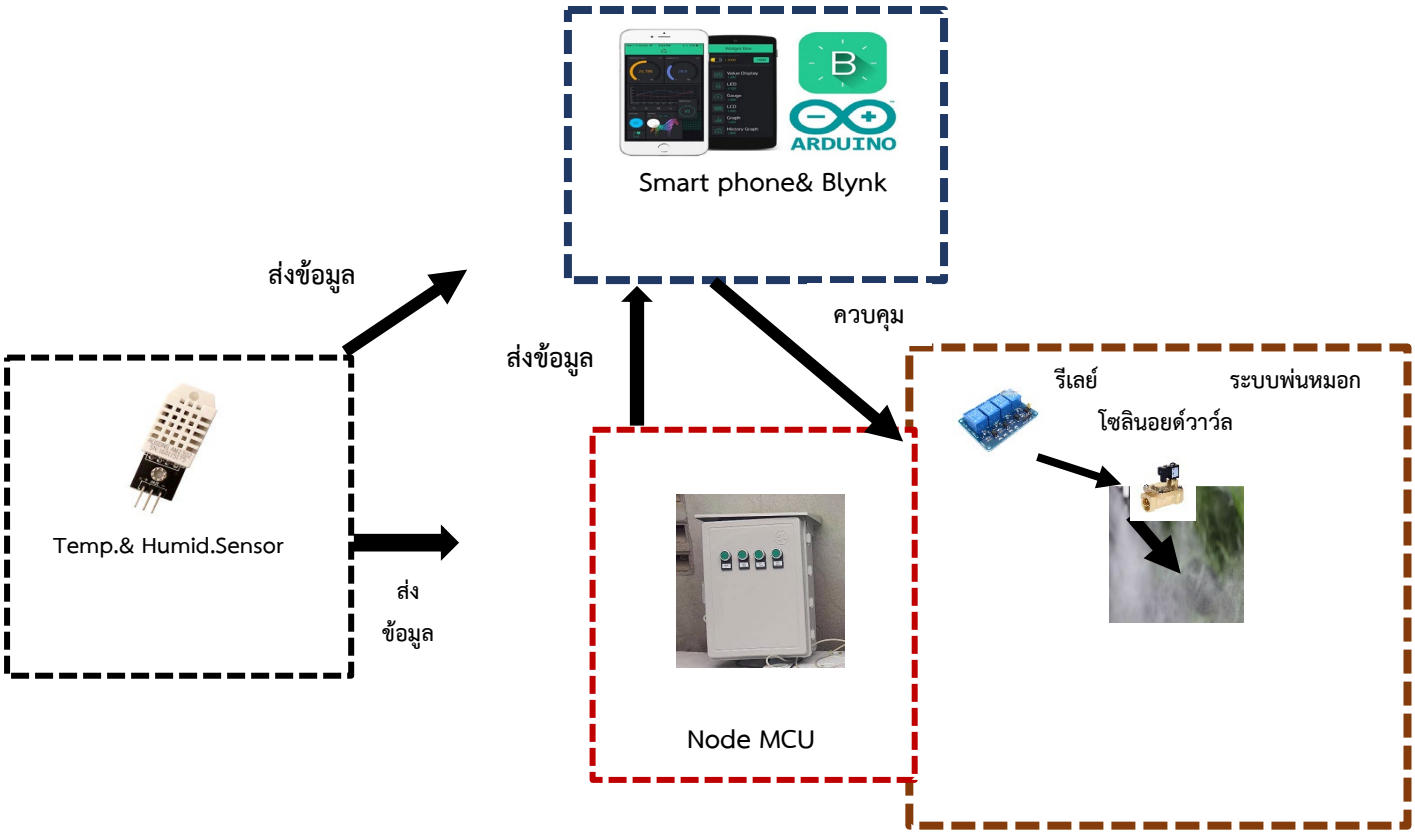
โดยการสังเคราะห์และทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยต่างๆ โดยสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทบทวนวรรณกรรมเพื่อเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์

งานวิจัย	ชุมชน/สถานที่ปลูก	ระบบการปลูกที่ใช้ระบบ Smart Farm	ผักที่ปลูก
ภัทรรสและคณะ [12]	ฟาร์มผักไฮโดรโปนิกส์ จ.นนทบุรี	NFT กับ Smart Farm	กรีนคอส, กรีนปัตตาเวีย
ปวันนพัสตร์ และคณะ [13]	ฟาร์มผัก ม.ราชมงคลหันตรา จ.อยุทธยา	NFT ฟาร์มอัจฉริยะคอมพิวเตอร์แบบฝังอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง	ผักสลัดชนิดต่างๆ
ธนภูมิและ ธนารักษ์ [14]	ฟาร์มผักไฮโดรโปนิกส์ จ.นครราชสีมา	ผักสลัดอินทรีย์โดยใช้ระบบสมาร์ทฟาร์ม	กรีนคอส
สกรณ์และคณะ[15]	ฟาร์มผัก ม.ราชภัฏบุรีรัมย์ จ.บุรีรัมย์	ผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยเทคโนโลยีIoT	ผักสลัดชนิดต่างๆ

4.4 การออกแบบและระบบการปลูกที่ได้เลือกใช้

ระบบ IOT ดังกล่าวนี้ได้ใช้สัญญาณ Wi - Fi ในการควบคุมในโหมดอัตโนมัติโดยมีการออกแบบและจัดสร้างเป็นชุดสำเร็จรูปและมีคู่มือที่ใช้งานที่ได้ออกแบบและจัดทำโดยสำนักมาตราวิทยา กระทรวงอุตสาหกรรม ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถ ตรวจสอบค่า อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ในในแอปพลิเคชัน Blynk บนโทรศัพท์สมาร์ทโฟน โดยที่อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ดังรูปที่ 2,3

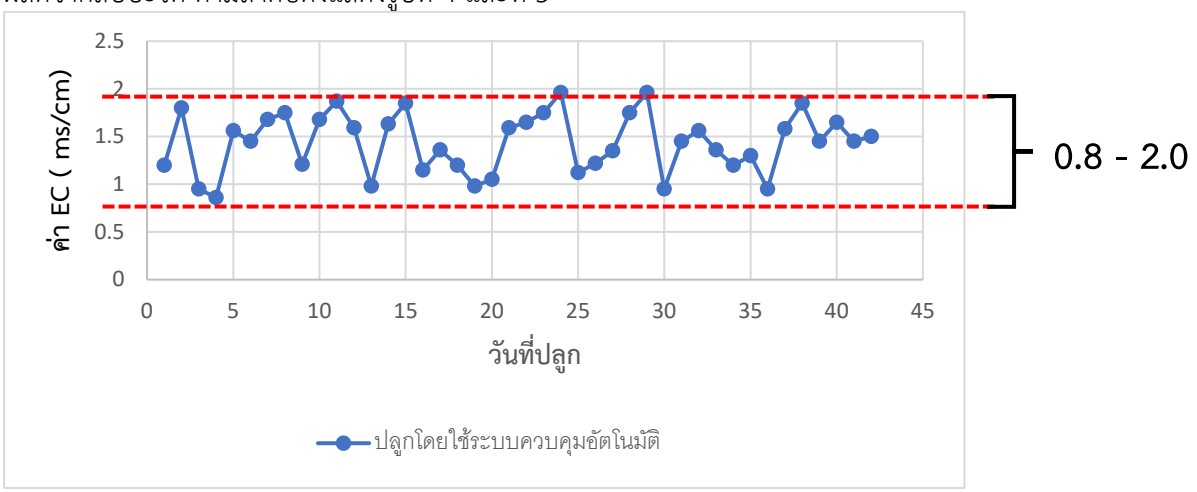


รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติฟาร์มผักไฮโดรโปนิกส์

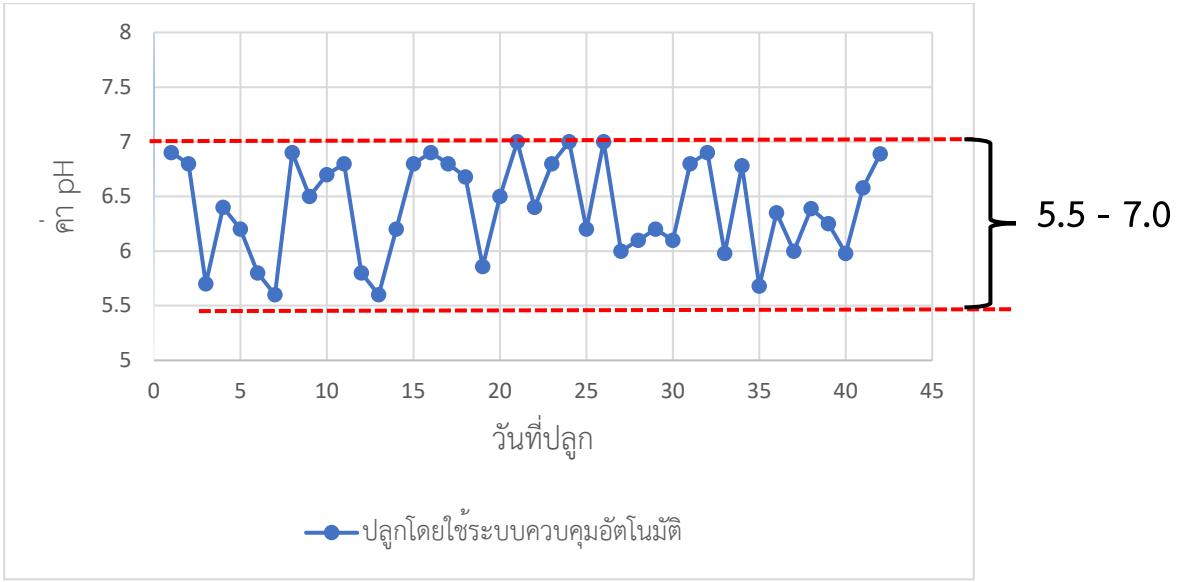
รูปที่ 3 แสดงระบบSmart Farm ที่ใช้ในการทดลอง

4.5 สภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการควบคุม

สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตที่สำคัญของผักกาดหอมกรีนคอสมีอยู่หลายปัจจัยแต่ปัจจัยที่สำคัญก็คือปุ๋ย ซึ่งค่าที่แสดงนั้นสามารถตรวจวัดได้โดยการวัดค่าการนำไฟฟ้า ECโดยมีการวัดแบบเรียลไทล์ด้วยระบบ Smart Farm ในการทดลองวิจัยกำหนดให้มีค่าการนำไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ 0.8-2.0 mS/cm และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม คือ 5.5-7.0 [5] ซึ่งสามารถปรับค่าได้โดยการใช้ สารปรับสภาพสารละลายอินทรีย์ และน้ำส้มสายชูหมักที่ผลิตจากสับปะรด ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 4 และที่ 5



รูปที่ 4 แสดงค่าEC ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนคอส



รูปที่ 5 แสดงค่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนคอส

เมื่อทำการปลูกผักกาดหอมกรีนคอสในระบบการปลูกแบบ NFT ที่มีการควบคุมอัตโนมัติและมีการควบคุมค่าต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักด้วยวิธีการแบบชีวภาพ ทำให้ผักที่ได้มีการเจริญเติบโตที่ดีและปลอดภัยต่อการบริโภค ผักที่ได้มีความสดและมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีดังรูปที่ 6

ภาพที่ 6 แสดงผักกาดหอมกรีนคอสที่ปลูกเมื่อมีอายุ 45 วัน

4.6 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

บ้านต้นแบบในชุมชนเทพประทาน สามารถ ผลิตผักสลัดเพื่อการจำหน่ายในชุมชน โดยมีการปลูกแบบระบบน้ำนิ่งบนโต๊ะ โดยการทดลองศึกษาเปรียบเทียบกับแปลงที่ออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่และมีการสอนให้กับชาวบ้านได้มีความเข้าใจโดยใช้คู่มือที่ได้จากหน่วยงานราชการคือ สำนักมาตราวิทยา โดยระบบที่ใช้เป็นระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ NFT และกำหนดเงื่อนไขแปลงทดลอง ทั้งสองแปลงให้มีเงื่อนไขที่กำหนดเหมือนกันได้แก่ ผักกาดหอมกรีนคอส,จำนวนต้นที่ปลูก, สารละลายที่ใช้ในการปลูก ได้แก่ธาตุอาหารเคมี AB และน้ำสกัดชีวภาพจากเศษปลาโดยใช้ในอัตราส่วน V/V = 80 : 20

เมื่อคำนวณตามสูตรทางเศรษฐศาสตร์ ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างระบบ Smart Farm และระบบดั้งเดิม

ชนิดตัวแปร	**ระบบการปลูก NFT (SMART FARM)**	**ระบบการปลูกแบบดั้งเดิม(น้ำนิ่ง)**
ผลผลิต (กก./ตร.ม.)	4.5	3.6
รายได้ต่อรอบ (บาท)	450	360
ROI (%)	-74.28	-60
จุดคุ้มทุน (รอบ)	รอบที่ 4–5	รอบที่ 6–7
ความคงที่ของคุณภาพผลผลิต	สูง	ปานกลาง

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ระบบการปลูกแบบ NFT ที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ สามารถเพิ่มผลผลิตได้เฉลี่ย 25 % เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิมของเกษตรกรในชุมชนเทพประทาน เนื่องจาก ระบบแบบใหม่นี้มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของผัก ได้แก่ ความชื้น ค่า pH และค่า EC โดยควบคุมและอ่านค่าได้โดยตรงแบบ Real time นอกจากนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติยังมีการสั่งการและการควบคุมสภาวะต่างๆ ตามที่ได้ตั้ง

โปรแกรมไว้ให้เป็นไปตามเงื่อนไข นอกจากนี้แล้ว ระบบ NFT เป็นระบบที่มีการไหลเวียนของสารละลายตลอดเวลาทำให้ผักที่ปลูกในระบบได้รับปริมาณธาตุอาหารอย่างเพียงพอ อีกทั้งข้อดีของระบบไหวนทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศทำให้มีปัญหาเรื่องการเกิดตะกอนที่เป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรคต่างๆ ทำให้ผักมีการเจริญเติบโตที่ต่อเนื่องตลอดเวลา [16] แต่เมื่อคำนวณผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment, ROI) พบว่า ระบบการปลูกผักสลัดแบบดั้งเดิมมีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนที่ดีกว่า ระบบ Smart Farm อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในระยะยาว (มากกว่า 5 รอบการปลูกต่อปี) ต้นทุนอุปกรณ์ Smart Farm จะเฉลี่ยลดลง และระบบจะเริ่มคุ้มทุนในรอบที่ 4-5 ของการปลูก และจุดเด่นที่สำคัญของระบบ Smart Farm คือ ความคงที่ของคุณภาพผลผลิตมีสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rathor, A. S., et al[17]

4.7 การวิเคราะห์ไนเตรท

โดยนำผักกาดหอมกรีนคอส ที่ได้จากปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ NFT ที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ไปวิเคราะห์ที่ ห้องปฏิบัติการกลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ค่า Nitrate ที่ตรวจวัดมีค่า 2,093.33 mg/ml พบว่าค่า Nitrate ที่ตรวจวัดจากผักที่ปลูกในระบบไม่สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด (2,500 mg/ml) ที่ European Commission (1997) [18] ได้กำหนดปริมาณ Nitrate สูงสุดที่ยอมให้มีอยู่ในผักกาดหอมคือ 2,500-3,000 มิลลิกรัม/น้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายธาตุอาหารน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาผสมสาร AB มีปริมาณ Nitrate สะสมอยู่ในปริมาณที่กำหนด สอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวรางค์ พัฒนะโพธิ์และคณะ [19]) ที่ศึกษาเรื่อง ประเมินความเสี่ยงของปริมาณตกค้างในผักสลัดพบว่าผักที่ปลูกในระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินส่วนใหญ่มีปริมาณ Nitrate ตกค้างสูงเกินมาตรฐาน (สูงกว่า 2,500 มก/น้ำหนัก 1 กิโลกรัม) (European Commission, 1997)

5. สรุป

การดำเนินโครงการวิจัยเรื่องนี้ สามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยดังนี้

5.1 เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ในชุมชนโดยเน้นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีความทันสมัยเพื่อให้ชุมชนสามารถพึ่งพาตนเองได้ด้านการผลิตอย่างยั่งยืน

5.1.1 งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการใช้วิจัยแบบมีส่วนร่วมในการหารูปแบบที่เหมาะสมและพัฒนาต้นแบบระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ในชุมชนโดยเลือกระบบที่เป็นธรรมชาติกล่าวคือ หาสูตรน้ำหมักชีวภาพที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่นำมาใช้ในระบบที่พัฒนาขึ้น จากการทดลองพบว่าน้ำหมักชีวภาพจากปลามีประสิทธิภาพดีที่สุดและเมื่อเทียบกับมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์น้ำมีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.2 เทคโนการเกษตรสมัยใหม่ที่ใช้ในการปลูกผักไฮโดโปนิกส์จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยต่าง ๆ ในช่วง 5 ปีย้อนหลัง พบว่าระบบการปลูกผักแบบNFT ร่วมกับระบบการควบคุมอัตโนมัติ เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในวงการการปลูกผักไฮโดโปนิกส์และเมื่อประยุกต์ใช้กับสูตรน้ำหมักชีวภาพที่เหมาะสมคือน้ำหมักจากเศษปลาก็จะทำให้ผักที่ได้มีการเจริญเติบโตที่ดีภายใต้การควบคุมค่าPH และค่าอุณหภูมิรวมถึงความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้ยังมีการควบคุมระบบต่างๆด้วยชีวภาพทำให้ผักที่ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าไนไตรต ตกค้างก็จะมีค่าไม่เกินมาตรฐานของค่าไนเตรตตามมาตรฐานของEU

5.2 เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการปลูกผักไฮโดโปนิกส์ระหว่างระบบน้ำนิ่งแบบดั้งเดิมกับระบบNFT ที่ควบคุมด้วยเทคโนโลยี Internet of things

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ ต่อรอบการปลูกพื้นที่ 1 ตารางเมตร พบว่า ระบบการปลูกที่มีการควบคุมอัตโนมัติมีผลผลิตเท่ากับ 4.5 กก/ตร.ม.มีรายได้ต่อรอบเท่ากับ 450 บาท, ผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ -74.28 %,จุดคุ้มทุนในรอบที่ 4-5 และความคงที่ของคุณภาพ

ผลผลิตสูง ในขณะที่ ระบบการปลูกแบบดั้งเดิม(น้ำนิ่ง)มีผลผลิตเท่ากับ 3.6 กก/ตร.ม.มีรายได้ต่อรอบเท่ากับ 360 บาท , ผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ -60 %,จุดคุ้มทุนในรอบที่ 6-7 และความคงที่ของคุณภาพปานกลาง โดยสรุปโดยภาพรวม พบว่า ระบบอัตโนมัติมีต้นทุนเริ่มต้นสูงกว่าแต่ให้ผลผลิตที่มากกว่าและมีความมั่งคงทั้งทางด้านการดูแลรักษาและการคุณภาพของผักที่ปลูกนอกจากนี้ ยังสามารถลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล และยังช่วยทำให้การดูแลผักมีความสะดวกและสามารถติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ซึ่งช่วยเพิ่มผลผลิตตลอดจนควบคุมคุณภาพของผักที่ปลูกได้เป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกิจกรรมส่งเสริมและสร้างนักเรียนนายร้อยให้เป็นนักวิจัย(กองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า) ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยและผู้วิจัยต้องขอบพระคุณส่วนราชการตำบลพรหมณีที่ช่วยประสานงานกับชุมชนเทพประทาน จังหวัดนครนายก ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงและได้รับความร่วมมือจากชาวบ้านเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ทิพย์วรรณ์ ทันไชย, ละเอียด ศรีหาเหง่า, นินุช บุญยฤทธานนท์, และสัชฌุเศรษฐ์ เรืองเดชสุวรรณ, “แนวทางการบริหารต้นทุนการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบมีส่วนร่วมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกผักปลอดสารพิษ ตำบลยางเนิ้ง อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่,” *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ปีที่ 41, ฉบับที่ 2, หน้า 31–48, 2566

[2] รัตนาภรณ์ ใจมา, ทัพไท หน่อสุวรรณ, กุหลาบ อุตสุข, ฐากูร ปัญญาใส, ฐานิต ศาลติกุลนุการ, พงศกร ศุภกิจไพศาล, และคณะ, “การเกษตรในเมืองกับ BCG Economic Model,” *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, ปีที่ 38, ฉบับที่ 3, หน้า 100–116, 2565.

[3] เยาวพา และระเกียรติกุล, “การเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์ Red Oak ที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์,” *วารสารเกษตรศาสตร์*, 2552.

[4] วิจิตรา ไชยชนะ และคณะ, “การพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิกส์,” *สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ*, 2541.

[5] กษิดิ์เดช อ่อนศรี และคณะ, “การวิเคราะห์ค่าควบคุม EC และ pH ในระบบ NFT เพื่อเพิ่มคุณภาพผลผลิตผักกาดหอม,” *วารสารเทคโนโลยีการเกษตรไทย*, 2563.

[6] พงษ์ธร โพธิ์ทอง, “การพัฒนาระบบฟาร์มอัจฉริยะควบคุมสารละลายไฮโดรโปนิกส์ด้วย IoT,” *วารสารนวัตกรรมเกษตรไทย*, 2564.

[7] ณัฐพงศ์ สุวรรณรักษ์ และคณะ, “ระบบควบคุมอัตโนมัติในฟาร์มผักไฮโดรโปนิกส์ต้นแบบ,” *วารสารวิศวกรรมเกษตรและสิ่งแวดล้อม*, 2563.

[8] ราชา สุภาพ, “การใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพในระบบ NFT สำหรับผักกาดหอม,” *มหาวิทยาลัยบูรพา*, 2561.

[9] ช่อผกา วงษ์สมบัติ และคณะ, “การเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพจากเครื่องในปลานิลร่วมกับเศษผัก,” *วารสารเทคโนโลยีการเกษตรไทย*, 2564.

[10] วิทยา รัตนพงษ์ และคณะ, “การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ชุมชน ,” *วารสารเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม*, 2561.

[11] คงเอก ศิริงาม, “ผลของสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอม,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย*, 2557.

[12] ภัทรรส และคณะ, “การพัฒนา Smart Farm ฟาร์มผักไฮโดรโปนิกส์ในจังหวัดนนทบุรี,” *การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2*, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 2568.

[13] ปวันนพัสตร์ และคณะ, “ฟาร์มผัก IoT แบบ Smart Farm มหาวิทยาลัยราชมงคลหันตรา,” *การประชุมวิชาการเกษตรอัจฉริยะ*, พระนครศรีอยุธยา, ประเทศไทย, 2563.

[14] ธนภูมิ และธนารักษ์, “การปลูกผักสลัดอินทรีย์โดยใช้ระบบ Smart Farm ในจังหวัดนครราชสีมา,” *วารสารเกษตรอินทรีย์ไทย*, 2566.

[15] สกรณ์ และคณะ, “ระบบฟาร์มผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยเทคโนโลยี IoT,” *วารสารวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยี*, 2563.

[16] P. Srivani and S. H. Manjula, “Evaluation of Smart Hydroponic Systems for Sustainable Crop Production,” *International Journal of Agricultural Technology and Innovation*, vol. 15, no. 2, pp. 33–40, 2019.

[17] A. S. Rathor et al., “Internet of Things-Based Automation in Hydroponic Agriculture: A Review,” *Journal of Smart Agricultural Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 101–118, 2024.

[18] European Commission, “Commission Regulation (EC) No 563/1997 on the maximum levels of nitrate in lettuce,” *Official Journal of the European Communities*, 1997.

[19] วรรณวรางค์ พัฒนะโพธิ์ และคณะ, “การประเมินความเสี่ยงของปริมาณไนเตรตตกค้างในผักสลัดที่ปลูกในระบบไร้ดิน,” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรไทย*, 2558.

การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจวิเคราะห์ความเสียหายของพื้นผิวทางวิ่งและทางขับของสนามบิน

Application of Artificial Intelligence for Runway and Taxiway Pavement Damage Inspection at Airports

ประสาทพร วงษ์คำช้าง[1], พินิศ รัตนปรมากุล[2*] อริสมันต์ แสงธงทอง[2] และ วาริส บัวขาว[2]

[1]กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Prasatporn Wongkamchang[1], Pinit Ruttanaporamakul[2*], Arissaman Sangthongtong and Waris Buakhaw[2]

[1]Mathematics and Computer Science Division, Navamindradhiraj Air Force Academy

[2] Department of Civil Engineering, Electrical and Civil Engineering Division, Education Division, Navamindradhiraj Air Force Academy

pinit_r@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจวิเคราะห์และจำแนกประเภทความเสียหายของพื้นผิวทางวิ่ง (Runway) และทางขับ (Taxiway) ของสนามบิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและซ่อมบำรุงความปลอดภัยภาคพื้นดิน โดยจำแนกประเภทความเสียหายออกเป็น 9 ประเภท ได้แก่ Corner-break, Corner-spalling, Crack, D-crack, Joint-seal-damage, Joint-spalling, Map-crack, Patch และ Spalling โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกด้วยอัลกอริทึม YOLOv8x สำหรับการตรวจจับวัตถุและประเมินประสิทธิภาพของโมเดลด้วยตัวชี้วัด Precision, Recall, F1 Score, mAP@50 และ mAP@50-95 ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.90, 0.84, 0.87, 0.89 และ 0.67 ตามลำดับ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับและจำแนกประเภทความเสียหายของพื้นผิวทางวิ่งสนามบินได้อย่างแม่นยำและมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในการตรวจสอบผิวทางแบบใกล้เวลาจริง (Near Real-Time) เพื่อลดภาระของเจ้าหน้าที่ภาคพื้นและเพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติการบิน

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, การประมวลผลภาพ, สนามบิน, พื้นผิวทางวิ่ง

Abstract

This research aims to apply artificial intelligence to analyze and classify surface damage on airport runways and taxiways, enhancing the efficiency and reliability of airfield pavement inspection and maintenance. The damage types are categorized into nine classes: Corner-break,

Corner-spalling, Crack, D-crack, Joint-seal-damage, Joint-spalling, Map-crack, Patch, and Spalling.

A deep learning model based on the YOLOv8x object detection algorithm was developed to identify and classify pavement damage. The model performance was evaluated using Precision, Recall, F1 Score, mAP@50, and mAP@50-95, achieving average values of 0.90, 0.84, 0.87, 0.89, and 0.67, respectively. The results indicate that the proposed model can accurately detect and classify runway surface damage, demonstrating its potential for near real-time inspection to reduce human workload and enhance ground operation safety in both civil and military airfields.

Keywords: Artificial Intelligence, Image Processing, Airport Pavement, Runway Inspection

1. บทนำ

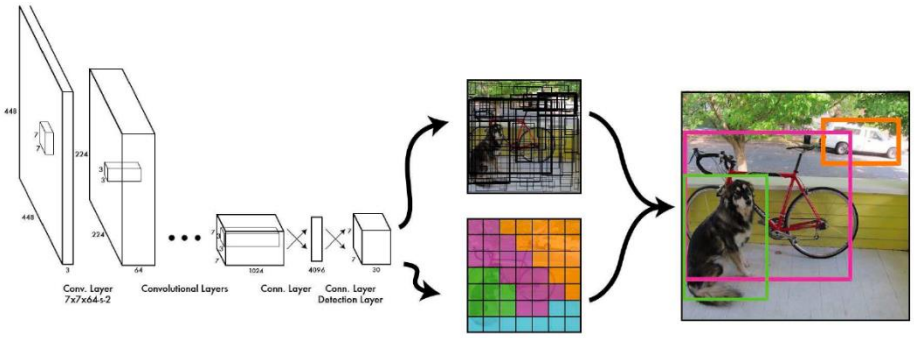
ความปลอดภัยภาคพื้นของสนามบินโดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ทางวิ่งที่อากาศยานใช้สำหรับวิ่งขึ้นหรือลงจอดนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องมีตรวจซ่อมบำรุงและการตรวจจับเศษวัตถุแปลกปลอม (Foreign Object Debris: FOD) บนทางวิ่งเพื่อป้องกันอากาศยานเกิดอุบัติเหตุในขณะใช้ผิวทางวิ่งของสนามบินทั้งสนามบินของทางทหารหรือสนามบินที่ใช้งานภาคพลเรือน จึงทำให้เกิดนวัตกรรมทางด้านความปลอดภัยของสนามบินโดยเฉพาะการตรวจพินิจผิวทางวิ่งของสนามบินมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่นที่สนามบินนานาชาติกำหนดให้มีมาตรการดำเนินการเกี่ยวกับการป้องกัน และการตรวจ FOD โดยมีเจ้าหน้าที่ตรวจทางวิ่งและทางขับขั้นต่ำ 4 ครั้ง/วัน ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ICAO เป็นต้น และการเติบโตของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ที่มีการพัฒนาเทคนิคการประมวลผลภาพอย่างรวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทำให้มีงานวิจัยและนวัตกรรมในการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบความเสียหายของผิวทางจราจรที่เป็นคอนกรีตและการตรวจหา FOD บนทางวิ่งและทางขับในสนามบินมากยิ่งขึ้น และจะเป็นการช่วยลดภาระจากการตรวจด้วยมนุษย์ที่อาจจะเกิดความผิดพลาดจากการเหนื่อยล้า รวมถึงสามารถนำต้นแบบที่ได้จากงานวิจัยไปพัฒนาต่อยอดให้มีความรวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัญญาประดิษฐ์ด้านการเรียนรู้เชิงลึกเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในด้านข้อมูลขนาดใหญ่ เนื่องจากปรับปรุงเทคนิคของการจำแนกรูปภาพอย่างมีนัยสำคัญ [1] โครงข่ายประสาทเทียม (Convolution Neuron Network, CNN) จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานทางด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ เช่น การจำแนกรูปภาพ [2-5] การตรวจสอบใบหน้า การแบ่งส่วนความหมาย และการตรวจจับวัตถุ นอกจากนี้ วิธีการที่ใช้ CNN บางส่วนได้รับการเสนอเพื่อแก้ปัญหาการขนส่ง [6-8] จากชุดข้อมูลสาธารณะต่างๆ เช่น ImageNet, Pascal VOC และ COCO วิธีการของ CNN ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถตรวจจับและจดจำได้ดีกว่าวิธีการทั่วไป เมื่อเทียบกับคุณสมบัติที่ออกแบบด้วยตนเองเหล่านี้ คุณลักษณะที่ใช้ CNN มีความละเอียดและความทนทานที่ดีกว่าสำหรับการตรวจพินิจลักษณะของความเสียหายของผิวทางวิ่งรวมทั้งการตรวจหา FOD และเมื่อพิจารณาปัญหาการตรวจพื้นผิวทางวิ่งรวมทั้งการตรวจหา FOD นั้นมีขั้นตอนประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการระบุตำแหน่งเป้าหมายและการจัดประเภทวัตถุบนทางวิ่ง ซึ่งจะเป็นปัญหาทางเทคนิคในการดำเนินการวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามด้วยคุณลักษณะที่ใช้วิธีการ CNN รวมถึงวิธีการอื่นๆ น่าจะมีความเป็นไปได้ในการตรวจหาลักษณะความเสียหายบนผิวทางวิ่งรวมทั้งตรวจพบ FOD บนผิวทางวิ่งได้

การพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจพินิจทางวิ่งของสนามบินใช้การประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องที่ติดตั้งกับรถยนต์ที่วิ่งตรวจในสนามบิน โดยกล้องสามารถบันทึกภาพและประมวลผลภาพแบบใกล้เวลาจริงในการตรวจหาตำแหน่งและลักษณะของความเสียหาย

YOLO (You Only Look Once) เป็นแบบจำลองสำหรับการตรวจจับวัตถุในภาพหรือวิดีโอ ที่พัฒนาขึ้นโดย Joseph Redmon และคณะ [9] ในปี 2016 โดย YOLO นับว่าเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพและความเร็วสูงในการตรวจจับวัตถุ วิธีการของ YOLO คือการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแบ่งภาพออกเป็นกรอบสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่เฉพาะเพื่อตรวจจับวัตถุที่อยู่ในแต่ละกรอบสี่เหลี่ยม โดยไม่ต้องใช้การทำซ้ำหรือการสร้างหลายระดับของภาพ เช่นในแบบจำลองอื่น ๆ

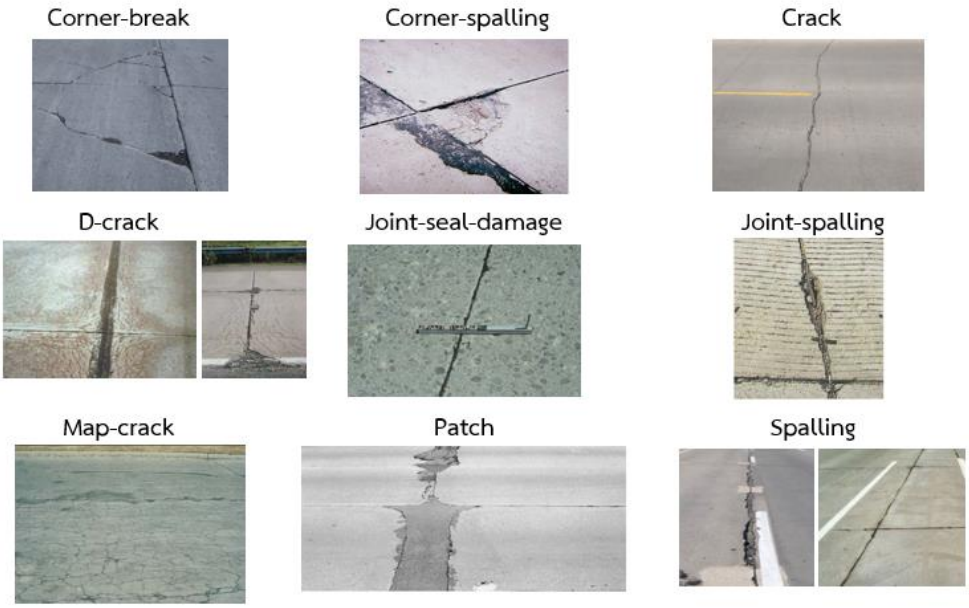


รูปที่ 1 แบบจำลอง YOLO สำหรับการตรวจจับวัตถุในภาพ

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองที่จำนวนพารามิเตอร์ไม่มากเนื่องจากต้องมีการตรวจจับความเสียหายบนพื้นผิวถนนแบบใกล้เวลาจริง จึงต้องต้องการการประมวลผลที่ค่อนข้างเร็ว เมื่อพิจารณาทั้งในเรื่องของความเร็วและความแม่นยำแล้วจึงเลือกทดลองใช้แบบจำลอง YOLOv8x

ในการที่จะสร้างแบบจำลองสำหรับใช้ในการตรวจจับความเสียหายของพื้นผิวบนถนนนั้น จะต้องใช้ชุดข้อมูล (Dataset) ซึ่งเป็นรูปเกี่ยวกับความเสียหายแบบต่าง ๆ ไว้เพื่อใช้สำหรับการฝึก (Training) โดยในเบื้องต้นจะใช้ชุดข้อมูลที่มีอยู่แล้วของต่างประเทศ เนื่องจากมีจำนวนชุดข้อมูลค่อนข้างมาก เมื่อทำการฝึกแบบจำลองด้วยชุดข้อมูลเหล่านี้ จนได้แบบจำลองที่สามารถทำการทำนายผล (Prediction) ได้ค่อนข้างดีแล้วจึงจะทำชุดข้อมูลที่เป็นรูปจากสถานที่จริงแล้วทำการฝึกแบบจำลองอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ตอนใช้งานจริงนั้นมีความแม่นยำจากการทำนายมากขึ้น

การชำรุดเสียหายของผิวทางคอนกรีต เกิดได้จาก 2 สาเหตุ คือ การชำรุดเสียหายจากตัวคอนกรีตเอง และจากพื้นทางคันดินไม่แข็งแรง โดยสามารถแบ่งประเภทของความเสียหายออกได้เป็น 4 ประเภท [10,11] ประกอบด้วย การเกิดรอยแตก (Cracking) ข้อบกพร่องบริเวณรอยต่อ (Joint deficiencies) ความเสียหายบนพื้นผิว (Surface Defects) และความเสียหายรูปแบบอื่น ๆ (Miscellaneous deficiencies) โดยความเสียหายทั้ง 4 ประเภทนี้มีรายละเอียดของความเสียหายแบ่งย่อยไปอีก อย่างไรก็ตามจากการลงพื้นที่สำรวจความเสียหายในพื้นที่สนามบินในประเทศไทย เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการวิจัยนั้น ทางคณะวิจัยได้เก็บข้อมูลได้ความเสียหายมาทำการวิจัยในครั้งนี้ทั้งหมด 9 รูปแบบคือ คือ Corner-break, Corner-spalling, Crack, D-crack, Joint-seal-damage, Joint-spalling, Map-crack, Patch, Spalling ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การสร้างชุดข้อมูลภาพของความเสียหายพื้นผิวสนามบินทั้ง 9 แบบ

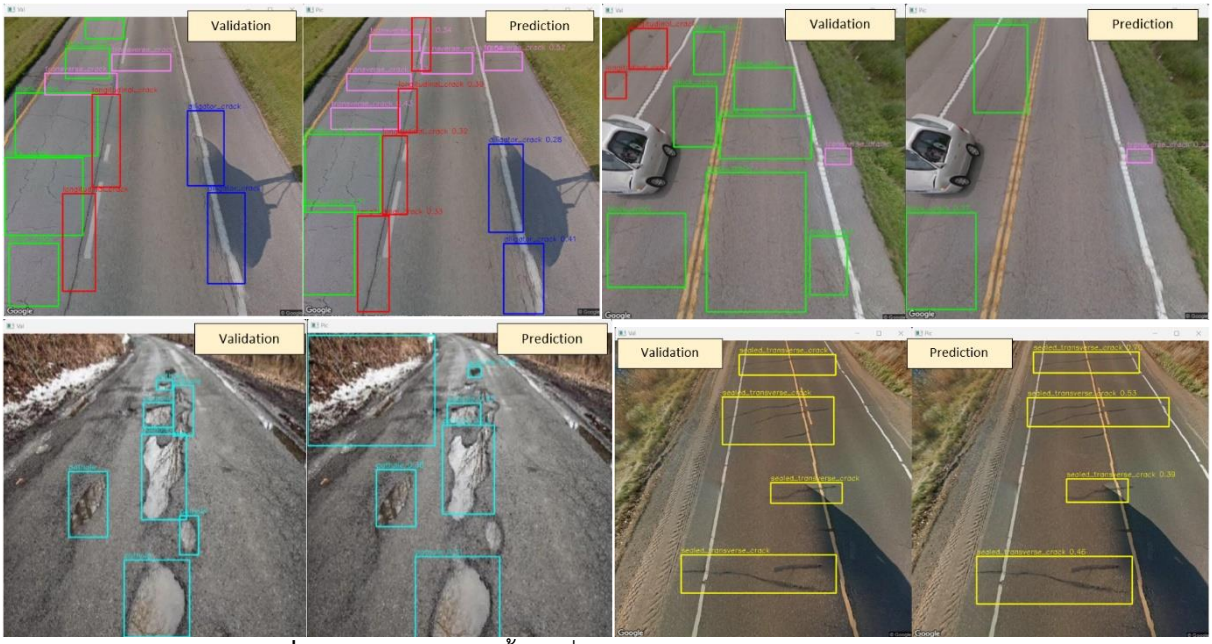
3. การดำเนินการวิจัย

การศึกษาข้อมูลด้าน วิธีการและมาตรฐานในการประเมินสภาพความเสียหายบนผิวทางวิ่ง ทางขับสนามบิน ได้ดำเนินการโดยอ้างอิงค่าดัชนีสภาพผิวทาง (Pavement Condition Index, PCI) ซึ่งเป็นวิธีการประเมินสภาพผิวจราจรที่ง่าย สะดวก ไม่ใช้งบประมาณมาก และมีมาตรฐานตาม ASTM D 5340 [10] โดยทำการการเลือกสนามบินตัวอย่างเพื่อทำการสำรวจและรวบรวมข้อมูลความเสียหายบนผิวทางวิ่ง ทางขับสนามบิน มีเงื่อนไขในการเลือก คือ เป็นสนามบินในกองทัพอากาศ มีการใช้สนามบินเป็นประจำสม่ำเสมอ และเป็นสนามบินที่กรมช่างโยธาทหารอากาศ (กรม ชย.ทอ.) มีข้อมูลและสามารถให้การสนับสนุนตามที่ร้องขอได้ โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับ กรม ชย.ทอ. แล้ว จึงเลือกใช้ สนามบิน 2 แห่ง ได้แก่ สนามบินกองบิน 7 จังหวัดสุราษฎร์ธานี และสนามบินกองบิน 2 จังหวัดลพบุรี เป็นสนามบินตัวอย่างในการประเมินสภาพผิวทางวิ่งและผิวทางขับ

แบบจำลองที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ YOLOv8s ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep Neural Network) ที่ออกแบบมาเพื่อการตรวจจับวัตถุแบบใกล้เวลาจริง เหมาะสำหรับงานวิเคราะห์ภาพทางวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นผิวคอนกรีต โดยชุดข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยภาพทั้งหมด 5,915 ภาพ แบ่งเป็นชุดฝึกสอน (Train) จำนวน 4,689 ภาพ และชุดตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) จำนวน 1,226 ภาพ คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 80:20 แม้จำนวนข้อมูลรวมจะมีขนาดมากเพียงพอ แต่บางคลาสยังมีจำนวนตัวอย่างเริ่มต้นค่อนข้างน้อย จึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Data Augmentation เช่น การหมุนภาพ การปรับความสว่าง การเพิ่มสัญญาณรบกวน (Noise) และการทำ crop-zoom เพื่อเพิ่มปริมาณและความหลากหลายของข้อมูลให้เหมาะสมต่อการเรียนรู้ของแบบจำลอง YOLOv8s ที่ใช้มีโครงสร้างรวม 207 เลเยอร์ และมีจำนวนพารามิเตอร์ทั้งสิ้น 10,628,788 พารามิเตอร์ ซึ่งช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะ (Features) ของความเสียหายแต่ละประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนำไปสู่ประสิทธิผลที่มั่นคงในการตรวจจับความเสียหายของพื้นผิวในสภาพการใช้งานจริง

ในการประมวลผล แบบจำลองนี้มีความซับซ้อนเท่ากับ 36.7 GFLOPs ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณการคำนวณระดับสูงที่ต้องใช้ต่อการประมวลผลหนึ่งภาพ การฝึกสอนแบบจำลองนั้นดำเนินการทั้งหมด 100 epochs ใช้ระยะเวลาประมาณ 699.4 ชั่วโมง เพื่อให้เครือข่ายสามารถเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลได้อย่างเหมาะสมและลดความคลาดเคลื่อนในการทำนาย โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้รุ่น Intel Xeon Silver 4314 ความเร็ว 2.4 GHz เป็นหน่วยประมวลผลกลาง และโปรแกรม Python 3.9.18 ร่วมกับไลบรารี PyTorch 2.2.1+CPU สำหรับการสร้างโมเดลและการคำนวณเชิงเมทริกซ์ การตั้งค่าดังกล่าวช่วยให้การฝึกสอนแบบจำลองเป็นไปอย่างมีเสถียรภาพ แม้จะไม่ได้ใช้หน่วยประมวลผลกราฟิก

(GPU) แต่ยังคงสามารถสร้างผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง ได้ตัวอย่างผลการทดสอบการตรวจหาพื้นผิวที่เสียหายดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการตรวจหาพื้นผิวที่เสียหายด้วยโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์

การวัดประสิทธิภาพอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุควรใช้ชุดข้อมูลทดสอบที่มีป้ายกำกับ (Ground truth) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัลกอริทึมกับค่าที่ถูกต้องในการตรวจจับวัตถุซึ่งแต่ละค่านั้นมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$\mathrm{Re}\,call = \frac{TP}{TP + FN} \tag{1}$$

$$\mathrm{Pr}\,ecision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{2}$$

$$F_1\,Measure = \frac{2 \times \mathrm{Pr}\,ecision \times \mathrm{Re}\,call}{\mathrm{Pr}\,ecision + \mathrm{Re}\,call} \tag{3}$$

โดย TP (True Positives) คือ ตรวจจับวัตถุที่ต้องตรวจจับจริง หรือแบบจำลองตรวจจับวัตถุที่มีอยู่จริง
TN (True Negatives) คือ ไม่ตรวจจับวัตถุที่ไม่ต้องตรวจจับจริง
FP (False Positives) คือ ตรวจจับผิดพลาดวัตถุที่ไม่มีอยู่จริงว่ามีอยู่จริง
FN (False Negatives) คือ ตรวจจับผิดพลาดวัตถุที่มีอยู่จริงว่าไม่มี

Average Precision (AP) คือค่าความแม่นยำเฉลี่ยคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของ Precision กับ Recall หรือคำนวณได้จากสมการ

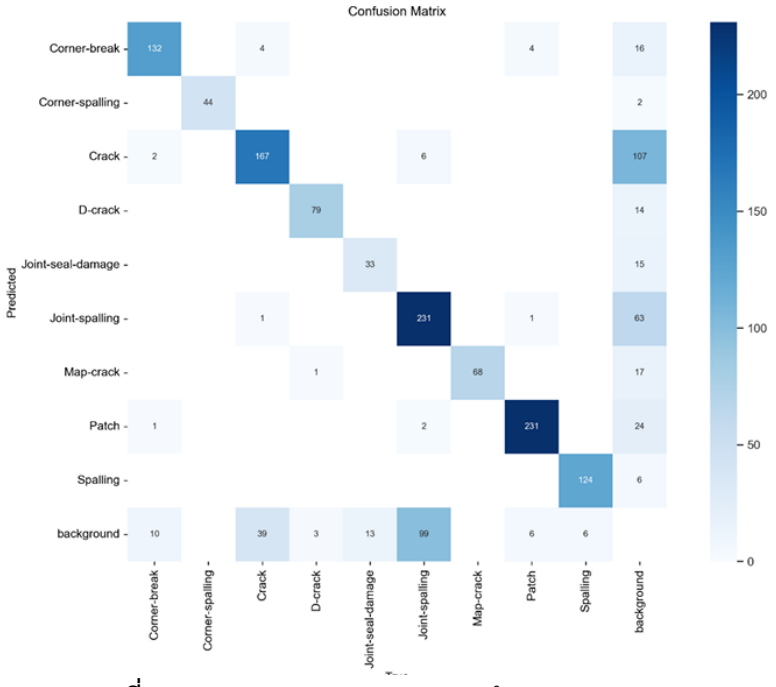
$$AP = \sum_{k=1}^{N} P_k \Delta R_k \tag{4}$$

โดยที่ N คือจำนวนรูปทั้งหมดที่ทำนายออกมาทั้งที่ทำนายถูกและทำนายไม่ถูก
P_k คือค่า Precision ที่ตำแหน่ง k และ ΔR คือการเปลี่ยนแปลงค่า Recall ตำแหน่ง $k-1$ และ k
mean Average Precision (mAP) เป็นการหาค่ากลางของค่าความแม่นยำเฉลี่ยดังแสดงในสมการ

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} AP_k \tag{5}$$

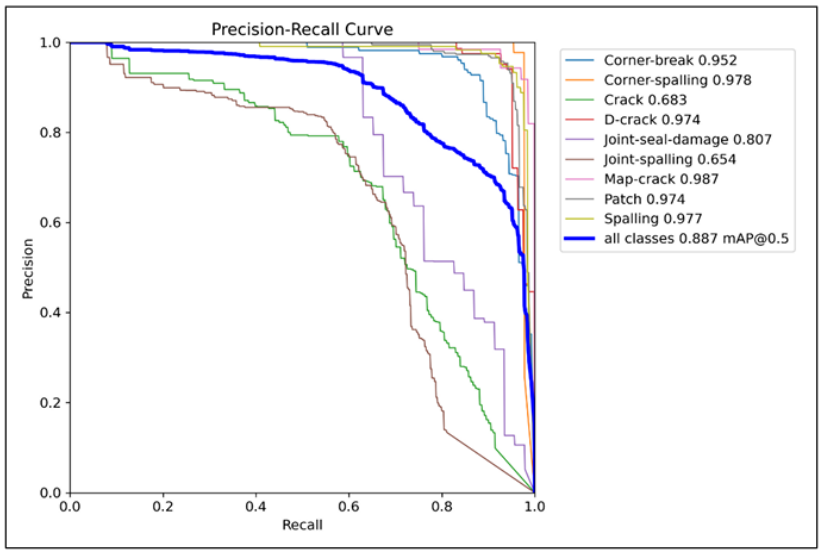
4. ผลการวิจัย

ในส่วนนี้นำเสนอผลการทดลองของแบบจำลอง YOLOv8s ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจจับและจำแนกประเภทความเสียหายบนพื้นผิวทางวิ่งและทางขับของสนามบินทั้ง 9 ประเภท โดยผลการทดสอบดังรูปที่ 4 แสดง Confusion Matrix ของแบบจำลอง YOLOv8s หลังการทดสอบบนชุดข้อมูลที่มีการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) จำนวน 1,226 ภาพ โดยแกนแนวนอน True คือประเภทความเสียหายจริง และแกนแนวตั้ง Predicted คือประเภทที่แบบจำลองทำนาย ผลลัพธ์พบว่าแบบจำลองสามารถจำแนกหลายคลาสได้อย่างแม่นยำ เช่น Map-crack และ Patch ซึ่งมีจำนวนการทำนายถูกต้องสูงสุดที่ 68 และ 231 ครั้งตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความสับสนระหว่างคลาสที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น Crack กับ Joint-spalling และ Joint-seal-damage กับ Spalling ซึ่งสะท้อนถึงความซับซ้อนของลักษณะรอยแตกและเนื้อผิวคอนกรีตในบางประเภท



รูปที่ 4 Confusion Matrix ของแบบจำลอง YOLOv8s

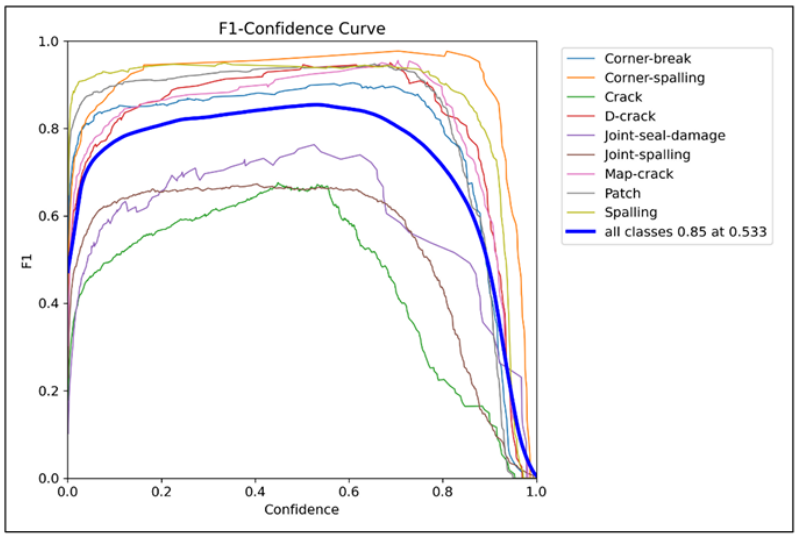
เมื่อทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของการจำแนกในแต่ละคลาสผ่าน Confusion Matrix แล้ว ส่วนต่อไปต้องพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองในเชิงลึกทั้งด้านความแม่นยำ และความครอบคลุมของการตรวจจับเพื่อประเมินว่าระบบสามารถตรวจพบความเสียหายได้ครบถ้วนเพียงใดภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากกราฟ Precision–Recall Curve ซึ่งช่วยสะท้อนความสามารถของแบบจำลองในการจำแนกวัตถุในแต่ละประเภทเมื่อประมวลผลกับข้อมูลจริง โดยกราฟดังกล่าวแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟ Precision–Recall Curve สำหรับแต่ละคลาสของแบบจำลอง YOLOv8s

รูปที่ 5 แสดงกราฟ Precision–Recall Curve สำหรับแต่ละคลาสของแบบจำลอง YOLOv8s โดยค่าความแม่นยำเฉลี่ย mAP@50 ของทุกคลาสรวมอยู่ที่ 0.887 ซึ่งถือว่ามีคุณภาพสูงสำหรับงานตรวจจับวัตถุบนพื้นผิวคอนกรีต กราฟแสดงให้เห็นว่าคลาสที่มี PR Curve อยู่ในระดับสูงและพื้นที่ใต้กราฟมาก ได้แก่ Map-crack, Corner-spalling, Patch และ D-crack ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแม่นยำที่สูงจากตารางผลการทดลอง ในทางตรงกันข้าม คลาส Crack และ Joint-spalling มีเส้นโค้งที่ต่ำกว่าและตกลงเร็วกว่าคลาสอื่น เนื่องจากรูปแบบความเสียหายมีลักษณะกระจายไม่เป็นเอกลักษณ์ และมักมีลักษณะคล้ายคลึงกับคลาสอื่น กราฟนี้ช่วยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพการจำแนกในแต่ละคลาสอย่างชัดเจน

นอกจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Precision และ Recall แล้ว ยังจำเป็นต้องวิเคราะห์พฤติกรรมของแบบจำลองภายใต้ค่าความเชื่อมั่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากค่า Threshold มีผลโดยตรงต่อการตัดสินใจว่าการตรวจจับใดควรยอมรับหรือปฏิเสธในขั้นตอนการทำงานจริง ดังนั้นการใช้กราฟ F1–Confidence Curve ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเป็นการช่วยให้สามารถประเมินความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุมได้อย่างเป็นระบบ รวมถึงช่วยระบุช่วงค่าความเชื่อมั่นที่เหมาะสมที่สุดก่อนนำแบบจำลองไปใช้งานจริง



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า F1 Score และระดับความเชื่อมั่น

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า F1 Score และระดับความเชื่อมั่นของแบบจำลอง YOLOv8s โดยเส้น F1-Confidence Curve ของแต่ละคลาสบ่งชี้ว่าค่าความเชื่อมั่นที่เหมาะสมที่สุด (Optimal threshold) อยู่ประมาณ 0.53 ซึ่งให้ค่า F1 Score เฉลี่ยสูงสุดที่ประมาณ 0.85 การที่หลายคลาสมีเส้นโค้งเรียบและมีค่า F1 สูงในช่วงความเชื่อมั่น 0.4–0.7 แสดงว่าแบบจำลองมีความเสถียรในการทำนาย ในขณะที่คลาส Crack และ Joint-spalling มีค่า F1 ลดลงรวดเร็วเมื่อความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น สะท้อนถึงความยากในการจำแนกความเสียหายประเภทนี้ในสภาวะจริง ดังนั้น กราฟความสัมพันธ์นี้จึงเป็นการช่วยให้สามารถเลือกค่าความเชื่อมั่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานภาคสนาม เพื่อลด false positives และ false negatives ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลทดลองการพัฒนาแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้อัลกอริทึม YOLOv8x ได้รับการประเมินประสิทธิภาพในการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของพื้นผิวทางวิ่งสนามบิน โดยใช้ตัวชี้วัดมาตรฐานในงานตรวจจับวัตถุ (Object Detection Metrics) ได้แก่ Precision, Recall, F1 Score, mAP@50 และ mAP@50–95 ผลการทดลองสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการวัดประสิทธิภาพการตรวจหาวัตถุ

type	Precision	Recall	F1 scores	mAP50	mAP50-95
Corner-break	0.907	0.89	0.898	0.952	0.723
Corner-spalling	0.95	0.977	0.963	0.978	0.875
Crack	0.729	0.602	0.659	0.683	0.287
D-crack	0.94	0.945	0.942	0.974	0.692
Joint-seal-damage	0.957	0.63	0.760	0.807	0.493
Joint-spalling	0.781	0.574	0.662	0.654	0.333
Map-crack	0.87	0.985	0.924	0.987	0.742
Patch	0.931	0.946	0.938	0.974	0.738
Spalling	0.946	0.935	0.940	0.977	0.842

จากผลการประเมิน พบว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับความเสียหายได้อย่างแม่นยำในหลายประเภท โดยมีค่าเฉลี่ย Precision 0.90, Recall 0.84, F1 Score 0.87, mAP@50 0.89, และ mAP@50–95 0.67 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการตรวจจับวัตถุได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูง ในรายละเอียดพบว่าการตรวจความเสียหายประเภท Corner-spalling และ Map-crack มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยได้ค่า mAP@50 เท่ากับ 0.978 และ 0.987 ตามลำดับ แสดงว่าแบบจำลองสามารถจำแนกความเสียหายลักษณะนี้ได้แม่นยำเกือบสมบูรณ์

สำหรับความเสียหายประเภท Crack ซึ่งมีลักษณะเส้นแตกกระจายและใกล้เคียงกับพื้นผิวปกติ ให้ค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีค่า mAP@50–95 เท่ากับ 0.287 รองลงมาคือ Joint-spalling ซึ่งมีค่า mAP@50–95 เท่ากับ 0.333 ปัจจัยดังกล่าวสะท้อนความยากในการจำแนกความเสียหายที่มีรูปแบบไม่ชัดเจนหรือใกล้เคียงกับคลาสอื่น ส่วนประเภท Joint-seal-damage แม้จะมีค่า Recall อยู่ในระดับปานกลาง แต่ยังคงให้ค่า Precision และ mAP ในระดับที่ยอมรับได้ แสดงว่าโมเดลยังสามารถจำแนกคลาสนี้ได้ในระดับเหมาะสม ในขณะที่ประเภท Patch และ Spalling มีผลการตรวจจับอยู่ในระดับสูง โดยมีค่า Precision มากกว่า 0.93 และค่า F1-Score เกิน 0.90 สะท้อนว่าโมเดลสามารถระบุลักษณะการซ่อมหรือการหลุดร่อนของพื้นผิวได้อย่างถูกต้องและสม่ำเสมอ โดยสรุปแล้วผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง YOLOv8s ที่พัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถตรวจจับความเสียหายของพื้นผิวทางวิ่งได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

5. สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อจำแนกและตรวจจับความเสียหายบนพื้นผิวทางวิ่งและทางขับของสนามบิน ซึ่งพบว่าความเสียหายมีอยู่หลากหลายลักษณะ โดยจากการเก็บข้อมูลแบ่งออกได้เป็น 9 ประเภท ได้แก่ Corner-break, Corner-spalling, Crack, D-crack, Joint-seal-damage, Joint-spalling, Map-crack, Patch, และ Spalling โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกด้วยอัลกอริทึม YOLOv8x เพื่อพัฒนาแบบจำลองตรวจจับวัตถุสำหรับการจำแนกความเสียหายเหล่านี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับและจำแนกประเภทของความเสียหายได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่า Precision, Recall, F1 Score, และ mAP อยู่ในระดับสูง สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการนำไปใช้งานจริงเพื่อช่วยตรวจสอบสภาพพื้นผิวทางวิ่งแบบใกล้เวลาจริง ซึ่งจะช่วยลดภาระของเจ้าหน้าที่ซ่อมบำรุงภาคพื้น เพิ่มความปลอดภัยของการปฏิบัติการบิน และสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งในสนามบินพลเรือนและสนามบินทางทหารในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนจากหลายหน่วยงานที่ให้การอุปถัมภ์ทั้งด้านงบประมาณ คำแนะนำทางวิชาการ และทรัพยากรในการดำเนินงาน คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณกองทัพอากาศ ที่ให้การสนับสนุนด้านนโยบาย และการอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย รวมถึงให้โอกาสในการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับระบบงานด้านการบินและการป้องกันประเทศของกองทัพอากาศ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม (วท.กห.) และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการวิจัย และคำปรึกษาด้านเทคโนโลยี รวมถึงการประสานความร่วมมือกับหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Krizhevsky, A.; Sutskever, I.; Hinton, G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In Proceedings of the Advances In Neural Information Processing Systems, Lake Tahoe, NV, USA, 3–6 December 2012; pp. 1097–1105.

[2] Simonyan, K.; Zisserman, A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv2014, arXiv:1409.1556.

[3] He, K.; Zhang, X.; Ren, S.; Sun, J. Deep Residual Learning for Image Recognition. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, 27–30 June 2016; pp. 770–778.

[4] Kim, K.W.; Hong, H.G.; Nam, G.P.; Park, K.R. A Study of Deep CNN-Based Classification of Open and Closed Eyes Using a Visible Light Camera Sensor. Sensors 2017, 17, 1534, doi:10.3390/s17071534.

[5] Satat, G.; Tancik, M.; Gupta, O.; Heshmat, B.; Raskar, R. Object classification through scattering media with deep learning on time resolved measurement. Opt. Express 2017, 25, 17466–17479.

[6] Yao, Y.; Tian, B.; Wang, F. Coupled Multivehicle Detection and Classification WithPrior Objectness Measure.IEEE Trans. Veh. Technol. 2017, 66, 1975–1984.

[7] Li, X.; Li, L.; Flohr, F.; Wang, J.; Xiong, H.; Bernhard, M.; Pan, S.; Gavrila, D.M.; Li, K. A unified framework for concurrent pedestrian and cyclist detection. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2017, 18, 269–281.

[8] Chen, L.; Hu, X.; Xu, T.; Kuang, H.; Li, Q. Turn Signal Detection During Nighttime by CNN Detector and Perceptual Hashing Tracking. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2017, 99, 1–12.

[9] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., pp. 779–788, 2016.

[10] US. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fifth Revised Edition). Report No.FHWA-HRT-13-092, May 2014.

[11] Dale Harrington, et.al. (2018). Guide for Concrete Pavement Distress Assessments and Solutions: Identification, Causes, Prevention, and Repair. Iowa State University, 2711 South Loop Drive, Suite 4700.

การศึกษาการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้า สำหรับแท็กซี่ไฟฟ้า ภายในเขตสนามบิน

FEASIBILITY STUDY OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATION FOR ELECTRIC VEHICLE TAXI IN AIRPORT

พงศ์ธัช ตันสกุล[1]

[1]สหสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[1]**Pongtouch Tonsakul**

[1]ENERGY TECHNOLOGY & MANAGEMENT CHULALONGKORN UNIVERSITY

E-mail: 6682013120@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินและความอ่อนไหวของโครงการสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับแท็กซี่ไฟฟ้า (EV Taxi) ที่ท่าอากาศยานเป็นผู้ลงทุนเอง เพื่อสนับสนุนนโยบายการเปลี่ยนผ่านสู่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลการใช้งานจริง 12 เดือน (ส.ค. 2024 - ก.ค. 2025) มาวิเคราะห์รูปแบบความต้องการ ซึ่งพบว่าแปรผันตามฤดูกาลท่องเที่ยว

การวิเคราะห์จำลองสถานี 4 ทางเลือก (เครื่องอัดประจุ 180 kW สองหัวชาร์จ จำนวน 2, 3, 4 และ 5 เครื่อง) ภายใต้อายุโครงการ 10 ปี และใช้โครงสร้างค่าไฟ EV Low Priority ผลการศึกษาพบว่าทุกทางเลือกมีความคุ้มค่าในการลงทุน โดยทางเลือกที่ 1 (2 เครื่อง) ให้ผลตอบแทนสูงสุด รองรับได้ 192 คัน/วัน มีกระแสเงินสดสุทธิ 7.9 ล้านบาท, อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 35% และระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน การวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าไฟ (+/-10%) พบว่า หากค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10% จะส่งผลให้ทางเลือกที่ 4 (5 เครื่อง) รองรับได้ 480 คัน/วัน มีกระแสเงินสดสุทธิ - 0.43 ล้านบาท, อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 9.04% และระยะเวลาคืนทุน 7 ปี 9 เดือน ไม่คุ้มค่าในการลงทุน เพราะความเสี่ยงด้านการลงทุนสูงกว่าความต้องการใช้งาน

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวพบว่า หากค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10% จะส่งผลให้

คำสำคัญ: สถานีอัดประจุไฟฟ้า, ยานยนต์ไฟฟ้า, กระแสเงินสดสุทธิ, อัตราผลตอบแทนภายใน, ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

This study evaluates the financial viability and sensitivity of an airport-invested EV charging station project for EV Taxis, supporting the policy of transitioning to electric vehicles. Based on 12 months of operational data (Aug 2024 - Jul 2025), demand patterns were analyzed, revealing fluctuations corresponding to tourist seasons.

Four scenarios were simulated (2, 3, 4, and 5 units of 180 kW dual-nozzle chargers) over a 10-year project life under the EV Low Priority tariff. The study found all scenarios to be profitable. Scenario 1 (2 chargers) yielded the highest returns, serving 192 vehicles/day with a Net Present Value (NPV) of 7.9 million THB, an Internal Rate of Return (IRR) of 35%, and 2 years 9 months payback period. The sensitivity analysis on electricity tariffs (+/-10%) indicated that if the electricity cost increases by 10%, Scenario 4 (5 chargers), which serves 480 vehicles/day, would yield an NPV of - 0.43 million THB, an IRR of 9.04%, and a payback period of 7 years and 9 months, rendering it financially unviable. This lack of viability is due to the higher investment risk exceeding the projected operational demand.

Keywords: Electric vehicle charging station; Electric vehicles; Net cash flow; Internal rate of return (IRR); Payback period.

1.บทนำ

ปัจจุบัน บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) มีนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม “Green Airport” และ มีเป้าหมายที่จะเป็นสนามบินที่ปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Carbon Airport) ภายในปี ค.ศ. 2043 โดยหนึ่งในแผนดำเนินงานสำคัญคือ การเปลี่ยนยานยนต์สันดาปที่ให้บริการภายในสนามบินทั้งหมดเป็นยานยนต์ไฟฟ้าภายในปี ค.ศ. 2028 เช่น อุปกรณ์ให้บริการภาคพื้นในเขต Airside รถยนต์ปฏิบัติงาน รถยนต์รับส่งพนักงาน รถบัสสาธารณะภายในและระหว่างสนามบิน รวมถึงยานยนต์ขนส่งสาธารณะประเภทต่าง ๆ

ในส่วนของยานยนต์ขนส่งสาธารณะ โดยเฉพาะรถแท็กซี่นั้น ทอท. ได้ตั้งเป้าหมายชัดเจนที่จะเปลี่ยนรถแท็กซี่ที่ให้บริการทั้งหมดเป็นยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle EV) ภายในปี ค.ศ. 2028 เช่นกัน ปัจจุบันในส่วนของบริการรถแท็กซี่ ลงทะเบียนในระบบมากกว่า 5,000 คัน และให้บริการในแต่ละวันมากกว่า 2,500 คัน โดยในปี ค.ศ. 2024 มีรถแท็กซี่ไฟฟ้า (EV Taxi) ที่ให้บริการแล้วจำนวน 300 คัน ซึ่งการส่งเสริมการใช้ EV Taxi ถือเป็นแนวทางสำคัญในการลดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะภายในเขตสนามบิน

ทั้งนี้ หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้ประกอบการแท็กซี่ในการเปลี่ยนมาใช้ EV คือ ความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานด้านการอัดประจุไฟฟ้า หากสถานีอัดประจุมีจำนวนไม่เพียงพอหรือเข้าถึงยาก ย่อมเป็นอุปสรรคสำคัญที่ขัดขวางการเปลี่ยนผ่านสู่การใช้ EV อย่างเต็มรูปแบบ โดยเฉพาะในพื้นที่อย่างสนามบิน ซึ่งความต้องการอัดประจุ EV Taxi จำนวนมาก และจำเป็นต้องใช้สถานีอัดประจุแบบเร็ว (DC Fast Charger) ซึ่งมีต้นทุนการลงทุนสูง จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการลงทุนสถานีอัดประจุภายในเขตสนามบินให้เหมาะสม ทั้งนี้การวางแผนดังกล่าวไม่เพียงแต่ต้องศึกษาพฤติกรรมการใช้สถานีอัดประจุของ EV Taxi เท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์อย่างรอบด้าน ได้แก่ ต้นทุนการลงทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน รายได้ที่อาจจะเกิดขึ้น ตลอดจนความเสี่ยงจากความผันผวนของค่าไฟฟ้าสำหรับ EV taxi ซึ่งผลลัพธ์จากการศึกษาปัจจัยเหล่านี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในการสนับสนุนการใช้ EV taxi ต่อไป

2.วัตถุประสงค์และประเด็นการวิจัย

วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงิน และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการสถานีอัดประจุไฟฟ้าในพื้นที่ท่าอากาศยานสำหรับให้บริการ (EV Taxi) โดยท่าอากาศยานเป็นผู้ลงทุนเอง

3.ขอบเขตและข้อจำกัด

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้า สำหรับให้บริการ EV Taxi ภายในเขตสนามบิน เพื่อรองรับการใช้งานที่ EV taxi จำนวน 300 คัน

3.1 การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้งานสถานีอัดประจุ (Charging Behavior Profile) ศึกษาลักษณะการใช้งานจริงของสถานีอัดประจุในพื้นที่สนามบิน โดยเก็บข้อมูลช่วงเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2567 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2568 เช่น ยี่ห้อและรุ่นของ EV taxi เวลาที่มาใช้บริการ และปริมาณการใช้เครื่องอัดประจุ

3.2 พิจารณาการติดตั้ง DC Fast Charger จำนวนแตกต่างกัน 4 กรณี เพื่อประเมินความต้องการใช้ไฟฟ้าของสถานีอัดประจุ และขีดความสามารถในการรองรับผู้มาใช้งาน

3.3 วิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงิน เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

3.4 วิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าไฟฟ้าของสถานีอัดประจุ

4.วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาความคุ้มค่าทางการเงินของการติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับ EV Taxi ภายในเขตสนามบิน มีวิธีการดำเนินการศึกษา ดังนี้

4.1 เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการประเมินความคุ้มค่าทางการเงิน

4.1.1ข้อมูลด้านเทคนิค

4.1.1.1 พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา

พื้นที่ตั้งโครงการ บริเวณลานจอดแท็กซี่ ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีขนาดลานจอดรอคิวรถ Taxi ขนาด 500 คัน ทำให้มีความสะดวกในการให้บริการ และเพียงพอต่อจำนวน EV Taxi จำนวน 300 คัน สำหรับการศึกษานี้ สำหรับการศึกษานี้ นอกจากนี้ พื้นที่ตั้งโครงการดังกล่าวยังอยู่ใกล้กับระบบไฟฟ้า 24kV ทำให้เหมาะสมในการก่อสร้างและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า [1]

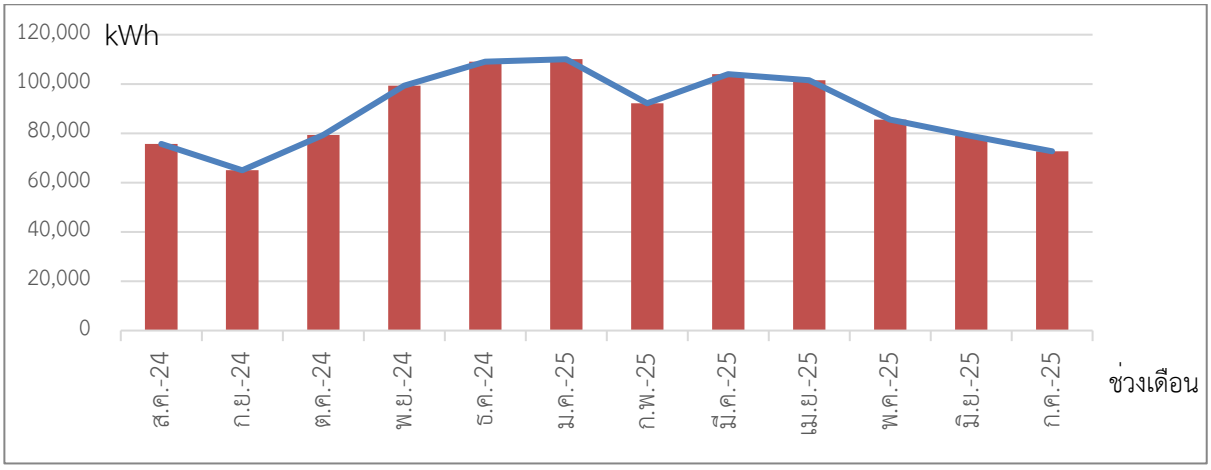
รูปที่ 1 แสดงพื้นที่ติดตั้งสถานีอัดประจุแท็กซี่ EV

4.1.1.2 พฤติกรรมการอัดประจุของ EV Taxi

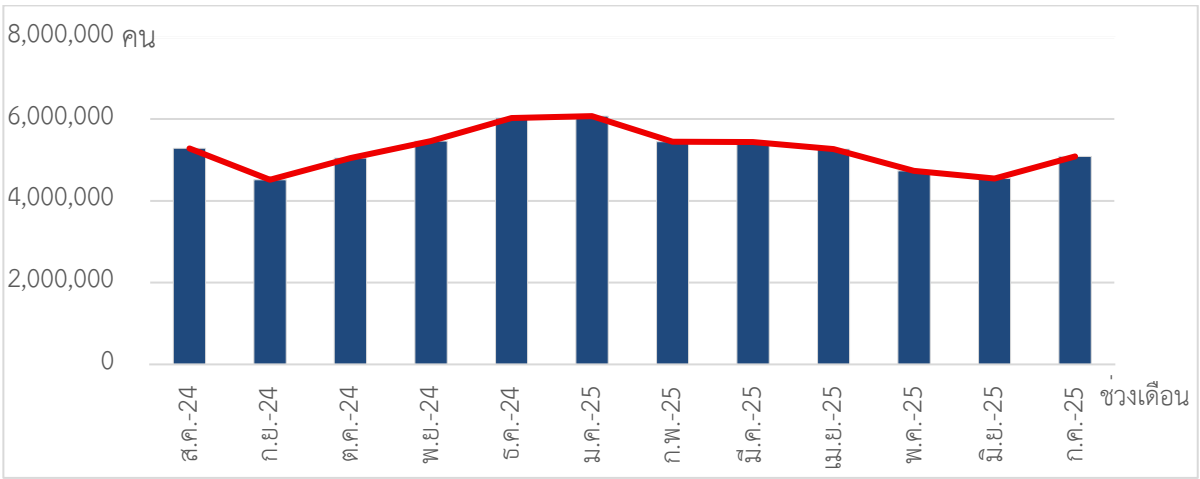
เก็บรวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลการอัดประจุไฟฟ้าของผู้ใช้บริการ จากสถานีปัจจุบัน (DC Fast Charger 40 kW จำนวน 20 เครื่อง) ระหว่าง สิงหาคม พ.ศ. 2567 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2568 เพื่อประเมินปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงและปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมรายเดือน เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการใช้งาน

จากการวิเคราะห์ลักษณะการใช้งานจริงของสถานีอัดประจุในพื้นที่สนามจากกราฟที่ 1 และกราฟที่ 2 พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีอัดประจุยังความสอดคล้องกับปริมาณผู้โดยสารอย่างมีนัยยะ ช่วงนอกฤดูกาลท่องเที่ยว (ช่วงฤดูฝน เดือน มิ.ย. ถึง ต.ค.) จะมีผู้โดยสารน้อย มีผลทำให้ปริมาณการใช้สถานีอัดประจุน้อย และช่วงฤดูกาลท่องเที่ยว (ช่วงฤดูร้อน เดือน มี.ค. ถึง พ.ค. และฤดูหนาว เดือน พ.ย. ถึง ก.พ. ที่มีผู้โดยสารมาก จะมีปริมาณการใช้สถานีอัดประจุก็เพิ่มมากขึ้น

กราฟที่ 1 การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีอัดประจุ (ระหว่าง สิงหาคม พ.ศ. 2567 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2568)

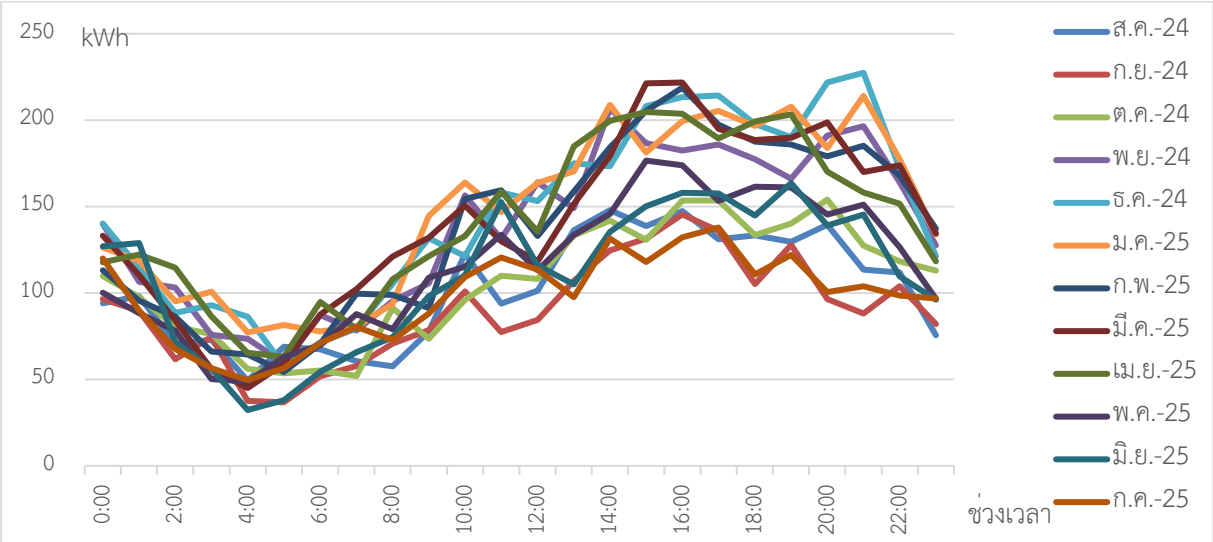


กราฟที่ 2 ปริมาณผู้โดยสาร (ระหว่าง สิงหาคม พ.ศ. 2567 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2568) [5]



กราฟที่ 3 ค่าเฉลี่ยพลังงานชาร์จต่อชั่วโมง ตลอด 1 วัน ของแต่ละเดือนจะพบว่ามีปริมาณการใช้สูงมากในเวลากลางวันซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการเดินทางของผู้โดยสาร ซึ่งมีผู้ใช้บริการสูงในช่วง 9.00 – 24.00 น.

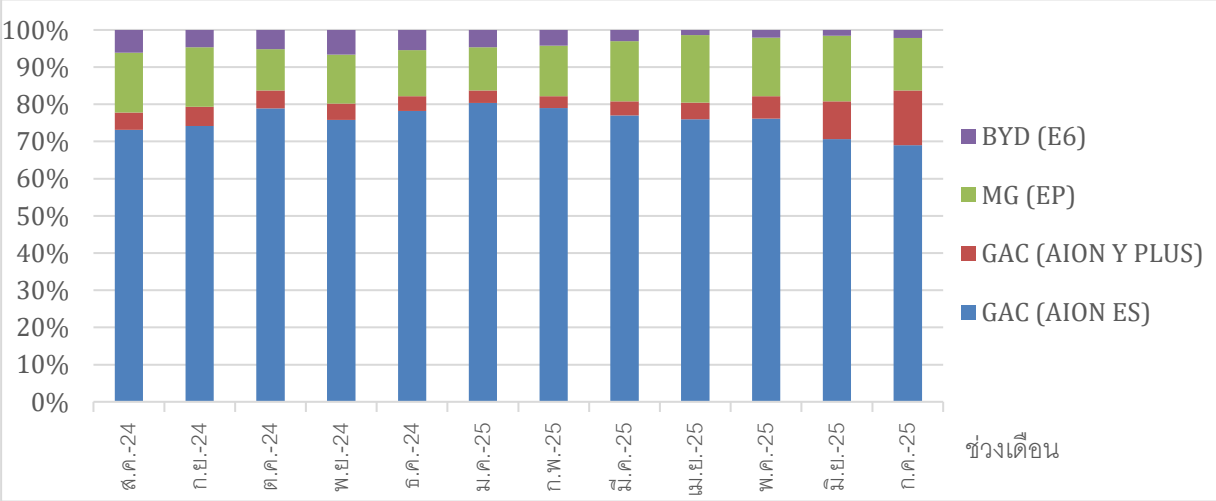
กราฟที่ 3 ค่าเฉลี่ยพลังงานชาร์จต่อชั่วโมง ตลอด 1 วัน (สิงหาคม พ.ศ. 2567 - กรกฎาคม พ.ศ. 2568)



4.1.1.3 ข้อมูลจำเพาะ ของรถ EV Taxi

สำรวจข้อมูลรถยนต์ EV Taxi ได้แก่ ยี่ห้อ รุ่น ขนาดแบตเตอรี่ และความสามารถในการชาร์จของแบตเตอรี่ ทั้งนี้ จากข้อมูลในตลาดรถยนต์รุ่นใหม่ความเร็วในการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ EV Taxi มีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ขนาดแบตเตอรี่ยังไม่สามารถเพิ่มได้อย่างมีนัยยะสำคัญมากนัก อันเกิดมาจากเทคโนโลยีการผลิตทำให้น้ำหนักและขนาดแบตเตอรี่ยังไม่เปลี่ยนไปมาก จากตารางที่ 1 ตารางแสดงข้อมูลเทคนิคขนาดแบตเตอรี่ และการรองรับการชาร์จ แบบ DC Fast Charge และกราฟที่ 5 สัดส่วน รุ่นรถแท็กซี่ พบว่า EV Taxi GAC (AION Y Plus) ที่รองรับการอัดประจุ 90 kW มีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยยะ

กราฟที่ 4 สัดส่วน รุ่นรถแท็กซี่



ตารางที่ 1 ตารางแสดงข้อมูลเทคนิคขนาดแบตเตอรี่ และการรองรับการชาร์จ แบบ DC Fast Charge [4]

EV Taxi	สัดส่วน EV TAXI (%)	Battery (kWh)	การรองรับการชาร์จ DC	ปริมาณการชาร์จ 30-80 % (kWh)	ชาร์จ 30-80 % ใช้เวลา (นาที)
GAC (AION ES)	71%	55.20	60 kW	27.60	27.6
GAC (AION Y Plus)	12%	50.66	90 kW	25.33	16.88
MG (EP)	14%	50.30	50 kW	25.15	30.18
BYD (E6)	3%	61.40	60 kW	30.70	30.7
เฉลี่ยตามขนาด		54.39	65 kW	27.19	26.34

4.1.1.4 รูปแบบการติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้า

กำหนดรูปแบบสถานีอัดประจุไฟฟ้า ตามรูปแบบมาตรฐานการเชื่อมต่อสถานีจากคู่มือประกอบกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า(EV) โดยสำนักงานกำกับกิจการพลังงาน (2561) รูปแบบที่ 1 สถานีอัดประจุไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจากระบบเครือข่ายไฟฟ้า (Grid Connected)

4.1.1.5 การเชื่อมต่อระบบกับเครือข่าย

ตั้งสถานีไฟฟ้าเชื่อมกับระบบเครือข่ายไฟฟ้า 24 KV กับการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งมีการขายไฟฟ้าให้สถานีอัดประจุด้วยรูปแบบ EV Low Priority เป็นการสนับสนุนการสร้างสถานีอัดประจุของการไฟฟ้านครหลวง ตามนโยบายของ สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.)

4.1.1.6 ข้อกำหนดของเครื่องอัดประจุไฟฟ้า

กำหนดรูปแบบเครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบ DC Fast Charger 180 kW ชนิด CCS Type 2 ที่มีจำนวนหัวจ่ายแบบเร็ว 2 หัวจ่าย ซึ่งจะสามารถรองรับการชาร์จพร้อมกันได้ที่ 90kW ต่อหัวจ่าย และมีสามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าของหัวจ่ายทั้งสองได้ เนื่องจากในอนาคตหากแบตเตอรี่ของแท็กซี่ EV ที่เข้ามาใช้บริการรองรับความเร็วในการชาร์จมากขึ้น

จากข้อมูลขนาดของแบตเตอรี่ของ EV Taxi ในปัจจุบัน พบว่ามีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 54 kWh เมื่อกำหนดการชาร์จ รถเริ่มชาร์จที่ Soc 30% และชาร์จได้ไม่เกิน 80% จะทำให้พลังงานต่อรอบการชาร์จนั้นอยู่ที่ประมาณ 27 kWh ซึ่งเมื่อนำมาชาร์จที่หัวชาร์จขนาด 90kW จะใช้เวลาชาร์จไม่เกิน 30 นาที โดยได้ทำการสรุปเป็นตาราง ความสามารถในการชาร์จจริงของเครื่องอัดประจุหนึ่งเครื่องได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความสามารถในการชาร์จของเครื่องอัดประจุ

ชาร์จรถ EV Taxi SOC30-80%		DC Fast Charger 180 kW ชนิด 2 หัวชาร์จ			
ใช้เวลา (นาที)	กำลังไฟที่ (kWh)	รองรับรถได้ (คัน / ชั่วโมง)	รองรับได้สูงสุดที่ (kWh)	พลังงานที่ชาร์จได้จริง (kWh)	Utilization สูงสุด (%)
30	27	4	360	108	30%

4.1.1.7 จำนวนเครื่องอัดประจุ และช่องจอด

พิจารณาการติดตั้งเครื่องอัดประจุ DC Fast Charger ที่แตกต่างกัน 4 กรณีศึกษา ได้แก่

กรณีที่ 1 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ DC Fast Charger จำนวน 2 เครื่อง

กรณีที่ 2 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ DC Fast Charger จำนวน 3 เครื่อง

กรณีที่ 3 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ DC Fast Charger จำนวน 4 เครื่อง

กรณีที่ 4 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ DC Fast Charger จำนวน 5 เครื่อง

4.1.2 ข้อมูลด้านการเงิน

4.1.2.1 ต้นทุนการลงทุน (Capital Expenditure: CAPEX)

ซึ่งมีอุปกรณ์หลัก ได้แก่ เครื่องอัดประจุขนาด 180 kW, หม้อแปลง, Meter TOU, ระบบไฟฟ้า 24kV และตู้ระบบไฟฟ้า (MDB)พร้อมระบบแรงต่ำ ข้อมูลราคาต่อหน่วยของอุปกรณ์แต่ละประเภทอ้างอิงจากการสืบราคาบริษัทผู้ผลิต ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลต้นทุนการลงทุนติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 1 – 4

	อุปกรณ์	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3		กรณี 4	
		ชุด	ราคา (บาท)	ชุด	ราคา (บาท)	ชุด	ราคา (บาท)	ชุด	ราคา (บาท)
1	METER TOU	1	300,000	1	300,000	1	300,000	1	300,000
2	เครื่องอัดประจุ 180 kW DC Fast Charger	2	2,200,000	3	3,300,000	4	4,400,000	5	5,500,000
3	อุปกรณ์เชื่อมต่อระบบ 24kV	1	2,000,000	1	2,000,000	1	2,000,000	1	2,000,000
4	หม้อแปลง 500/800/1000/ 1250 kVA	1	500,000	1	700,000	1	900,000	1	1,100,000
5	ตู้ระบบไฟฟ้าหลัก	1	1,000,000	1	1,100,000	1	1,200,000	1	1,300,000
	Total CAPEX		6,000,000		7,400,000		8,800,000		10,200,000

4.1.2.2 ต้นทุนการดำเนินงาน (Operating Expenditure: OPEX)

แบ่งได้เป็นสองส่วน คือ ค่าใช้จ่ายคงที่ Fixed Cost และ ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable cost)

4.1.2.2.1 ค่าใช้จ่ายคงที่ Fixed Cost เป็นค่าใช้จ่ายที่ ไม่เปลี่ยนตามปริมาณการใช้บริการ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายเงินเดือนพนักงาน (มีการปรับขึ้นค่าจ้างประจำปี5%), ค่าสาธารณูปโภค, ค่าประกัน, ค่าบำรุงรักษา

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายเงินเดือนพนักงาน

ตำแหน่ง	เงินเดือน(บาท)	จำนวน (คน)	รวม(บาท)
ผู้บริหารโครงการ	50,000	1	50,000
วิศวกรบำรุงรักษา	30,000	1	30,000
ช่างบำรุงรักษาระบบ	20,000	1	20,000
พนักงานบัญชีและธุรการ	18,000	1	18,000
เงินเดือนรวม			158,000

ตารางที่ 5 ค่าบำรุงรักษาประจำปี

รายการ	อุปกรณ์	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3		กรณี 4	
		ชุด	ราคา (บาท)	ชุด	ราคา (บาท)	ชุด	ราคา (บาท)	ชุด	ราคา (บาท)
1	RMU	1	60,000	1	60,000	1	60,000	1	60,000
2	TR	1	50,000	1	50,000	1	50,000	1	50,000
3	MDB	1	25,000	1	25,000	1	25,000	1	25,000
4	Charger 180kW	2	50,000	3	50,000	4	50,000	5	50,000
	Total Maintenance Cost		235,000		285,000		335,000		385,000

ตารางที่ 6 ตัวอย่างต้นทุนการดำเนินงาน (Operating Expenditure: OPEX) ของกรณี ที่ 4

ปี	ค่าเงินเดือน (บาท)	ค่า Internet (บาท)	ค่าประกัน (บาท)	ค่าบำรุงรักษา (บาท)	Total (บาท)
1	1,896,000.00	21,600.00	100,000.00	385,000.00	2,402,600.00
2	1,990,800.00	21,600.00	100,000.00	385,000.00	2,497,400.00
3	2,090,340.00	21,600.00	100,000.00	385,000.00	2,596,940.00
4	2,194,857.00	21,600.00	100,000.00	385,000.00	2,701,457.00
5	2,304,599.85	21,600.00	100,000.00	385,000.00	2,811,199.85
6	2,419,829.84	21,600.00	100,000.00	385,000.00	2,926,429.84
7	2,540,821.33	21,600.00	100,000.00	385,000.00	3,047,421.33
8	2,667,862.40	21,600.00	100,000.00	385,000.00	3,174,462.40
9	2,801,255.52	21,600.00	100,000.00	385,000.00	3,307,855.52
10	2,941,318.30	21,600.00	100,000.00	385,000.00	3,447,918.30

4.1.2.2.2 ค่าใช้จ่ายคงที่ ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable cost) ค่าใช้จ่ายที่ แปรผันตามปริมาณการใช้บริการโดยตรง ได้แก่ ต้นทุนค่าไฟฟ้า(ซึ่งรวมค่าความสูญเสียในระบบไฟฟ้า 7%) ค่าบริการระบบจัดการสถานีอัดประจุ และค่าใช้จ่าย QR / Bank payment

ตารางที่ 7 ตัวอย่างค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable cost) ของกรณีที่ 4

ปี	ต้นทุนค่าไฟ			ค่าระบบ Back End ,Payment		Total (บาท)
	ปริมาณการใช้ไฟ (kWh) + Loss7%	ค่าไฟต่อหน่วย (บาท)	ค่าไฟรวม (บาท)	ค่าบริการ (บาท)	ค่าบริการรวม (บาท)	
1	1,148,420.95	2.9162	3,349,025.17	0.30	321,987.18	3,671,012.36
2	1,205,842.00	2.9162	3,516,476.43	0.30	338,086.54	3,854,562.97
3	1,266,134.10	2.9162	3,692,300.25	0.30	354,990.87	4,047,291.12

4	1,329,440.80	2.9162	3,876,915.27	0.30	372,740.41	4,249,655.68
5	1,395,912.84	2.9162	4,070,761.03	0.30	391,377.43	4,462,138.46
6	1,465,708.48	2.9162	4,274,299.08	0.30	410,946.30	4,685,245.39
7	1,538,993.91	2.9162	4,488,014.04	0.30	431,493.62	4,919,507.66
8	1,615,943.60	2.9162	4,712,414.74	0.30	453,068.30	5,165,483.04
9	1,696,740.78	2.9162	4,948,035.48	0.30	475,721.72	5,423,757.19
10	1,781,577.82	2.9162	5,195,437.25	0.30	499,507.80	5,694,945.05

4.1.2.3 ต้นทุนการเปลี่ยนอุปกรณ์เมื่อครบอายุการใช้งาน

ประกอบด้วย เครื่อง DC Fast Charger ทดแทนของเดิมที่สิ้นสุดอายุการใช้งานเป็นเวลา 5 ปี โดยจะเปลี่ยนในปีที่ 6

4.1.2.4 รายรับ (Revenue) ประกอบด้วยค่าพลังงานที่ EV Taxi เข้ามาใช้บริการในอัตราหน่วยละ 7.5 บาท โดยตั้งสมมติฐาน ปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นปีละ 5% โดยพิจารณาจากอัตราการปลดระวาง Taxi และการเติบโตของ EV Taxi

ตารางที่ 8 ตัวอย่างรายได้จากการให้บริการสถานีอัดประจุ ของกรณีที่ 4

ปี	ปริมาณไฟที่ขายได้ (kWh)	ค่าชาร์จ (บาท/ kWh)	รายรับรวม (บาท)
1	1,073,290.61	7.5	8,049,680.00
2	1,126,955.14	7.5	8,452,164.00
3	1,183,302.89	7.5	8,874,772.00
4	1,242,468.04	7.5	9,318,510.00
5	1,304,591.44	7.5	9,784,436.00
6	1,369,821.01	7.5	10,273,658.00
7	1,438,312.06	7.5	10,787,340.00
8	1,510,227.67	7.5	11,326,708.00
9	1,585,739.05	7.5	11,893,043.00
10	1,665,026.00	7.5	12,487,695.00

4.2. การประเมินความคุ้มค่าทางด้านการเงิน

การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินใช้แบบจำลองกระแสเงินสดคิดลด (Discounted Cash Flow Model) ในการพิจารณาเกณฑ์การลงทุนโครงการ โดยมีตัวชี้วัด ได้แก่

4.2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net Present Value: NPV) [2] คือเป็นการคำนวนหาผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับกับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่ายของโครงการ ถ้า NPV มีค่ามากกว่า 0 แสดงถึงโครงการมีความเหมาะสมในการลงทุน ค่า NPV ยิ่งสูงยิ่งแสดงถึงความคุ้มค่าในการลงทุนสูง

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{CF_0}{(1+r)^0}$$

CF_0 : เงินลงทุนเริ่มต้น (มักเป็นค่าลบ)

CF_t : กระแสเงินสดสุทธิที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละงวดที่

t : (ปีที่ 1, 2, 3, ...)

r : อัตราคิดลด (Discount Rate) หรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ

n : จำนวนงวดทั้งหมด

4.2.2 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal rate of return: IRR) [2] คืออัตราดอกเบี้ยที่ใช้ในการคิดลด เพื่อให้มูลค่าปัจจุบันมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงเป็นอัตราร้อยละ หากโครงการมีอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการสูงแสดงถึงโครงการนั้นมีความคุ้มค่าในการลงทุนสูง

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{CF_0}{(1+r)^0} = 0$$

4.2.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) [3] คือระยะเวลาคืนทุนของโครงการโดยปรับกระแสเงินสดสุทธิเป็นมูลค่าปัจจุบัน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}}$$

4.3. การประเมินความอ่อนไหวทางเศรษฐศาสตร์ (Sensitivity analysis)

ประเมินความอ่อนไหวทางเศรษฐศาสตร์ ที่มีผลต่อความเป็นไปได้คุ้มค่าทางด้านการเงิน โดยพิจารณาปรับอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุอีก 2 อัตราจากอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุปัจจุบันแบบ Low Priority ที่ 2.9162 บาทต่อหน่วย ได้แก่ อัตราลดลง 10% และเพิ่มขึ้น 10% ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง

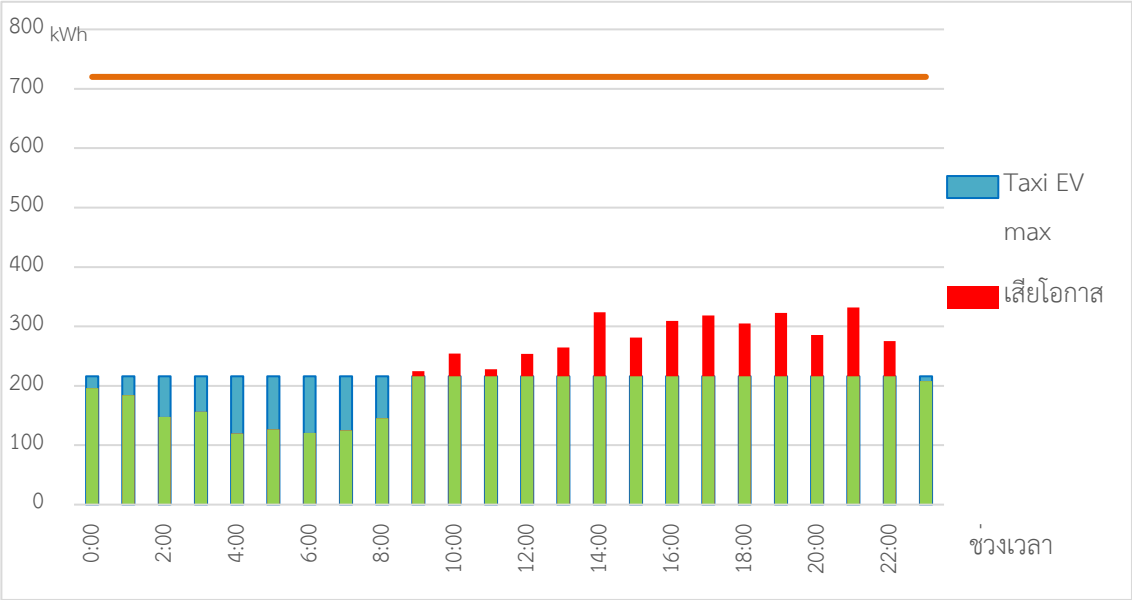
5.ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตารางที่ 9 ความสามารถในการชาร์จของเครื่องอัดประจุ 4 กรณี

DC Fast Charger 180 kWชนิด 2 หัวจ่าย (เครื่อง)	รองรับรถได้ (คัน / ชั่วโมง)	พลังงานสูงสุดที่ชาร์จได้จริง (kWh)	รองรับได้สูงสุดที่ (kWh)	Utilization สูงสุด (%)
2	8	216	720	30%
3	12	324	1080	30%
4	16	432	1440	30%
5	20	540	1800	30%

เมื่อพิจารณาจากพฤติกรรมการใช้งานของแต่วัน และความสามารถในการชาร์จของเครื่องอัดประจุ พบว่าในบางช่วงเวลาสถานีอัดประจุหนาแน่นที่เกินความสามารถการรองรับของสถานีอัดประจุทำให้เกิดการเสียโอกาส

กราฟที่ 5 แบบจำลองพฤติกรรมการชาร์จของสถานีอัดประจุช่วงเดือน มกราคม ค.ศ. 2033



เมื่อนำพฤติกรรมการใช้สถานีอัดประจุของ EV Taxi และความสามารถในการชาร์จของเครื่องอัดประจุ มาพิจารณาการติดตั้งทั้ง 4 กรณี ได้สรุปข้อมูลความสามารถในการรองรับดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 ข้อมูลความสามารถในการรองรับ กรณีที่ 1 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ 2 เครื่อง 4 ช่องจอด

ปี	ขายได้ (kWh)	ไม่เพียงพอ (kWh)	ไม่ได้ใช้ (kWh)	Utilization (%)	Lost Opportunity (%)
1	1,072,330.56	960.05	5,233,909.39	17.00%	0.02%
2	1,123,223.21	3,731.92	5,180,244.86	17.81%	0.06%
3	1,173,402.28	9,900.62	5,123,897.11	18.60%	0.16%
4	1,222,965.25	19,502.79	5,064,731.96	19.39%	0.31%
5	1,271,335.89	33,255.56	5,002,608.56	20.16%	0.53%
6	1,318,991.24	50,829.78	4,937,378.99	20.91%	0.81%
7	1,366,281.54	72,030.53	4,868,887.94	21.66%	1.14%
8	1,412,397.88	97,829.79	4,796,972.33	22.39%	1.55%
9	1,456,250.07	129,488.98	4,721,460.95	23.09%	2.05%
10	1,498,642.00	166,384.00	4,642,174.00	23.76%	2.64%
รวม	12,915,819.92	583,914.00	49,572,266.08		
เฉลี่ย				20.48%	0.93%

ตารางที่ 11 ข้อมูลความสามารถในการรองรับ กรณีที่ 2 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ 3 เครื่อง 6 ช่องจอด

ปี	ขายได้ (kWh)	ไม่เพียงพอ (kWh)	ไม่ได้ใช้ (kWh)	Utilization (%)	Lost Opportunity (%)
1	1,073,290.61	0.00	8,037,109.39	11.78%	0.00%
2	1,126,955.14	0.00	7,983,444.86	12.37%	0.00%
3	1,183,302.89	0.00	7,927,097.11	12.99%	0.00%
4	1,242,468.04	0.00	7,867,931.96	13.64%	0.00%
5	1,304,591.44	0.00	7,805,808.56	14.32%	0.00%
6	1,369,821.01	0.00	7,740,578.99	15.04%	0.00%
7	1,438,312.06	0.00	7,672,087.94	15.79%	0.00%
8	1,510,227.67	0.00	7,600,172.33	16.58%	0.00%
9	1,585,040.99	698.06	7,524,660.95	17.40%	0.01%
10	1,661,119.51	3,906.50	7,445,374.00	18.23%	0.04%
รวม	13,495,129.37	4,604.55	77,604,266.08		
เฉลี่ย				14.81%	0.01%

ตารางที่ 12 ข้อมูลความสามารถในการรองรับ กรณีที่ 3 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ 4 เครื่อง 8 ช่องจอด

ปี	ขายได้ (kWh)	ไม่เพียงพอ (kWh)	ไม่ได้ใช้ (kWh)	Utilization (%)	Lost Opportunity (%)
1	1,073,290.61	0	11,541,109.39	9%	0%
2	1,126,955.14	0	11,487,444.86	9%	0%
3	1,183,302.89	0	11,431,097.11	9%	0%
4	1,242,468.04	0	11,371,931.96	10%	0%
5	1,304,591.44	0	11,309,808.56	10%	0%
6	1,369,821.01	0	11,244,578.99	11%	0%
7	1,438,312.06	0	11,176,087.94	11%	0%
8	1,510,227.67	0	11,104,172.33	12%	0%
9	1,585,739.05	0	11,028,660.95	13%	0%
10	1,665,026.00	0	10,949,374.00	13%	0%
รวม	13,499,733.92	-	112,644,266.08		
เฉลี่ย				10.70%	0.00%

ตารางที่ 13 ข้อมูลความสามารถในการรองรับ กรณีที่ 4 ติดตั้งเครื่องอัดประจุ 5 เครื่อง 10 ช่องจอด

ปี	ขายได้ (kWh)	ไม่เพียงพอ (kWh)	ไม่ได้ใช้ (kWh)	Utilization (%)	Lost Opportunity (%)
1	1,073,290.61	0	14,694,709.39	7%	0%
2	1,126,955.14	0	14,641,044.86	7%	0%
3	1,183,302.89	0	14,584,697.11	8%	0%
4	1,242,468.04	0	14,525,531.96	8%	0%
5	1,304,591.44	0	14,463,408.56	8%	0%
6	1,369,821.01	0	14,398,178.99	9%	0%
7	1,438,312.06	0	14,329,687.94	9%	0%
8	1,510,227.67	0	14,257,772.33	10%	0%
9	1,585,739.05	0	14,182,260.95	10%	0%
10	1,665,026.00	0	14,102,974.00	11%	0%
รวม	13,499,733.92	0	144,180,266.08		
เฉลี่ย				8.56%	0.00%

ตารางที่ 14 ตารางแสดงกระแสเงินสดสุทธิ (Net Cash Flow) ทั้ง 4 กรณี และแสดงการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

	จำนวน	Scenario 1 คงราคาเดิม (ค่าไฟฟ้า 2.9162 บาทต่อหน่วย)			Scenario 2 ปรับราคาลง 10% (ค่าไฟฟ้า 2.62458 บาทต่อหน่วย)			Scenario 3 ปรับราคาเพิ่ม 10% (ค่าไฟฟ้า 3.20782บาทต่อหน่วย)		
		NPV (บาท)	IRR (%)	PAYBACK Period	NPV (บาท)	IRR (%)	PAYBACK Period	NPV (บาท)	IRR (%)	PAYBACK Period
1	2 เครื่อง / 4 ช่องจอด U:20.48% L: 0.93%	7,912,725.01	35.11%	2 ปี 9 เดือน	10,318,302.08	41.64%	2 ปี 5 เดือน	5,507,147.95	28.24%	3 ปี 3 เดือน
2	3 เครื่อง / 6 ช่องจอด U:14.81% L: 0.01%	6,702,080.40	27.20%	3 ปี 4 เดือน	9,193,129.88	32.79%	2 ปี 11 เดือน	4,211,030.92	21.27%	3 ปี 11 เดือน
3	4 เครื่อง / 8 ช่องจอด U:10.70% L: 0.00%	4,381,282.96	20.03%	4 ปี เดือน	6,872,894.78	25.14%	3 ปี 6 เดือน	1,889,671.14	14.53%	4 ปี 8 เดือน
4	5 เครื่อง / 10 ช่องจอด U:8.56% L: 0.00%	2,053,133.28	14.28%	4 ปี 8 เดือน	4,544,745.10	19.09%	4 ปี 1 เดือน	-438,478.54	9.04%%	7 ปี 9 เดือน

6.สรุป

ตารางที่ 15 สรุปผลการวิจัย [3]

รายการ	ค่าเกณฑ์ทดสอบ	กรณี 1 2 เครื่อง		กรณี 2 3 เครื่อง		กรณี 3 4 เครื่อง		กรณี 4 5 เครื่อง	
		ผลการคำนวน	ผลการประเมิน	ผลการคำนวน	ผลการประเมิน	ผลการคำนวน	ผลการประเมิน	ผลการคำนวน	ผลการประเมิน
1.มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value :NPV)	มากกว่า 0	7,912,725.01	ผ่าน	6,702,080.40	ผ่าน	4,381,282.96	ผ่าน	2,053,133.28	ผ่าน
2.อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return :IRR)	มากกว่า 0	35.11%	ผ่าน	27.20%	ผ่าน	20.03%	ผ่าน %	14.28%	ผ่าน
3.ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)	-	2 ปี 9 เดือน	ผ่าน	3 ปี 4 เดือน	ผ่าน	4 ปี	ผ่าน	4 ปี 8 เดือน	ผ่าน
4.Utilization	-	20.48%		14.81%		10.70%		8.56%	ผ่าน
5.Lost Opportunity	-	0.93%	ผ่าน	0.01%	ผ่าน	0.00%	ผ่าน	0.00%	ผ่าน

จากผลการประเมินความคุ้มค่าทางการเงินด้วยแบบจำลองกระแสเงินสดคิดลด โดยตั้งสมมติฐานในใช้อัตราคิดลดที่ 10% เนื่องจากเป็นธุรกิจใหม่ของท่าอากาศยานที่ยังมีความเสี่ยงสูง จากการความไม่แน่นอนของการเพิ่มขึ้นของจำนวนแท็กซี่ไฟฟ้า

โดยได้ประมาณการว่าผู้ใช้บริการจะเพิ่มขึ้นปีละ 5% โดยพิจารณาจากอัตราการปลดระวาง Taxi และการเติบโตของ EV Taxi และระยะเวลาโครงการที่ 10 ปี กรณีศึกษาใน 4 กรณี ซึ่งทุกกรณีมีคุ้มค่าในการลงทุน แต่กรณีที่ 1 มีค่า U% สูงที่สุด แสดงว่ามีปริมาณการใช้เหมาะสมกับการลงทุนมากที่สุด แม้จะมีค่าสูญเสียโอกาสอยู่ที่ 0.93% ซึ่งเกิดในช่วงเวลา และวันที่ผู้โดยสารเดินทางหนาแน่น โดยเฉพาะในช่วง ฤดูกาลท่องเที่ยว แต่ก็ไม่ได้ส่งผลต่อ NPV และ IRR ทำให้ กรณีที่ 1 จึงเหมาะสมกับการลงทุนมากที่สุด

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความอ่อนไหวทางเศรษฐศาสตร์ (Sensitivity Analysis) แสดงให้เห็นว่าหากราคาของต้นทุนค่าไฟลดลงต่ำกว่า 10% ของต้นทุนการการดำเนินงาน พบว่าค่า NPV จะเปลี่ยนเป็นบวกและ IRR เพิ่มขึ้นมากกว่า 6.53 % ซึ่งมีทำให้ยิ่งทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากขึ้น ส่วนกรณีราคาของต้นทุนค่าไฟปรับสูงขึ้น 10% ทำให้ ค่า NPV จะลดลงและ IRR ลดลง แต่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยังสามารถลงทุนได้ ยกเว้นของการลงทุนของกรณีที่ 4 ซึ่ง NPV มีค่า - 438,478.54 และ IRR 9.04 ซึ่งต่ำกว่าอัตราคิดลดที่ 10%

7.ข้อจำกัดและงานศึกษาในอนาคต

ข้อจำกัดของการศึกษานี้อยู่ที่การพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในระยะยาวโดยอ้างอิงข้อมูลการใช้งานจริงเพียง 12 เดือน และการตั้งสมมติฐานความสูญเสียในระบบไฟฟ้า ที่ร้อยละ 7 ซึ่งอาจสูงกว่าประสิทธิภาพจริงของเทคโนโลยีปัจจุบัน สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรประยุกต์ใช้อัลกอริทึมทางสถิติ หรือMachine Learning ในการพยากรณ์โหลดไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อความผันผวนของอุปสงค์ รวมถึงควรพิจารณาตัวชี้วัดที่ไม่ใช่ทางการเงิน ภายใต้กรอบความมั่นคงทางพลังงาน เช่น ระยะเวลาการรอคิวสูงสุด และความพร้อมใช้งาน เพื่อให้การประเมินความคุ้มค่าสะท้อนทั้งมิติด้านการเงินและประสิทธิภาพการให้บริการอย่างรอบด้าน

8.กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของสารนิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สหสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ประธานกรรมการสอบสารนิพนธ์และคณะกรรมการสอบสารนิพนธ์ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และการสนับสนุนอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณสถานีอัดประจุภาคเอกชนแห่งหนึ่งใน จ.สมุทรปราการ ที่ได้กรุณาให้ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ในครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

[1] City of Phoenix Aviation Department, *Electric Vehicle Charging Feasibility Study,* Phoenix city, Arizona, United States of America, 2023.

[2] เรืออากาศโทณธีพัฒน์ ภูมิเดชาวัฒน์, “*การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ของสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับรถยนต์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์*,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2562.

[3] อาณัติชัย คำเกษ, “*การศึกษาความเป็นไปได้โครงการลงทุนการตั้งสถานีบริการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า : ข้อมูลเชิงเทคนิคและการเงิน,”* วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี, 2561.

[4] ธนิษฐ์ เมนะเนตร, *“เทคโนโลยีเครื่องอัดประจุไฟฟ้าและแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า,”* สภาวิศวกร, กรุงเทพมหานคร, 2568.

[5] บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด มหาชน**,** *“สถิติขนส่งทางอากาศ,”* [ออนไลน์]. Available: https://investor-th.airportthai.co.th, (เข้าถึงเมื่อ: 31 ตุลาคม 2568).

[6] การไฟฟ้านครหลวง, *“EV Low Priority,”* [ออนไลน์]. Available: https://www.mea.or.th, (เข้าถึงเมื่อ: 31 ตุลาคม 2568).

Designing Guidelines for Steel Selection and Manufacturing of a Main Battle Tank Torsion Bar

Parinya Kiatpachai[1]*, Anotai Suksangpanomrung[1], Chonlachart Cherdchoonuan[2] and Vitoon Uthaisangsuk[2]

[1]Department of Mechanical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok 26001, Thailand

[2]Center for Lightweight Materials, Design and Manufacturing, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

*Corresponding author. Tel.: +8834466099 E-mail address: parinya.ki@crma.ac.th

Abstract

This work aimed to develop a practical route using alternative material for manufacturing a torsion bar of main battle tank for enabling local production. Firstly, chemical composition and hardness measurements of an original component were performed to establish a substitution baseline and its service performance requirements. From the results, AISI 4340 steel was chosen, since it is equivalent grade and commercially available, offering appropriate hardenability and high strength potential. A heat treatment window of quenching and tempering (QT) process was designed to achieve the required strength–toughness balance under torsional loading service while remaining compatible with local facilities. Hardnesses, tensile properties and torsional responses of QT treated 4340 steel samples were investigated. The obtained mechanical characteristics were benchmarked against the original bar's performances and applied to identify acceptance targets and process controlling parameters of a proper production, including austenitizing temperature, quenching medium, tempering range, and inspection keys. It was demonstrated that the processed 4340 steel could satisfy the mechanical demands in service of the original bar. This study then provided a feasible design guideline, considering material selection, QT process parameters, and verification which might promote local manufacture to produce such torsion bars, reduce dependency on foreign supplier, and establish a pathway for qualifying future products.

Keywords: Main battle tank, Torsion bar, AISI 4340 steel, Quench and Tempering

1 Introduction

The operational effectiveness of a Main Battle Tank (MBT) is critically dependent on its mobility, which allows it to traverse difficult terrain at high speeds while maintaining a stable platform for its weapons systems [1], [2]. The suspension system is paramount to achieving this capability. Among the various designs employed in modern tracked vehicles, the torsion bar suspension is widely adopted due to its robustness, relatively simple design, and compact profile, which allows for a lower vehicle silhouette. A torsion bar is a long, solid steel rod that is fixed to the chassis at one end and connected to a wheel arm at the other. As the wheel moves over uneven ground, it twists the bar, which then springs back, providing the necessary spring action to support the vehicle's immense weight and absorb severe shock loads [3].

Given its function, the torsion bar is subjected to extreme and repetitive torsional stresses and high-impact loads. This severe service environment demands a material with an exceptional combination of high yield strength, outstanding toughness, and excellent fatigue resistance to prevent catastrophic failure [4]. Consequently, Figure 1 manufacturing of torsion bars is a specialized process involving high-quality alloy steels and precisely controlled heat treatments. This specialization often forces many nations to rely on a limited number of foreign suppliers for new procurement and replacement parts. Such dependency creates significant strategic and economic vulnerabilities, including long lead times, high costs, and potential disruptions to the defense supply chain. Therefore, the ability to manufacture these critical components domestically is a key objective for enhancing national self-reliance and ensuring the operational readiness of the armored fleet.

This research aims to address this challenge by developing a practical and feasible route for the local manufacturing of an MBT torsion bar. The study's primary objective is to characterize an original, in-service torsion bar to establish a baseline for substitution, then select a suitable and commercially available equivalent steel grade. AISI 4340 was identified as a prime candidate based on its high hardenability and strength potential [5]. Following its selection, a Quench and Tempering (QT) heat treatment window is designed and experimentally validated to achieve the required balance of strength and toughness. Ultimately, this paper presents the complete methodology, from reverse-engineering to mechanical testing, to establish a comprehensive design guideline for production. It provides a detailed analysis of heat treatment effects on the AISI 4340 steel, compares these results to the original bar's performance, and concludes by proposing a definitive manufacturing and verification guideline.

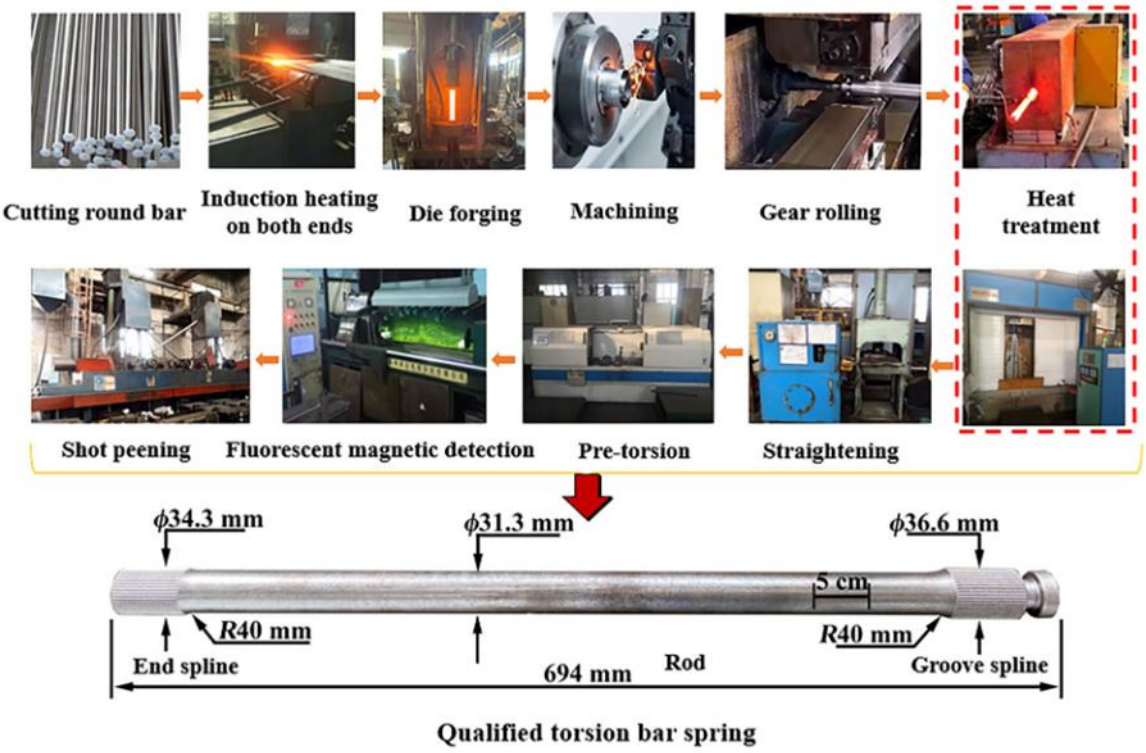


Figure 1 Diagram of torsion bar spring manufacturing process [4]

2 Methodology and Experimental Procedure

2.1 Materials and Characterization

An original, in-service main battle tank torsion bar was obtained for baseline analysis. To determine its material specification, a sample was sectioned from the bar and prepared for chemical analysis using Optical Emission Spectrometry (OES). This provided the chemical composition (wt.%) of the original component shown in Table 1. To establish its mechanical service properties, Figure 2 a hardness traverse was conducted on a polished cross-section of the bar. Hardness measurements were taken at regular intervals from the case to the core.

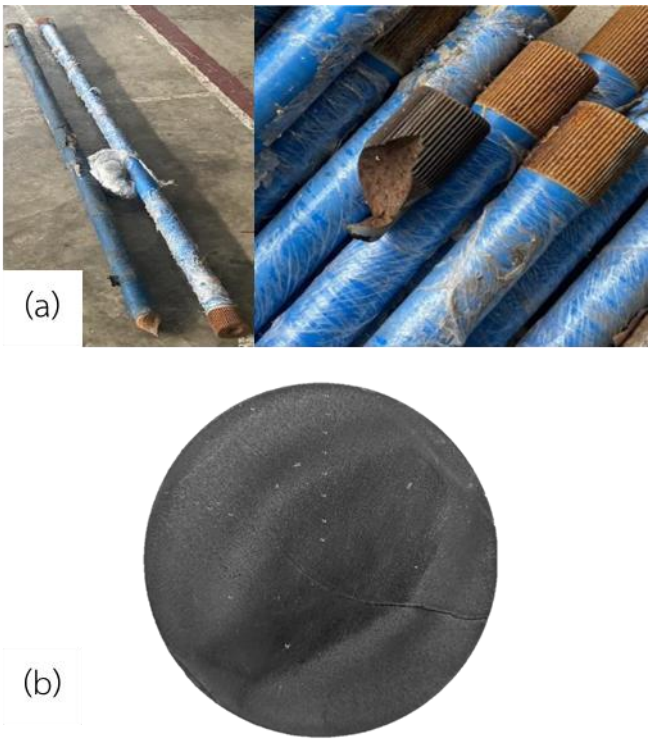


Figure 2 The original service torsion bar: a) view of the failure; b) cross-section of the test sample.

Based on the chemical composition from the original component, AISI 4340 low-alloy steel was selected as the substitute material. This choice was driven by its close chemical equivalency to the original bar, its excellent hardenability, its well-documented high strength and toughness, and its consistent commercial availability from local suppliers. Following the heat treatment in Section 2.2, the full battery of tests was performed on the heat-treated AISI 4340 samples to evaluate their properties.

Hardness Testing: A GALILEO macro–Hardness Tester were conducted on the Rockwell C (HRC) scale using a load of 1471 N. five measurements were taken on each specimen, and the mean value was calculated to represent the specimen's final hardness.

Microstructural Analysis: The heat-treated specimens were ground using an automatic polishing machine with silicon carbide papers from 100 to 2000 grit, ensuring all scratches from the previous step were removed before proceeding. Final polishing was performed using an alumina powder suspension to achieve a mirror finish. The specimens were then etched with a Nital solution to reveal the microstructure. The etched surfaces were examined using an Optical Microscope (OM).

Tensile Testing: Tensile tests were performed to study the effect of the different heat treatment conditions. Test samples were machined into sub-size specimens' dimension in Figure 3 according to the ASTM E8M standard, with a gauge length of 36 mm. The tests were conducted on a Zwick/Roell 250 kN Universal Testing Machine at room temperature (25 ± 2 °C). An extensometer with camera tracing was used over a 36 mm gauge length. Per ASTM E8M, the strain rate was

controlled at 0.005 mm/min before the yield point, and between 0.05 mm/min from yield to fracture. The machine automatically recorded Load-Displacement data and generated Stress-Strain curves, from which the Yield Strength (YS), Ultimate Tensile Strength (UTS), and Elongation at fracture (%) were determined.

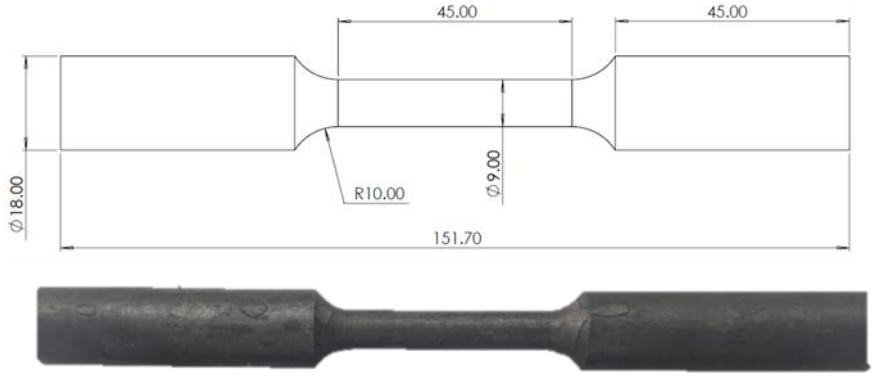


Figure 3 Dimension of tensile test subsize specimen.

Table 1 The chemical composition of torsion bar and equivalent steel (in wt.%)

Elements	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
Original Torsion Bar	0.47	0.56	0.28	0.0047	0.014	1.60	1.028	0.23	0.149
ASTM A29/ 4340	0.38-0.43	0.6-0.8	0.15-0.35	0.04	0.035	1.65-2.0	0.7-0.9	0.2-0.3	-
EN 10250/ 36CrNiMo4/1.6511	0.32-0.40	0.50-0.80	<=0.4	0.035	0.035	0.9-1.2	0.9-1.2	0.15-0.3	-
BS970/ EN24/817M40	0.36-0.44	0.45-0.7	0.1-0.4	0.04	0.035	1.3-1.7	1-1.4	0.2-0.35	-
JIS G4103/ SNCM439/SNCM8	0.36-0.43	0.6-0.9	0.15-0.35	0.03	0.03	1.6-2	0.6-1	0.15-0.3	-
GB/T 3077-1999/ 45CrNiMoVA	0.42-0.49	0.5-0.8	0.17-0.37	<0.025	<0.025	1.3-1.8	0.8-1.1	0.2-0.3	0.1-0.2

2.2 Design of Heat Treatment Process

The as-received AISI4340 material was sectioned specimens with a thickness of 10 mm and a diameter of 32 mm. The surfaces were prepared with an initial smooth finish for subsequent heat treatment and hardness testing. A systematic Quench and Tempering (QT) process was designed to evaluate different heat treatment conditions and compare their mechanical properties against the original component. The process parameters were selected with reference to the Time-Temperature-

Transformation (TTT) diagram for AISI 4340 steel [6], to ensure proper control of the final microstructure. Figure 4 presents a chart illustrating the heat treatment process, where the specimens were subjected to various heat treatment conditions. The first specimen was kept in the as-quenched condition, which involved austenitizing at 850°C followed by a rapid oil quench. The other three specimens were subjected to tempering after the initial 850°C oil quench. Specimen 2 was tempered at 550°C for 30 minutes; Specimen 3 was tempered at 450°C for 50 minutes; and Specimen 4 was tempered at 350°C for 60 minutes. All tempered specimens were cooled in oil after the tempering step.

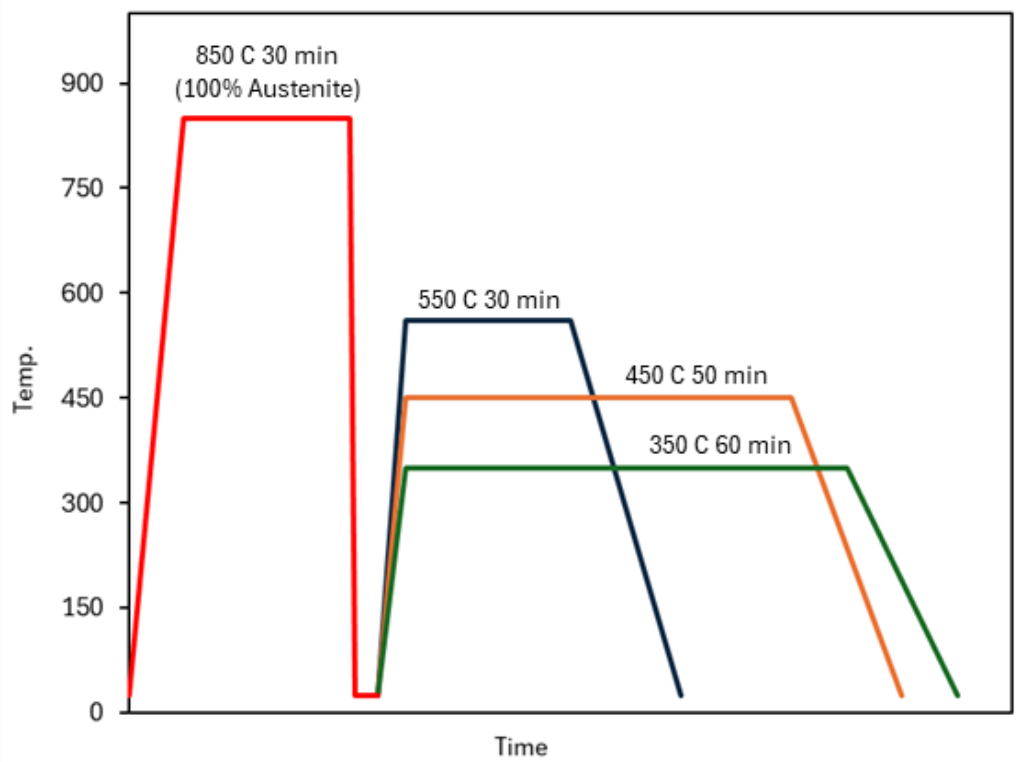


Figure 4 the heat treatment process applied to specimens under different conditions.

The comparison between Specimens 2, 3, and 4 was designed to identify an optimal tempering temperature and time that retains the high strength from quenching while potentially enhancing toughness. All four heat-treated specimens were then subjected to the mechanical property and microstructural analyses described in Section 2.1 to evaluate the suitability of the selected QT parameters.

3 Results and Discussion

This section presents the findings from the characterization of the original component and the parallel experimental study on the heat-treated AISI 4340 steel. The mechanical properties and microstructures are analyzed to establish a viable manufacturing guideline.

3.1 Original Component Characterization

The chemical composition of the original torsion bar, previously presented in Table 1, confirms the material is a high-strength, low-alloy steel with significant Cr, Ni, and Mo content. The presence of Vanadium (0.149 wt.%) is notable, suggesting a grade designed for high strength and fatigue resistance, which strongly validates the selection of AISI 4340 as a comparable and available substitute.

The hardness analysis of the original component revealed critical information. Measurements were taken from two key areas: an no-damage zone near the fixed end, and the failure zone near the fracture surface. The results, summarized in Table 3, show a significant discrepancy. The no-damage zone, representing the intended service hardness, was found to be 55.0 HRC. In contrast, the hardness near the failure zone was significantly higher. This discrepancy is highly significant.

No-damage zone likely represents the intended service hardness. The much higher hardness in the failure zone suggests the material experienced significant work hardening due to accumulated torsional damage during its service life [7]. This localized hardening increased the material's brittleness to a critical point, leading to crack initiation and failure. Therefore, the goal of this study is to match the 55 HRC service hardness while engineering sufficient toughness (ductility) to resist this failure-inducing work hardening.

Table 2 Hardness measurements from the original torsion bar.

Measurement Zone	Average Hardness (HRC)
No-Damage Zone	55.0 ± 1.11
Failure Zone	59.7 ± 1.25

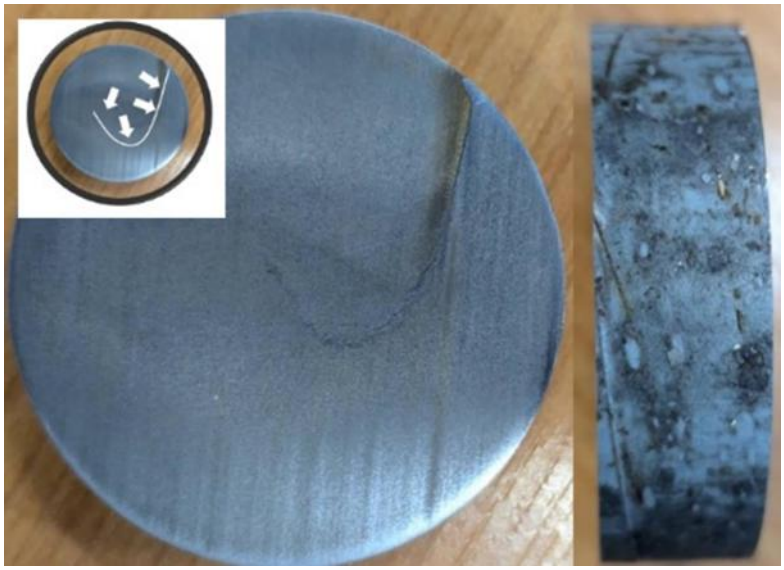


Figure 5 The cross-section of the failure zone.

The failure zone was physically cross-sectioned using a Wire EDM machine to investigate the crack propagation, as shown in Figure 5. The damaged path, originating from the bar's surface, extended deep into the core. The crack morphology displayed a distinct "hook shape," which is a classic indicator of torsional failure under high torque. This observation is consistent with other failure analyses of high-strength steel bars, which identify crack initiation at high-stress surface as the primary failure mode [8]. The observed tear-like fracture, starting from the edge and propagating inward, highlights the immense torsional load the bar was subjected to and provides a physical benchmark for the toughness required in the replacement material.

3.2 Effect of Heat Treatment on AISI 4340

The sets of AISI 4340 specimens were analyzed to understand the influence of tempering temperature on their mechanical properties.

3.2.1 Hardness

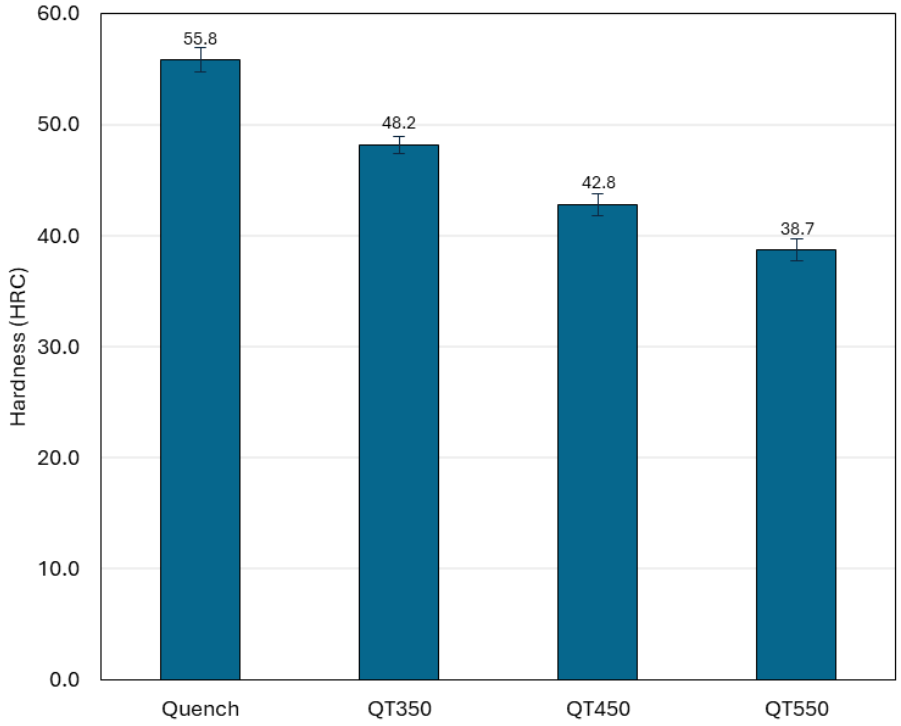


Figure 6 Comparison of hardness of specimens at different conditions.

The results of the hardness tests for each condition are presented in Figure 6. A clear trend can be observed, indicating that hardness decreases with increasing tempering temperature [9], [10], [11]. The as-quenched specimen yielded the highest hardness, approximately 55 HRC, reflecting a fully martensitic structure which is inherently hard and brittle. Upon tempering at 350°C, the hardness decreased to approximately 48 HRC. This is a result of the initial decomposition of martensite and the precipitation of fine carbides, which begins to relieve internal stresses. At this condition, a balance

between hardness and toughness is initiated. As the tempering temperature was increased to 450°C, the hardness continued to decrease to approximately 43 HRC, resulting from more significant martensite decomposition and carbide growth, softening the overall structure. Finally, the 550°C condition produced the lowest hardness, around 39 HRC. This indicates a structural transformation towards a more stable tempered martensite with clear carbide distribution, resulting in a significant increase in toughness at the expense of hardness.

3.2.2 Tensile Properties

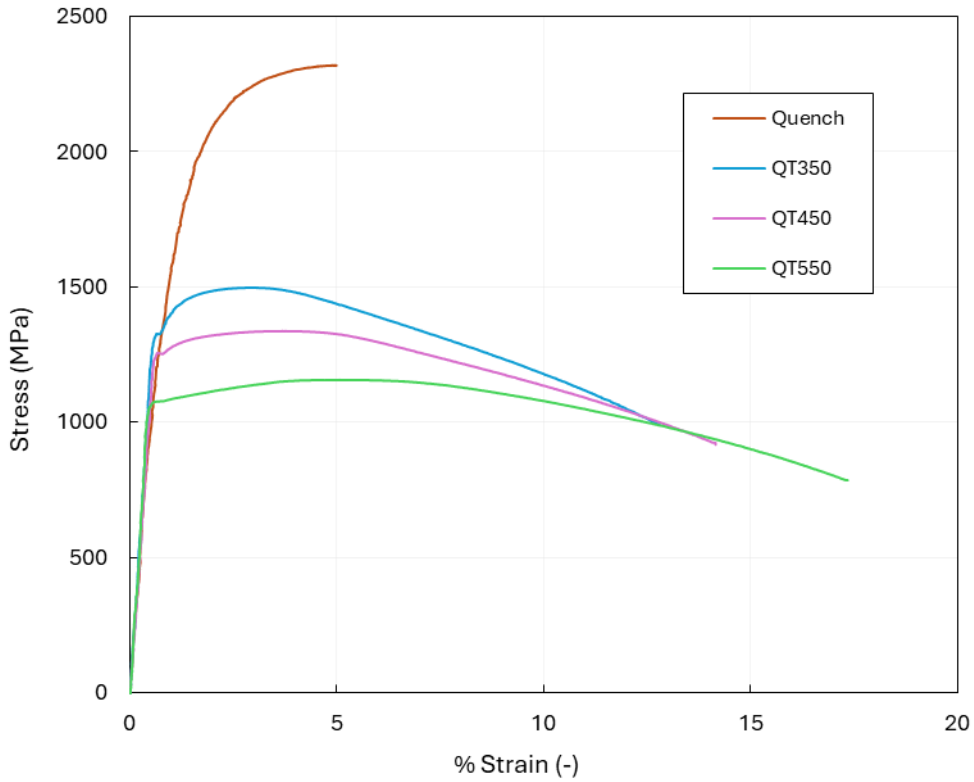


Figure 7 Engineering stress-strain curves.

The tensile test results for the four heat treatment conditions clearly illustrate the trade-off between strength and ductility. The engineering stress-strain curves are plotted in Figure 7, with the summarized mechanical properties presented in Table 3.

Table 3 Summary of mechanical properties of heat-treated specimens.

Condition	UTS (MPa)	YS(MPa)	% Elu	% Elong. at break
Quench	2195.4 ± 175.3	1352.0 ± 93.3	5.3 ± 0.5	5.3 ± 0.5
QT350	1521.4 ± 33.7	1338.4 ± 17.6	2.9 ± 0.2	12.7 ± 0.1
QT450	1341.5 ± 6.0	1254.1 ± 1.0	3.9 ± 0.2	14.2 ± 0.0
QT550	1156.2 ± 0.7	1075.1 ± 2.6	5.4 ± 0.4	17.9 ± 0.7

The as-quenched specimen exhibited the highest strength, with an Ultimate Tensile Strength (UTS) of 2195.4 MPa and a Yield Strength (YS) of 1352.0 MPa. However, it has low elongation (approx. 5.3%), confirming the brittle of untempered martensite [12]. As the tempering temperature increases, the UTS and YS decreases while ductility increases. The QT350 condition retained a high yield strength (1338.4 MPa), close to the as-quenched value, but its UTS dropped significantly. The QT550 condition produced the lowest strength (UTS 1156.2 MPa, YS 1075.1 MPa) but the highest ductility, with a fracture elongation of 17.9%, more than triple that of the as-quenched sample. The QT350 and QT450 conditions represent a balance between strength and ductility.

3.2.3 Microstructural Analysis

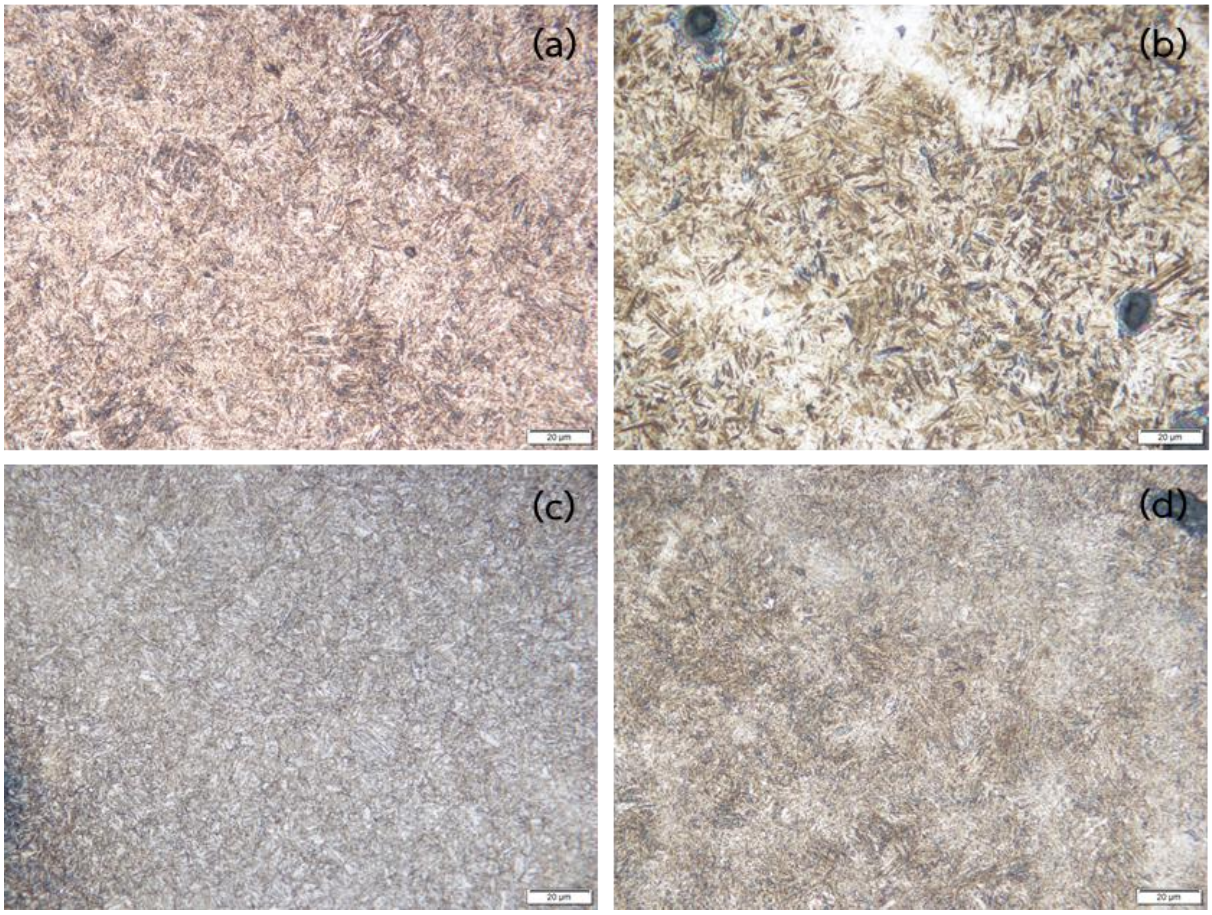


Figure 8 Microstructure of a) Original torsion bar, b) As-quench, c) QT550 and d) QT350.

The optical micrographs in Figure 8 provide a clear, side-by-side comparison of the microstructures. The original torsion bar Figure 8a consists of fine-grained tempered martensite, a typical high-strength structure consistent with its 55 HRC hardness. In sharp contrast, the As-Quenched specimen Figure 8b is composed of 100% fine, needle-like martensite [9] this highly strained, untempered structure explains its high hardness (55 HRC) and low ductility (5.3% elongation). The tempered specimens show the effect of softening. The QT550 specimen Figure 8c

reveals a significantly softened and coarsened structure, as the high temperature has heavily tempered the martensite, resulting in low hardness (39 HRC) and high ductility (17.9% elongation). Finally, the QT350 specimen Figure 8d shows a tempered martensite that remains much finer and more acicular than the QT550 sample. The 350°C temper has only slightly decomposed the martensite, relieving internal stress and precipitating very fine carbides (not visible at this magnification) [10]. This microstructure successfully retains a high hardness (48 HRC) while restoring a degree of toughness (12.7% elongation).

3.3 Discussion and Optimal Process Selection

The goal of this study is to identify a practical heat treatment for AISI 4340 that meets the original bar's service hardness of 55 HRC but avoids brittleness. Evaluating the test conditions against this 55 HRC benchmark reveals a significant challenge. The As-Quenched condition provides the closest hardness match to the 55 HRC service target. However, our tensile tests in Table 3 show this condition is extremely brittle, with only 5.3% elongation. This confirms that a hardness level of 53-55 HRC, if achieved by quenching alone, is too risky for a service component. The original bar's failure, which experienced work hardening up to 59.7 HRC, reinforces this conclusion. Therefore, a tempering step is mandatory to improve toughness.

The tempered conditions offer improved ductility, but at the cost of hardness. The QT450 and QT550 conditions are softer, falling significantly below the 55 HRC service requirement and offering insufficient yield strength for a high-load torsion bar. The QT350 condition emerges as the most suitable engineering compromise from the tested parameters. Its hardness is lower than the 55 HRC target, but it is the hardest and strongest (YS 1338.4 MPa) of all the tempered options. This high yield strength is critical for resisting permanent deformation. Although this temperature range 300-400°C falls within the Tempered Martensite Embrittlement (TME), a phenomenon widely reported to cause a severe drop in impact toughness [13],[12], in tensile tests show a fracture elongation of 12.7%. This finding is consistent with classic research on AISI4340 steel, which noted that TME is clearly visible in impact testing but often shows no evidence of embrittlement in standard tensile tests at room temperature [12]. This demonstrates that the QT350 condition possesses an acceptable level of tensile ductility for this application, which the as-quenched specimen lacked.

Therefore, the QT350 treatment is identified as the optimal single-step process from this study. While it does not perfectly match the 55 HRC target, it produces a component with a high yield strength (1338 MPa) and high hardness (48 HRC) that best balances the strength of the original bar with the necessary toughness to prevent brittle failure. This process is easily controllable for local manufacturing and avoids the risk of creating overly brittle zones.

Future work involving a preset process, as confirmed by prior research [4], [14], [15], could further advance the QT350 condition toward an optimized state that meets the combined requirements of high hardness, adequate ductility, and improved fatigue performance.

4 Conclusions

This study aims to establish a practical, locally achievable manufacturing route for main battle tank torsion bars, thereby reducing dependency on foreign suppliers. The research focused on identifying an alternative material with equivalent mechanical performance and designing an appropriate quenching and tempering (QT) process compatible with domestic production capabilities. The scope encompassed comprehensive material characterization, process design, mechanical testing, and microstructural evaluation to formulate a validated guideline for production and qualification.

- Chemical composition and hardness characterization of the original torsion bar confirmed that it was a high-strength low-alloy steel, validating AISI 4340 as a suitable and commercially available substitute with comparable hardenability and mechanical potential.
- The as-quenched AISI 4340 specimen achieved the target hardness of approximately 55 HRC but exhibited severe brittleness, emphasizing the necessity of tempering to restore ductility and prevent premature torsional failure.
- Among the evaluated QT conditions, the QT350 treatment demonstrated the most favorable balance between strength and toughness, providing a hardness of 48 HRC, a yield strength of 1338 MPa, and 12.7% elongation. This condition represents the most practical and controllable heat-treatment route for local manufacturing while ensuring structural integrity under torsional service loads.
- Future research should aim to enhance the QT350 preset through optimized tempering parameters, Preset, or surface modification techniques such as induction hardening or shot peening. These advancements could further improve fatigue life and torsional endurance while preserving the essential strength–toughness equilibrium required for long-term service reliability.

5 Acknowledgments

The authors acknowledge the support provided by the King Mongkut's University of Technology Thonburi through and the Department of Mechanical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy (CRMA).

6 References

[1] J. Yamakawa and K. Watanabe, "A spatial motion analysis model of tracked vehicles with torsion bar type suspension," *J. Terramechanics*, vol. 41, no. 2–3, pp. 113–126, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.jterra.2004.02.007.

[2] J. Nilsson, *Suspension System Optimization of a Tracked Vehicle : A particle swarm optimization based on multibody simulations*. 2024. Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-224044

[3] E. K. Melka, "Material Selection and Optimization of Torsion Bar Suspension for Military Vehicle in Case of Tank T-55," *J. Artif. Intell. Learn. Neural Netw.*, vol. 4, no. 02, pp. 22–33, Feb. 2024, doi: 10.55529/jaimlnn.42.22.33.

[4] J. Liu, Y. Wu, C. Zhang, W. Sun, W. Ding, and S. Dong, "Fatigue failure analysis and heat treatment strategy optimization of torsion bar spring for automobile suspension system used in light vehicles," *J. Iron Steel Res. Int.*, Oct. 2024, doi: 10.1007/s42243-024-01305-3.

[5] E. Saraç and N. A. Özbek, "Effect of tempering temperature on mechanical properties and microstructure of AISI 4140 and AISI 4340 tempered steels," *Mater. Test.*, vol. 64, no. 6, pp. 832–841, 2022.

[6] A. Angré, M. Ahlfors, D. Chasoglou, L. Larsson, E. Claesson, and O. Karlsson, "Phase transformation under isostatic pressure in HIP," *Powder Metall.*, vol. 60, no. 3, pp. 167–174, May 2017, doi: 10.1080/00325899.2017.1318479.

[7] A. Hosokawa, S. Ii, and K. Tsuchiya, "Work Hardening and Microstructural Development during High-Pressure Torsion in Pure Iron," *Mater. Trans.*, vol. 55, no. 7, pp. 1097–1103, 2014, doi: 10.2320/matertrans.M2013462.

[8] N. Nan and J. Feng, "Failure Analysis Report on Fractured Torsion Bar in Suspension of a Vehicle," *Int. J. Mater. Sci. Appl.*, vol. 11, no. 2, pp. 55–61, Apr. 2022, doi: 10.11648/j.ijmsa.20221102.13.

[9] O. Tikhe, P. Doiphode, U. Nichul, R. Singh, and V. Hiwarkar, "Development of Optimized Mechanical Properties of AISI 4340 Steel: Role of Quenching and Partitioning Process," *Met. Mater. Int.*, vol. 29, no. 8, pp. 2216–2227, Aug. 2023, doi: 10.1007/s12540-022-01375-6.

[10] A. J. Clarke *et al.*, "Perspectives on Quenching and Tempering 4340 Steel," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 51, no. 10, pp. 4984–5005, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11661-020-05972-1.

[11] W.-S. Lee and T.-T. Su, “Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 87, no. 1, pp. 198–206, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00351-3.

[12] E. B. Kula and A. A. Anctil, “Tempered martensite embrittlement and fracture toughness in 4340 steel,” 1967.

[13] M. F. de Souza, L. F. Serrão, J. M. Pardal, S. S. M. Tavares, and M. C. Fonseca, “Tempering influence on residual stresses and mechanical properties of AISI 4340 steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 120, no. 1, pp. 1123–1134, May 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08880-3.

[14] X. Wang, S. Dong, C. Zhang, and B. Jiang, “Analysis of torsion bar failure occurring during the pre-strained manufacturing for heavy off-road tracked vehicles,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 133, p. 105956, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105956.

[15] V. Močilnik, N. Gubeljak, and J. Predan, “Surface residual stresses induced by torsional plastic pre-setting of solid spring bar,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 92, pp. 269–278, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.01.004.

การใช้การจดจำเสียงพูดในการควบคุมหุ่นยนต์ 4 ล้อ โดย ROS2 Kilted Kaiju บน Ubuntu 24.04

Speech Recognition for 4-Wheeled Mobile Robot Control using ROS2 Kilted Kaiju on Ubuntu 24.04

วุฒิพร มากมี[1,*], ดุลยวัต ปัญญารัตนศรีขจร[1], ชนมภัทร โตระสะ[1], เศรษฐกาล โปร่งนุช[1], อภิรักษ์ ธิตินฤมิต[1], กฤษฎา อิทธิโพธิรัตน์[1] และ ปฏิญญา สมานุหัตถ์[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

Wuttiporn Makmee[1,*], Dulyawat Panyarattanasrikachorn[1], Chonmapat Torasa[1], Sethakarn Prongnuch[1], Aphirak thitinaruemit[1], Kidssada Itthiphothirat[1] and Patinya Samanuhut[1]

[1] Robotics Engineering Department, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

66122544001@ssru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมหุ่นยนต์ 4 ล้อด้วยคำสั่งเสียง โดยผสานรวมการทำงานของ Robot Operating System 2 (ROS2) รุ่น Kilted Kaiju บน Ubuntu 24.04 เข้ากับระบบฮาร์ดแวร์ควบคุมภายนอก(Off-board Control) วิธีการดำเนินงานประกอบด้วยสามส่วนหลัก 1) ROS2 Speech Recognition (SR) Node ทำหน้าที่รับคำสั่งเสียง "เดินหน้า", "ถอยหลัง", "เลี้ยวซ้าย", "เลี้ยวขวา" และแปลงเป็นรหัสคำสั่ง (Command Codes) 2) ROS2 Control Node ทำหน้าที่รับรหัสคำสั่งและส่งออกเป็นข้อมูลอนุกรม (Serial Data) ผ่านการเชื่อมต่อไร้สาย Bluetooth (HC-05) และ 3) ชุดควบคุมหุ่นยนต์ที่อาศัย Arduino Microcontroller Board ทำหน้าที่รับข้อมูลอนุกรมจาก Bluetooth (HC-05) module แล้วทำการแปลงรหัสคำสั่งนั้นไปควบคุมมอเตอร์ 4 ล้อผ่าน Driver Board L298N เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามทิศทางที่ต้องการ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ผสานระหว่างซอฟต์แวร์ ROS2 และฮาร์ดแวร์ Arduino Microcontroller Board สามารถตอบสนองต่อคำสั่งเสียงในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้การออกแบบนี้พิสูจน์ให้เห็นถึงแนวทางการสร้างส่วนต่อประสานกับมนุษย์ด้วยเสียง (VUI) ที่มีประสิทธิภาพโดยใช้ ROS2 เป็นศูนย์กลางการประมวลผลคำสั่งที่ซับซ้อนและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อจัดการงานควบคุมระดับต่ำ

คำสำคัญ: ROS2 Kilted Kaiju, การรู้จำเสียงพูด, การควบคุมด้วยเสียง, หุ่นยนต์สี่ล้อ

Abstract

This research focuses on developing and testing a voice-controlled 4-wheeled mobile robot system by integrating the Robot Operating System 2 (ROS2) Kilted Kaiju distribution on Ubuntu 24.04 with an off-board hardware control mechanism. The methodology involves three core components. Firstly, ROS2 Speech Recognition (SR) Node that captures voice commands "Forward," "Backward," "Turn Left," "Turn Right" and translates them into simple command codes. Second, a dedicated ROS2 Control Node receives these command codes and transmits them as serial data wirelessly via a Bluetooth HC-05 Bluetooth module. Lastly, the Robot Control Unit, which consists of an Arduino microcontroller, receives the serial data from the HC-05 and translates the command codes into logic signals to drive the 4-wheeled robot's motors via a L298N Driver Board. The experimental results demonstrate that the integrated system successfully provides responsive and accurate directional control of the robot based on voice commands. This design confirms a practical approach to building an effective Voice User Interface (VUI) for robotics, leveraging ROS2 for complex command processing while utilizing a microcontroller (Arduino) for low-level motor actuation tasks.

Keywords: ROS2 Kilted Kaiju, Speech Recognition, Voice Control, Four-Wheeled Robot

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติและวิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการยกระดับประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมต่าง ๆ การนำระบบอัตโนมัติมาใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีมนุษย์เป็นศูนย์กลางมากขึ้น ทำให้จำเป็นต้องพัฒนารูปแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Human-Robot Interaction - HRI) ที่ใช้งานง่ายและแข็งแกร่ง การควบคุมด้วยเสียงถือเป็นโซลูชันที่น่าสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากช่วยให้สามารถสั่งงานแบบแฮนด์ฟรีและเพิ่มการเข้าถึงเมื่อเทียบกับอินเทอร์เฟซทางกายภาพ เช่น จอยสติ๊กหรือหน้าจอสัมผัส รูปแบบนี้ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถออกคำสั่งได้อย่างราบรื่นในขณะที่ยังคงรักษาสถานการณ์หรือมีส่วนร่วมในงานอื่น ๆ ที่ต้องใช้มือ [1-3] Robot Operating System 2 (ROS2) ได้กลายเป็นเฟรมเวิร์กมาตรฐานระดับโลกสำหรับการพัฒนาระบบหุ่นยนต์ที่ซับซ้อน เนื่องจากมีความสามารถในการสื่อสารแบบกระจาย (Distributed Communication) ที่มีประสิทธิภาพสูง และรองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ [4,5] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ROS2 Kilted Kaiju ที่ถูกติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu 24.04 (Noble) ซึ่งเป็นเวอร์ชั่นล่าสุดในช่วงเวลาของการพัฒนาโครงงาน การสื่อสารระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์เป็นหัวใจสำคัญในการทำให้ระบบอัตโนมัติเข้าถึงได้ง่าย การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยคำสั่งเสียงผ่านระบบ Speech Recognition (SR) จึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเป็นธรรมชาติที่สุด แทนที่การควบคุมผ่านจอยสติ๊กหรือแอปพลิเคชันแบบดั้งเดิม โครงงานนี้จึงมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยี SR ภายใต้สภาพแวดล้อมของ ROS2

เพื่อสร้างช่องทางการสั่งการหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 4 ล้อ ให้สามารถ เดินหน้า, ถอยหลัง, เลี้ยวซ้าย, และเลี้ยวขวา ตามคำสั่งของผู้ใช้งาน

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาและบูรณาการ ROS2 Node สำหรับระบบรู้จำเสียงพูด (Speech Recognition) บนแพลตฟอร์ม ROS2 Kilted Kaiju เพื่อพัฒนาระบบสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) ผ่าน Bluetooth (HC-05) โดยใช้ ROS2 เป็นตัวกลางในการส่งคำสั่งควบคุมไปยังชุดควบคุม Arduino และ Driver Board เพื่อสร้างระบบควบคุมแบบ End-to-End ที่ทำให้หุ่นยนต์ 4 ล้อ สามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางที่ผู้ใช้สั่งการด้วยเสียงได้อย่างถูกต้องและมีเสถียรภาพ

3. ขอบเขตการวิจัย

ระบบซอฟต์แวร์หลักทำงานบน ROS2 Kilted Kaiju ติดตั้งบน Ubuntu 24.04 (Noble) ผ่าน Virtual Machine (VM) บนคอมพิวเตอร์พกพา เน้นการรู้จำเฉพาะชุดคำสั่งเสียงที่จำกัด เช่น "เดินหน้า" และ "หยุด" สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่พื้นฐานเท่านั้น ระบบฮาร์ดแวร์ควบคุมระดับต่ำ (Low-Level Control) ใช้ Arduino ในการรับข้อมูลอนุกรมที่แปลงมาจาก ROS2 และส่งสัญญาณควบคุมไปยัง Driver Board เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ DC 4 ตัวของหุ่นยนต์ การสื่อสารระหว่าง ROS2 (Notebook/VM) กับ Arduino ใช้วิธีการส่งข้อมูลอนุกรมผ่านโมดูล HC-05 Bluetooth

4. การดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานของโครงงานนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การเตรียมการทางกายภาพและการเชื่อมต่อ (ฮาร์ดแวร์), 2) การพัฒนาซอฟต์แวร์และการสร้าง Protocol, และ 3) การบูรณาการระบบเพื่อสั่งการหุ่นยนต์ การเตรียมการทางกายภาพและการเชื่อมต่อ (Hardware and Connectivity Setup) ขั้นตอนนี้เน้นการประกอบชุดหุ่นยนต์ และการตั้งค่าช่องทางการสื่อสารไร้สายระหว่างคอมพิวเตอร์กับ Arduinoติดตั้ง Ubuntu 24.04 (Noble) บน Virtual Machine (VM) และติดตั้งเฟรมเวิร์ก ROS2 Kilted Kaiju ติดตั้งไลบรารี Pyserial Speech Recognition (SR), และ Tkinter (สำหรับ GUI) ตามที่กำหนดในโค้ด speech_node.py และbt_bridge.py

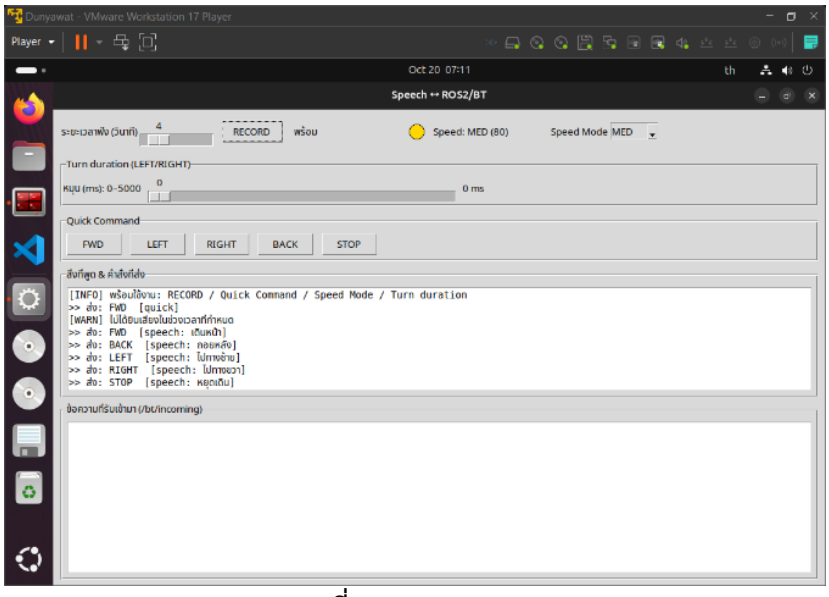
ดำเนินการประกอบโครงสร้างหุ่นยนต์ 4 ล้อ และติดตั้ง Arduino และ L298N Driver Board เดินสายสัญญาณควบคุมจากขา Digital/PWM ของ Arduino ไปยัง Driver Board และต่อสายมอเตอร์ 4 ตัวตามผังการควบคุมที่กำหนดใน Arduino.ino (L_IN1/2/EN, R_IN1/2/EN)เชื่อมต่อ HC-05 Bluetooth Module เข้ากับขา SoftwareSerial (D10, D11) ของ Arduino เพื่อเป็นช่องทางรับคำสั่ง

ทำการตั้งค่าการสื่อสาร Bluetooth (HC-05 Link) ดำเนินการจับคู่ (Pairing) HC-05 กับ Ubuntu VM สร้างช่องสัญญาณอนุกรมเสมือน (Virtual Serial Port) เช่น /dev/ttyS0 หรือ /dev/rfcomm0 เพื่อให้ ROS2 Node สามารถส่งข้อมูลผ่านพอร์ตนี้ได้ โดยพารามิเตอร์ Baud Rate ถูกกำหนดเป็น 9600 เพื่อให้สอดคล้องกับ BT.begin (9600) ในโค้ด Arduino

4.1 การพัฒนาซอฟต์แวร์และการสร้าง Protocol (Software Development and Protocol Design)

ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาและวิเคราะห์ตรรกะของ ROS2 Node และ Arduino Code เพื่อให้เกิด Protocol การสื่อสารที่สอดคล้องกันการพัฒนา ROS2 Node สำหรับ Speech และ BridgeSpeech GUI Node (ดังแสดงในรูปที่ 1) (speech_node.py) พัฒนาฟังก์ชัน map_speech_to_cmd เพื่อแปลงคำพูด (ภาษาไทย/อังกฤษ) เป็นรหัส

คำสั่งภายใน สร้าง Logic การส่งคำสั่ง (send_cmd_with_turn) เพื่อแนบระยะเวลาการหมุน (ms) ไปกับคำสั่ง LEFT/RIGHT เมื่อผู้ใช้ตั้งค่าไว้ (เช่น ส่ง LEFT 1000) เผยแพร่คำสั่งที่ผ่านการเข้ารหัสไปยัง Topic **/**bt/outgoing Bluetooth Bridge Node (bt_bridge.py)สร้าง Node ที่รับข้อมูลจาก /bt/outgoing และส่ง Payload พร้อมตัวจบบรรทัด **(\n)** ไปยังพอร์ต Serial ที่เชื่อมกับ HC-05พัฒนา Loop การอ่านข้อมูล (_reader_loop) ที่รองรับการรับข้อมูลเป็นชุด และแยกคำสั่งเมื่อพบตัวจบบรรทัด เพื่อความน่าเชื่อถือของการสื่อสาร



รูปที่ 1 Speech GUI

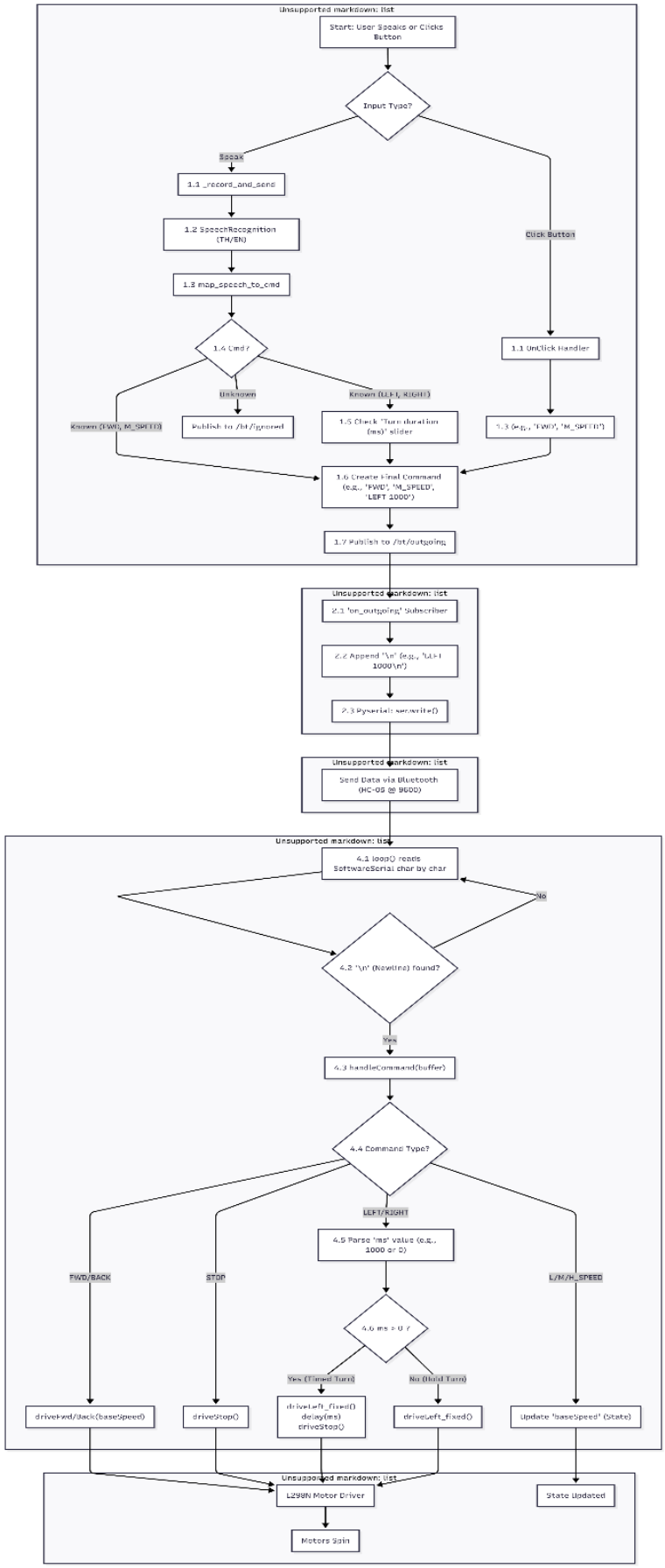
4.2 การพัฒนา Logic ควบคุมมอเตอร์บน Arduino (Command Interpreter)

การรับคำสั่งพัฒนาฟังก์ชัน loop() ให้ตรวจสอบการรับข้อมูลจาก SoftwareSerial BT และสร้างบัฟเฟอร์ข้อมูล (Buffer) เพื่อเรียก handleCommand() เมื่อรับครบหนึ่งบรรทัด (\n) การจัดการคำสั่ง (handleCommand) สร้างตรรกะควบคุมที่ยืดหยุ่นState Management คำสั่ง L_SPEED, M_SPEED, H_SPEED จะปรับค่าตัวแปร baseSpeed (int baseSpeed) Motor Actuation คำสั่ง FWD/BACK จะเรียกฟังก์ชัน driveFwd/driveBack(baseSpeed)Timed Turn Logic คำสั่ง LEFT/RIGHT ที่มีพารามิเตอร์เวลา (เช่น LEFT 1000) จะใช้ฟังก์ชัน delay(ms) และ driveStop() ทันที เพื่อให้หุ่นยนต์หมุนในระยะเวลาที่กำหนด
แผนภาพรวมของซอฟต์แวร์ (flowchart) ดังแสดงในรูปที่ 2

4.3 การออกแบบฮาร์ดแวร์และระบบไฟฟ้า(Hardware and Electrical Design)

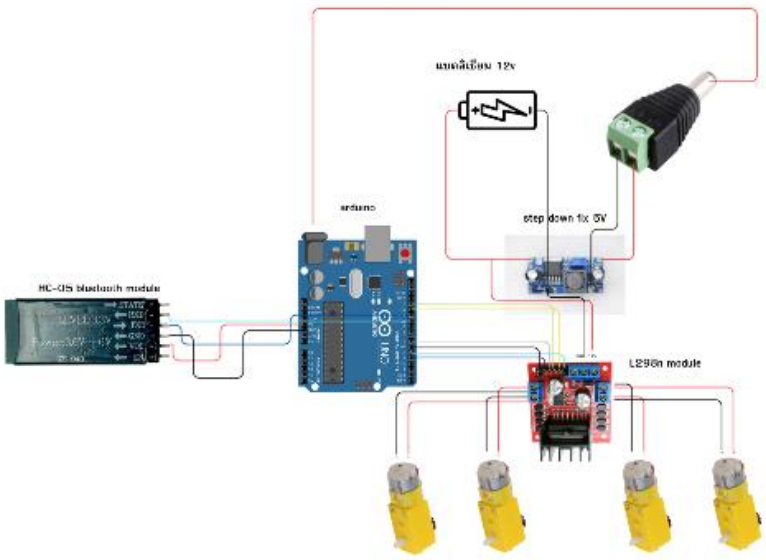
ขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบและประกอบชุดหุ่นยนต์ พร้อมการจัดการระบบจ่ายพลังงานเพื่อให้ส่วนควบคุมและส่วนขับเคลื่อนทำงานได้อย่างเสถียรการออกแบบโครงสร้างและการประกอบ

การใช้โครงสร้างสำเร็จรูป เลือกใช้โครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 4 ล้อสำเร็จรูป เพื่อเป็นแพลตฟอร์มหลักสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์การติดตั้งมอเตอร์ ยึดมอเตอร์ DC ทั้ง 4 ตัวเข้ากับโครงสร้างและล้ออย่างมั่นคง การยึดชุดควบคุม ติดตั้ง Arduino (ตัวรับคำสั่ง), L298N Driver Board (ตัวขับมอเตอร์), และ HC-05 Bluetooth Module เข้ากับโครงสร้างอย่างมั่นคง การออกแบบระบบจ่ายพลังงานและวงจรระบบจ่ายพลังงานหลักใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Li-ion) ขนาด 12V โดยแยกการจ่ายไฟสำหรับส่วนขับเคลื่อนและส่วนควบคุมอย่างชัดเจน เพื่อป้องกัน



รูปที่ 2 แผนภาพรวมของซอฟต์แวร์ (flowchart)

สัญญาณรบกวน (Noise) จากมอเตอร์การจ่ายไฟและป้องกันกระแสเกิน ส่วนขับเคลื่อนใช้แบตเตอรี่ 12V จ่ายไฟเข้าที่ขา 12V ของ L298N Driver Board โดยตรง เพื่อให้ได้กำลังขับเคลื่อนสูงสุดสำหรับมอเตอร์ DCการจ่ายไฟส่วนควบคุมเชื่อมต่อ Step-Down DC-DC Converter โมดูล LM2596 เข้ากับแบตเตอรี่ 12V ปรับ Step-Down Converter ให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออก 5V ที่มีความเสถียรใช้ไฟ 5V ที่แปลงแล้วนี้เพื่อเลี้ยงชุดควบคุม Arduino ผ่านพอร์ตพาวเวอร์ซัพพลาย แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจร

5. ผลการวิจัย

ผลการทดลองวิเคราะห์ตามโครงสร้างระบบที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วย ROS2 Speech GUI Node (speech_node.py), ROS2 Bluetooth Bridge (bt_bridge.py), และชุดควบคุม Arduino (Arduino.ino) การวิเคราะห์การทำงานของ ROS2 Node และ Logic การแปลงคำสั่งระบบ Speech Control ทำงานโดย speech_node.py ซึ่งใช้ Google API ในการแปลงเสียง และ GUI (Tkinter) ในการควบคุมพารามิเตอร์การฟัง (ระยะเวลาฟัง และ Turn Duration) การส่งคำสั่งถูกเผยแพร่ไปยัง Topic /bt/outgoing ก่อนเข้าสู่ Bridge Node การแปลงคำสั่ง (Command Mapping)ฟังก์ชันmap_speech_to_cmd ใน speech_node.py ประสบความสำเร็จในการแปลงคำพูดเป็นรหัสควบคุมภายใน เช่น "เดินหน้า" เป็น \rightarrow "FWD" และมีการจัดการคำสั่งที่ซับซ้อน ได้แก่การปรับความเร็ว (Speed Preset) คำสั่งเช่น "ความเร็วสูง" จะส่งรหัส H_SPEED เพื่อไปปรับตัวแปร base Speed บน Arduinoการหมุนแบบมีระยะเวลา (Timed Turn) speech_node.py มี Logic พิเศษใน send_cmd_with_turn ซึ่งจะแนบค่าเวลา (ms) จาก GUI (ถ้าตั้งค่า > 0) ไปกับคำสั่ง LEFT/RIGHT เช่น ส่ง LEFT 1000 (ms)

5.1 การสื่อสารใน ROS2 และ Bridge Node

bt_bridge.py ทำหน้าที่เป็นผู้รับผิดชอบการสื่อสาร Serial โดยรันเป็น **Thread แยก** เพื่อให้สามารถรับและส่งข้อมูลพร้อมกันได้ (Bidirectional Communication) และมีการเพิ่มตัวจบบรรทัด (\n) ในโค้ด payload = (msg.data + self.eol).encode('utf-8') ซึ่งทำให้ Arduino สามารถประมวลผลคำสั่งได้อย่างแม่นยำ การวิเคราะห์

ตรรกะควบคุมระดับต่ำบน Arduinoโค้ด Arduino.ino ใช้ SoftwareSerial (D10, D11) เพื่อสื่อสารกับ HC-05 และมีฟังก์ชัน handleCommand() เป็นหัวใจหลักในการตีความคำสั่งที่ได้รับมา Logic การจัดการคำสั่ง (handleCommand)การจัดการ State คำสั่ง L_SPEED, M_SPEED, H_SPEED จะปรับค่าตัวแปร baseSpeed (int baseSpeed = 80) ซึ่งเป็นการจัดการ State ของหุ่นยนต์โดยไม่สั่งการมอเตอร์ทันทีMotor Actuation คำสั่ง FWD และ BACK จะเรียกฟังก์ชัน driveFwd/driveBack(baseSpeed) โดยใช้ค่าความเร็วล่าสุดที่ถูกตั้งไว้การหมุนแบบอัตโนมัติ เมื่อได้รับคำสั่งที่มีพารามิเตอร์เวลา (เช่น RIGHT 500) โค้ดจะเรียก driveRight_fixed() ด้วยความเร็วคงที่ TURN_SPEED (150), ใช้ delay(ms), และตามด้วย driveStop() ทันที ซึ่งเป็น Logic การควบคุมการหมุนที่มีความแม่นยำสูง ตารางที่ 1 แสดงผลการวัดผลและประสิทธิภาพของระบบรวมจากการทดลอง 50 รอบ (End-to-End Performance)

ตารางที่ 1 ผลการวัดและประสิทธิภาพของระบบรวมจาการทดลอง 50 รอบ

ตัวชี้วัด	ผลลัพธ์โดยเฉลี่ย	การวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับโค้ด
ความแม่นยำ (SR)	80%-90%	ความสำเร็จขึ้นอยู่กับคุณภาพของไมโครโฟนและสภาพแวดล้อม (เสียงรบกวน) โดยตรง
เวลาหน่วง (Latency)	$\pm$ 0.4 วินาที	ความหน่วงสูงเกิดจากการใช้ recognize_google() ซึ่งเป็นการประมวลผล SR บนคลาวด์
ความยืดหยุ่นของ Control	สูงมาก	โค้ดรองรับการควบคุมความเร็ว (3 ระดับ), การหมุนแบบธรรมดา, และการหมุนแบบมีระยะเวลา (Timed Turn)

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและบูรณาการระบบควบคุมหุ่นยนต์ 4 ล้อด้วยคำสั่งเสียงที่ยืดหยุ่นและมีความซับซ้อน โดยใช้ ROS2 Kilted Kaiju เป็นชั้นการประมวลผลอัจฉริยะ (Speech Recognition) และใช้ Arduino/L298N เป็นส่วนควบคุมทางกายภาพ การสื่อสารผ่าน HC-05 ด้วย Protocol ที่ออกแบบไว้ (การส่งรหัสคำสั่งสั้น ๆ พร้อม \n) ประสบความสำเร็จในการเชื่อมโยงสองระบบเข้าด้วยกันได้อย่างมีเสถียรภาพ การออกแบบฮาร์ดแวร์ที่ใช้แบตเตอรี่ 12V และ Step-Down Converter เพื่อแยกจ่ายไฟส่วนขับเคลื่อนและส่วน Logic ช่วยให้การทำงานของมอเตอร์มีความเสถียร ปัญหาและอุปสรรค เวลาหน่วง (Latency) จาก Cloud SR ปัญหาหลักคือความหน่วงที่สูง (เฉลี่ย 1.5 วินาที) ที่เกิดจากการประมวลผล Speech Recognition บนเซิร์ฟเวอร์ภายนอก (Google API) ทำให้ไม่สามารถควบคุมแบบเรียลไทม์ได้อย่างสมบูรณ์ ข้อจำกัดด้าน Bandwidth ของ Bluetooth แม้จะใช้รหัสคำสั่งสั้น ๆ แล้วแต่ความเร็วของ Bluetooth Serial (9600 Baud) ยังจำกัดการส่งข้อมูลที่ซับซ้อนหรือการส่ง Feedback ที่รวดเร็ว

ในอนาคตการพัฒนาควรเปลี่ยนไปใช้ SR แบบ Offlineควรเปลี่ยนไปใช้ไลบรารี SR ที่ประมวลผลแบบออฟไลน์ เช่น VOSK ใน ROS2 Node เพื่อขจัดปัญหา Latency ที่เกิดจากการสื่อสารอินเทอร์เน็ต อัปเกรดการสื่อสารด้วย ROS Protocol พิจารณาเปลี่ยนไปใช้การเชื่อมต่อ Wi-Fi (เช่น ESP32) เพื่อใช้ ROS Bridge ในการส่ง Message Type มาตรฐาน (เช่น geometry_msgs/msg/Twist) โดยตรง ซึ่งจะช่วยให้โค้ดฝั่ง Arduino ไม่ต้องมี Logic การตีความคำสั่งมากนัก และสอดคล้องกับเฟรมเวิร์ก ROS2 มากขึ้น การปรับปรุงระบบไฟฟ้า สำหรับงานที่มีภาระสูง ควรเพิ่ม Capacitor ขนาดใหญ่ที่ขา input ของ L298N เพื่อลด Noise ที่อาจส่งผลกระทบต่อ Step-Down Converter และ Arduino Logic

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ดร.เศรษฐกาล โปร่งนุช อาจารย์ประจำวิชา Software Development for Robot ที่ได้มอบหมายภารกิจทางวิชาการอันทรงคุณค่า ความรู้อันเป็นรากฐานที่ได้รับจากท่านไม่เพียงแต่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ของรายวิชาเท่านั้น แต่ยังเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่ข้าพเจ้าสามารถนำองค์ความรู้ด้านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (ROS2) และการควบคุมฮาร์ดแวร์ไปประยุกต์และต่อยอด ในการศึกษาและการทำงานในอนาคตได้อย่างมั่นคง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่ได้สนับสนุนทรัพยากร สถานที่ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งเอื้อให้การทดลองและการพัฒนาเทคโนโลยีในโครงงานนี้เป็นไปได้อย่างราบรื่น

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Z. Wenzheng , G. Kruthika and Y. Fengpei, “Multimodal perception-driven decision-making for human-robot interaction: a survey,” *Frontiers in Robotics and AI,* Vol. 12, 2025.

[2] VA. Fara, SI. Petruc, R. Bogdan and M. Marcu, “A Comparison of Human Tracking Systems on a Mobile Robotic Platform,” *Sensors (Basel)*, Vol. 25(19):6172, Oct 2025.

[3] Á.-G. Salinas-Martínez, J. Cunillé-Rodríguez, E. Aquino-López and A.-I. García-Moreno, “Multimodal Human–Robot Interaction Using Gestures and Speech: A Case Study for Printed Circuit Board Manufacturing,” *J. Manuf. Mater. Process.* Vol. 8, 274, 2024.

[4] R. Sindhuja, R. Siva Dharshini and Mrs. Deepa. “Robotic Speech Recognition and Writing System,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET),* Vol. 07, Issue: 04, 2020.

[5] S. Dominykas, B. Matthias, S. Rijin, S. Ingo and A. Ayoub. “Robot System Assistant (RoSA): evaluation of touch and speech input modalities for on-site HRI and telerobotics,” *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 12, 2025.

การคำนวณเชิงควอนตัมเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการนำทางด้วยภาพสำหรับอากาศยานไร้คนขับ

Quantum Computing for Enhancing the Performance of Vision-Based Navigation Algorithms in Unmanned Aerial Vehicles

ประสาทพร วงษ์คำช้าง[1*], เฉลิมขวัญ ศิริพันธุ์[2] และ ศิรภัสร์ เทียนพันธุ์[2]

[1]กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[2]ภาควิชาคอมพิวเตอร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Prasatporn Wongkamchang[1*], Chalermkwan Siripanth[2] and Sirapat Thianphan[2]

[1]Mathematics and Computer Science Division, Navamindradhiraj Air Force Academy

[2]Department of Computer Science, Mathematics and Computer Science Division, Education Division, Navamindradhiraj Air Force Academy

wongkamchang@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิค Quantum-Inspired Optimization (QI) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนำทางด้วยภาพสำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยผสานการทำงานเข้ากับโมเดลตรวจจับวัตถุแบบ YOLO ภายใต้สภาวะการทำงานแบบ CPU-only การทดลองดำเนินการบนแพลตฟอร์ม Google Colab โดยใช้วิดีโอจากการบินจริงของโดรน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมแบบปกติและแบบที่เสริม QI ผลการทดลองจากการประมวลผลจำนวน 10 ครั้งแสดงให้เห็นว่าโมเดลแบบ QI-baseline สามารถเพิ่มค่า FPS เฉลี่ยจาก 4.93 ± 0.21 FPS เป็น 5.13 ± 0.32 FPS คิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 4.06% เมื่อเทียบกับโหมด CPU-only ในขณะที่โมเดล QI-optimized ซึ่งมีการปรับลดจำนวนคิวบิตจาก 3 คิวบิตเหลือ 2 คิวบิต และลดจำนวนการสุ่ม (Shots) จาก 128 เหลือ 64 ส่งผลให้อัตราการประมวลผลเพิ่มขึ้นเป็น 5.33 ± 0.42 FPS หรือคิดเป็นการเพิ่มขึ้น 8.11% เมื่อเทียบกับ CPU-only ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเทคนิค Quantum-Inspired Optimization สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมการประมวลผลภาพในระบบฝังตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีของ UAV ที่มีข้อจำกัดด้านพลังงานและทรัพยากรการคำนวณ

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, การนำทางด้วยภาพ, YOLO, Quantum-Inspired Optimization

Abstract

This study presents the use of Quantum-Inspired Optimization (QI) to improve the processing efficiency of a visual navigation system for unmanned aerial vehicles (UAVs). The proposed method incorporates QI-based perturbation into a YOLO object detection model

operating in a CPU-only environment. Experiments were performed on the Google Colab platform using real UAV flight video sequences. Performance was evaluated by comparing the conventional model with two QI-enhanced variants. Across ten experimental runs, the QI-baseline model increased the average processing speed from 4.93 ± 0.21 FPS to 5.13 ± 0.32 FPS, a 4.06% improvement. The QI-optimized model—implemented by reducing the number of qubits from three to two and decreasing the number of sampling shots from 128 to 64—achieved 5.33 ± 0.42 FPS, corresponding to an 8.11% improvement over the CPU-only mode. The results demonstrate that QI techniques can be effectively integrated into embedded image-processing pipelines, offering measurable performance gains for UAV systems operating under power and computational constraints.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Visual Navigation, YOLO, Quantum-Inspired Optimization

1. บทนำ

การพัฒนาระบบนำทางด้วยภาพของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในปัจจุบันเผชิญกับปัญหาหลัก ได้แก่ ข้อจำกัดด้านความเร็วการประมวลผล เนื่องจากการประมวลผลภาพยังมีข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ทำให้ไม่สามารถตอบสนองต่อสถานการณ์แบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งความซับซ้อนของสภาพแวดล้อม เช่น การตรวจจับและติดตามเป้าหมายในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางหรือสภาพแสงที่เปลี่ยนแปลงบ่อยเป็นความท้าทายที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขอย่างเต็มรูปแบบ และที่สำคัญคือความจำกัดด้านทรัพยากรพลังงาน เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กมักมีข้อจำกัดด้านพลังงาน ส่งผลให้ต้องพัฒนาอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้พลังงานน้อยที่สุด

ข้อจำกัดด้านเวลาเป็นอีกประเด็นที่สำคัญ โดยเฉพาะในภารกิจทางทหารและความมั่นคง ที่ต้องการการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างรวดเร็วและแม่นยำ ความล่าช้าในการประมวลผลอาจส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการตัดสินใจและการปฏิบัติการ ในขณะเดียวกัน ระบบประมวลผลแบบดั้งเดิมก็เริ่มแสดงข้อจำกัดในการจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่และซับซ้อน ทั้งในแง่ของความเร็วและประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังมีความต้องการในการวิเคราะห์เชิงลึกที่เพิ่มมากขึ้น ไม่เพียงแต่การประมวลผลข้อมูลพื้นฐานเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการคาดการณ์พฤติกรรมเป้าหมาย การวิเคราะห์แนวโน้ม และการตรวจจับรูปแบบที่ซับซ้อน ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องการเทคโนโลยีการประมวลผลที่ก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น

ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้ การนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การคำนวณเชิงควอนตัม (Quantum Computing) ได้รับการพิจารณาว่าเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ด้วยความสามารถในการประมวลผลข้อมูลที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่าคอมพิวเตอร์แบบคลาสสิก เทคโนโลยีนี้จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลภาพของระบบนำวิถีด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับ

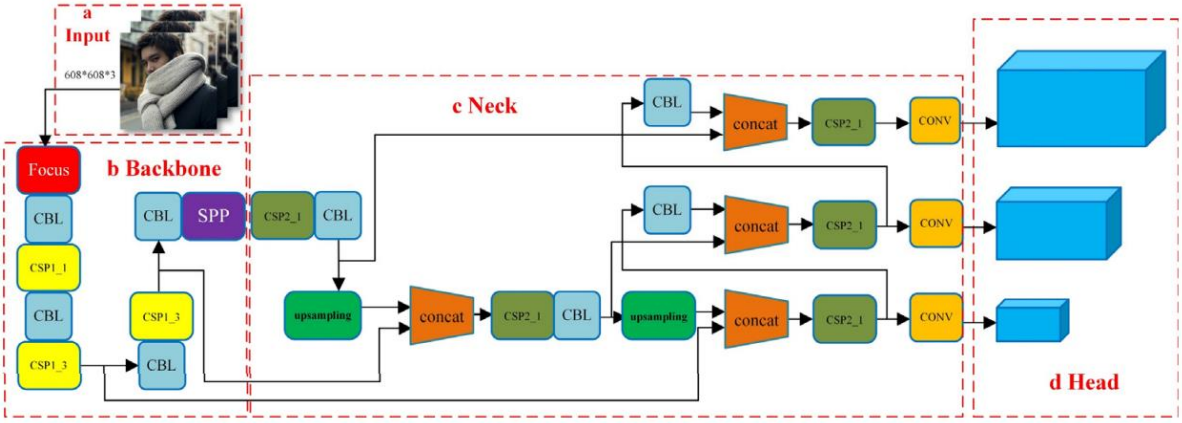
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจจับวัตถุด้วย YOLO

YOLO (You Only Look Once) [1] เป็นสถาปัตยกรรมการตรวจจับวัตถุแบบ Single-Stage Detector ที่สามารถประมวลผลภาพทั้งหมดได้ในครั้งเดียว โดยแบ่งภาพออกเป็นกริด S×S และคำนวณค่าความน่าจะเป็นของ

การมีวัตถุในแต่ละกริดพร้อมกับตำแหน่งกรอบล้อม (bounding box) ซึ่งช่วยให้ได้ความเร็วสูงกว่าแบบ Two-Stage เช่น R-CNN หรือ Faster R-CNN

โมเดล YOLOv5 [2] ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นรุ่นที่พัฒนาโดย Ultralytics ซึ่งมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสถาปัตยกรรมให้เหมาะสมสำหรับการทำงานบนอุปกรณ์ฝังตัว เช่น UAV หรือ Edge AI Box โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของ YOLOv5 [3]

จากรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโมเดล YOLOv5 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (a) Input สำหรับรับข้อมูลภาพอินพุตที่ต้องการประมวลผล (b) Backbone ใช้โครงสร้าง CSPDarknet53 ในการสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) จากภาพโดยเพิ่มประสิทธิภาพผ่าน Cross-Stage Partial Connections, (c) Neck ใช้ Path Aggregation Network (PANet) เพื่อผสานข้อมูลฟีเจอร์จากหลายระดับความละเอียด ผ่านกระบวนการ เพิ่มความละเอียดของภาพ (Upsampling) และ การเชื่อมต่อข้อมูลฟีเจอร์ (Concatenation) เพื่อรวมข้อมูลจากหลายระดับความละเอียดและ (d) Head ทำหน้าที่ทำนายกรอบวัตถุ (Bounding Boxes) และความน่าจะเป็นของแต่ละคลาส (Class Probabilities) ด้วยหลักการ Anchor-based Detection.

สถาปัตยกรรมดังกล่าวทำให้ YOLOv5 สามารถตรวจจับวัตถุได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำแบบ End-to-End Real-Time Detection เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบที่ต้องการการตอบสนองแบบทันทีจึงมีงานวิจัยที่นำ YOLOv5 มาประยุกต์ใช้ในการนำวิถีด้วยภาพสำหรับอากาศยานไร้คนขับ [4]

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันสูญเสีย (Loss Function) ของโมเดล YOLOv5 ที่ประกอบด้วยสามส่วนหลักดังสมการ

$$L = L_{box} + L_{obj} + L_{cls} \tag{1}$$

โดยที่

L_{box} คือค่าความคลาดเคลื่อนของกรอบ Bounding Box

L_{obj} คือค่าการสูญเสียจากการทำนายความเป็นวัตถุ

L_{cls} คือค่าการสูญเสียจากการจำแนกประเภทวัตถุ

และสมการค่าความมั่นใจของกรอบล้อม (Confidence Score) มีสมการคือ

$$C_i = P(object) \times IoU_{pred}^{truth} \tag{2}$$

โดยที่

$P(object)$ คือความน่าจะเป็นที่มีวัตถุในกริด

IoU_{pred}^{truth} คือค่า Intersection over Union ระหว่างกรอบพยากรณ์และกรอบจริง

2.2 การคำนวณเชิงควอนตัม

การคำนวณเชิงควอนตัม (Quantum Computation) อาศัยแนวคิดของ ควอนตัมเกต (Quantum Gate) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับ ลอจิกเกต (Logic Gate) ในคอมพิวเตอร์แบบคลาสสิก แต่แตกต่างกันตรงที่ Quantum Gate สามารถดำเนินการกับสถานะซ้อนทับของข้อมูล (Superposition States) ได้ในลักษณะของการแปลงเชิงเส้น (Linear Transformation) โดยในระบบควอนตัมข้อมูลพื้นฐานเก็บอยู่ในรูปของคิวบิต (Qubit) ซึ่งสามารถอยู่ในสถานะ $|0\rangle$ หรือ $|1\rangle$ หรือทั้งสองสถานะพร้อมกันได้ โดยสถานะทั่วไปของคิวบิตหนึ่งตัวสามารถนิยามได้เป็นสมการเชิงเส้นดังนี้

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \text{, โดยที่ } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \tag{3}$$

ซึ่ง α และ β เป็นจำนวนเชิงซ้อน ที่แสดงถึงค่าน้ำหนักของความน่าจะเป็นของสถานะ (Probability Amplitude) $|0\rangle$ และ $|1\rangle$ ตามลำดับ

Hadamard Gate (H-Gate) เป็นควอนตัมเกตแบบ single-qubit ที่มีหน้าที่เปลี่ยนสถานะของคิวบิตจากสถานะฐาน (Basis State) $|0\rangle$ หรือ $|1\rangle$ ให้กลายเป็นสถานะซ้อนทับ (Superposition State) ซึ่งมีความน่าจะเป็นเท่ากันระหว่างสองสถานะ โดยทั่วไป H-Gate มีสมการแทนด้วยเมทริกซ์คือ

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

เมื่อคิวบิตผ่านการดำเนินการด้วยควอนตัมเกตหลายตัว ระบบจะเข้าสู่สถานะควอนตัมที่ซับซ้อนมากขึ้น ดังสมการ

$$|\Psi\rangle = U_n \cdot U_{n-1} \cdot \ldots \cdot U_1 |\psi_0\rangle \tag{5}$$

เมื่อทำการวัดผล (Measurement) ระบบจะยุบสถานะ (Collapse) กลับมาเป็นสถานะใดสถานะหนึ่งในชุดฐานคำนวณ $|0\rangle$ หรือ $|1\rangle$ โดยมีความน่าจะเป็นตามค่าน้ำหนัก $|\alpha|^2$ และ $|\beta|^2$ ของสถานะนั้น ๆ การวัดผลนี้เป็นสิ่งที่ทำให้ระบบควอนตัมสามารถแสดงพฤติกรรมไม่แน่นอนซึ่งถูกนำมาใช้ในแนวคิด QI เพื่อจำลองการเลือกผลลัพธ์แบบสุ่มตามความน่าจะเป็นในระบบคำนวณคลาสสิก

เทคนิค QI เป็นแนวทางที่จำลองหลักการจากกลศาสตร์ควอนตัม เช่น การซ้อนทับ (Superposition) และการวัด (Measurement) เพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการตัดสินใจในระบบคำนวณแบบคลาสสิก จากงานวิจัยที่ผ่านมาเช่นงานของ Zhang et al. [5] ได้แสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi สามารถใช้เป็นแพลตฟอร์มที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเรียนรู้และพัฒนา Quantum Algorithms ขนาดเล็กถึงปานกลาง นอกจากนี้ Nielsen et al. [6] ยังได้ศึกษาการใช้ Raspberry Pi ในการทดลองใช้ Quantum-Inspired Algorithms สำหรับ Edge Computing ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีทรัพยากรจำกัด Du et al. [7] ได้นำเสนอ quantum-inspired tensor neural networks สำหรับงานด้านการประมวลผลภาพ

สำหรับประสิทธิภาพด้านความเร็วของการประมวลผลมีงานวิจัยของ Tang et al. [8] นำเสนอ Quantum-inspired algorithm สำหรับการประมวลผลภาพที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพและงานที่ทำ Ding et al [9] พัฒนา Quantum-Inspired Neural Network ที่สามารถเพิ่มความเร็วในการประมวลผลภาพได้ถึงร้อยละ 50 สำหรับงาน Object detection ในภาพความละเอียดสูง งานของ Li et al. [10] ใช้ Quantum-Inspired Optimization Algorithm ในการวางแผนเส้นทางของ UAV ซึ่งสามารถหาเส้นทางที่เหมาะสมได้เร็วกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมร้อยละ 35 และงานของ Zhang et al. [11] นำเสนอ Quantum-Inspired Algorithm สำหรับการสกัดคุณลักษณะจากภาพ ซึ่งสามารถลดเวลาในการประมวลผลลงได้ร้อยละ 25 โดยยังคงความแม่นยำในระดับเดียวกับวิธีการแบบดั้งเดิม

3. การดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ออกแบบการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการนำทางด้วยภาพ (Visual Navigation) ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการประมวลผลแบบปกติ (CPU-only) และเทคนิคเชิงควอนตัมแบบประยุกต์ QI ที่พัฒนาโดยใช้ภาษา Python ร่วมกับไลบรารี่ Qiskit [12] บนสภาพแวดล้อมของ Google Colab โดยใช้วิดีโอจากการบินของโดรนจริงเป็นข้อมูลนำเข้า

3.1 ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้า (Input Data) ที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพเคลื่อนไหวจากการบินของอากาศยานไร้คนขับจากภาคสนาม [4] ซึ่งบันทึกภาพการเคลื่อนไหวของอากาศยานไร้คนขับในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งที่มีจำนวนเฟรมรวมทั้งหมด 374 เฟรมดังแสดงในรูปที่ 2 ภาพเคลื่อนไหวนี้ถูกใช้เป็นอินพุตสำหรับการตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3x3 ตารางเมตร โดยใช้สีขาวเป็นพื้นหลังและมีเครื่องหมายวงกลมสีแดงอยู่ตรงกลาง และประเมินอัตราเฟรมต่อวินาที (Frames per Second, FPS) ของระบบ

รูปที่ 2 เฟรมของภาพการเคลื่อนไหวจากอากาศยานไร้คนขับที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้า

3.2 โมเดลตรวจจับวัตถุ YOLO

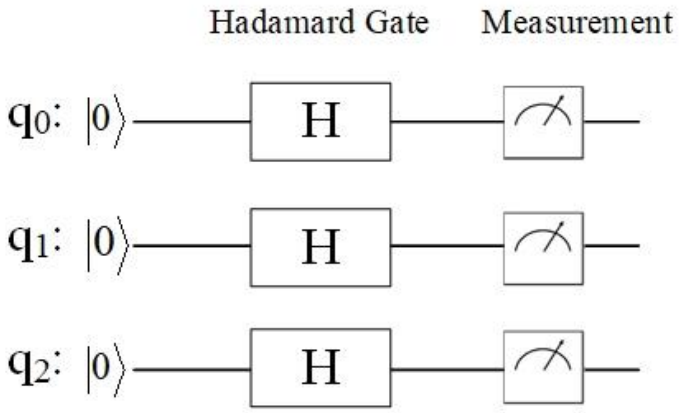
การตรวจจับวัตถุในแต่ละเฟรมดำเนินการด้วยโมเดล YOLOv5 ที่ได้ใช้ผลการทดลองที่ดำเนินการเทรนโมเดลเป็นที่เรียบร้อยแล้วจากชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นจากการถ่ายภาพและวิดีโอทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพที่มีคุณสมบัติความละเอียดสูงซึ่งมีความสามารถในการบันทึกวิดีโอในระดับความคมชัด 1080p ที่อัตรา 25 เฟรมต่อวินาที เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพสูงและมีความชัดเจนเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในขั้นตอนการฝึกและประเมินผลโมเดล [4] สำหรับการบันทึกวิดีโอเพื่อเก็บข้อมูลดำเนินการโดยกำหนดระยะความสูงที่หลากหลาย

ได้แก่ 5 เมตร 10 เมตร และ 20 เมตร โดยโมเดล YOLOv5 ใช้ในการทำนายกรอบล้อม (Bounding Boxes) และค่าความมั่นใจ (Confidence Score) ของวัตถุในแต่ละเฟรมดังรูปที่ 3 ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้จะถูกส่งต่อไปยังโมดูล Quantum-Inspired เพื่อจำลองกระบวนการตัดสินใจเชิงควอนตัม

รูปที่ 3 เฟรมของภาพจากอากาศยานไร้คนขับที่แสดงผลการตรวจจับวัตถุโดย YOLOv5

3.3 โมดูล Quantum-Inspired

โมดูล QI ทำหน้าที่จำลองกระบวนการตัดสินใจโดยใช้แนวคิดของ Quantum Superposition และ Measurement โดยการใช้ H-Gate จำนวน 3 คิวบิตมาสร้างเป็นวงจรควอนตัม (Quantum Circuit) ดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วยการประยุกต์ใช้ไลบรารี่ Qiskit ใช้เพื่อสร้างสถานะซ้อนทับของการตัดสินใจใช้จำนวน 64 shots ในการสุ่มจำลอง (Quantum Sampling) กระบวนการนี้เป็นการจำลองเชิงควอนตัม



รูปที่ 4 วงจรควอนตัมที่สร้างจาก H-Gate จำนวน 3 คิวบิตที่มีการวัด

3.4 การทดสอบ

การทดลองทั้งหมดดำเนินการบนแพลตฟอร์ม Google Colab ในสภาพแวดล้อมแบบ CPU-only โดยใช้เครื่องเสมือนที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการลินุกซ์แบบ 64 บิต พร้อมหน่วยประมวลผล Intel® Xeon® CPU @ 2.20 GHz จำนวน 1 Core และหน่วยความจำหลัก 12.7 GB RAM สำหรับรันแบบจำลองและกระบวนการคำนวณต่าง ๆ โดยการตั้งค่าการทดสอบทั้งหมด 3 รูปแบบเพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบการทดลอง 3 รูปแบบเพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบ

รูปแบบการทดลอง	รายละเอียด
CPU-only	ใช้วิธีการคัดเลือกวัตถุจากค่า confidence สูงสุดแบบปกติ
QI-baseline	จำลองวงจรควอนตัม 3 qubits และ 128 shots โดยใช้ qasm_simulator ของ Qiskit
QI-optimized	ปรับลดวงจรเหลือ 2 qubits และ 64 shots พร้อม reuse backend และใช้ AerSimulator ของ Qiskit เพื่อเพิ่มความเร็ว

3.5 เกณฑ์การวัดผล

การวัดประสิทธิภาพใช้การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) ระหว่างค่า FPS ที่ได้จากแต่ละแบบ เพื่อวัดอัตราการปรับปรุง (Performance Gain) ของเทคนิค Quantum-Inspired Optimization เมื่อเทียบกับการประมวลผลแบบ CPU-only โดยที่ FPS นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$FPS = \frac{N_{frames}}{T_{process}} \tag{6}$$

โดยที่

N_{frames} = จำนวนเฟรมทั้งหมดที่ประมวลผล

$T_{process}$ = เวลารวมของการประมวลผลทั้งหมด

4. ผลการวิจัย

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล YOLOv5 ที่ผสานการทำงานกับเทคนิค Quantum-Inspired Optimization (QI) พบว่าการใช้วงจรควอนตัมจำลองช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้เมื่อเทียบกับการประมวลผลแบบ CPU-only ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยที่ CPU-only หมายถึงการประมวลผลโดยไม่ใช้เทคนิคควอนตัม QI-baseline หมายถึงการใช้วงจรควอนตัมจำลองจำนวน 3 คิวบิต จำนวนการสุ่ม (Shots) เท่ากับ 128 และ QI-optimized หมายถึงการใช้วงจรควอนตัมจำลองที่ปรับแต่งแล้วโดยใช้จำนวน 2 คิวบิตและจำนวนการสุ่มเท่ากับ 64

ตารางที่ 2 ผลการทดลองอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณจำนวน 10 ครั้ง

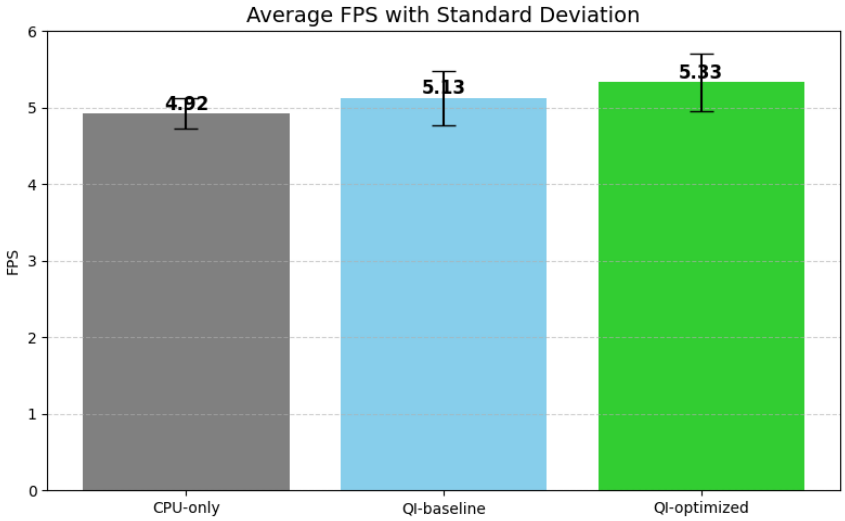
Test	CPU-only (FPS)	QI-baseline (FPS)	QI-optimized (FPS)
1	5.39	6.06	6.28
2	5.07	5.22	5.42
3	4.86	4.91	4.93
4	4.79	4.84	5.04
5	4.91	5.11	5.40
6	4.78	5.02	5.23
7	4.71	4.85	5.10
8	4.75	5.15	5.39
9	5.02	5.07	5.43
10	4.97	5.05	5.09
เฉลี่ย	**4.93**	**5.13**	**5.33**
SD	**0.21**	**0.32**	**0.42**

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ

โหมด	FPS	เพิ่มจาก CPU-only
CPU-only	4.93 ± 0.21	–
QI-baseline	5.13 ± 0.32	+4.06 %
QI-optimized	5.33 ± 0.42	+8.11 %

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการประมวลผลทั้งหมด 10 ครั้ง พบว่าโมเดลแบบ CPU-only มีความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 4.93 ± 0.21 FPS ขณะที่โมเดลแบบ QI-baseline สามารถเพิ่มความเร็วเฉลี่ยเป็น 5.13 ± 0.32 FPS คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 4.06% เมื่อเทียบกับโหมด CPU-only

สำหรับโมเดล QI-optimized ซึ่งมีการลดจำนวนคิวบิตจาก 3 คิวบิตเหลือ 2 คิวบิต และลดจำนวนการสุ่ม (Shots) จาก 128 เหลือ 64 พบว่าความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 5.33 ± 0.42 FPS หรือเพิ่มขึ้น 8.11% เมื่อเทียบกับ CPU-only ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณทั้ง 3 วิธี

5. สรุป

การผสานเทคนิค Quantum-Inspired Optimization เข้ากับ YOLOv5 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนำทางของอากาศยานไร้คนขับได้จริง จากการวาง Quantum-Inspired Module ไว้ในขั้นตอน Post-processing หลังส่วน Head ของ YOLOv5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระบบมีผลลัพธ์ของกรอบล้อมและค่าความมั่นใจแล้ว โมดูล QI ใช้การสุ่มเชิงควอนตัมแบบมีโครงสร้าง Hadamard Gate ที่มีการวัดเพื่อเลือกกรอบล้อมหนึ่งรายการจากผลลัพธ์ทั้งหมด โดยไม่ได้แก้ไขสถาปัตยกรรมภายใน YOLOv5

การออกแบบแบบนี้ช่วยให้ระบบไม่ต้องเลือกกรอบล้อมแบบเดิมซ้ำ ๆ เหมือนที่ YOLOv5 ใช้วิธี argmax ทำทุกครั้ง ทำให้การทำงานของ CPU ไม่ติดขัดเป็นช่วง ๆ และประมวลผลแต่ละเฟรมได้สะดวกมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนเฟรมที่ประมวลผลได้ต่อวินาทีเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้โดยใช้หลักการซ้อนทับและการวัดสถานะเพื่อเลือกผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด พบว่าวิธีการ QI ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ FPS ได้ถึง 8.11% โดยไม่เพิ่มภาระคำนวณของระบบ ดังนั้นจึงเป็นพื้นฐานสำคัญซึ่งที่นำเสนอแนวคิดเบื้องต้นเพื่อให้สามารถนำไปต่อยอดสู่การนำเทคนิค QI ไปใช้ในระบบฝังตัวของอากาศยานไร้คนขับในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” in Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 779–788, 2016.

[2] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, “YOLOv5 by Ultralytics,” GitHub Repository, 2020. [Online]. Available: https://github.com/ultralytics/yolov5

[3] Y. Zhao and S. Geng, “Face occlusion detection algorithm based on YOLOv5,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 2031, no. 1, p. 012053, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2031/1/012053

[4] ภุมมาลี ส., พราหมอ้น ณ., วงษ์คำช้าง ป., และ คำพูล จ., “การประยุกต์ใช้ระบบนำวิถีด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับอากาศยานไร้คนขับโจมตีขนาดเล็ก”, EAU Heritage Sci., ปี 18, ฉบับที่ 3, น. 150–164, ธ.ค. 2024.

[5] J. Zhang, Y. Sung, and T. Mak, “Quantum Computing Education with Raspberry Pi,” IEEE Transactions on Education, vol. 64, no. 4, pp. 453–460, 2021.

[6] M. A. Nielsen, M. J. Bremner, J. L. Dodd, A. M. Childs, and C. M. Dawson, “Implementing Quantum Algorithms on Raspberry Pi for Edge Computing Applications,” Quantum Information Processing, vol. 21, no. 3, pp. 1–18, 2022.

[7] Y. Du, M. H. Hsieh, D. Liu, and D. Tao, “Quantum-Inspired Tensor Neural Networks for Computer Vision Tasks,” IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 34, no. 5, pp. 2244–2256, 2023.

[8] H. Tang et al., “Quantum-Inspired Algorithm for General Image Processing Tasks,” IEEE Transactions on Image Processing, vol. 30, pp. 1–14, 2021.

[9] Y. Ding et al., “Quantum-Inspired Convolutional Neural Networks for Image Classification,” Nature Communications, vol. 13, pp. 1–10, 2022.

[10] J. Li et al., “Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for UAV Path Planning in Complex Environments,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 59, no. 2, pp. 1–15, 2023.

[11] Y. Zhang et al.,“Quantum-Inspired Feature Extraction for Image Processing,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 26, no. 1, pp. 1–12, 2020.

[12] IBM Quantum, “Qiskit: An Open-source Framework for Quantum Computing,” GitHub Repository, 2024. [Online]. Available: https://qiskit.org/

วิศวกรรมระบบและโมเดลดิจิทัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของกำลังพลด้านวิศวกรรมในโปรแกรมพัฒนาขีดความสามารถขนาดใหญ่ของกองทัพอากาศ

Integrating Model-Based Systems Engineering into the Royal Thai Air Force Capability Development Programs: A Practice for Enhanced Engineering Personnel Efficiency

วรเชษฐ์ เจริญสวัสดิ์[1], เชษฐพัฒน์ ไกรขาว[2], ณณัท ฐานทัดสกุล[3] และ วิภาวดี วงษ์สุวรรณ์[4]

[1]แผนกวิศวกรรมระบบ ทีมนรสีห์

[2]กองควบคุมมาตรฐานซอฟต์แวร์ ศูนย์ซอฟต์แวร์กองทัพอากาศ

[3]ฝ่ายวิศวกรรมระบบ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

[4]คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น

Vorachet Jaroensawas[1], Chettapat Kraikhaw[2], Nanata Tantadsakul[3] and Wipawadee Wongsuwan[4]

[1]Systems Engineering Department, NORASI Team

[2]Software Standards Division, RTAF Software Center

[3]Systems Engineering Department, Defence Technology Institute

[4]Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology

[1]vorachet.jaroensawas@norasi-team.com, [2]chsm_ger@rtaf.mi.th

[3]nanata.t@dti.or.th, [4]wipawadee@tni.ac.th

บทคัดย่อ

สมุดปกขาวของกองทัพอากาศ (ทอ.) ปี 2568 ได้วางรากฐานเชิงยุทธศาสตร์ สำหรับการพัฒนาขีดความสามารถใหม่ ๆ ครอบคลุมหลายโครงการในหลากหลายโดเมนระบบ เพื่อตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมความมั่นคงที่ซับซ้อนในปัจจุบัน [1] การขับเคลื่อนโปรแกรมขนาดใหญ่ให้สำเร็จภายใต้ความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องมีการบริหารจัดการโปรแกรมขนาดใหญ่และวัฏจักรระบบที่มีคุณภาพ มุ่งเน้นเพิ่มขีดความสามารถของบุคลากรด้านวิศวกรรมให้ปฏิบัติที่ซับซ้อนได้มากขึ้น รวดเร็วขึ้น น่าเชื่อถือ และอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหนึ่งในเป้าหมายสำคัญที่สมุดปกขาวมุ่งเน้น คือการบรรลุอธิปไตยทางเทคโนโลยีสำหรับระบบวิกฤตและซับซ้อนสูง (เช่น ระบบบัญชาการและควบคุม, การปฏิบัติการร่วมข้ามโดเมน) เป้าหมายเหล่านี้ผลักดันให้ต้องแสวงหาแนวทางในการพัฒนาและบูรณาการองค์ความรู้ที่มีประสิทธิภาพ การพึ่งพากระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้เอกสารเป็นหลักเพียงอย่างเดียวในการบริหารโปรแกรม เชื่อมโยง ทวนสอบ ย้อนรอย ให้เหตุผล ติดตามผล แสวงหาปฏิบัติการที่เป็นเลิศ ของวัฏจักรระบบกว่า 100 โครงการภายใต้โปรแกรมพัฒนาขีดความสามารถขนาดใหญ่ของ ทอ. ที่มีความต่อเนื่องกว่า 10 ปี นั้นเป็นภาระงานที่มีข้อมูลวิศวกรรมจำนวนมหาศาล วิจัยนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในบริบทของวิศวกรรมระบบ เพื่อเป็นเครื่องมือสนับสนุนการบุคลากรด้านวิศวกรรมที่มีจำนวนจำกัดและมีการสับเปลี่ยนแปลงหมุนเวียนหน้าที่ความรับผิดชอบตลอดเวลา การเพิ่มขีดความสามารถในการบริหารโปรแกรมขนาดใหญ่และปลดล็อกศักยภาพของบุคลากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลและวิศวกรรมระบบ คือทางออกในสมมุติฐานของวิจัย

คำสำคัญ: วิศวกรรมระบบ, อธิปไตยทางเทคโนโลยี, โมเดลระบบดิจิทัล, ความซับซ้อน, การวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการ

Abstract

The Royal Thai Air Force (RTAF) White Paper 2025 outlines a strategic path for developing new capabilities across numerous system domains to navigate a complex security landscape [1]. Executing these large-scale programs, particularly achieving technological sovereignty for critical systems like Command and Control and Joint All-Domain Operations, demands high-quality program management and enhanced engineering expertise. However, managing the system lifecycle of over 100 long-term projects using traditional, document-centric processes imposes an unsustainable data and workload burden on the RTAF's limited and frequently rotating engineering workforce. This research posits that the solution lies in adopting digital technology within the Systems Engineering (SE) context and realized through Model-Based Systems Engineering (MBSE). By providing a structured, linked, and traceable digital environment, this approach will significantly support personnel, enhance large-scale program management, and unlock the limited workforce's potential, thereby sustaining the RTAF's long-term capability development goals.

Keywords: Systems Engineering (SE), Technological Sovereignty, Model-Based Systems Engineering (MBSE), Operational Analysis

1. ภูมิทัศน์ภัยคุกคาม

สภาพแวดล้อมความมั่นคงร่วมสมัยมีลักษณะของความขัดแย้งที่ต่อเนื่อง คลุมเครือ ไม่เป็นเส้นตรง สมุดปกขาว ทอ. ปี 2568 ได้ประมวลความท้าทายนี้ไว้ โดยระบุถึงภูมิทัศน์ทางยุทธศาสตร์ ผสมผสานการวางกำลังทางทหารเพื่อรับมือกับการทำสงครามแบบอสมมาตร ไซเบอร์ และเศรษฐกิจ ซึ่งสร้างสภาพแวดล้อมของสงครามพันทาง

1.1 อุบัติการณ์ภัยคุกคาม

สมุดปกขาว นำเสนอภาพรวมที่ครอบคลุมของอุบัติการณ์ภัยคุกคาม 10 ประการ ภัยคุกคามเหล่านี้ไม่ได้แยกออกจากกัน แต่สร้างเป็นเครือข่ายที่เชื่อมโยงกันและซับซ้อน ซึ่งสามารถจัดกลุ่มตามหน้าที่ได้เป็น 3 กลุ่มหลัก

กลุ่มที่ 1 ภัยคุกคามทางภูมิรัฐศาสตร์ กลุ่มนี้มีรากฐานมาจากการแข่งขันทางภูมิรัฐศาสตร์ ประกอบด้วย THC-1) การแข่งขันในการแผ่ขยายอิทธิพลด้านยุทธศาสตร์ในพื้นที่ทะเลจีนใต้และอนุภูมิภาคแม่น้ำโขง THC-2) การแข่งขันกันสะสมอาวุธในภูมิภาค โดยประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ต่างพัฒนาเทคโนโลยีทางการทหารขั้นก้าวหน้า THC-3) ปัญหาความมั่นคงตามแนวชายแดนและเขตแดนทางธรรมชาติ ซึ่งนำไปสู่อาชญากรรมข้ามชาติและการทะลักของผู้อพยพ THC-4) ปัญหาความขัดแย้งทางภูมิรัฐศาสตร์ในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วโลก ซึ่งสร้างสภาวะไร้เสถียรภาพที่ส่งผลกระทบเป็นลูกโซ่

กลุ่มที่ 2 ภัยคุกคามแบบอสมมาตร กลุ่มนี้มุ่งเป้าไปที่ระบบประสาทของประเทศ เศรษฐกิจ โครงสร้างพื้นฐาน และขีดความสามารถทางเทคโนโลยี ประกอบด้วย THC-5) การก่อการร้ายที่มุ่งเป้าไปที่พื้นที่เศรษฐกิจและโครงสร้าง

พื้นฐานสำคัญ เพื่อทำลายเสถียรภาพและความเชื่อมั่นของชาติ THC-6) ภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่รุนแรงขึ้น และการโจมตีต่อระบบโครงสร้างพื้นฐานที่เพิ่มมากขึ้น THC-7) การขยายตัวและการแข่งขันทางอวกาศในระดับภูมิภาค ซึ่งคุกคามการพึ่งพาดาวเทียมสื่อสารและข่าวกรอง THC-8) จุดอ่อนเชิงยุทธศาสตร์ที่สำคัญ การพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างชาติ ที่บั่นทอนอธิปไตยทางเทคโนโลยีและข้อผูกพันนโยบายป้องกันประเทศที่เสียเปรียบต่างชาติ

กลุ่มที่ 3 ภัยคุกคามเชิงโครงสร้างและความยืดหยุ่นของชาติ กลุ่มนี้แสดงถึงภัยคุกคามพื้นฐานที่ไม่ใช่การทหาร แต่มุ่งเป้าไปที่การดำรงชีวิต เสถียรภาพทางเศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย THC-9) ความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงฟอสซิล และแนวโน้มของโลกที่มุ่งสู่สังคมไร้คาร์บอน ซึ่งสร้างทั้งผลกระทบทางเศรษฐกิจและความจำเป็นในการปรับตัวทางอุตสาหกรรม THC-10) ภัยธรรมชาติที่รุนแรงมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม ซึ่งคุกคามความมั่นคงทางอาหารโดยตรง

2. หลักการทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การบริหารจัดการแผนงานขนาดใหญ่ที่เหมาะสมสำหรับสมุดปกขาว ทอ. นั้นเป็น "ระบบแห่งระบบ" (System of Systems) ซึ่งมีคุณลักษณะซับซ้อน มีการจัดหมู่ จุดเชื่อมต่อ และความสัมพันธ์จำนวนมากในเนื้อหารายละเอียด แนวทางดั้งเดิมที่ใช้เอกสารเป็นหลักในโครงการวิศวกรรมสร้างภาระให้แก่บุคลากรอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีขีดความสามารถใหม่ดังนี้ ประการแรกคือ การสร้างความสอดคล้องและการบูรณาการข้อมูล ด้วยการริเริ่ม "แหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือเพียงแหล่งเดียว" มิใช่เอกสารแบบกระจัดกระจาย ที่ไม่มีประสิทธิภาพในการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลง การย้อนรอยหาเหตุผล และ การวิเคราะห์ผลกระทบ โดยหลักการพื้นฐานเหล่านี้เป็นองค์ความรู้จากสาขาวิชาวิศวกรรมระบบ [2] และได้รับการยืนยันว่ามีความจำเป็นในบริบทของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ [3, 4] ประการที่สองคือ ขีดความสามารถในการจัดการความซับซ้อนและองค์ความรู้ เพื่อปลดปล่อยศักยภาพของบุคลากรทักษะสูงจากภาระงานซ้ำซ้อนที่มีมูลค่าต่ำ เช่นงานเอกสาร

ตารางที่ 1 ตารางสรุปขีดความสามารถที่จำเป็นและเปรียบเทียบผลกระทบ ในขอบเขตที่สนใจของวิจัย

ขีดความสามารถที่จำเป็น	**ผลเสียถ้าไม่ทำ** (ใช้เอกสารเป็นหลัก)	**ประโยชน์ที่ได้รับ** (ใช้โมเดลเป็นหลัก) **ประสิทธิภาพใหม่**
การย้อนรอยข้อมูลที่ซับซ้อนได้รวดเร็ว	**"ไม่รู้ว่ากระทบอะไร"** เมื่อความต้องการเปลี่ยนไป ไม่สามารถตอบได้ว่า กระทบส่วนใดได้ในเวลาอันรวดเร็ว ต้องทบทวนจากเอกสารจำนวนมาก เป็นภาระงานที่มีมูลค่าเพิ่มต่ำและผิดพลาดได้ง่าย	**"รู้ผลกระทบทันที"** สามารถสืบย้อนรอยข้อมูลที่ซับซ้อนได้รวดเร็วกว่าการทบทวนเอกสาร
การวิเคราะห์ผลกระทบข้อมูลที่ซับซ้อนได้รวดเร็ว	**"งบประมาณบานปลายและล่าช้า"**	**"ประเมินผลกระทบได้แม่นยำ"** ระหว่างพิจารณาอนุมัติเปลี่ยนแปลง

	ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงได้ยากเมื่อมีการร้องขอการเปลี่ยนแปลงทำให้แก้ปัญหาหนึ่ง ไปสร้างปัญหาใหม่เสี่ยงต่อการบูรณาการที่ล้มเหลว ในภายหลัง	สามารถวิเคราะห์ผลกระทบข้อมูลที่ซับซ้อนได้รวดเร็ว
รักษาความสอดคล้องข้อมูลที่ซับซ้อนได้โดยใช้ความพยายามที่น้อยกว่าเอกสาร	**"ข้อมูลขัดแย้งกันเอง"** ทีมโครงการขนาดใหญ่ที่ไม่ได้ทำงานร่วมกันอย่างใกล้ชิด มีความเสี่ยงเรื่องที่แต่ละทีมทำงานบนเอกสารคนละฉบับ เห็นข้อมูลไม่ตรงกัน เสียเวลาถกเถียงและเกิดความผิดพลาดในการสื่อสาร	**"ทุกคนเห็นภาพเดียวกัน"** โมเดลคือแหล่งข้อมูลจริงเพียงแหล่งเดียว ทำงานบนข้อมูลเดียวกัน ขจัดความผิดพลาดเรื่องความไม่สอดคล้อง
จัดการความซับซ้อนได้โดยใช้ความพยายามที่น้อยกว่าเอกสาร ไม่หายไปกับเอกสารและบุคคล	**"ความรู้ผูกติดกับตัวบุคคล ถ่ายทอดความรู้ไม่เป็นระบบ"** องค์ความรู้ของระบบที่ซับซ้อนผูกติดกับตัวบุคคล เมื่อพวกกำลังพลย้ายหรือเกษียณ องค์ความรู้จะหายไป	**"เปลี่ยนความซับซ้อนให้จัดการได้"** โมเดลทำหน้าที่เป็น ความจำขององค์กร จัดการมุมมองเข้าถึงความรู้อย่างเป็นระบบ สนับสนุนกำลังพลใหม่เรียนรู้ได้รวดเร็วกว่า
การสร้างเอกสาร	**"จมอยู่กับงานเอกสาร"** บุคลากรทักษะสูงเสียเวลาในการคัดลอก-วางและจัดรูปแบบเอกสาร แทนที่จะใช้เวลาทำงานวิศวกรรมที่สำคัญและมีมูลค่ามากกว่า	**"สร้างเอกสารอัตโนมัติ"** โมเดลสามารถสร้างเอกสารที่จำเป็นได้แบบอัตโนมัติ รวดเร็ว แม่นยำ

---

3. การดำเนินการวิจัย

วิจัยประยุกต์ใช้วิศวกรระบบตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของโปรแกรม โดยใช้ข้อมูลจาก สมุดปกขาว ทอ. ปี 2568 [1] เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างโมเดลระบบดิจิทัลตัวอย่าง เพื่อนำไปปฏิบัติทดลองและตอบคำถามวิจัยในตารางที่ 2

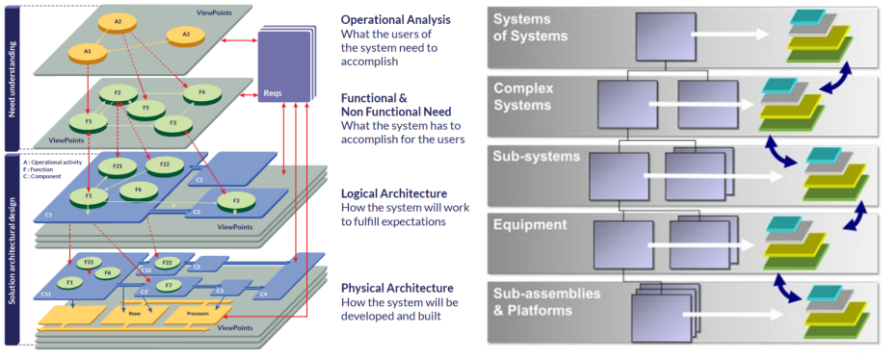
วิจัยเลือกใช้ Arcadia [5] เป็นระเบียบวิธีหลักสำหรับแนวทางวิศวกรรมระบบที่ใช้โมเดลดิจิทัล Arcadia ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อการวิเคราะห์และออกแบบสถาปัตยกรรมระบบที่ซับซ้อน สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เชิงปฏิบัติการ (Operational Analysis) และการกำหนดสถาปัตยกรรมในหลายระดับได้อย่างเป็นขั้นตอน เช่น สถาปัตยกรรมเชิงตรรกะ (Logical Architecture) และสถาปัตยกรรมเชิงกายภาพ (Physical Architecture) เพื่อ

สนับสนุนการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีดังกล่าวให้มีตัวอย่างที่ชัดเจน วิจัยใช้เครื่องมือซอฟต์แวร์ Capella [6] ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานตามกรอบของ Arcadia โดย Capella ทำหน้าที่เป็นสภาพแวดล้อมการสร้างแบบจำลอง (Modeling Workbench) ที่ช่วยให้สามารถสร้างมุมมอง (Viewpoints) ของ Arcadia

วิจัยสร้างโมเดลดิจิทัลจากชุดข้อมูลและความสัมพันธ์จากสมุดปกขาว ทอ. ในขอบเขตการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการ โดยนำ ภัยคุกคาม มาตรการตอบโต้ ขีดเความสามารถที่ต้องการ กำลังรบที่จำเป็น โดเมนระบบ โครงการ และส่วนประสานต่างๆ มาเป็นข้อมูลทดลอง

ตารางที่ 2 วิธีการของวิจัย

การประมวลผลที่สนใจ	**วิธีการสร้างและสาธิต**	**การนำเสนอผลลัพธ์ สำรวจและอภิปราย**
ประมวลผล การย้อนรอย	ใช้โมเดลนำเสนอบริบทให้แก่ระบบในแต่ละโดเมน ที่มีความชัดเจนกว่าเอกสาร	**"รู้ผลกระทบทันที"** ทำอย่างไร
ประมวลผล การวิเคราะห์ผลกระทบ	ใช้โมเดลคำนวณผลกระทบ ที่มีประสิทธิภาพกว่าเอกสาร	**"ประเมินผลกระทบได้แม่นยำ"** ทำอย่างไร
ประมวลผล การทวนสอบความสอดคล้อง	ใช้โมเดลอำนวยงานทวนสอบความสอดคล้องและความสมบูรณ์ ที่มีประสิทธิภาพกว่าเอกสาร	**"ทุกคนเห็นภาพเดียวกัน"** ได้อย่างไร
ประมวลผล การจัดการความซับซ้อน	ใช้โมเดลเข้าถึงลำดับชั้นและความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของรายละเอียด ที่เอกสารไม่สามารถทำได้	**"ความซับซ้อนจัดการได้"** ทำอย่างไร
ประมวลผล การสร้างเอกสาร	สร้างเอกสารจากโมเดลที่สร้างขึ้นและเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นฉบับในเอกสารในสมุดปกขาว	**"สร้างเอกสารอัตโนมัติ"** ช่วยบุคลากรได้อย่างไร

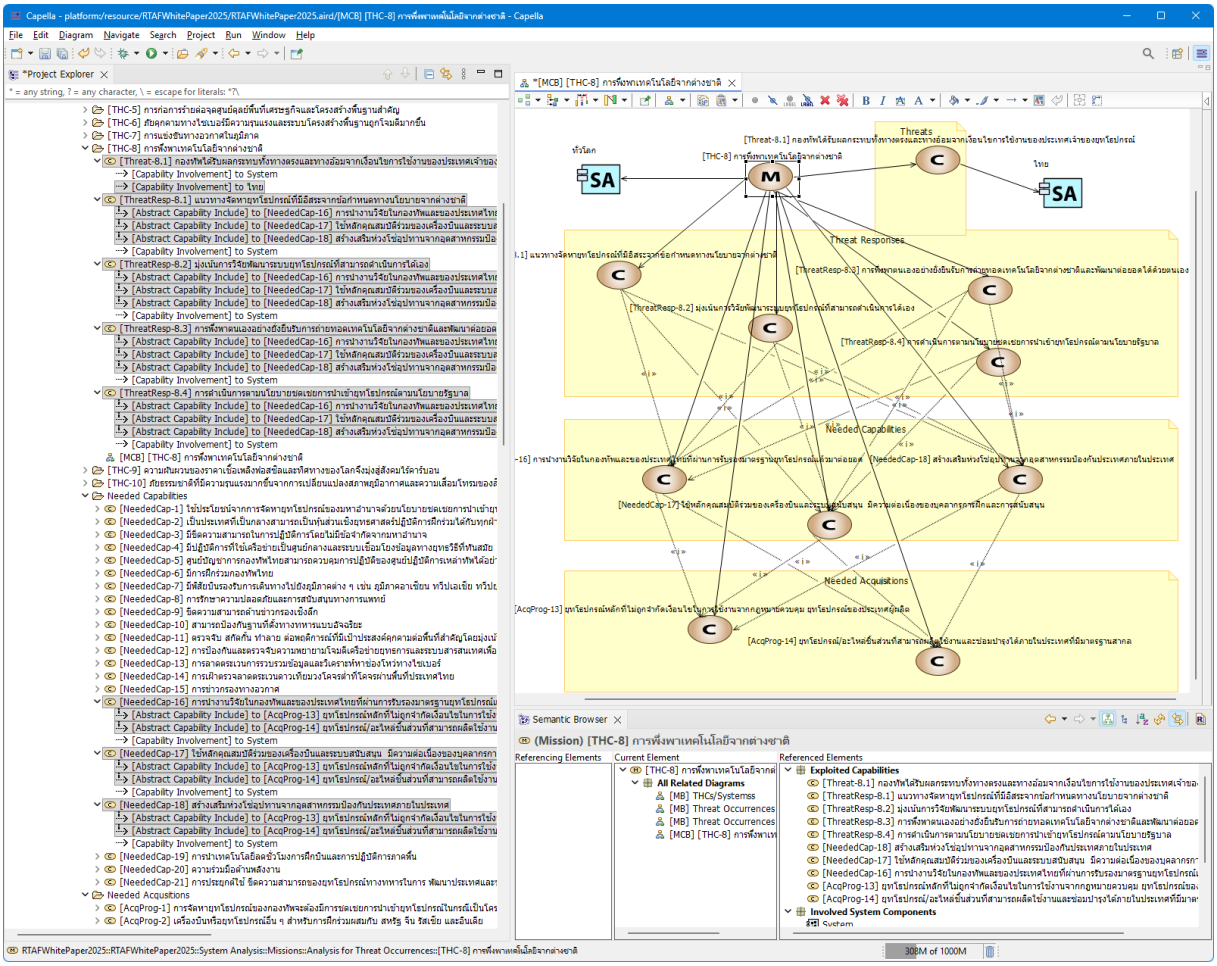


รูปที่ 1 ระเบียบวิธี Arcadia [5] สำหรับวิศวกรรมระบบที่ใช้โมเดลดิจิทัล

4. ผลการวิจัย

4.1 ประมวลผลการย้อนรอย

ผลการทดลองเชิงประจักษ์ชี้ให้เห็นว่า โมเดลดิจิทัลมีประสิทธิภาพในการนำเสนอข้อมูลการเชื่อมโยงขององค์ประกอบในสภาวะแวดล้อมภัยคุกคาม เหนือชั้นกว่าการใช้เอกสารแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โมเดลสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ทั้งในรูปแบบ กราฟิกเชิงสัมพันธ์ และโครงสร้างลำดับชั้นแบบต้นไม้ ซึ่งช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถมองเห็น ทิศทางของความสัมพันธ์ ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ได้อย่างชัดเจน จุดเด่นที่สำคัญคือขีดความสามารถด้านการย้อนรอยกลับแบบสองทิศทาง เมื่อมีการเพิ่ม ลบ หรือแก้ไของค์ประกอบใดๆ ในแบบจำลอง เส้นทางการเชื่อมโยงจะถูกปรับปรุงและแสดงผลให้เห็นโดยอัตโนมัติ

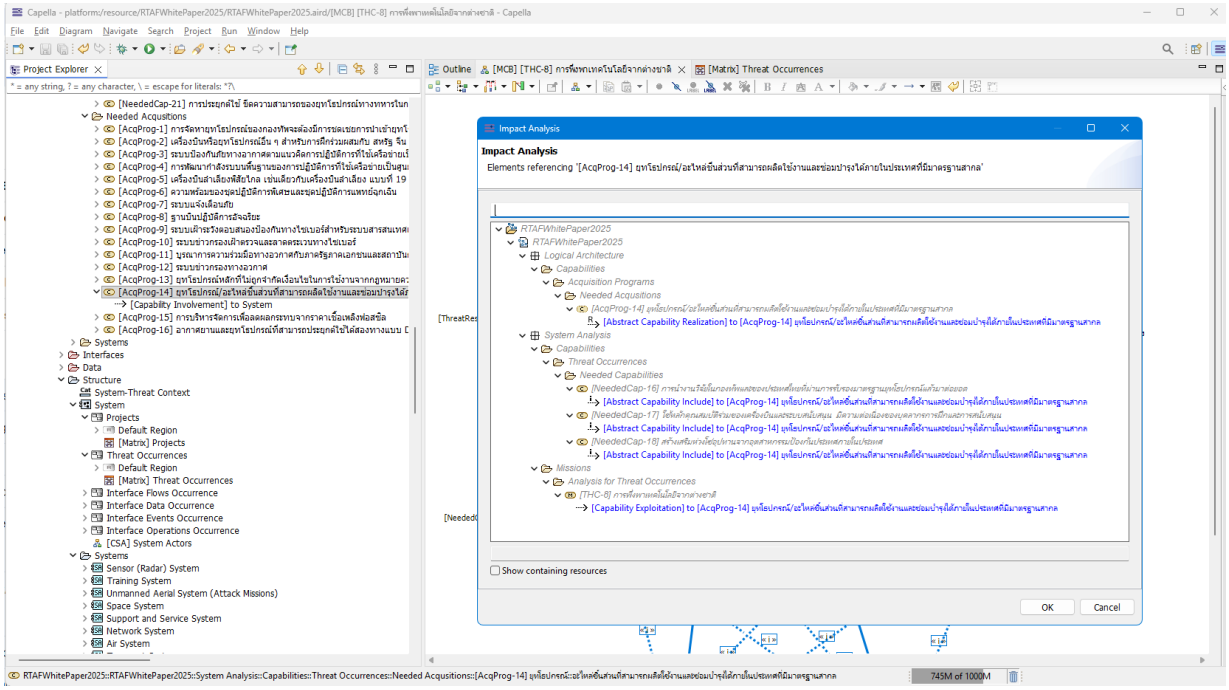


รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้โมเดล Mission และ Capability และแผนภาพ Mission Capability Blank (MCB) ในการนิยามสภาพแวดล้อมภัยคุกคามและประมวลผลย้อนรอยหาความสัมพันธ์ระหว่าง ภัยคุกคาม มาตรการตอบโต้ ขีดความสามารถที่ต้องการ และกำลังระบบที่ต้องจัดหา

คุณลักษณะเด่นนี้ เปิดโอกาสให้ซอฟต์แวร์สามารถประมวลผลการสืบย้อนรอยจากโมเดลต้นทางที่สนใจในแบบอัตโนมัติ ซึ่งแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับการตรวจสอบความสอดคล้องด้วยมือที่ต้องกระทำในเอกสาร

4.2 ประมวลผลการวิเคราะห์ผลกระทบ

ข้อค้นพบที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือโมเดลดิจิทัลแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถในการวิเคราะห์ผลกระทบได้อย่างรวดเร็ว โดยก่อนที่จะมีการดำเนินการแก้ไขคุณลักษณะใด ๆ สามารถประมวลผลและสรุปรายการโมเดลที่จะได้รับผลกระทบทั้งหมดได้ มีความชัดเจน แม่นยำ และรวดเร็ว ซึ่งเป็นขีดความสามารถใหม่ที่ไม่สามารถทำได้ด้วยมือบนเอกสารจำนวนมาก

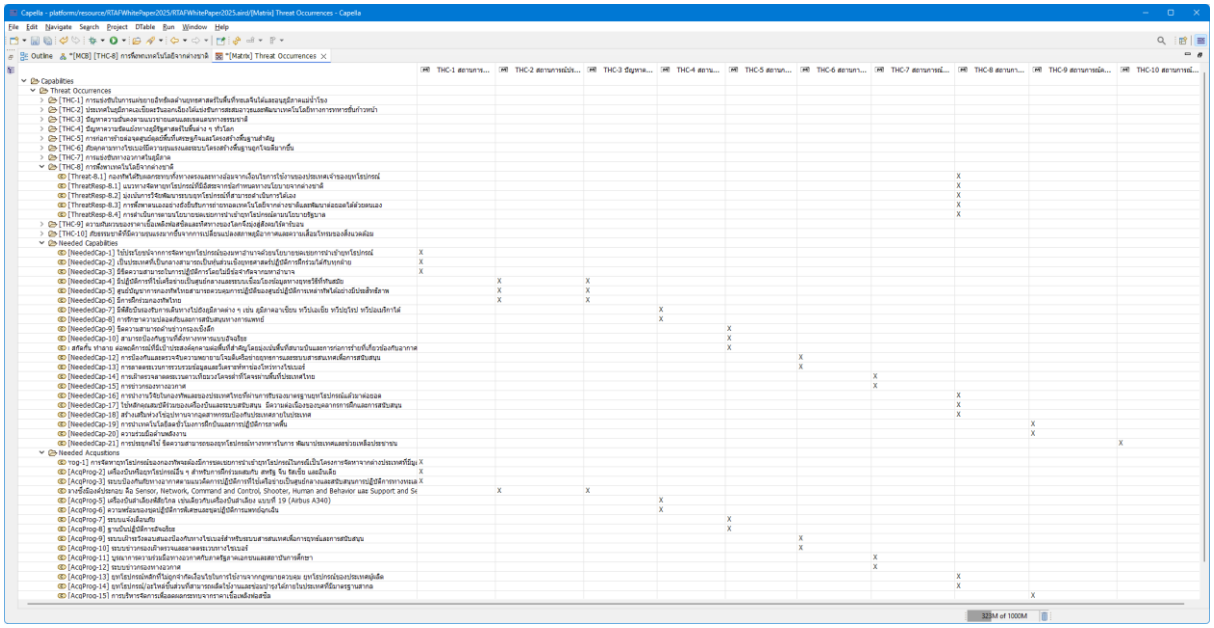


รูปที่ 3 การใช้ความสามารถการซอฟต์แวร์ให้ประมวลผลผลกระทบ จากการเปลี่ยนเงื่อนไขของ [AcqProg-14] การจัดหาอะไหล่ชิ้นส่วนที่สามารถผลิตใช้งานและซ่อมบำรุงได้ภายในประเทศที่มีมาตรฐานสากล ซึ่งได้คำตอบในเวลาอันรวดเร็วว่า จะส่งผลกระทบต่อ [NeededCap-16] การนำงานวิจัยในกองทัพและของประเทศไทยที่ผ่านการรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์แล้วมาต่อยอด, [NeededCap-17] ใช้หลักคุณสมบัติร่วมของเครื่องบินและระบบสนับสนุน มีความต่อเนื่องของบุคลากรการฝึกและการสนับสนุน และ [NeededCap-18] สร้างเสริมห่วงโซ่อุปทานจากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในประเทศ

4.3 ประมวลผลการทวนสอบความสอดคล้อง

การทวนสอบยืนยันความสอดคล้อง จำเป็นต้องอาศัยการตรวจสอบความสัมพันธ์ขององค์ประกอบเหตุและผลในเนื้อหาสาระที่เกิดขึ้นในวัฏจักรงานวิศวกรรม โมเดลดิจิทัลสนับสนุนขีดความสามารถนี้โดยการสังเคราะห์เมทริกซ์ความสัมพันธ์แบบอัตโนมัติจากโมเดล เมทริกซ์ดังกล่าวทำหน้าที่นำเสนอข้อมูลความสัมพันธ์ ช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถ ทบทวนความสอดคล้องเชิงบูรณาการของทั้งระบบ กระบวนการนี้มีความสำคัญในกระบวนการทวนสอบและรับรองในงานวิศวกรรม ซึ่งไม่สามารถกระทำได้โดยอัตโนมัติและต้องใช้ความพยายามมากในแนวทางปฏิบัติที่ใช้

เอกสารเป็นหลัก

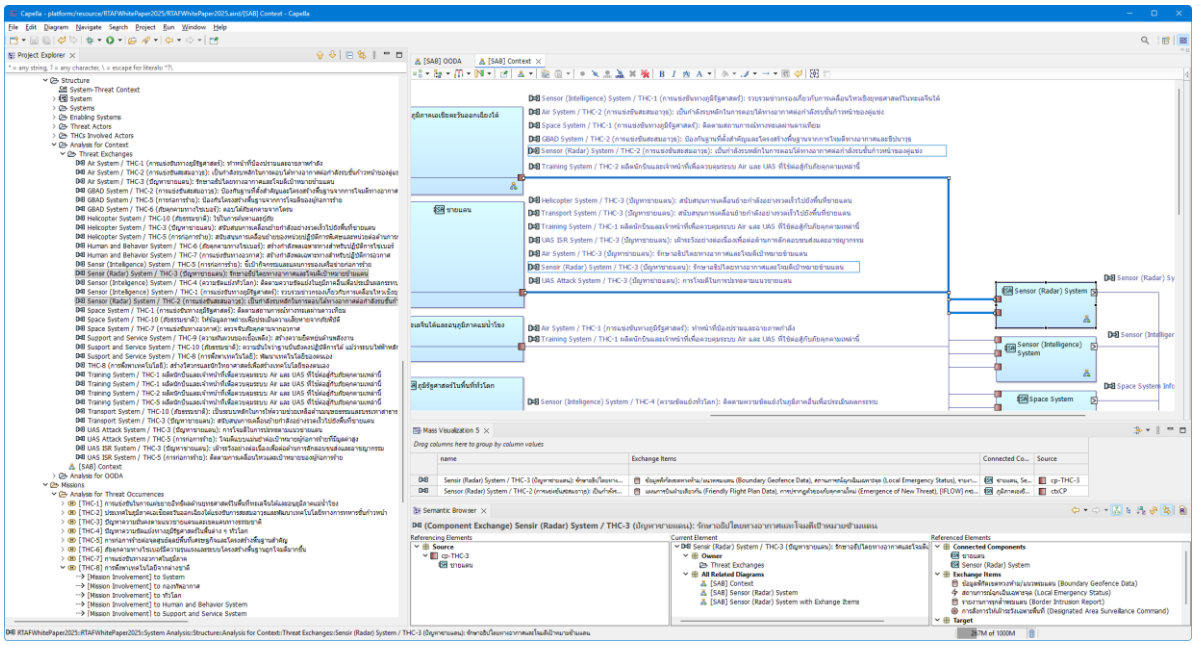


รูปที่ 4 การสังเคราะห์เมทริกซ์ความสัมพันธ์แบบอัตโนมัติเพื่อทบทวนองค์ประกอบของการนิยามสภาพแวดล้อมภัยคุกคาม โดยสามารถบ่งชี้ความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลวิศวกรรมได้อย่างรวดเร็วจากเมทริกซ์

4.4 ประมวลผลการจัดการความซับซ้อน

ข้อค้นพบระหว่างการวิจัยในเรื่องการจัดการความซับซ้อนคือ แม้ว่าสมุดปกขาวจะระบุรายการระบบเป็นหมายที่เป็นกำลังรบที่ต้องการ แต่เมื่อเข้าสู่กระบวนการออกแบบ นักออกแบบจำเป็นต้องใช้บริบทของระบบเป็นโจทย์ออกแบบ เป็นข้อมูลที่ต้องนำมาจากการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการ ในแนวทางดั้งเดิมที่ใช้เอกสาร นักออกแบบระบบต้องย้อนรอบกลับไปวิเคราะห์เอกสารอื่นๆ (เช่น เอกสารประเมินภัยคุกคาม, แนวคิดการปฏิบัติการ) เพื่อสังเคราะห์ข้อมูลบริบทเชิงลึกนี้ ซึ่งไม่ใช่ขอบเขตเนื้อหาในสมุดปกขาว เป็นภาระงานสำคัญของนักออกแบบที่จะต้องรักษาความสอดคล้อง

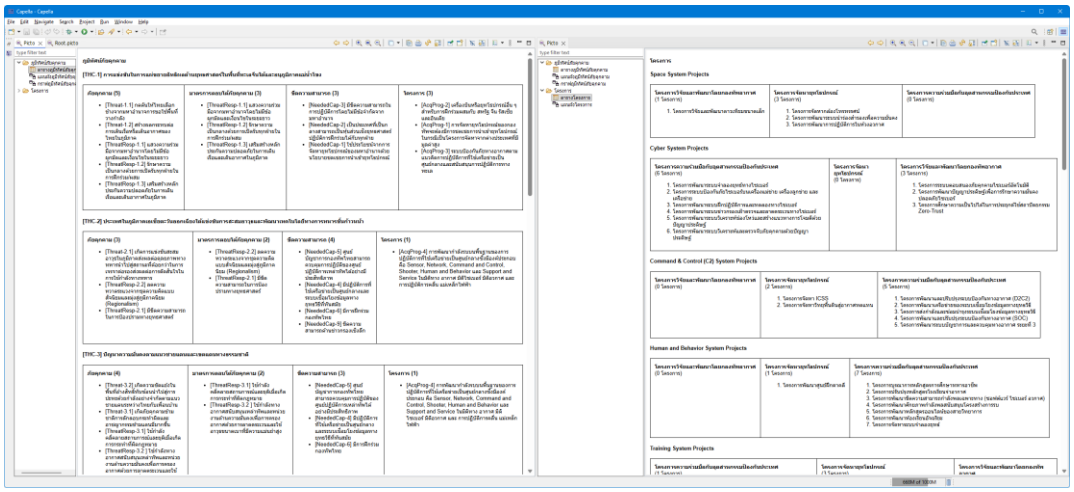
โมเดลดิจิทัลได้แสดงศักยภาพในเรื่องนี้ โดยสามารถนำโมเดลที่พัฒนาไว้ในลำดับก่อนหน้าจากการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการ กลับมาใช้ซ้ำเพื่อวิเคราะห์และแสดงบริบทได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น กรณีระบบเซ็นเซอร์ (เรดาร์) โมเดลแสดงความเชื่อมโยงระหว่างตัวระบบเรดาร์กับความต้องการในการปฏิบัติงานในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และพื้นที่ชายแดนของประเทศ อันเป็นข้อมูลบริบทที่จำเป็นต่อการวางแผนงานออกแบบในขั้นตอนต่อไป เช่น การระบุตัวประสานและรายละเอียดสภาพแวดล้อมของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และพื้นที่ชายแดนของประเทศ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ระบบเซ็นเซอร์ (เรดาร์) เป็นต้น



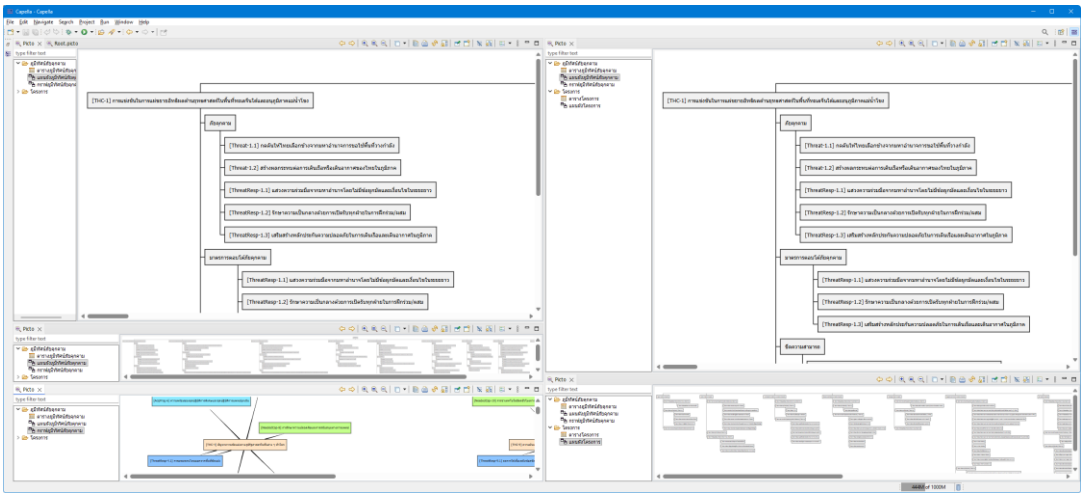
รูปที่ 5 การแสดงบริบทของระบบเชิงปฏิบัติการได้อย่างชัดเจนสำหรับกรณีระบบเซ็นเซอร์ (เรดาร์) ในการทดลองได้นิยามบริทต่อภัยคุกคามคือ Sensor (Radar) System / THC-2 (การแข่งขันสะสมอาวุธ): เป็นกำลังรบหลักในการตอบโต้ทางอากาศต่อกำลังรบขั้นก้าวหน้าของคู่แข่ง และ Sensor (Radar) System / THC-3 (ปัญหาชายแดน): รักษาอธิปไตยทางอากาศและโจมตีเป้าหมายข้ามแดน ซึ่งแสดงผลทั้งกราฟฟิก (กลาง), รายการต้นไม้ (ซ้าย) และการประมวลผลย้อนรอย (ล่าง)

4.5 ประมวลผลการสร้างเอกสาร

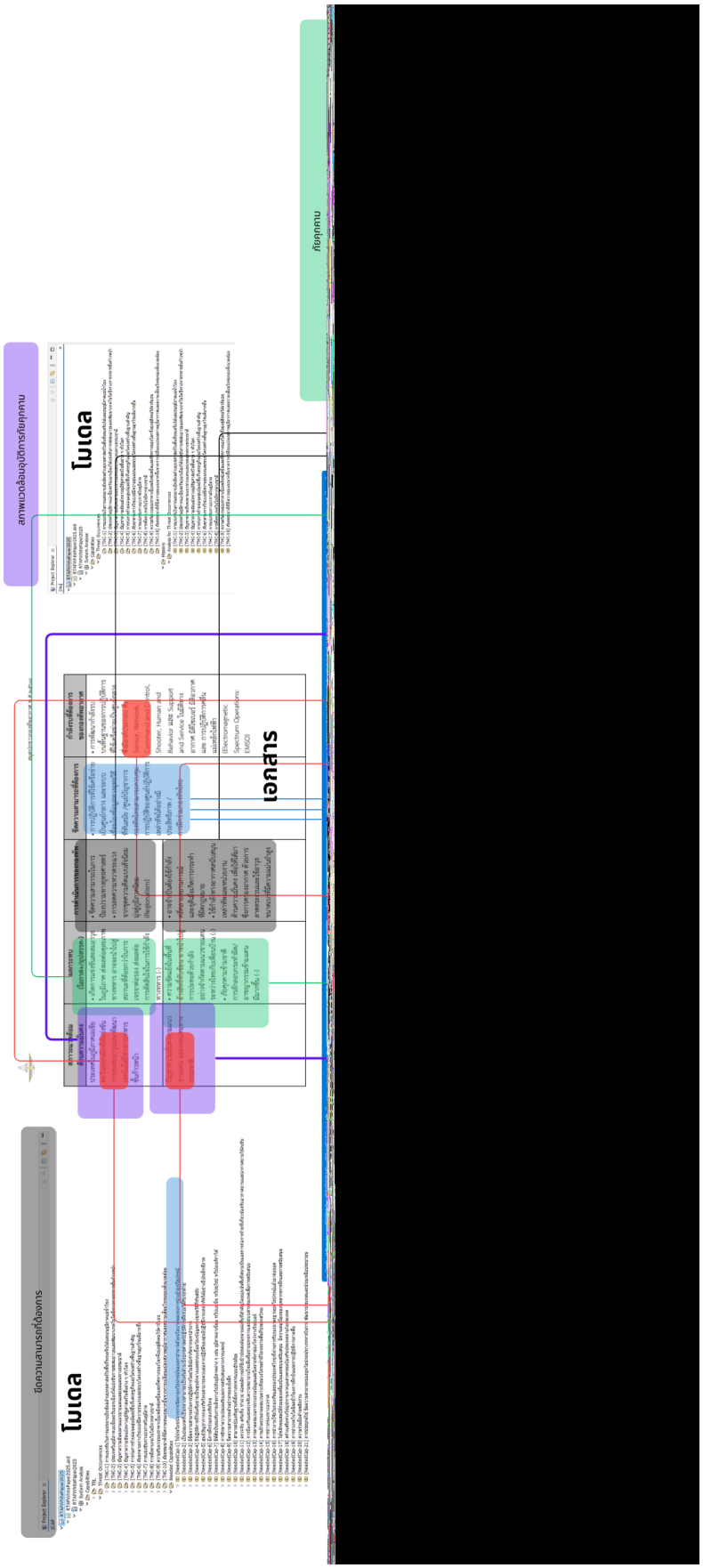
โมเดลดิจิทัลแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ในการนำกลับมาใช้ซ้ำเพื่อการสร้างเอกสาร การทดลองวิจัยได้นำโมเดลมาประมวลผลสร้างตารางสภาพแวดล้อมภัยคุกคาม และรายการโครงการ ซึ่งสามารถทดแทนข้อมูลตารางในสมุดปกขาวได้ ผลการทดลองชี้ชัดว่า โมเดลสร้างเอกสารดังกล่าวได้โดยอัตโนมัติและรวดเร็วมาก กระบวนการนี้อาศัยการเขียนชุดคำสั่ง (Scripting) เพิ่มเติม มีความยืดหยุ่น สามารถสร้างเอกสารที่เป็น รูปแบบข้อความ (Text-based) ได้อย่างแม่นยำไปตามชุดคำสั่ง สามารถประยุกต์ให้ตรงตามความต้องการเฉพาะเรื่องของเอกสารได้ นอกเหนือจากเอกสารข้อความ ยังสามารถประยุกต์หลักการเดียวกันนี้ในการ สร้างแผนภาพกราฟิก (Graphical Diagrams)



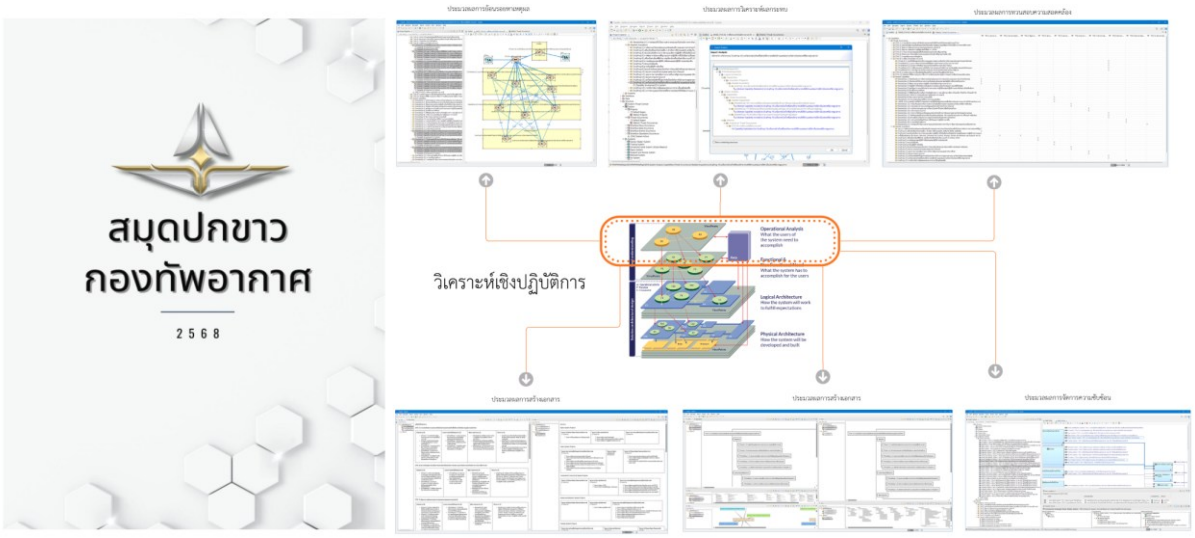
รูปที่ 6 เอกสารตารางสภาพแวดล้อมภัยคุกคาม และรายการโครงการ ที่สร้างมาจากโมเดล



รูปที่ 7 เอกสารแผนผังและกราฟของสภาพแวดล้อมโครงการและรายการโครงการ



รูปที่ 8 แผนผังแสดง การถอดโครงสร้างของสาระจากสมุดปกขาวแบบเอกสาร ออกมาเป็นสมุดปกขาวแบบดิจิทัล



รูปที่ 9 แผนผังสรุปการทดลองในขอบเขตวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการ ของวิศวกรรมระบบที่ใช้โมเดลดิจิทัล ที่มุ่งเน้นสำรวจขีดความสามารถใหม่ให้แก่บุคลากร เพื่อสร้างความพร้อมในการทำงานที่ซับซ้อนในอนาคต

5. สรุป

วิจัยเสนอแนวทางและสาธิตการรับมือความท้าทายในการดำเนินโครงการพัฒนาขีดความสามารถใหม่ของกองทัพอากาศ ตามกรอบเนื้อหาสมุดปกขาว ทอ. 2568 ซึ่งครอบคลุมกว่า 100 โครงการ 14 โดเมนระบบ เพื่อตอบสนองต่อ 10 ภัยคุกคามสำคัญ วิจัยตั้งข้อสันนิษฐานว่า กองทัพอากาศจะยังคงมีข้อจำกัดในจำนวนบุคคลากรด้านวิศวกรรมและจะต้องเผชิญภัยคุกคามอุบัติใหม่และการเปลี่ยนแปลงที่ยากจะคาดการณ์ได้ชัดเจนในห้วงทศวรรษข้างหน้า ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความต้องการใหม่และข้อจำกัดใหม่ ๆ และความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนขึ้น เป็นความท้าทายในการบริหารจัดการวัฏจักรระบบจำนวนมากมายของบุคคลากรด้านวิศวกรรม คำถามวิกฤติของวิจัยคือ "ทำอย่างไรให้บุคลากร ที่มีจำนวนจำกัด สามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น มีความน่าเชื่อถือ และปฏิบัติอย่างเป็นระบบ"

ในโปรแกรมขนาดใหญ่ในสมุดปกขาว จะเกิดการสะสมของสารสนเทศ องค์ความรู้ที่มีมุมมองที่หลากหลายจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในแต่ละโดเมนเป็นจำนวนมหาศาล ทั้งด้านการบริหารจัดการในการจัดหาและรายละเอียดเทคนิควิทยาศาสตร์และวิศวกรรมทั้งโครงการภายในและร่วมกับภาคอุตสาหกรรม ก่อให้เกิดความซับซ้อนในการสื่อสารและการทำความเข้าใจเกินกว่าบุคคลากรจะบริหารได้ด้วยเอกสารเป็นหลัก

วิจัยเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและความรู้จากวิศวกรรมระบบควบคู่กับเอกสาร เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของบุคลากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เหมาะสำหรับการนำมาใช้ตอบโต้ ภัยคุกคามจากการพึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ (ภัยคุกคาม THC-8) ซึ่งบั่นทอนอธิปไตยทางเทคโนโลยี และสอดคล้องกับสมุดปกขาวที่มุ่งสร้างเทคโนโลยีขั้นสูงขึ้นเอง โดยเฉพาะระบบที่ซับซ้อนและวิกฤติ เช่น ศูนย์บัญชาการและควบคุม การปฏิบัติการร่วมข้ามโดเมน และปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาและบริหารจัดการด้วยภูมิปัญญาไทย

ประโยชน์ของวิจัย คือ การรับประกัน ความชัดเจน ความน่าเชื่อถือ ความสามารถการย้อนรอยหาเหตุ ทวนสอบหาหลักฐานได้ เมื่อบุคลากรนำความรู้เข้ามาในโปรแกรมขนาดใหญ่ผ่านวิธีการของวิจัย สามารถนำไปสนับสนุนกระบวนการการตัดสินใจตลอดวัฏจักรโครงการต่าง ๆ ในโปรแกรม และสามารถสร้างเอกสารและผลงานดิจิทัลที่จำเป็นได้อย่างเป็นระบบและอัตโนมัติ

วิจัยมีข้อจำกัดอยู่ในระดับการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับผู้บริหารโปรแกรมที่ต้องการมองเห็นตัวประสานระดับสูงระหว่างโครงการและระบบ ความสามารถในการประมวลผลที่รวดเร็วแม่นยำในการ ทวนสอบ ย้อยรอย วิเคราะห์ผลกระทบ ในระดับโปแกรม แต่ไม่มีเนื้อหางานวิเคราะห์และออกแบบระบบในแต่ละโครงการ เช่น สถาปัตยกรรมเชิงตรรกะ (ใช้ตอบคำถามระบบทำงานอย่างไร) และสถาปัตยกรรมเชิงกายภาพ (ใช้ตอบคำถามระบบสร้างอย่างไร) นักวิจัยมุ่งหวังที่จะดำเนินวิจัยต่อเนื่อง โดยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานที่สนใจ ขยายผลการศึกษาและประยุกต์ใช้ให้ครอบคลุมบุคลากรในบทบาทอื่น ๆ ตลอดทั้งวัฏจักรของระบบในโปรแกรมขนาดใหญ่ของกองทัพอากาศ เพิ่มโอกาสประสบความสำเร็จของโครงการวิศวกรรมภายใต้สมุดปกขาว ทอ.

6. เอกสารอ้างอิง

[1] กองทัพอากาศ. สมุดปกขาวกองทัพอากาศ พ.ศ. 2568. กรุงเทพมหานคร: กองทัพอากาศ, 2568.

[2] BKCASE Editorial Board, “Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBOK), v. 2.9,” [ออนไลน์]. Available: https://sebokwiki.org (เข้าถึงเมื่อ: 12 พฤศจิกายน 2568).

[3] Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering (OUSD(R&E)), “Systems Engineering and Architecture,” [ออนไลน์]. Available: https://www.cto.mil/sea/se/ (เข้าถึงเมื่อ: 12 พฤศจิกายน 2568).

[4] Defense Acquisition University (DAU), “Systems Engineering Guidebook,” [ออนไลน์]. Available: https://www.dau.edu/sites/default/files/Migrated/CopDocuments/Systems-Eng-Guidebook_Feb2022-Cleared.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 12 พฤศจิกายน 2568).

[5] Eclipse Foundation, “Arcadia: A model-based systems and software architecture engineering method,” [ออนไลน์]. Available: https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html (เข้าถึงเมื่อ: 12 พฤศจิกายน 2568).

[6] Eclipse Foundation, “Capella: Model-based systems engineering workbench,” [ออนไลน์]. Available: https://www.eclipse.org/capella/ (เข้าถึงเมื่อ: 12 พฤศจิกายน 2568).

A Proof-of-Concept Low-Cost SeaGlider with Syringe-Driven Buoyancy Control and 3D-Printed Structure

Nutthawut Suchato[1], Sarawuth Srinakaew[2], Napadach Attachareanwong[1], Phupha Rungsuntia[3], Suppanut kalamphasut[3]

[1]Electrical Engineering Department, Royal Thai Naval Academy

[2]Marine Engineering Department, Royal Thai Naval Academy

[3]Naval Cadet, Royal Thai Naval Academy

napadach.att@hotmail.com

Abstract

The high cost of commercial autonomous underwater gliders creates a significant barrier for research and educational applications. This project introduces and validates a low-cost, proof-of-concept SeaGlider that utilizes a novel syringe-driven buoyancy control engine. The vehicle platform, with a 100 mm diameter and 1 m length, adjusts its buoyancy via a single-syringe system capable of displacing up to 300 mL. The syringe is actuated by a stepper motor with a 13:1 gear reduction, under the control of an Arduino microcontroller. The glider's hull was constructed from a readily available acrylic pipe, with the internal chassis and component mounts fabricated using 3D printing, which significantly reduced manufacturing costs and complexity. Experimental results from tests conducted in a controlled pool environment demonstrate that with precise ballasting and optimal wing positioning, the platform successfully achieves stable, sawtooth-pattern gliding motion. This work confirms the viability of a syringe-based system as a simple yet effective method for buoyancy control, presenting a scalable and cost-effective framework for the future development of accessible underwater glider prototypes for educational and preliminary research purposes.

Keywords: Syringe-Driven Buoyancy Control, Autonomous Underwater Glider, ยานใต้น้ำ

1. Introduction

Autonomous Underwater Gliders (AUGs) have become transformative tools in oceanography, environmental monitoring, and maritime surveillance [1][2]. Unlike conventional propeller-driven Autonomous Underwater Vehicles (AUVs), gliders achieve propulsion through a unique and highly energy-efficient mechanism. By alternately changing their net buoyancy and using hydrodynamic lift generated by fixed wings, they traverse the water column in a characteristic sawtooth pattern. This method of locomotion consumes power only intermittently during buoyancy adjustments, enabling missions of extraordinary duration, often lasting weeks or months, over vast oceanic regions.

However, the widespread adoption of this technology is severely constrained by its prohibitive cost. Commercial underwater gliders are complex systems, with typical price points ranging from 1,000,000 to over 8,000,000 THB [3]. This high capital investment creates a significant accessibility gap, limiting their use to well-funded research institutions and excluding many universities, smaller research groups, and educational programs [4].

In recent years, a paradigm shift towards the democratization of technology has been enabled by the convergence of several key factors: the availability of low-cost, powerful microcontrollers such as the Arduino platform; the maturation of rapid prototyping technologies like 3D printing (Fused Deposition Modeling - FDM); and the collaborative ethos of the open-source hardware movement. These developments have collectively lowered the barrier to entry for designing and building sophisticated robotic systems. Projects such as the Open-Source Underwater Glider (OSUG) have demonstrated the feasibility of constructing functional gliders using off-the-shelf components and 3D-printed parts for a fraction of the cost of commercial systems [3].

The significance of such low-cost platforms extends beyond simple cost reduction. It represents a potential shift in the strategy of oceanographic data collection. While a single high-cost glider provides sparse, high-precision data, a fleet of dozens of low-cost gliders could be deployed as a network, offering unprecedented spatial and temporal resolution for studying dynamic and complex phenomena like coastal currents or ecosystem responses [2].

Building upon these developments, this paper presents the design, implementation, and experimental validation of a minimalist, proof-of-concept underwater glider. The primary contribution of this work is the demonstration of a novelly simple and cost-effective buoyancy engine based on a single, stepper-motor-driven syringe. By focusing on the absolute simplification of this core subsystem,

this research aims to validate a foundational design that is exceptionally accessible, reproducible, and suitable as an educational testbed or a starting point for more advanced low-cost glider development.

2. Related Work / Background

The principles of modern underwater glider dynamics, control, and design are largely founded on the comprehensive work of researchers such as J. G. Graver [1]. Established commercial platforms, including the Slocum Glider, UW SeaGlider, and Spray Glider, represent the state-of-the-art in this field. These systems are engineered for long-term, deep-ocean deployments and typically employ sophisticated buoyancy engines. The most common architecture involves a hydraulic pump that transfers oil from an internal reservoir to an external, flexible bladder [5]. This action increases the vehicle's displacement, creating positive buoyancy for ascent. Reversing the pump returns the oil to the internal reservoir, decreasing displacement and causing the glider to descend. While highly effective and reliable, these hydraulic systems are a primary driver of the vehicle's overall cost and complexity.

In response to the high cost of commercial systems, the research community has explored a variety of low-cost and educational glider prototypes. These efforts aim to retain the fundamental operating principles of gliders while simplifying their mechanical and electronic systems. Notable examples include the ROUGHIE glider, a laboratory-scale vehicle for hands-on engineering education , and the Folaga vehicle, a low-cost AUV designed for sampling in shallow coastal areas [6]. These projects have successfully demonstrated that valuable scientific and educational objectives can be met with significantly simplified and more affordable platforms.

The Open Source Underwater Glider (OSUG) project is a particularly relevant precursor to the present work, as it established a comprehensive, well-documented blueprint for a sub-30,000 THB glider [3]. The OSUG design leverages 3D-printed components, an acrylic tube hull, and a buoyancy engine constructed from multiple medical-grade syringes actuated by a lead-screw stepper motor. The OSUG project and others have explored a spectrum of buoyancy actuation methods, each presenting a unique set of trade-offs. Beyond the high-end hydraulic systems, these include peristaltic pumps for moving fluid between bladders [3], mechanisms based on the phase change of materials like wax [7], and novel approaches using water electrolysis to generate gas for displacement [8].

The design choice of a buoyancy engine places a vehicle on a spectrum of cost, complexity, and performance. The system presented in this paper occupies a specific niche on this spectrum, prioritizing extreme simplicity and cost-effectiveness. It employs a direct water intake method, similar to OSUG,

but further simplifies the design by using a single, large-volume syringe driven by a stepper motor through a gear reduction. While OSUG evolved into a more feature-rich platform, the focus of this work is to isolate and validate this minimalist actuator mechanism as a viable proof-of-concept. This approach provides a valuable empirical data point on one of the simplest possible buoyancy engine architectures, offering a clear and accessible entry point for students and researchers new to the field of underwater robotics.

3. System Design and Development

3.1 Mechanical Architecture and Assembly

The glider was designed with modularity, low cost, and ease of replication as primary objectives. The system is composed of three main subsystems: the mechanical architecture, the syringe-driven buoyancy engine, and the electronics and control system.

The main body of the glider consists of a 1-meter-long, 100 mm outer diameter clear acrylic tube, a material selected for its low cost, ready availability, and transparency, which facilitates inspection of internal components during development and testing. A key element of the low-cost design philosophy is the extensive use of additive manufacturing. The entire internal chassis, which provides mounting points for the buoyancy engine, electronics, and ballast weights, was custom-designed in CAD software (Solidworks) and fabricated using Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing. This approach offers significant advantages over traditional manufacturing, including the ability to create complex, integrated geometries, rapid iteration of designs, and dramatically reduced costs. The components were printed in Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), chosen for its ease of printing, though materials like PET-G could offer superior water resistance and durability for future iterations [3].

Static stability is achieved through careful placement of ballast weights and components. Lead weights are wrapped around the acrylic hull to ensure the glider's center of gravity is significantly below its center of buoyancy. This configuration provides strong passive roll stability, causing the glider to naturally self-right if perturbed. The vehicle is ballasted to be neutrally buoyant when the syringe plunger is empty, a critical prerequisite for effective buoyancy-driven propulsion. A pair of fixed wings are mounted symmetrically on the hull to generate the necessary hydrodynamic lift for forward motion during ascent and descent. The Key Glider Specifications are shown in Table 1

Table 1 Key Glider Specifications

Parameter	Value	Unit
Overall Length	1.0	m
Hull Diameter (Outer)	100	mm
Total Mass (Ballasted)	~7.9	kg
Hull Material	Acrylic	-
Internal Structure Material	3D-Printed ABS	-
Buoyancy Engine Type	Single Syringe, Direct Water Intake	-
Max. Buoyancy Displacement	300	mL
Control Unit	Arduino Uno	-

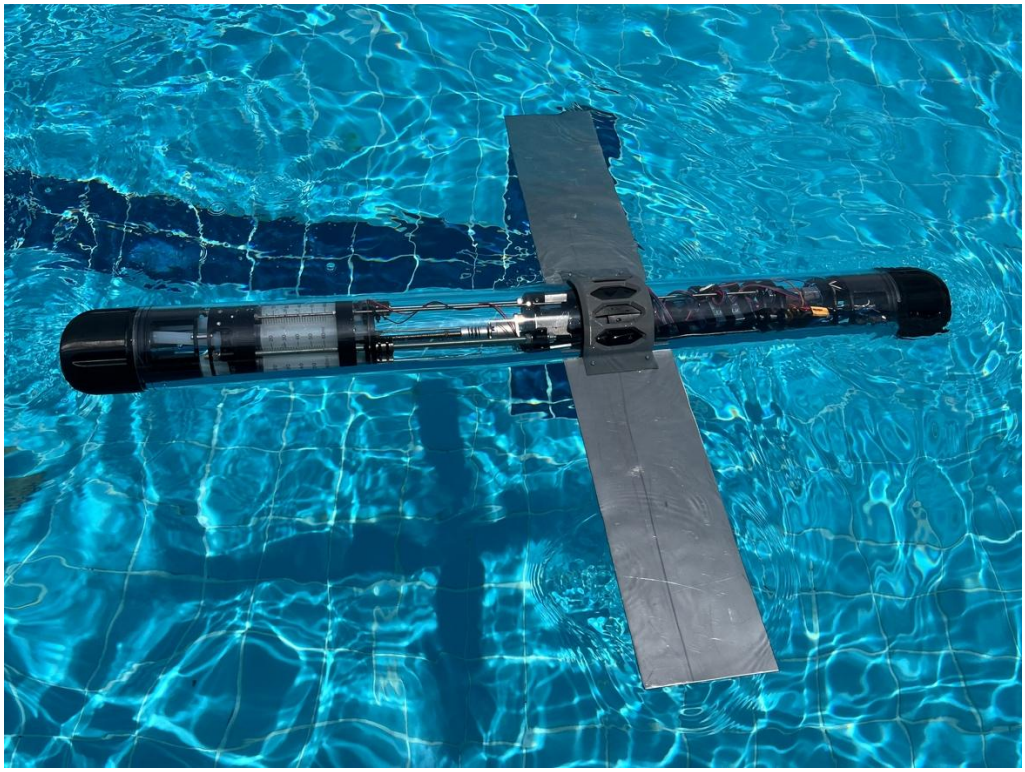


Figure 1 The Glider without ballasting

3.2 Syringe-Driven Buoyancy Engine

The core innovation of this project is its minimalist buoyancy engine. This system directly modulates the glider's mass by ingesting or expelling ambient water, thereby altering the vehicle's average density.

3.2.1 Principle of Operation

The vertical motion of the glider is governed by Archimedes' principle. The net buoyancy force (F_{net}) acting on the vehicle is the difference between the buoyant force (F_B) and the gravitational force (F_g) as

$$F_{net} = F_B - F_g = (\rho_w V_{total} - m_{total})g \quad (1)$$

Where ρ_w is the density of the surrounding water, V_{total} is the total displaced volume of the glider, m_{total} is the total mass of the glider, and g is the acceleration due to gravity. The buoyancy engine functions by changing m_{total} through the intake or expulsion of a water mass, Δm, Ingesting water ($\Delta m > 0$) increases m_{total}, making F_{net} negative. And causing the glider to sink. Expelling water ($\Delta m < 0$) decreases m_{total}, making F_{net} positive and causing the glider to ascend.

3.2.2 Syringe-based Mechanism

The actuator mechanism was designed for simplicity and precision using off-the-shelf components :

- **Syringe:** A single 300 mL medical-grade syringe serves as the piston and cylinder for water displacement. Its nozzle is connected via tubing to an inlet/outlet port on the glider's hull.
- **Drive System:** A NEMA stepper motor provides the rotational force. Stepper motors are ideal for this application as they allow for precise, open-loop positional control; the volume of water displaced is directly proportional to the number of steps the motor turns.
- **Transmission:** The motor's torque is amplified through 13:1 gear reduction system. This increased torque is necessary to overcome the friction of the syringe plunger and the hydrostatic pressure at the inlet. The output of the gearbox drives a lead screw, which converts the rotational motion into the linear translation required to move the syringe plunger.

This syringe-based approach offers distinct advantages, namely its extremely low cost, mechanical simplicity, and the high precision of volume displacement afforded by the stepper motor. However, it also has inherent limitations. The total displacement volume is fixed by the syringe size (300 mL), which provides a relatively small buoyant force. This limits the glider's ability to operate in

deep water or overcome strong density gradients (pycnoclines). Furthermore, the actuation speed is constrained by the motor's speed and the gear ratio, resulting in slower dive/climb transitions compared to high-pressure hydraulic systems.

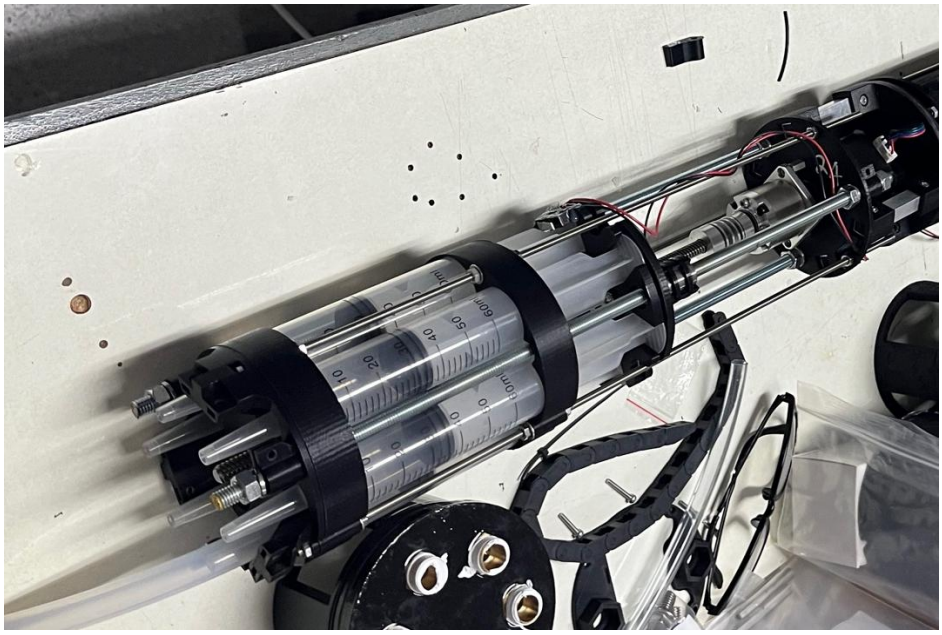


Figure 2 The syringe-driven buoyancy engine of the glider

3.2.3 Safety and Stroke Limitation

To prevent the stepper motor from driving the plunger beyond its physical limits, a robust end-stop system is implemented. Magnetic reed switches are mounted on the chassis at positions corresponding to the fully extended and fully retracted states of the plunger. A magnet attached to the moving part of the plunger assembly triggers these switches, sending a digital signal to the Arduino controller. This signal is used in the control logic to stop the motor's rotation. As a redundant safety measure, physical stoppers are also integrated into the chassis to mechanically halt travel, preventing damage to the syringe or motor in the event of a switch failure.

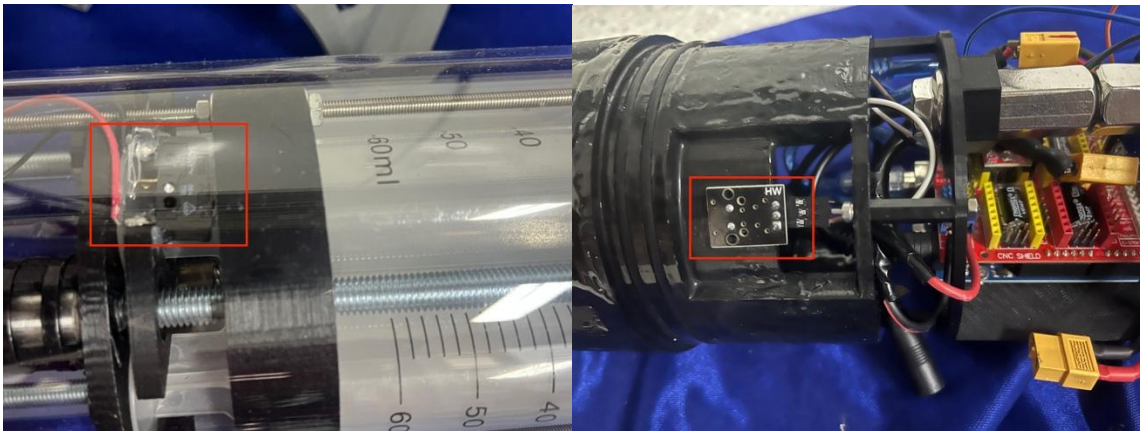


Figure 3 The stopper and magnetic switches of the glider

3.3 Electronics and Control

The electronic control system is centered around the Arduino platform, chosen for its low cost, extensive community support, and ease of programming.

3.3.1 Control Hardware

The control hardware is straightforward. An Arduino Uno serves as the central processing unit, executing the control logic. It interfaces with a stepper motor driver board (e.g., an A4988 driver), which takes step and direction signals from the Arduino and provides the necessary current to drive the NEMA motor coils. The magnetic limit switches are wired to digital input pins on the Arduino, providing the feedback signals for stroke limitation. The entire system is powered by a rechargeable lithium-ion battery pack.

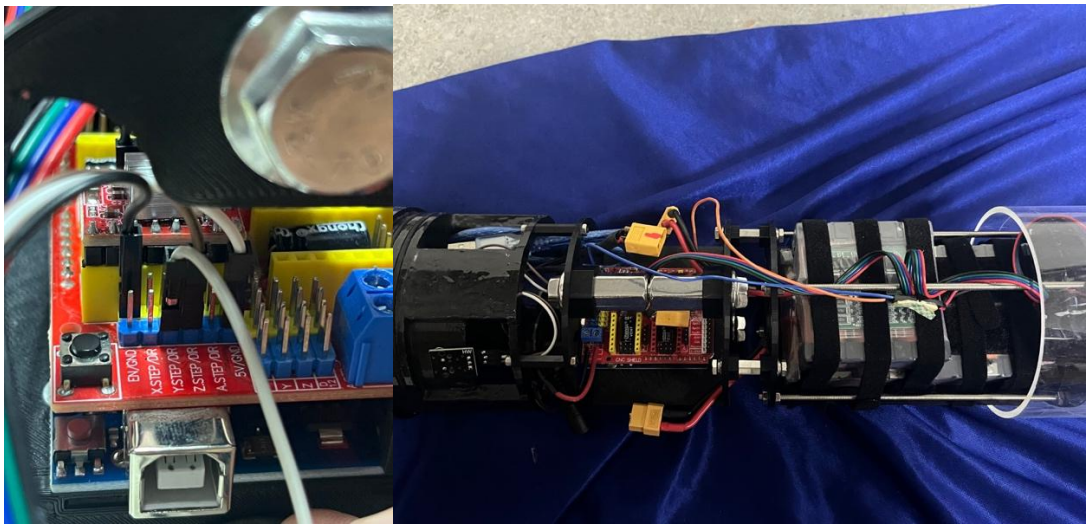


Figure 4 The electronic compartment of the glider

3.3.2 Control Logic

For this proof-of-concept validation, a simple, time-based finite state machine was implemented in the Arduino software. The logic operates in a continuous loop, cycling through two primary states:

Dive Phase: The Arduino commands the stepper motor to rotate in the direction that retracts the plunger. This action draws water into the syringe, increasing the glider's mass and initiating a descent. The motor continues to run for a pre-set duration or until the "retracted" limit switch is triggered, at which point the motor is stopped.

Climb Phase: After a fixed time delay at depth, the Arduino reverses the motor's direction of rotation. This extends the plunger, expelling the water from the syringe. The glider's mass decreases, its net buoyancy becomes positive, and it begins to ascend. The motor runs until the "extended" limit switch is triggered.

This simple, open-loop control cycle is sufficient to produce the characteristic sawtooth gliding pattern required for validation. The use of standard Arduino libraries, such as the Stepper.h library, simplifies the code required to generate the pulse sequences for motor control.

4. Experimental Setup

To validate the design and confirm the functionality of the syringe-driven buoyancy engine, a series of experiments were conducted in a controlled environment. This approach is a critical methodological step in engineering design, as it allows for the isolation and testing of the core vehicle systems (in this case, the propulsion mechanism) without the confounding variables of a real-world environment, such as currents, waves, or density variations. A successful demonstration in a controlled testbed de-risks the concept and provides the necessary justification for developing more advanced prototypes for open-water trials.

4.1 Test Environment and Procedure

The experiments were performed in a 3-meter-deep swimming pool, which provided a calm, clear body of water with a uniform and known density. The experimental procedure was as follows:

Pre-flight Ballasting: The glider was meticulously ballasted with fixed weights to achieve precise neutral buoyancy. This was done with the syringe plunger set to be empty, ensuring the vehicle would neither sink nor float on its own before the buoyancy engine was activated.

Deployment: The glider's control system was powered on, initiating the autonomous control loop. The vehicle was then gently released at the water's surface. The glider was then allowed to operate autonomously, executing multiple dive-climb cycles based on its pre-programmed, time-based logic. Its motion was observed and recorded throughout the test period.

4.2 Data Acquisition

Given the proof-of-concept nature of this study, data acquisition relied primarily on qualitative visual observation. The gliding stability in the case with and without the installation of the wing. The total time required to complete one full dive-and-climb cycle, measured using a stopwatch and cross-referenced with video timestamps. The horizontal distance traveled during one complete cycle, estimated from the video footage by referencing markers of known distance along the pool's edge.

5. Results and Discussion

The experimental tests successfully validated the fundamental design of the low-cost glider and its novel buoyancy engine. The results confirmed that the simple, syringe-based mechanism is capable of producing sufficient buoyant force to propel the vehicle in a stable sawtooth gliding motion.

Upon deployment, the glider autonomously executed the pre-programmed control logic, successfully completing multiple dive-climb cycles. Visual observation confirmed that the vehicle maintained stable pitch and roll attitude throughout its trajectory, with the low center of gravity effectively preventing any uncontrolled rolling. The transition between the dive and climb phases at the bottom of the trajectory was smooth, and the vehicle reliably surfaced at the end of each climb. This qualitative result provides the essential proof-of-concept that the system works as designed. Specifically, the dive-climb cycle time is 64 seconds. The vertical distance and the horizontal displacement are approximately 1.3 and 1.2 meters.

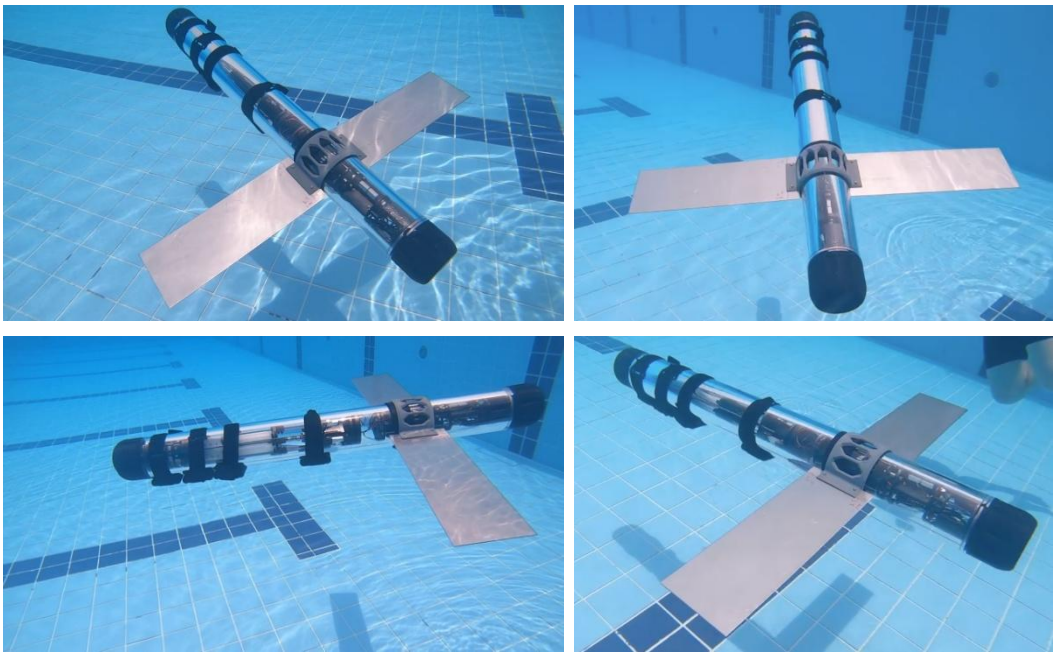


Figure 5 The operation of the glider

Furthermore, the experimental results confirm the viability of the stepper-motor-driven syringe as an effective buoyancy control mechanism for a low-cost glider. The system's key advantages were evident in practice: its extreme low cost and mechanical simplicity enabled rapid development and assembly, and the precise control offered by the stepper motor provided reliable and repeatable actuation without the need for complex feedback sensors.

However, the experiment also highlighted the inherent limitations of this minimalist design. The 300 mL displacement volume generates a relatively small net buoyant force. While sufficient for the calm, uniform-density conditions of the swimming pool, this small force would give the glider "little control authority" in a real-world marine environment, making it vulnerable to currents and potentially unable to overcome strong density stratification. The observed cycle time is also relatively long, a direct consequence of the trade-off between torque and speed in the geared motor system. A faster actuation would require a more powerful motor or a different gear ratio, which could increase power consumption and cost.

This project successfully demonstrates what can be considered a "minimum viable product" for a buoyancy-driven underwater glider. It serves as an excellent educational platform, encapsulating key principles of mechatronics, control systems, and fluid dynamics in a tangible and highly accessible project. Its low cost and reliance on 3D-printed and off-the-shelf parts make it an ideal candidate for undergraduate engineering projects, robotics clubs, and introductory research experiences. The work also contributes a valuable data point to the broader design space of low-cost AUVs. By pushing the boundaries of simplification, it helps to map the trade-offs between cost, complexity, and performance. The success of this minimalist design validates an important entry point on that spectrum, proving that meaningful experimentation in underwater robotics is possible even with the most constrained of budgets.

6. Conclusion and Future Work

This paper has presented the design, construction, and experimental validation of a proof-of-concept, low-cost underwater glider. The work successfully demonstrated that a novelly simple buoyancy engine, based on a single stepper-motor-driven syringe, is a viable mechanism for achieving stable, buoyancy-driven propulsion. Through tests in a controlled pool environment, the prototype proved its ability to execute repeatable, sawtooth gliding patterns, thereby validating the core design concept. This project establishes a highly accessible and scalable framework, confirming that functional glider prototypes can be developed with minimal cost and complexity, making the technology available for a wider range of educational and research applications.

While the proof-of-concept was successful, the current prototype represents a foundational platform. Future work will focus on addressing its limitations and expanding its capabilities. A clear roadmap for development includes:

Enhanced Sensing and Control: The immediate next step is to integrate an onboard sensor suite, including an Inertial Measurement Unit (IMU) for attitude sensing and a pressure sensor for accurate depth measurement. This will enable the transition from a simple time-based control loop to a more robust, closed-loop, depth-based state machine. This would also pave the way for implementing more advanced control algorithms, such as PID or LQR controllers, to optimize glide paths and provide heading control.

Hydrodynamic Optimization: The current wing and hull design can be improved through systematic hydrodynamic analysis. Using computational fluid dynamics (CFD) or empirical testing, the wing profile and angle of attack can be optimized to improve the lift-to-drag ratio, resulting in a flatter, more efficient glide angle and greater horizontal range per cycle.

Buoyancy Engine Scalability: To prepare the glider for real-world environments, the displacement volume of the buoyancy engine must be increased. Future iterations could explore the use of larger, custom-fabricated piston systems, an array of multiple syringes working in parallel , or alternative low-cost mechanisms such as a peristaltic pump transferring fluid to an external bladder, which would decouple the displacement volume from the size of the internal actuator.

Open-Water Trials: With enhanced control and a more powerful buoyancy engine, the next generation of the prototype will be prepared for testing in a real-world environment, such as a lake or calm coastal waters. These trials will be essential for evaluating the glider's performance against environmental factors like currents, waves, and water density variations.

Reference:

[1] J. G. Graver, "Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design," *Ph.D. dissertation, Princeton Univ.*, Princeton, NJ, USA, 2005.

[2] E. Petritoli and F. Leccese, "Autonomous Underwater Glider: A Comprehensive Review," *Drones*, vol. 9, no. 1, p. 21, 2025

[3] A. S. Williams, "Design of a Low-Cost Open-Source Underwater Glider," Engineering Archive, 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/326139551_Design_of_a_Low-Cost_Open-Source_Underwater_Glider

[4] Z. Wu, C. Wang, Y. Wang, T. Liu, G. Pu, and L. Wang, "An Information-Theoretic Approach to Semi-Weakly Supervised Learning," *arXiv preprint arXiv:2108.05792*, 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/2108.05792

[5] D. C. Hernández-Jaramillo and R. E. Vásquez, "Design of a Bioinspired Underwater Glider for Oceanographic Research," *Biomimetics*, vol. 8, no. 1, p. 80, Feb. 2023.

[6] P. D. Arjanbhai, "Design And Analysis Of Underwater Glider," *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 7, no. 12, pp. 1158-1162, 2020. [Online]. Available: http://www.jetir.org/papers/JETIR2012356.pdf

[7] T. Inoue, K. Shibuya, and A. Nagano, "Underwater robot with a buoyancy control system based on the spermaceti oil hypothesis - Development of the depth control system," in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 44-49.

[8] "Reverse Electrolysis Controls Underwater Robot's Buoyancy," ASME, Aug. 26, 2024. [Online]. Available: https://www.asme.org/topics-resources/content/reverse-electrolysis-controls-underwater-robot%E2%80%99s-buoyancy

การคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์เพื่อเตรียมความพร้อมด้านเทคโนโลยีสื่อสารโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ

Strategic Foresight for Technological Preparedness of the Royal Thai Air Force's Telecommunication System

สุรชัย เชี่ยวชาญ[1], ธันยวัต ชูส่งแสง[2]
[1]กองสื่อสารโทรคมนาคม กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ
[2]วิทยาลัยการทัพอากาศ
Surachai Chieochan[1], Tunyawat Choosongsang[2]
[1]Telecommunications Division, Directorate of Communication & Electronic, RTAF
[2]Air War College, RTAF

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนผ่านสู่การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางถือเป็นหัวใจสำคัญของยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี อย่างไรก็ตาม การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสื่อสารโทรคมนาคมต้องเผชิญกับแรงเสียดทานสำคัญจากจากสภาวะแวดล้อมในอนาคตที่ผันผวน ไม่แน่นอน ซับซ้อน และคลุมเครือ งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์ (Strategic Foresight) เพื่อพัฒนากรอบแนวทางการเตรียมความพร้อมเชิงรุกสำหรับเทคโนโลยีสื่อสารโทรคมนาคมของกองทัพอากาศในช่วงปี พ.ศ. ๒๕๖๘ - ๒๕๘๐ โดยอาศัยเทคนิคเดลฟายและการสำรวจสภาวะแวดล้อม จนสามารถระบุปัจจัยขับเคลื่อนวิกฤต ๒ ประการ ได้แก่ “สภาพแวดล้อมทางภูมิรัฐศาสตร์” และ “อัตราความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี” ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นฐานในการสร้างฉากทัศน์อนาคตที่เชื่อว่าเกิดขึ้นได้ ๔ รูปแบบ ตั้งแต่วิวัฒนาการทางเทคโนโลยีที่มีเสถียรภาพไปจนถึงการแข่งขันและขัดแย้งที่รุนแรง ผลการศึกษาได้นำเสนอกรอบยุทธศาสตร์ “เสริมแกร่งอย่างพลิ้วไหว, ต่อยอดตามแรงลม” ซึ่งให้ความสำคัญเร่งด่วนกับการวางรากฐานในระยะสั้น (พ.ศ. ๒๕๖๘-๒๕๗๐) ด้านความมั่นคงปลอดภัยของเครือข่าย สถาปัตยกรรมระบบ และความพร้อมของบุคลากร ควบคู่ไปกับการใช้ยุทธศาสตร์แบบแยกส่วนที่ปรับเปลี่ยนได้ตามสถานการณ์สำหรับระยะกลางถึงยาว (พ.ศ. ๒๕๗๑-๒๕๘๐) เพื่อประกันความต่อเนื่องของการปฏิบัติการไม่ว่าฉากทัศน์อนาคตจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด

คำสำคัญ การคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์, ระบบโทรคมนาคมทางทหาร, การปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง, การวางแผนฉากทัศน์, กองทัพอากาศ

Abstract

The transition towards Network-Centric Operations (NCO) constitutes a cornerstone of the Royal Thai Air Force’s (RTAF) 20-Year Strategy. However, the development of the requisite telecommunications infrastructure faces significant friction from a Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous (VUCA) future environment. This research applies Strategic Foresight to formulate a proactive preparedness framework for RTAF telecommunications technology for the period 2025–2037. Utilizing the Delphi technique and environmental scanning, two critical drivers of change were identified: the "Geopolitical Environment" and

the "Pace of Technological Advancement." These drivers served as the basis for constructing four plausible future scenarios, ranging from stable technological evolution to intense competition and conflict. The study proposes the "Adaptive Resilience & Modular Advancement" strategic framework. This approach prioritizes urgent short-term foundations (2025–2027) regarding network security, system architecture, and personnel readiness, while employing a modular, situation-dependent strategy for the medium-to-long term (2028–2037) to guarantee operational continuity regardless of the unfolding future scenario.

Keywords Strategic Foresight, Military Telecommunications, Network-Centric Operations, Scenario Planning, Royal Thai Air Force.

๑. บทนำ

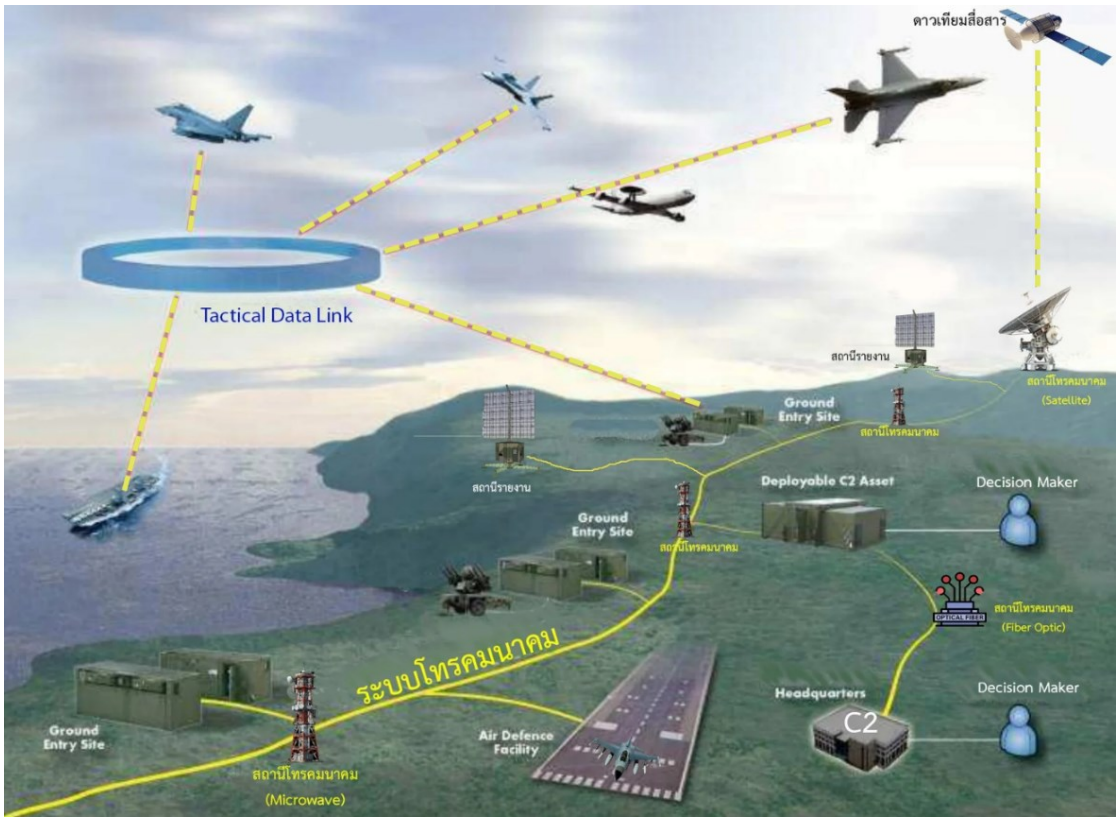
สมรภูมิยุคใหม่ได้เปลี่ยนผ่านไปสู่การสงครามที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง [1,2] ซึ่งเป็นแนวคิดหลักที่กองทัพอากาศใช้ในการพัฒนากองทัพตามยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี (พ.ศ. ๒๕๖๑ - ๒๕๘๐) [3] องค์ประกอบสำคัญประการหนึ่งของแนวคิดดังกล่าว คือ การมีโครงข่ายโทรคมนาคมที่แข็งแกร่ง ปลอดภัย และยืดหยุ่นสูง เพื่อเชื่อมโยงระบบตรวจจับ ผู้บังคับบัญชา และหน่วยปฏิบัติอย่างไร้รอยต่อ ดังแสดงใน ภาพที่ ๑

บทเรียนสำคัญจากสงครามรัสเซีย-ยูเครนได้ตอกย้ำถึงความจำเป็นอย่างยิ่งในการมีโครงข่ายสื่อสารทางทหารที่ทนทานต่อการโจมตี ทั้งการกวนสัญญาณ ภัยคุกคามทางไซเบอร์ และการทำลายโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบโทรคมนาคมของกองทัพอากาศในปัจจุบันกำลังเผชิญความไม่แน่นอนและความท้าทายในหลายมิติ ทั้งจากปัจจัยภายนอก เช่น ความก้าวหน้าแบบก้าวกระโดดของเทคโนโลยี (ปัญญาประดิษฐ์, ควอนตัม, 5G/6G, SATCOM) ภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ซับซ้อน และสภาพแวดล้อมทางภูมิรัฐศาสตร์ที่ผันผวน แรงกดดันจากภาคประชาชนผู้เสียภาษี ตลอดจนจากปัจจัยภายใน เช่น ข้อจำกัดด้านงบประมาณ การบริหารจัดการเทคโนโลยีเดิมที่หลากหลาย และการพัฒนาบุคลากรให้มีทักษะที่เหมาะสม ดังนั้น ภายใต้ปัจจัยเหล่านี้ การวางแผนเชิงยุทธศาสตร์แบบดั้งเดิมอาจไม่เพียงพอ [5]

เพื่อตอบสนองต่อความไม่แน่นอนดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงใช้ “การคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์” (Strategic Foresight) [6-8] เป็นกรอบระเบียบวิธีวิจัย ซึ่งแตกต่างจากการวางแผนแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาข้อมูลในอดีตและแนวโน้มในปัจจุบันเป็นหลัก และมักนำไปสู่ภาพอนาคตเพียงภาพเดียวในระยะสั้น ในขณะที่การคาดการณ์อนาคตจะเน้นไปที่การค้นหาปัจจัยที่ขับเคลื่อนที่อยู่เบื้องหลังแนวโน้มเหล่านั้น แล้วสำรวจภาพอนาคตที่เชื่อว่าเกิดขึ้นได้ที่หลากหลายเพื่อนำมากำหนดมาตรการเตรียมความพร้อมที่รัดกุมและครอบคลุม แนวทางนี้สอดคล้องกับแนวปฏิบัติขององค์กรความมั่นคงชั้นนำระดับโลก อาทิ นาโต้ กองทัพอากาศสหรัฐฯ กองทัพบกแคนาดา และกระทรวงกลาโหมออสเตรเลีย ซึ่งใช้การคาดการณ์อนาคตเป็นเครื่องมือป้อนข้อมูลเชิงลึก เพื่อยกระดับการวางแผนยุทธศาสตร์ในสภาวะ VUCA มิใช่เพื่อทดแทนการวางแผนแบบดั้งเดิม [9-15] การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ๑) วิเคราะห์แนวโน้มและปัจจัยขับเคลื่อนที่กำหนดอนาคตของโทรคมนาคมทางทหาร ๒) สร้างฉากทัศน์อนาคตที่เชื่อว่าเกิดขึ้นได้สำหรับช่วงปี พ.ศ. ๒๕๖๘–๒๕๘๐ และ ๓) จัดทำกรอบการพัฒนายุทธศาสตร์ที่รับประกันความพร้อมด้านสื่อสารโทรคมนาคมของ ทอ. ในทุกฉากทัศน์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์ของเทคโนโลยีสื่อสารโทรคมนาคมเพื่อสนับสนุนแนวคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางของกองทัพอากาศ ในช่วงเวลา พ.ศ. ๒๕๖๘ - ๒๕๘๐ โดยมุ่งเน้นมิติทางเทคโนโลยีเป็นหลัก ด้วยการเปลี่ยนกระบวนทัศน์จาก “การทำนายให้เห็นอนาคตเดียว” ไปสู่ “การเตรียมพร้อมสำหรับอนาคตที่หลากหลายที่เชื่อว่าเกิดขึ้นได้” ผลการศึกษาได้นำเสนอกรอบยุทธศาสตร์ “เสริมแกร่งอย่างพลิ้วไหว, ต่อยอดตามแรงลม” (Adaptive Resilience & Modular Advancement) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์ ช่วย

ให้ผู้บริหารเข้าใจถึงฉากทัศน์อนาคต โอกาส และความเสี่ยงที่แตกต่างกัน ตลอดจนสามารถระบุช่องว่างความพร้อมเพื่อกำหนดขอบเขตการพัฒนาได้อย่างชัดเจน ยุทธศาสตร์นี้จึงเปรียบเสมือนแผนที่นำทางที่ช่วยให้กองทัพอากาศสามารถเตรียมความพร้อมระบบโทรคมนาคม ทอ.เพื่อรับมือกับความไม่แน่นอนทางเทคโนโลยีและภูมิรัฐศาสตร์ในทศวรรษหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ ๑ ระบบโทรคมนาคม: โครงสร้างพื้นฐานในการเชื่อมโยงข้อมูลตามแนวคิดการสงครามที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง
ที่มา: ผู้วิจัยดัดแปลงจาก [4]

๒. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิจัยเชิงคุณภาพโดยประยุกต์ใช้ “กระบวนการคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์” ของโจเซฟ โวรอส [6] เป็นกรอบแนวคิดหลัก เพื่อสำรวจอนาคตทางเลือกที่เชื่อว่าเกิดขึ้นได้ (Plausible Futures) ในปี ๘๐ และกำหนดยุทธศาสตร์ที่ยืดหยุ่นสำหรับกองทัพอากาศ กระบวนการวิจัยประกอบด้วย ๔ ขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

๒.๑ การสำรวจสภาวะแวดล้อมและการวิเคราะห์แนวโน้ม: ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิและปฐมภูมิ โดยใช้กรอบการวิเคราะห์ PESTEL-MCV ครอบคลุม ๙ มิติ (การเมือง เศรษฐกิจ สังคม เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม กฎหมาย การทหาร ความคิด และค่านิยม) เพื่อระบุแนวโน้มและสัญญาณการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นใช้เทคนิคเดลฟาย (Delphi Technique) ผ่านการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักในกองทัพอากาศ เพื่อกลั่นกรองและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยขับเคลื่อนที่มีความไม่แน่นอนและผลกระทบสูงสุด[๑]

[๑] หากเปรียบ “แนวโน้ม” เหล่านี้ดั่ง “แม่น้ำ” ที่กำลังไหลบ่าไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง การวิเคราะห์แนวโน้มก็เปรียบได้กับการค้นหา “ต้นน้ำ” ที่ทั้งควบคุมปริมาณและขับเคลื่อนกระแสน้ำให้ไหลไปในทิศทางนั้น ๆ

๒.๒ การสร้างฉากทัศน์: นำปัจจัยขับเคลื่อนหลัก ๒ ประการ มาใช้เป็นแกนในการสร้างเมทริกซ์ฉากทัศน์อนาคต ๒x๒ ทำให้ได้ภาพอนาคตทางเลือก ๔ รูปแบบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน พร้อมทั้งวิเคราะห์โอกาส ความท้าทาย และความเสี่ยงในแต่ละฉากทัศน์

๒.๓ การวิเคราะห์ช่องว่าง: เปรียบเทียบสถานะความพร้อมของระบบโทรคมนาคมของกองทัพอากาศในปัจจุบันกับคุณลักษณะที่พึงประสงค์ในอนาคต เพื่อระบุ “ช่องว่างด้านประสิทธิภาพ” (Performance Gaps) และ “ช่องว่างด้านโอกาส” (Opportunity Gaps) ขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ขอบเขตการพัฒนาที่จำเป็น

๒.๔ การพยากรณ์ย้อนกลับ (Backcasting): กำหนดหนทางปฏิบัติจากอนาคตที่พึงประสงค์ย้อนกลับมาสู่ปัจจุบัน เพื่อวางแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาที่สามารถตอบสนองต่อพลวัตของทั้ง ๔ ฉากทัศน์ได้อย่างครอบคลุม ขั้นตอนนี้จะทำให้ได้แนวทางการพัฒนาที่จำเป็น ภายใต้ขอบเขตการพัฒนาในขั้นตอนที่ ๒.๒ ที่สอดคล้องกับโอกาสและความท้าทาย (หรือ “บททดสอบ”) ในแต่ละฉากทัศน์

๓. ผลการวิจัย

๓.๑ ผลการสำรวจสภาวะแวดล้อม

ผลการสำรวจสภาวะแวดล้อมชี้ให้เห็นปัจจัยภายนอกที่อยู่นอกเหนือการควบคุม แต่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการวางแผนของกองทัพอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นต่อไปนี้

๑. ปัจจัยด้านภูมิรัฐศาสตร์และการทหาร (P/M): ความตึงเครียดระดับโลกจากการแข่งขันเชิงยุทธศาสตร์ระหว่างมหาอำนาจ (สหรัฐฯ, จีน, รัสเซีย) และความไม่แน่นอนทางการเมืองภายในประเทศ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพงบประมาณด้านการทหารและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการต่าง ๆ ในขณะที่แนวคิดการปฏิบัติการทางทหารสมัยใหม่มุ่งสู่การสงครามที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางและ JADC2

๒. ปัจจัยด้านเทคโนโลยี (T): เกิดการอุบัติขึ้นพร้อมกันของเทคโนโลยีพลิกโฉมหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นปัญญาประดิษฐ์ (AI), เทคโนโลยีควอนตัม, อินเตอร์เน็ตผ่านเครือข่ายดาวเทียมวงโคจรต่ำ และเครือข่ายไร้สาย 5G/6G ซึ่งสร้างทั้งโอกาสในการยกระดับขีดความสามารถด้านเครือข่าย และในขณะเดียวกันก็เปิดช่องให้เกิดภัยคุกคามทางไซเบอร์รูปแบบใหม่

๓. ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคม (E/S): สภาวะเศรษฐกิจของประเทศที่คาดว่าจะเติบโตในระดับปานกลาง ถือเป็นข้อจำกัดด้านงบประมาณที่สำคัญ ประกอบกับสภาวะสังคมสูงวัย และช่องว่างทางทักษะดิจิทัล ได้ก่อให้เกิด “สภาวะการแข่งขันแย่งชิงบุคลากรทักษะสูง” กับภาคเอกชนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

๓.๒ ผลการวิเคราะห์แนวโน้มและปัจจัยขับเคลื่อน (Trend Analysis and Key Drivers)

การวิเคราะห์แนวโน้มเป็นขั้นตอนการประเมินหาปัจจัยขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลง โดยได้วิเคราะห์แนวโน้มหลัก อาทิ การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในระบบสื่อสาร, ความก้าวหน้าของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมความเร็วสูง, การให้ความสำคัญกับความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์, การให้ความสำคัญกับแนวคิดการสงครามที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง และการแข่งขันทางภูมิรัฐศาสตร์ของชาติมหาอำนาจ โดยประเมินทั้งผลกระทบและความไม่แน่นอนต่อการพัฒนาระบบโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ นอกจากนี้ ยังได้ดำเนินการสำรวจสัญญาณอ่อน (Weak Signals) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงในระยะเริ่มต้น อาทิ ระบบตรวจจับด้วยเทคโนโลยีควอนตัม และปัจจัยพลิกผัน (Wild Cards) ที่แม้มีโอกาสเกิดต่ำแต่ส่งผลกระทบรุนแรง อาทิ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีควอนตัม โดยนัยสำคัญของกระบวนการนี้ คือ การ

สังเคราะห์และกลั่นกรองปัจจัยขับเคลื่อนต่าง ๆ เพื่อระบุ “ต้นน้ำ” หรือ “ปัจจัยขับเคลื่อนหลัก” ที่มีนัยสำคัญสูงสุดเพียง ๒ ประการ ดังนี้

๑. สภาพแวดล้อมทางภูมิรัฐศาสตร์: สะท้อนระดับความมั่นคง ความร่วมมือ หรือการแข่งขันระหว่างประเทศ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อนโยบายความมั่นคง งบประมาณ การถ่ายทอดเทคโนโลยี รูปแบบภัยคุกคาม และความร่วมมือทางทหาร แกนของปัจจัยนี้มีตั้งแต่สภาวะ “มั่นคงและมีความร่วมมือ” ไปจนถึง “ไม่มั่นคงและมีการแข่งขันสูง”

๒. อัตราความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี: สะท้อนลักษณะของนวัตกรรมและความเร็วในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารโทรคมนาคม ซึ่งมีผลกระทบสูงต่อขีดความสามารถด้านเครือข่ายของ ทอ. แกนของปัจจัยนี้มีตั้งแต่ “การพัฒนาแบบค่อยเป็นค่อยไป (Evolutionary Pace)” ไปจนถึง “การพัฒนาแบบก้าวกระโดด (Revolutionary Pace)”

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ประมวลฉันทามติและยืนยันปัจจัยขับเคลื่อน ๒ ประการดังกล่าว กับผู้เชี่ยวชาญและมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาระบบโทรคมนาคมของกองทัพอากาศ ๓ กลุ่ม ผ่านการสัมภาษณ์ ปัจจัยทั้งสองนี้ จะถูกนำไปใช้เป็นแกนหลักในการสร้างฉากทัศน์อนาคตในขั้นตอนต่อไป

๓.๓ ผลการสร้าง ๔ ฉากทัศน์อนาคต

จากการผสาน ๒ ปัจจัยขับเคลื่อนหลัก ก่อให้เกิดฉากทัศน์อนาคต ๔ รูปแบบ ดังแสดงใน**Error! Reference source not found.** ดังนี้

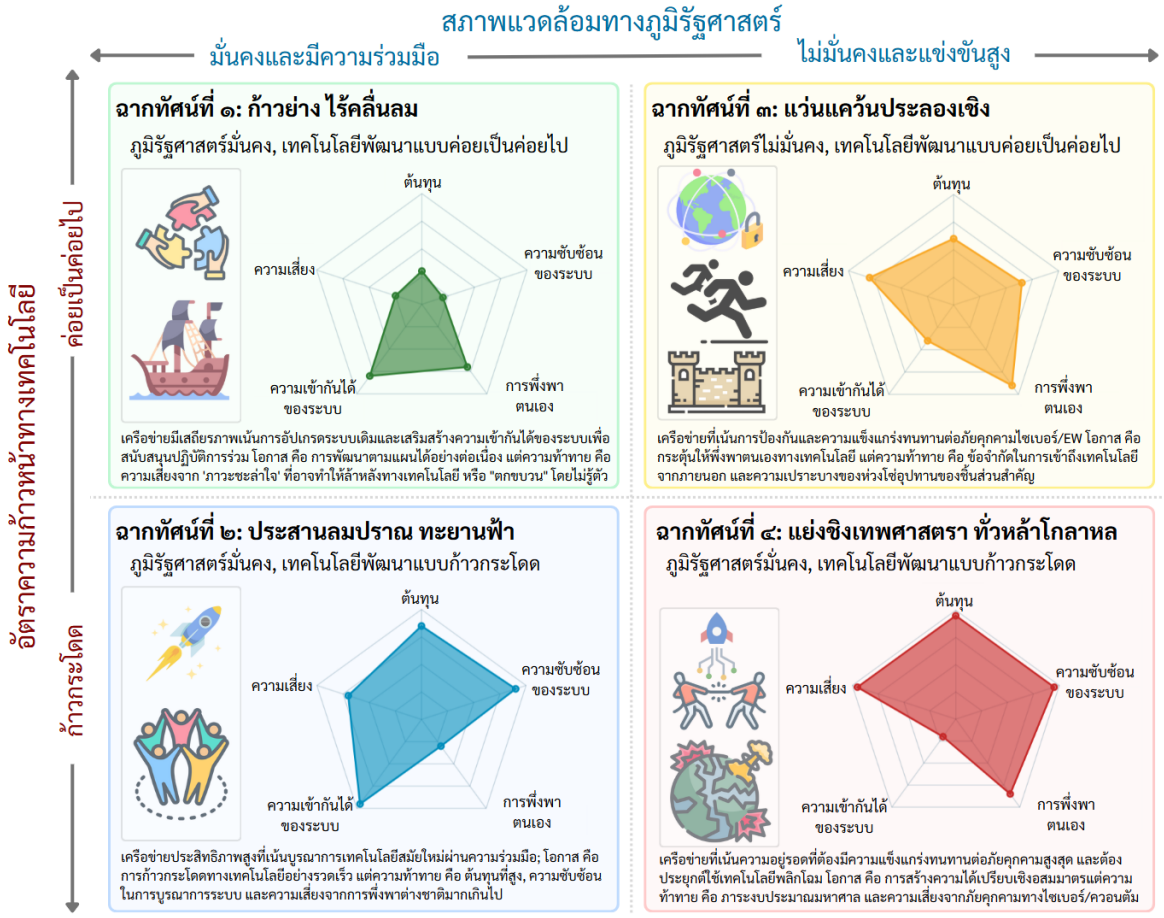
ฉากทัศน์ที่ ๑: ก้าวย่าง ไร้คลื่นลม (Steady Course) (ภูมิรัฐศาสตร์มั่นคง / เทคโนโลยีค่อยเป็นค่อยไป)

ภายใต้ฉากทัศน์นี้ นัยสำคัญทางยุทธศาสตร์ต่อการพัฒนาระบบโทรคมนาคม คือ มีโอกาสพัฒนาอย่างเป็นระบบตามแผนยุทธศาสตร์ มากกว่าการเปลี่ยนแปลงแบบพลิกโฉม อีกทั้งงบประมาณที่ได้รับจัดสรรจะเพียงพอสำหรับการปรับปรุงแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Upgrade) โดยเน้นการบูรณาการเทคโนโลยีมาตรฐาน (Proven Technologies) เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมความเร็วสูง และ 5G/6G เข้ากับระบบปัจจุบัน หรือการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในระดับพื้นฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการเครือข่าย รวมถึงการดำรงสภาพระบบเดิมโดยยกระดับความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ใน “ระดับพื้นฐาน” อย่างไรก็ตาม ความท้าทายที่สำคัญที่สุดในฉากทัศน์นี้ คือ “ภาวะชะล่าใจ” (Complacency Trap) ซึ่งอาจส่งผลให้การปรับตัวล่าช้ากว่าภัยคุกคามที่ซ่อนเร้น หรือล้าหลังเมื่อเทียบกับประเทศเพื่อนบ้านที่มีการเร่งพัฒนา และอาจต้องเผชิญความท้าทายในการรักษากำลังพลสายเทคนิคที่เกี่ยวข้อง ท่ามกลางแรงดึงดูดจากภาคเอกชน ฉากทัศน์นี้สะท้อนการพัฒนาเทคโนโลยีแบบค่อยเยื้องย่างภายใต้เสถียรภาพด้านความมั่นคงและความร่วมมือ จึงเปรียบเปรยฉากทัศน์อนาคตนี้ว่า “ก้าวย่าง ไร้คลื่นลม”

ฉากทัศน์ที่ ๒: ประสานลมปราณ ทะยานฟ้า (Collaborative Leap) (ภูมิรัฐศาสตร์มั่นคง / เทคโนโลยีก้าวกระโดด)

ภายใต้ฉากทัศน์นี้ ถือเป็นสภาวะที่เร่งรัดให้เกิดนวัตกรรมผ่านความร่วมมือ นัยสำคัญทางยุทธศาสตร์ต่อการพัฒนาระบบโทรคมนาคม คือ กองทัพอากาศมีโอกาสในการเข้าถึงและพัฒนาร่วมในเทคโนโลยีล้ำสมัยกับพันธมิตร ซึ่งรวมถึงการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ขั้นสูง มาใช้ในกระบวนการตัดสินตกลงใจทางยุทธการ การใช้ดาวเทียมสื่อสารความเร็วสูงเต็มรูปแบบ รวมถึง การริเริ่มประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมเพื่อการเข้ารหัสและความมั่นคงปลอดภัยเครือข่ายในระดับเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม ฉากทัศน์นี้ยังมีความท้าทายทางเทคนิคที่สำคัญ ๓ ประการ คือ ๑) ความซับซ้อนในการบูรณาการระบบเก่าเข้ากับระบบใหม่ที่ทันสมัย โดยภาระงานหลักจะเปลี่ยนไปสู่การบริหารจัดการสถาปัตยกรรมที่ต้องเชื่อมโยงเทคโนโลยีที่หลากหลายจากพันธมิตรทางทหารหลายกลุ่มก้อน ๒) ความเสี่ยงเชิงยุทธศาสตร์จากการพึ่งพาเทคโนโลยีจากภายนอกมากเกินไป อาจกระทบต่อเป้าหมายการพึ่งพาตนเองของ ทอ. ๓) ความท้าทายในการพัฒนา

บุคลากรให้มีความรู้เท่าทันเทคโนโลยี บุคลากรในฉากทัศน์นี้จำเป็นต้องมีทักษะด้านเทคนิคระดับสูงและปรับตัวได้รวดเร็ว โดยเฉพาะในสาขาวิทยาการข้อมูล จริยธรรมปัญญาประดิษฐ์ การบูรณาการระบบ และเทคโนโลยีควอนตัมเบื้องต้น ประกอบกับขีดความสามารถในการใช้งานระบบล้ำสมัยเหล่านี้อย่างมีจริยธรรมและมีประสิทธิภาพ ถือเป็นฉากทัศน์อนาคตที่เปี่ยมด้วยโอกาส มีการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว ประกอบกับความสัมพันธ์เชิงพึ่งพาอาศัยกับพันธมิตร จึงอุปมาฉากทัศน์นี้ว่า “ประสานลมปราณ ทะยานฟ้า”



ภาพที่ ๒ ฉากทัศน์อนาคตที่เชื่อว่าเกิดขึ้นได้ (Plausible Future Scenarios)

ฉากทัศน์ที่ ๓: แว่นแคว้นประลองเชิง (Regional Tension & Tech Nationalism) (ภูมิรัฐศาสตร์ไม่มั่นคง / เทคโนโลยีค่อยเป็นค่อยไป)

ภายใต้ฉากทัศน์นี้ ภาพอนาคตเต็มไปด้วยความตึงเครียดและความไม่แน่นอนสูง ความขัดแย้งทางภูมิรัฐศาสตร์จะปะทุเป็นระยะ ความไว้วางใจระหว่างประเทศเริ่มสั่นคลอนและเต็มไปด้วยความหวาดระแวง แต่ละประเทศจะเน้นการให้ความสำคัญกับความมั่นคงของชาติและการยกระดับความพร้อมรบ โดยเฉพาะขีดความสามารถด้านการข่าวกรอง การเฝ้าตรวจ และการลาดตระเวน ระบบป้องกันทางอากาศ การสงครามอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาระบบโทรคมนาคม ทอ. จำเป็นต้องปรับทิศทางจากการ “เน้นผนวกเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ากับระบบเดิม” ไปสู่การ “ดำรงสภาพและเสริมสร้างความแข็งแกร่งให้ระบบเดิม” ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางไซเบอร์และอิเล็กทรอนิกส์ที่เลวร้ายและการถูกจำกัดการเข้าถึงเทคโนโลยีจากต่างประเทศ เช่น การเสริมขีดความสามารถในการฟื้นตัวของระบบเมื่อถูกโจมตี การมีเครือข่ายสำรอง และ

การพึ่งพาห่วงโซ่อุปทานภายในประเทศเพื่อลดการพึ่งพาต่างชาติ ถือเป็นฉากทัศน์ที่สะท้อนภาวะตึงเครียดทางภูมิรัฐศาสตร์และความมุ่งมั่นที่จะพึ่งพาตนเองอย่างจริงจังให้เห็นถึงภาวะ จึงอุปมาฉากทัศนี้ว่า “แว่นแคว้นประลองเชิง”

ฉากทัศน์ที่ ๔: แย่งชิงเทพศาสตรา ทั่วหล้าโกลาหล (Arms Race & Disruption) (ภูมิรัฐศาสตร์ไม่มั่นคง / เทคโนโลยีก้าวกระโดด)

ฉากทัศน์นี้ถือเป็นความท้าทายสูงสุดที่ขับเคลื่อนด้วยความขัดแย้งทางภูมิรัฐศาสตร์ที่รุนแรงและการแข่งขันทางเทคโนโลยีอย่างดุเดือดเพื่อความอยู่รอดของชาติ บีบให้กองทัพอากาศต้องเร่งจัดหาเทคโนโลยีพลิกโฉม (Disruptive Technology) อาทิ AI ขั้นสูง, ควอนตัม และขีดความสามารถทางไซเบอร์/อวกาศ มาใช้งานอย่างทันท่วงที แม้จะต้องแบกรับภาระงบประมาณมหาศาล ในส่วนระบบโทรคมนาคมจำเป็นต้องมีความแข็งแกร่งทนทานสูงสุด (Resilience) คล่องตัว และมีความมั่นคงปลอดภัยขั้นสูง โดยเฉพาะการเร่งประยุกต์ใช้การเข้ารหัสต้านควอนตัม (PQC) เป็นมาตรฐานพื้นฐานเพื่อครองความได้เปรียบด้านข้อมูลข่าวสาร อย่างไรก็ตาม การเน้นความปลอดภัยสูงสุดส่งผลให้ขีดความสามารถในการเชื่อมโยงระบบกับพันธมิตรต้องถูกลดทอนลง ในด้านกำลังพล ต้องการบุคลากรที่มีทักษะเฉพาะทางสูงเพื่อควบคุมระบบที่ซับซ้อนและเป็นอัตโนมัติ ท่ามกลางความเสี่ยงที่เทคโนโลยีอาจยกระดับความขัดแย้งโดยไม่ตั้งใจ ภาพรวมจึงเป็นการดิ้นรนเพื่อความอยู่รอดภายใต้แรงกดดันรอบด้าน ฉากทัศน์นี้จึงสะท้อนอนาคตที่ต้องต่อสู้เพื่อความอยู่รอดของชาติ ภายใต้การชิงความเป็นเลิศด้านอาวุธและเทคโนโลยีพลิกโฉม นำมาซึ่งภาระงบประมาณมหาศาล และแรงกดดันอย่างต่อเนื่อง จึงอุปมาฉากทัศน์นี้ว่า “แย่งชิงเทพศาสตรา ทั่วหล้าโกลาหล”

ตารางที่ ๑ สรุปจุดเน้นทางเชิงยุทธศาสตร์ โอกาสและความเสี่ยงสำคัญ จำแนกตามฉากทัศน์

ตารางที่ ๑ สรุปผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์จำแนกตามฉากทัศน์

ฉากทัศน์	จุดเน้นทางยุทธศาสตร์	โอกาสหลัก	ความเสี่ยงวิกฤต
๑. ก้าวย่าง ไร้คลื่นลม	พัฒนาตามแผน (Standard Modernization)	การวางแผนระยะยาวที่มีเสถียรภาพ	ภาวะชะล่าใจ, ล้าหลังคู่แข่ง
๒. ประสานลมปราณฯ	ร่วมมือและรับถ่ายทอด (Alliance & Transfer)	ก้าวกระโดดทางเทคโนโลยีผ่านพันธมิตร	การพึ่งพาต่างชาติ, ปัญหาความเข้ากันได้ของระบบ
๓. แว่นแคว้นประลองเชิง	พึ่งพาตนเอง (Self-Reliance Focus)	เสริมสร้างอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ	ห่วงโซ่อุปทานชะงักงัน, เทคโนโลยีตกรุ่น
๔. แย่งชิงเทพศาสตราฯ	ความอยู่รอดและอสมมาตร (Survival & Asymmetric)	สร้างความได้เปรียบเฉพาะจุด (Niche)	งบประมาณสูงลิ่ว, ภัยคุกคามควอนตัม

๓.๔ ขอบเขตการพัฒนา (“The What”)

ดังแสดงในภาพที่ ๓ ผลการวิเคราะห์ช่องว่างได้สะท้อนให้เห็นถึงขอบเขตการพัฒนาที่สำคัญใน ๒ มิติ ในมิติทางเทคโนโลยี พบช่องว่างที่ชัดเจนระหว่างระบบปัจจุบัน – ซึ่งเป็นการผสมผสานเทคโนโลยีต่างยุคสมัย - กับความต้องการในการยกระดับเครือข่ายให้ทันสมัย โดยเฉพาะการขาดแผนงานที่เป็นรูปธรรมในการบูรณาการปัญญาประดิษฐ์, ดาวเทียมสื่อสารความเร็วสูง, และเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายยุคใหม่ ช่องว่างที่สำคัญอย่าง คือ การขาดความพร้อมในการรับมือภัย

คุกคามเชิงควอนตัม และการป้องกันการสงครามอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน โดยเฉพาะในฉากทัศน์ที่มีความตึงเครียดสูง นอกจากนี้ โครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายแกนหลักยังขาดความจุและความเร็วที่เพียงพอ และที่สำคัญ คือ การขาดสถาปัตยกรรมระบบเปิดแบบแยกส่วน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการบรรลุขีดความสามารถในการปฏิบัติการร่วมอย่างแท้จริง ในมิติด้านอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งถือเป็นปัจจัยสนับสนุน พบช่องว่างเชิงยุทธศาสตร์ที่ชัดเจน ประการแรก คือ ยุทธศาสตร์การพัฒนาปัจจุบันที่เน้นการพัฒนาแบบค่อยเป็นค่อยไป ยังขาดความยืดหยุ่นและไม่สอดคล้องกับอัตราการปรับตัวทางเทคโนโลยีที่รวดเร็วซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในบางฉากทัศน์ ประการที่สอง คือ ช่องว่างด้านทักษะกำลังพล ระหว่างทักษะในปัจจุบันกับความต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญขั้นสูงในเทคโนโลยีอุบัติใหม่ ประการสุดท้าย คือ ช่องว่างด้าน

ภาพที่ ๓ การสังเคราะห์ขอบเขตการพัฒนาระบบโทรคมนาคม ทอ.ด้วยการวิเคราะห์ช่องวาง (Gap Analysis)

ทรัพยากร ระหว่างข้อจำกัดงบประมาณในปัจจุบันที่เน้นการพัฒนาเท่าที่จำเป็น กับความต้องการการลงทุนขนาดใหญ่และต่อเนื่องเพื่อบรรลุสถานะที่พึงประสงค์ โดยเฉพาะในฉากทัศน์ที่ต้องเร่งก้าวให้ทันเทคโนโลยี ผลการวิเคราะห์ช่องว่างทั้งหมดนี้ จึงถือเป็น “ขอบเขตการพัฒนา (What)” ที่กองทัพอากาศต้องให้ความสำคัญ

ในเชิงยุทธศาสตร์ สามารถจำแนกช่องว่างเหล่านี้เป็น ๒ มิติ [16] ดังนี้

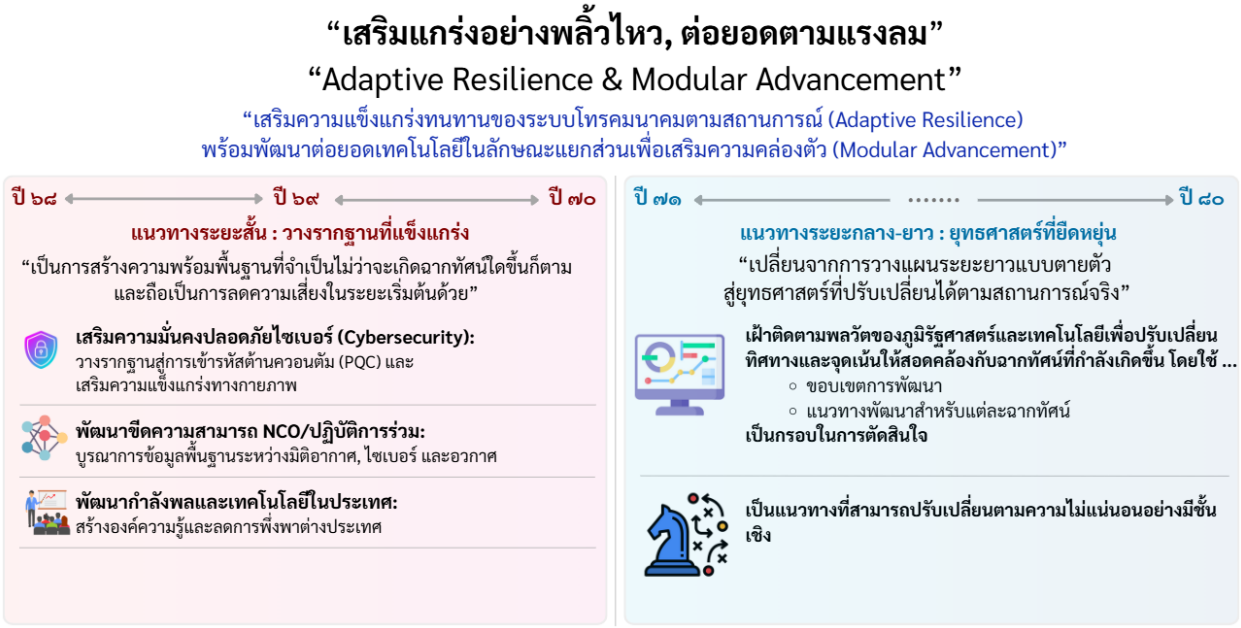
๑) ช่องว่างด้านประสิทธิภาพ: สะท้อนถึงจุดอ่อนพื้นฐานที่ระบบปัจจุบันยังทำได้ต่ำกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะปัญหา “ความเข้ากันได้ของระบบ” (Interoperability) อันเกิดจากการผสมผสานเทคโนโลยีต่างยุคสมัยต่างโปรโตคอล และ “ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์พื้นฐาน” ที่ยังไม่ครอบคลุมทั่วทั้งองค์กร ช่องว่างเหล่านี้ถือเป็นความเสี่ยงวิกฤตที่ต้องได้รับการแก้ไขทันทีเพื่อดำรงสภาพความพร้อมรบ

๒) ช่องว่างด้านโอกาส: สะท้อนถึงศักยภาพที่ยังไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ ได้แก่ การขาดแผนงานที่เป็นรูปธรรมในการบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูง (AI, LEO Satellites) และการขาดสถาปัตยกรรมระบบเปิดแบบแยกส่วน (Modular Open System Architecture: MOSA) ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการลดการผูกขาดเทคโนโลยีและเพิ่มความคล่องตัวในการปรับปรุงระบบในอนาคต

ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ยุทธศาสตร์การพัฒนาแบบ “ค่อยเป็นค่อยไป” (Incremental Improvement) ในปัจจุบัน ไม่เพียงพอที่จะรับมือกับฉากทัศน์ที่มีความผันผวนสูง (ฉากทัศน์ที่ ๒ และ ๔) จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนผ่านสู่ยุทธศาสตร์ใหม่ที่เน้นความยืดหยุ่นและการเตรียมความพร้อมเชิงรุก

๓.๕ แนวทางการพัฒนา (“The How & When”)

เพื่อตอบสนองต่อความไม่แน่นอนของฉากทัศน์ทั้ง ๔ รูปแบบ ซึ่งเปรียบเสมือน “บททดสอบ” ภายใต้ “ขอบเขตการพัฒนา” (“The What”) ที่จำเป็นดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้เสนอกรอบยุทธศาสตร์ “เสริมแกร่งอย่างพลิ้วไหว, ต่อยอดตามแรงลม” (Adaptive Resilience & Modular Advancement) ซึ่งเปลี่ยนกระบวนทัศน์จากการวางแผนระยะยาวแบบตายตัว (Static Planning) สู่การบริหารจัดการแบบปรับเปลี่ยนได้ตามสถานการณ์ (Dynamic Strategy) โดยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น ๒ ระยะสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ ๔ ดังนี้



ภาพที่ ๔ กรอบยุทธศาสตร์ในการพัฒนา

แนวทางการพัฒนาในปี ๖๘ – ๗๐ (อนาคตอันใกล้)

การวางรากฐานที่มั่นคง (พ.ศ. ๒๕๖๘ – ๒๕๗๐) ระยะนี้มุ่งเน้นการสร้าง “ความพร้อมพื้นฐาน” (No-Regret Moves) ที่จำเป็นสำหรับทุกฉากทัศน์ ไม่ว่าอนาคตจะเปลี่ยนไปในทิศทางใด โดยมีจุดเน้น ๓ ประการ ดังนี้

๑. *เสริมความมั่นคงปลอดภัยและความแข็งแกร่งทนทานของเครือข่าย*

กรอบเวลา: เริ่มดำเนินการทันทีตั้งแต่ปี ๖๘ และต่อเนื่อง

แผนดำเนินการ: ประเมินช่องโหว่ทางไซเบอร์อย่างครอบคลุมโดยทันที, เสริมสร้างความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ขั้นพื้นฐานทั่วทั้งเครือข่ายในปัจจุบัน, เริ่มต้นการวางแผนและวิจัยพัฒนาเพื่อเตรียมความพร้อมรับมือเทคโนโลยีการเข้ารหัสต้านควอนตัมในอนาคต และเสริมสร้างความแข็งแกร่งทางกายภาพของโครงสร้างพื้นฐานด้านเครือข่ายพร้อมระบบสนับสนุน

หมุดหมายสำคัญ (ปี ๖๙): (๑) ระดับความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์พื้นฐานได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ และ (๒) เริ่มต้นแผนงานรองรับเทคโนโลยีการเข้ารหัสต้านควอนตัม (๓) โครงสร้างพื้นฐานด้านเครือข่ายที่สำคัญได้รับการปรับปรุง

๒. *ปรับปรุงโครงสร้างและสถาปัตยกรรมเครือข่าย*

กรอบเวลา: เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี ๖๘ เป็นต้นไปสำหรับทุกระบบที่ติดตั้งใหม่และที่ต้องปรับปรุง

แผนดำเนินการ: กำหนดมาตรฐานและกลไกตามหลักการสถาปัตยกรรมระบบเปิดแบบแยกส่วนสำหรับทุกระบบที่จัดหาใหม่และที่ต้องปรับปรุง เพื่อให้ระบบต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อและทำงานร่วมกันได้อย่างราบรื่น เอื้อต่อการปรับปรุงให้ทันสมัยได้รวดเร็ว และลดการผูกขาดทำให้การดำรงสภาพเป็นไปอย่างยั่งยืน; พัฒนาระบบเครือข่ายแกนหลัก (Backbone Network) ที่รองรับการบูรณาการเทคโนโลยี 5G/6G และระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมความเร็วสูงที่มีความคล่องตัวในการติดตั้ง การรื้อถอน และการเคลื่อนย้าย ควบคู่ไปกับการเพิ่มความจุ ขยายพื้นที่ครอบคลุม และยกระดับความน่าเชื่อถือของเครือข่ายแกนหลัก; บูรณาการข้อมูลพื้นฐานระหว่างมิติอากาศ-ไซเบอร์-อวกาศ

หมุดหมายสำคัญ (ปี ๗๐): (๑) มีการนำนโยบายสถาปัตยกรรมระบบเปิดแบบแยกส่วนไปใช้กับโครงการจัดหาและปรับปรุงเครือข่ายแกนหลัก (๒) การพัฒนาและปรับปรุงเครือข่ายแกนหลักในพื้นที่ปฏิบัติการที่สำคัญเสร็จสมบูรณ์; (๓) มีความเข้ากันได้ของระบบด้านเครือข่ายระหว่างเหล่าทัพ และ (๔) ริเริ่มบูรณาการข้อมูลเบื้องต้นระหว่างมิติอากาศ-ไซเบอร์-อวกาศ

๓. *เตรียมความพร้อมกำลังพลไว้รองรับเทคโนโลยี*

กรอบเวลา: เริ่มต้นตั้งแต่ปี ๖๘ และดำเนินการต่อเนื่อง

แผนดำเนินการ: กำหนดเส้นทางความก้าวหน้าในวิชาชีพที่ชัดเจนและสร้างแรงจูงใจ; สร้างความร่วมมือกับสถาบันอุดมศึกษาเพื่อพัฒนากำลังพลศักยภาพสูง (Talent Pipeline) สำหรับอนาคต; สร้างกลไกการเฝ้าระวังและติดตามแนวโน้มเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง (Tech Watch) เพื่อให้การพัฒนาทักษะสอดคล้องกับแนวโน้มของโลกอยู่เสมอ

หมุดหมายสำคัญ (ปี ๗๐): (๑) มีแผนพัฒนากำลังพลสายเทคนิคเชิงรุก (ด้านสื่อสารโทรคมนาคม) ที่ชัดเจน; (๒) เริ่มความมือกับสถาบันการศึกษาและเอกชน; (๓) เริ่มขับเคลื่อนกลไกการเฝ้าระวังและการติดตามแนวโน้มเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

แนวทางการพัฒนาห้วงปี ๗๑ – ๘๐ (อนาคตระยะกลาง - ยาว)

ระยะนี้เน้นการ “ปรับเปลี่ยนทิศทางการเตรียมความพร้อม” (Pivot) ตามสัญญาณจากปัจจัยขับเคลื่อนหลักที่ปรากฏขึ้นจริง ซึ่งมีจุดเน้น จังหวะ ทิศทาง และการใช้ทรัพยากร ที่แตกต่างกัน สรุปแนวทางการพัฒนา ฯ ตามฉากทัศน์ที่คาดการณ์ (ภาพที่ ๕) ดังนี้

หากเข้าสู่ฉากทัศน์ที่ ๑: ใช้แนวทาง “เพียรพัฒนาต่อเนื่อง เสริมสร้างเครือข่ายสัมพันธ์”

ภายใต้ฉากทัศน์ที่ ๑ แนวทางหลัก คือ เน้นการพัฒนาอย่างมีวินัย เป็นขั้นเป็นตอน ควบคู่กับการประสานความร่วมมือกับพันธมิตรอย่างต่อเนื่อง แนวทางนี้ใช้โอกาสจากความมั่นคงทางภูมิรัฐศาสตร์และความร่วมมือระหว่างประเทศผ่านการฝึก ศึกษา และแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ เพื่อประกอบการพัฒนาปรับปรุงระบบ ฯ อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน พร้อมทั้งวางกลไกเพื่อลดความเสี่ยงจากภาวะชะล่าใจหรือภาวะถดถอยทางเทคโนโลยีเมื่อเทียบกับคู่แข่ง

หากเข้าสู่ฉากทัศน์ที่ ๒: ใช้แนวทาง “ร่วมแรงคว้าโอกาสทอง เตรียมพร้อมทุกด้านอย่างรอบคอบ”

ภายใต้ฉากทัศน์ที่ ๒ แนวทางหลัก คือ เน้นการผนึกกำลังกับพันธมิตรเพื่อฉกฉวยโอกาสทางเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างก้าวกระโดด แต่ต้องมีการเตรียมการล่วงหน้าเพื่อป้องกันความเสี่ยง แนวทางนี้มีเป้าหมายแสวงประโยชน์จากโอกาสในความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและเสถียรภาพด้านความมั่นคงอย่างเต็มที่ ขณะเดียวกันก็มุ่งลดทอนความเสี่ยงที่เกิดจาก (๑) การพึ่งพาต่างชาติมากเกินไป (๒) ความซับซ้อนของเทคโนโลยีขั้นสูง (๓) ต้นทุนระยะยาวในการนำเทคโนโลยีขั้นสูงมาใช้ และ (๔) ความล้าสมัยหรือตกยุคของเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

หากเข้าสู่ฉากทัศน์ที่ ๓: ใช้แนวทาง “เสริมป้อมปราการให้แข็งแกร่ง สร้างพลังตน ลดการพึ่งพา”

ภายใต้ฉากทัศน์ที่ ๓ แนวทางหลัก คือ การมุ่งพัฒนาเครือข่ายโทรคมนาคมให้แข็งแกร่ง ทนทาน มั่นคงปลอดภัย โดยเน้นการพึ่งพาตนเอง แนวทางนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานความเข้าใจต่อพลวัตของภูมิรัฐศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

ความท้าทายด้านห่วงโซ่อุปทานของชิ้นส่วนสำคัญ และอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีที่อยู่ในระดับปานกลาง โดยมุ่งเน้นการเสริมสร้างขีดความสามารถของกองทัพอากาศให้สามารถปฏิบัติการและพึ่งพาตนเองได้อย่างยั่งยืน

หากเข้าสู่ฉากทัศน์ที่ ๔: ใช้แนวทาง "ครองข้อมูลให้เหนือกว่า พลิกแพลงกลยุทธ์เพื่ออยู่รอด"

ในบริบทของฉากทัศน์ที่ ๔ แนวทางหลัก คือ ต้องมุ่งสร้างความได้เปรียบเชิงอสมมาตร โดยมีเป้าหมายสูงสุดคือ "ความอยู่รอดของชาติ" และ "การชิงความได้เปรียบด้านข้อมูลข่าวสารอย่างเบ็ดเสร็จเด็ดขาด" ทั้งนี้ ต้องตระหนักว่าความพยายามสร้างความเท่าเทียมด้านเทคโนโลยีในทุกมิติเทียบกับชาติมหาอำนาจเป็นสิ่งเป็นไปไม่ได้และไม่สอดคล้องกับทรัพยากรที่มีจำกัด แนวทางนี้เน้นการเลือกลงทุนในขีดความสามารถเฉพาะด้านที่ให้ผลเชิงยุทธศาสตร์เท่านั้น เช่น ด้านปฏิบัติการไซเบอร์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แม้ต้องแลกกับการลดทอนขีดความสามารถในบางมิติ นอกจากนี้ อาจต้องลดความสำคัญของการเชื่อมโยงเครือข่ายกับพันธมิตรหลัก เพื่อแลกกับ (๑) ความรวดเร็วในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นจุดเน้น (๒) การรักษาความลับ และ (๓) ความปลอดภัยสูงสุดของข้อมูลและเครือข่าย

ภาพที่ ๕ แนวทางการพัฒนาฯ ในระยะกลาง-ยาว

๔. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การเตรียมความพร้อมด้านโทรคมนาคมทางทหารในยุค VUCA ไม่สามารถพึ่งพาการพยากรณ์อนาคตเพียงรูปแบบเดียวได้อีกต่อไป การประยุกต์ใช้การคาดการณ์อนาคตเชิงยุทธศาสตร์ทำให้กองทัพอากาศสามารถระบุปัจจัยเสี่ยงและโอกาสที่ซ่อนอยู่ นำไปสู่ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย ดังนี้

๑) การจัดสรรงบประมาณที่ยืดหยุ่น: ควรแบ่งงบประมาณส่วนหนึ่งสำหรับการทดลองและวิจัยเทคโนโลยีอุบัติใหม่ (R&D Sandbox) เพื่อให้สามารถปรับตัวตามฉากทัศน์ที่เปลี่ยนแปลงได้ทันท่วงที

๒) การปฏิรูปการพัฒนากำลังพล: เปลี่ยนจากการฝึกอบรมตามวงรอบ เป็นการเรียนรู้ตลอดชีวิต (Lifelong Learning) และสร้างเส้นทางอาชีพเฉพาะทางสำหรับบุคลากรสายเทคนิค เพื่อรักษาคนเก่งไว้ในองค์กร

๒) การเฝ้าระวังเชิงยุทธศาสตร์: กองทัพอากาศควรมีกลไกการติดตามสัญญาณอนาคต (Horizon Scanning) อย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินสัญญาณเตือนภัยล่วงหน้าจากปัจจัยภูมิรัฐศาสตร์และเทคโนโลยี พร้อมทั้งปรับแผนยุทธศาสตร์ให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

กรอบแนวคิด “เสริมแกร่งอย่างพลิ้วไหว, ต่อยอดตามแรงลม” จะช่วยเปลี่ยนสถานะของกองทัพอากาศจากการตั้งรับต่อการเปลี่ยนแปลง เป็นการกำหนดอนาคตที่มีความพร้อมและความยืดหยุ่นในการปกป้องอธิปไตยของชาติในทุกสถานการณ์

บรรณานุกรม

[1] D. S. Albert, J. J. Garstka, and F. P. Stein. Network-centric warfare: Developing and leveraging information superiority. CCRP Publication Series, 1999.

[2] E. E. Silbaugh. Network-centric operations: Challenges and pitfalls. Air War College, Air University, Center for Strategy and Technology, 2005.

[3] กองทัพอากาศ, ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ ๒๐ ปี พ.ศ. ๒๕๖๑ - ๒๕๘๐ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๓). กองทัพอากาศ, ๒๕๖๓.

[4] J. Wayne, "Link 16 Operational Overview," Thales UK.

[5] H. Mintzberg. The fall and rise of strategic planning. 1994.

[6] J. Voros, “A Generic Foresight Process Framework,” Foresight, 5, 3, 10-21. 2003.

[7] A. Horton, “A simple guide to successful foresight,” Foresight, 1, 1, 5-9. 1999.

[8] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน), เครื่องมือการมองอนาคต (Foresight tools). กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ๒๕๖๒.

[9] NATO. Allied command transformation strategic foresight analysis 2023. NATO, 2023.

[10] M. Damen. EU-Ukraine 2035: Strategic Foresight Analysis on the Future of the EU and Ukraine. Brussels: European Parliamentary Research Service, 2023.

[11] Headquarters U.S. Air Force, Deputy Chief of Staff for Strategy Integration and Requirements, AF A5/7 Air Force Futures. Air Force Global Futures Report. U.S. Air Force, 2023.

[12] S. Hoferer. Strategic foresight and innovation: How the US Air Force stays ahead. ITONICS, 2024.

[13] S. Boey, P. Dortmans, and J. Nicholson. Forward 2035: DSTO Foresight Study. Defense Science and Technology Organization, DoD, Australian Government, 2014.

[14] Canadian Army Land Warfare Centre. Canada’s Future Army, Volume 1: Methodology, Perspectives and Approaches. 2015.

[15] P. W. Lackenbauer (Ed.). Understanding the future Arctic security environment: Applying NATO strategic foresight analysis to Canadian Arctic defence and security. North American and Arctic Defence and Security Network, 2020.

[16] B. Einstein, “Business Insights Blogs.” Harvard Business School Online. [Online]. Available :https://online.hbs.edu/blog/post/gap-analysis (accessed 10 Dec. 2024).

บูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ

นาวาอากาศเอก ณัฐพล นิยมไทย[1*]

[1]กองสนับสนุนการวิจัยอากาศยาน ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ

nattapol_n@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับทั้งในประเทศและต่างประเทศ และนำมากำหนดแนวทางบูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ กรณีศึกษาจากตุรกี อิสราเอล เกาหลีใต้ และสิงคโปร์ พบว่าประสบความสำเร็จในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายและกลยุทธ์ของกองทัพอากาศเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านนี้ ให้นำไปปฏิบัติได้ 4 รูปแบบ การบูรณาการประกอบด้วย 1) ผู้นำระดับยุทธศาสตร์ต้องกำหนดทิศทางและยุทธศาสตร์การพัฒนา 2) ความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชนเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อน 3) รัฐมีมาตรการส่งเสริมด้านโครงสร้างพื้นฐาน มาตรการภาษี งบประมาณ และกฎระเบียบ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขัน 4) ส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยีแบบก้าวกระโดดเพื่อยกระดับขีดความสามารถของบุคลากร 5) จัดทำฐานข้อมูลองค์ความรู้ สร้างนักวิจัย รวมถึงส่งเสริมหลักสูตร UAS กองทัพอากาศ และ 6) จัดตั้งหน่วยงานรับรองมาตรฐานอากาศยานไร้คนขับระดับประเทศ

คำสำคัญ: บูรณาการ, อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ, กิจการอากาศยานไร้คนขับ, กองทัพอากาศ

Abstract

This research aimed to examine domestic and international models for promoting the defense industry in the field of unmanned aerial systems (UAS) and to develop an integrated framework for the Royal Thai Air Force's UAS ecosystem. Case studies from Türkiye, Israel, South Korea, and Singapore showed that these countries had successfully advanced their UAS defense industries, offering valuable insights for shaping effective policies and strategies for the Air Force. The study proposed six integrated approaches. First, strategic-level leaders had to set clear developmental directions and overarching strategies. Second, strong government–industry cooperation served as a critical mechanism for driving progress. Third, the government should implement supportive measures - including infrastructure development, tax incentives, budget allocations, and regulatory frameworks - to enhance national competitiveness. Fourth, leapfrogging technology transfer should be

encouraged to strengthen human capital and technological expertise. Fifth, a comprehensive knowledge base should be established, along with researcher development and the enhancement of UAS-related academic programs within the Air Force. Finally, the study recommended creating a national certification body responsible for standardizing unmanned aerial systems

Keywords: Integrated framework, Defense industry, UAS ecosystem, Royal Thai Air Force

1. บทนำ

เทคโนโลยีระบบอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial System: UAS) ทั่วโลกเติบโตอย่างรวดเร็วจากความก้าวหน้าด้านปัญญาประดิษฐ์ ระบบนำร่องอัตโนมัติ และการสื่อสารระยะไกล ส่งผลให้กองทัพทั่วโลกนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในภารกิจทางการทหารทั้งด้านการรบ เช่น การโจมตีเป้าหมายระยะไกล และด้านมิใช่การรบ เช่น การลาดตระเวนตามแนวชายแดน ปัจจัยเหล่านี้ทำให้อุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับเติบโตในหลายมิติ ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาแพลตฟอร์มใหม่ ๆ การผลิตระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ และการขยายตลาดอากาศยานไร้คนขับเชิงพาณิชย์ที่เชื่อมโยงกับภาคการทหาร เป็นต้น ซึ่งในอนาคตเทคโนโลยีนี้จะเสริมขีดความสามารถหรือทดแทนอากาศยานที่มีคนขับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รัฐบาลให้การสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยอย่างต่อเนื่อง โดยได้บรรจุประเด็นนี้ไว้ในยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ.2561 - 2580) เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ นอกจากนี้ ยังได้กำหนดให้อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นอุตสาหกรรมเป้าหมายพิเศษลำดับที่ 11 (S-Curve 11) พร้อมทั้งส่งเสริมผ่านพระราชบัญญัติส่งเสริมการลงทุน พ.ศ.2520 โดยมุ่งเน้นการผลิตและซ่อมบำรุงระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อการป้องกันประเทศ

กองทัพอากาศให้ความสำคัญกับการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และการเสริมขีดความสามารถของอากาศยานไร้คนขับให้เป็นกำลังรบสำคัญในอนาคต โดยกำหนดไว้ในยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 - 2580) ซึ่งมุ่งเน้นการเสริมสร้างสมรรถนะและความพร้อมในการป้องกันประเทศผ่านการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับประเภท Medium Altitude Long Endurance: MALE และ High Altitude Long Endurance: HALE รวมทั้ง Unmanned Combat Air Vehicle: UCAV บนพื้นฐานของความร่วมมือกับอุตสาหกรรมภายในประเทศ

อย่างไรก็ตาม การเสริมขีดความสามารถอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศให้เป็นกำลังรบสำคัญในอนาคตด้วยการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศยังมีปัญหาหลายประการ เช่น การขาดการบูรณาการระหว่างหน่วยงานของรัฐและภาคเอกชน การขาดแนวทางและมาตรการในการสนับสนุนและส่งเสริมการประกอบกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ตลอดจนความซับซ้อนของเทคโนโลยีที่ต้องใช้งบประมาณสูงและระยะเวลาการวิจัยและพัฒนาที่ยาวนาน รวมถึงการไม่มีหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์ หากไม่ได้รับการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจะส่งผลให้กองทัพอากาศยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับจากต่างประเทศในฐานะ “ผู้ใช้” ต่อไป ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการวิจัยการบูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ เพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหาในการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับให้สามารถเสริมขีดความสามารถหรือทดแทนอากาศยานที่มีนักบินในหลายภารกิจของกองทัพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต เพื่อก้าวสู่การเป็นกองทัพอากาศที่แข็งแกร่ง และมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นอุตสาหกรรมที่มีระบบนิเวศ (Ecosystem) หรือกิจการอันประกอบไปด้วย การวิจัย พัฒนาการผลิต การประกอบรวม การปรับปรุง การซ่อมสร้าง การเปลี่ยนลักษณะ การแปรสภาพ หรือการให้บริการ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการป้องกันประเทศ อุตสาหกรรมนี้มีเอกลักษณ์ที่แตกต่างจากอุตสาหกรรมประเภทอื่นตรงที่มีบทบาทการเป็นโครงสร้างพื้นฐานและหลักประกันทางด้านความมั่นคงต่อประเทศ ในบริบทของความพร้อมรบของกองทัพในเชิงปริมาณและคุณภาพทางด้านยุทโธปกรณ์ อีกทั้งยังสัมพันธ์กับความสามารถในการดำรงความพร้อมรบภายใต้การพึ่งพาตนเองได้ในยามสงคราม และเตรียมความพร้อมด้วยการฝึกในยามสงบได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงเป็นแนวทางช่วยให้ประเทศประหยัดงบประมาณจากการนำเข้าจากต่างประเทศอีกด้วย

ปัจจุบัน อากาศยานไร้คนขับ มีบทบาทในการปฏิบัติร่วมกับอากาศยานที่มีคนขับด้านการป้องกันประเทศ อาทิ การลาดตระเวนและเฝ้าตรวจ การค้นหาเป้าหมาย รวมทั้งภารกิจพิเศษอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ท่ามกลางความตึงเครียดทางภูมิรัฐศาสตร์และการรักษาความปลอดภัยตามแนวชายแดนที่เพิ่มขึ้น นานาประเทศจึงได้คิดริเริ่มเชิงกลยุทธ์ในการเสริมสร้างความมั่นคงของชาติด้วยการลงทุนพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศด้านอากาศยานไร้คนขับ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถการป้องกันประเทศและรับมือกับภัยคุกคาม จึงเกิดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ หรือระบบนิเวศอากาศยานไร้คนขับขึ้น หมายถึง กิจการอันประกอบไปด้วย การวิจัยและพัฒนา การผลิต การประกอบรวม การทดสอบ การส่งกำลังซ่อมบำรุง การฝึกอบรม และการรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการป้องกันประเทศ เพื่อนำมาเสริมขีดความสามารถหรือทดแทนอากาศยานที่มีคนขับในหลากหลายภารกิจของกองทัพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และการทบทวนวรรณกรรม พบว่า อุตสาหกรรมป้องกันประเทศมีบทบาทสำคัญในการเสริมความมั่นคงของชาติและเศรษฐกิจ โดยสามารถพัฒนาขีดความสามารถด้านการผลิตและซ่อมบำรุงยุทโธปกรณ์ในประเทศ ลดการพึ่งพาการนำเข้า และสนับสนุนการเติบโตของนวัตกรรมภายในประเทศ ปัจจุบัน นานาประเทศ เช่น ตุรกี อิสราเอล เกาหลีใต้ และสิงคโปร์ ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับผ่านการลงทุนในเทคโนโลยีใหม่ ๆ และการสร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชน เพื่อเสริมประสิทธิภาพในการป้องกันประเทศ ขณะที่ประเทศไทยก็ได้เริ่มมีการสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในด้านนี้ เช่น โครงการ M Solar-X UAV ที่วิจัยและพัฒนาโดยโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช สามารถผลิตและใช้งานภายในประเทศได้ สะท้อนถึงการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในทิศทางที่พึ่งพาตนเองได้มากขึ้น

การพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสำคัญ ตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปีและแผนพัฒนาของกระทรวงกลาโหม ในส่วนของกองทัพอากาศ ได้วางยุทธศาสตร์การพัฒนาขีดความสามารถของระบบอากาศยานไร้คนขับ เพื่อตอบสนองต่อภัยคุกคามในอนาคต โดยเน้นความร่วมมือในการวิจัยและพัฒนา และส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศให้สามารถผลิตและซ่อมบำรุงอากาศยานไร้คนขับได้ต่อไป ประเด็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับทั้งหมดนี้จะเป็นข้อมูลนำเข้าที่สำคัญ เพื่อใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และสังเคราะห์ในงานวิจัย

3. การดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่อง บูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ ผู้วิจัยได้กำหนดระเบียบวิธีวิจัยเป็นเชิงคุณภาพ มีการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารจากข้อมูลทุติยภูมิที่ได้ทบทวนวรรณกรรมโดยใช้หลักการยืนยันสามเส้า (Triangulation technic) วิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างของข้อคำถามเพื่อนำไปสัมภาษณ์ผู้ทรงคุณวุฒิระดับผู้บริหารเชิงยุทธศาสตร์ ระดับผู้เชี่ยวชาญที่ทรงความรู้ และระดับผู้ปฏิบัติเชิงยุทธวิธี โดยเป็นการ

สัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้างหรือการสัมภาษณ์แบบชี้นำ (Guided interview) แล้วนำข้อมูลไปสังเคราะห์บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ ตามแนวคิดในการปฏิบัติภารกิจระบบอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ ด้วยการวาดเหตุการณ์จำลองอนาคต (Scenario planning) และสังเคราะห์แนวทางการบูรณาการเพื่อขับเคลื่อนการดำเนินการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับรองรับการบรรจุอากาศยานไร้คนขับเข้าประจำการในกองทัพอากาศให้สามารถปฏิบัติภารกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารที่ได้ทบทวนวรรณกรรมโดยใช้หลักการยืนยันสามเส้าในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของตุรกี อิสราเอล เกาหลีใต้ และสิงคโปร์ พบความสัมพันธ์และสอดคล้องในสามประเด็นหลัก ได้แก่ 1) การบูรณาการความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชน โดยรัฐสนับสนุนเงินทุนวิจัยและพัฒนา 2) มาตรการส่งเสริมอุตสาหกรรม เช่น สิทธิประโยชน์ทางภาษีและเขตอุตสาหกรรมเฉพาะเพื่อลดการพึ่งพาต่างประเทศ และ 3) ปัจจัยความสำเร็จ ซึ่งเน้นการส่งเสริมการลงทุนและพัฒนาทรัพยากรมนุษย์เป็นหัวใจสำคัญ

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกโดยใช้หลัก 6’C Technic (QDAT Knowledge) จำแนกแยกแยะเนื้อหาสาระ ข้อมูลที่มีประเด็นสำคัญออกเป็นกลุ่ม (Classify) ตามคำถามสัมภาษณ์ ได้ดังนี้

4.2.1 แนวทางการบูรณาการเพื่อขับเคลื่อนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้าน UAS ของกองทัพอากาศ

การขับเคลื่อนอุตสาหกรรม UAS ของกองทัพอากาศต้องอาศัยความร่วมมือระหว่างรัฐและเอกชน โดยเริ่มจากการพัฒนา K-24 ผ่านความร่วมมือระหว่างบริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด และกองทัพอากาศซึ่งเป็นรูปแบบคล้าย Korea Aerospace Industries เพื่อสร้างขีดความสามารถผลิตอากาศยานไร้คนขับในประเทศ ควบคู่กับบทบาทของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศในการสนับสนุนบริษัทร่วมทุน และการใช้พื้นที่กองบิน 3 เป็นฐานอุตสาหกรรม รวมถึงการวางยุทธศาสตร์ระยะยาว 25 ปี ตาม UAS CONOPs ที่ผลักดันพัฒนาร่วมระหว่างรัฐ เอกชน และสถาบันการศึกษา ผ่าน MOU และกรอบกฎระเบียบที่ชัดเจน เพื่อให้เกิดความยั่งยืนในอุตสาหกรรมโดยรวม

4.2.2 แนวทางและมาตรการสนับสนุนการประกอบกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้าน UAS

การสนับสนุนอุตสาหกรรม UAS ต้องเริ่มจากการพัฒนาบุคลากรและองค์ความรู้ ผ่านการฝึกอบรมโดยผู้ผลิตชั้นนำ การจัดทำฐานข้อมูล และการสร้างนักวิจัยอย่างต่อเนื่อง พร้อมมาตรการรัฐ เช่น สิทธิประโยชน์ทางภาษี การลดหย่อนอุปกรณ์นำเข้า การส่งเสริมโครงการ S-Curve 11 และการจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรม DTI เพื่อรองรับการผลิตและซ่อมบำรุง นอกจากนี้ยังต้องพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานโดยยกระดับกองบิน 3 เป็นศูนย์ทดสอบและฝึกอบรม รวมถึงการจัดสรรย่านความถี่และระบบร่วมมือทุกภาคส่วน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนามีมาตรฐานและตอบโจทย์กองทัพอากาศอย่างแท้จริง

4.2.3 การส่งเสริมอุตสาหกรรม UAS ผ่านการถ่ายทอดเทคโนโลยีแบบก้าวกระโดด (Jumpstart)

การถ่ายทอดเทคโนโลยีแบบก้าวกระโดดเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยกระดับความสามารถบุคลากรและการพึ่งพาตนเองของอุตสาหกรรม โดยอาศัยบริษัทร่วมทุนระหว่างรัฐและผู้ผลิตระดับโลก รวมถึงความร่วมมือของบริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด กับผู้ผลิต เช่น Turkish Aerospace Industries เพื่อยกระดับมาตรฐานสากล ขณะเดียวกัน UAS CONOPs ช่วยให้กองทัพอากาศสามารถพัฒนาเทคโนโลยีโดยไม่ต้องเริ่มจากศูนย์ และวางแผนบรรจุ UAS ติดอาวุธขนาดกลางในอนาคต ซึ่งจะเสริมขีดความสามารถผลิต ซ่อมบำรุง และรองรับความต้องการในประเทศได้อย่างมั่นคง

4.2.4 การรับรองมาตรฐานยุทโธปกรณ์จากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้าน UAS

การพัฒนาอุตสาหกรรม UAS ต้องมีระบบรับรองมาตรฐานระดับประเทศ โดยแม้กระทรวงกลาโหมจะมีสำนักมาตรฐานทางทหารทำหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพอยู่แล้ว แต่ความสามารถยังจำกัดเฉพาะงานวิจัย จึงควรยกระดับ

ให้สามารถรับรองยุทโธปกรณ์ตามมาตรฐานสากล เช่น NATO โดยมีบทบาทร่วมกันระหว่างสำนักงานการบินกองทัพอากาศและหน่วยงานเฉพาะด้านภายใต้กระทรวงกลาโหม อีกทั้งบริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด ยังมีศักยภาพพัฒนาเป็นผู้รับรองมาตรฐานในอนาคต เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นด้านคุณภาพทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ

4.2.5 โอกาสในการบูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการ UAS ของกองทัพอากาศ

โอกาสการบูรณาการในอุตสาหกรรม UAS ขึ้นอยู่กับการกำหนดยุทธศาสตร์ที่ถูกต้อง โปร่งใส และสร้างความเข้าใจร่วมกัน เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานสากล ขณะเดียวกันต้องสนับสนุนงบวิจัยและพัฒนามากขึ้น พร้อมส่งเสริมบุคลากรทุกภาคส่วนผ่านการอบรมหรือถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และเปิดโอกาสให้มีส่วนร่วมในกระบวนการผลิตอย่างเต็มรูปแบบ นอกจากนี้ยังต้องเร่งสร้างกฎระเบียบสนับสนุนอุตสาหกรรม จัดตั้งหน่วยงานรับรอง และพัฒนาศูนย์ฝึกอบรม UAS ของกองทัพอากาศให้เป็นโครงการนำร่องแบบครบวงจร เพื่อลดการพึ่งพาต่างประเทศและสร้างความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมในระยะยาว

4.3 การสังเคราะห์ข้อมูลโดยนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม และผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก จนถึงขั้นตอนการวิเคราะห์/จำแนกแยกแยะเนื้อหาสาระ ข้อมูลที่มีประเด็นสำคัญออกเป็นกลุ่ม (Classify) มาสังเคราะห์รวมกัน แล้วจัดหมวดหมู่ (Category) ดังนี้

4.3.1 สังเคราะห์บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับตามแนวความคิดในการปฏิบัติภารกิจระบบอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ ด้วยการวาดเหตุการณ์จำลองอนาคต (Scenario Planning)

4.3.1.1 <u>Scenario 1</u> บริษัทร่วมทุน 3 ฝ่าย ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยวาดเหตุการณ์จำลองอนาคตว่า อาศัยอำนาจตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562 มาตรา 23(7) จัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้น โดยเป็นการบูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ เช่น Turkish Aerospace Industries: TAI ของตุรกี หรือ Israel Aerospace Industries: IAI ของอิสราเอล เป็นต้น ลงนามจัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้นด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ อันประกอบไปด้วย การวิจัยและพัฒนา การผลิต การประกอบรวม การทดสอบ การส่งกำลังซ่อมบำรุง และการฝึกอบรมภาคพื้น ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม DTI จังหวัดกาญจนบุรี

4.3.1.2 <u>Scenario 2</u> บริษัทร่วมทุน 2 ฝ่าย ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยวาดเหตุการณ์จำลองอนาคตว่า เป็นการบูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ เช่น TAI ของตุรกี หรือ IAI ของอิสราเอล เป็นต้น ลงนามจัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้น หรือลงนามความร่วมมือ ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ อันประกอบไปด้วย การวิจัยและพัฒนา การผลิต การประกอบรวม การทดสอบ การส่งกำลังซ่อมบำรุง และการฝึกอบรมภาคพื้น ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม DTI จังหวัดกาญจนบุรี

4.3.1.3 <u>Scenario 3</u> บริษัทร่วมทุน 3 ฝ่าย ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่กองทัพอากาศ โดยวาดเหตุการณ์จำลองอนาคตว่า อาศัยอำนาจตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562 มาตรา 23(7) จัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้น โดยเป็นการบูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ เช่น TAI ของตุรกี หรือ IAI ของอิสราเอล เป็นต้น ลงนามจัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้นด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ อันประกอบไปด้วย การวิจัยและพัฒนา การผลิต การประกอบรวม การทดสอบ การส่งกำลังซ่อมบำรุง และการฝึกอบรมภาคพื้น ในพื้นที่กองบิน 3 อำเภอวัฒนานคร จังหวัดสระแก้ว

4.3.1.4 <u>Scenario 4</u> บริษัทร่วมทุน 2 ฝ่าย ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่กองทัพอากาศ โดยวาดเหตุการณ์จำลองอนาคตว่า เป็นการบูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด และบริษัทผู้ผลิต

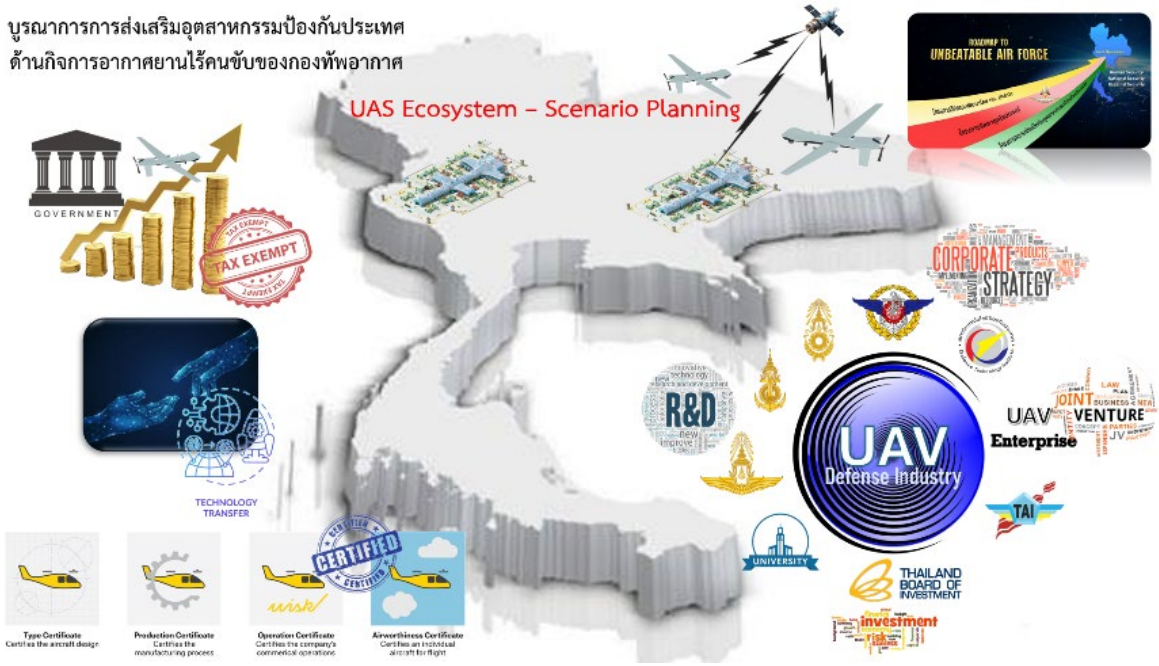
อากาศยานไร้คนขับชั้นนำ เช่น TAI ของตุรกี หรือ IAI ของอิสราเอล เป็นต้น ลงนามจัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้นหรือลงนามความร่วมมือ ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ อันประกอบไปด้วย การวิจัยและพัฒนา การผลิต การประกอบรวม การทดสอบ การส่งกำลังซ่อมบำรุง และการฝึกอบรมภาคพื้น ในพื้นที่กองบิน 3 อำเภอวัฒนานคร จังหวัดสระแก้ว

4.3.1.5 รูปแบบการดำเนินกิจการของทั้ง 4 Scenario ที่จะนำไปสู่ปัจจัยแห่งความสำเร็จ คือ รัฐบาลลงทุนการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับภายใต้โครงการ S-Curve 11 อย่างจริงจังให้กับบริษัทร่วมทุน รวมถึงกำหนดแนวทางและมาตรการในการสนับสนุนและส่งเสริมการประกอบกิจการ เช่น 1) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) ส่งเสริมแรงจูงใจสิทธิประโยชน์ด้านภาษี อาทิ ลดขั้นตอนการนำเข้า-ส่งออก การยกเว้นภาษีศุลกากรขาเข้าสำหรับเครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น 2) การส่งเสริมพื้นที่สนามบินของกองทัพอากาศ อาทิ กองบิน 3 เป็นที่ทดสอบและฝึกอบรมอากาศยานไร้คนขับ ด้วยความพร้อมของสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่เอื้อต่อการบริหารจัดการ 3) สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ บริหารการจัดสรรย่านคลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารการบินของอากาศยานไร้คนขับที่ผลิตภายในประเทศ 4) การพัฒนาบุคลากรระดับอุดมศึกษา โดยโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และมหาวิทยาลัยที่เป็นสมาชิกองค์กรเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอวกาศ เปิดสอนหลักสูตรที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ เพื่อผลิตบุคลากรเข้าสู่บริษัทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกิจการอากาศยานไร้คนขับในนิคมอุตสาหกรรม และให้ศูนย์การฝึกอากาศยานไร้คนขับกองทัพอากาศจัดฝึกอบรมนักบินและช่างเทคนิคอากาศยานไร้คนขับอย่างต่อเนื่องทั้งในหลักสูตรขั้นพื้นฐาน (Basic training) และขั้นสูง (Tactical training) และ 5) รัฐบาลจัดตั้งหน่วยงานรับรองมาตรฐานด้านการป้องกันประเทศ เพื่อรับรองมาตรฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับโดยส่งบุคลากรไปเข้ารับการฝึกอบรมหลักสูตรการรับรองมาตรฐานกับองค์การบริหารการบินแห่งชาติ (FAA) ประกอบด้วย การรับรองการออกแบบอากาศยานไร้คนขับและอุปกรณ์บนอากาศยาน (Type certification) การรับรองมาตรฐานบริษัทดำเนินกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านอากาศยานไร้คนขับ (Production certification) และการรับรองมาตรฐานความสมควรเดินอากาศสำหรับอากาศยานเฉพาะ เช่น อากาศยานไร้คนขับ (Special airworthiness certification)

บริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำที่เข้ามาร่วมทุนและถือหุ้น จะต้องถ่ายทอดเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับให้บุคลากรของบริษัทร่วมทุนสามารถผลิตอากาศยานไร้คนขับได้เองในประเทศ รวมถึงถ่ายทอดเทคโนโลยีและส่งเสริมผู้ประกอบการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รายย่อยหรือเริ่มต้นใหม่ภายในประเทศให้ผลิตโครงสร้างอากาศยานและอุปกรณ์บนอากาศยานไร้คนขับให้กับบริษัทร่วมทุนดำเนินการประกอบเป็นอากาศยานไร้คนขับในขั้นตอนสุดท้าย (Final assemblies) เพื่อลดการพึ่งพาจากต่างประเทศ

กระบวนการเริ่มต้นจาก กองทัพอากาศกำหนดความต้องการอากาศยานไร้คนขับให้กับบริษัทร่วมทุน และให้โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และ ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ ดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบอากาศยานไร้คนขับร่วมกับบริษัทร่วมทุน จนได้อากาศยานไร้คนขับต้นแบบวิจัย (Research prototype UAV) และให้บริษัทร่วมทุนเป็นผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับส่งให้กองทัพอากาศทดสอบทดลองและให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงแก้ไขจนกระทั่งได้อากาศยานไร้คนขับต้นแบบสายการผลิต (Production prototype UAV) เพื่อนำเข้าสู่สายการผลิตในบริษัทร่วมทุนต่อไป โดยในขั้นตอนการผลิตของบริษัทร่วมทุน จะต้องมีผู้เกี่ยวข้อง คือ นักวิจัย ผู้ผลิต และผู้ใช้งาน ร่วมอยู่ในกระบวนการตั้งแต่ต้นจนจบเพื่อตรวจสอบปรับแก้ไข ทดสอบ ทดลอง จนกระทั่งได้อากาศยานไร้คนขับที่เป็นผลิตภัณฑ์ และให้กองทัพอากาศร่วมทดสอบการใช้งานอากาศยานไร้คนขับของบริษัทร่วมทุนจนผ่านการรับรองความสมควรเดินอากาศและได้รับการรับรองมาตรฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ

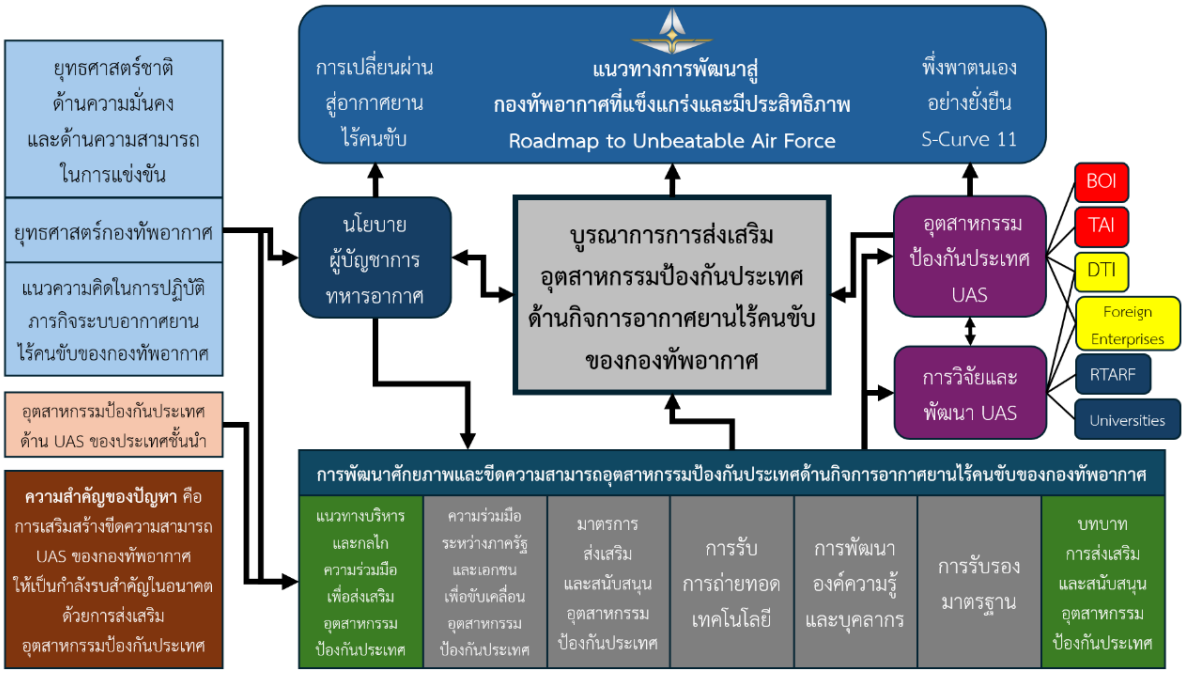
หลังจากนั้น รัฐบาลลงทุนในระยะแรกให้นำอากาศยานไร้คนขับของบริษัทร่วมทุนเข้าประจำการในกองทัพอากาศ รวมถึง กองทัพบก และกองทัพเรือ เพื่อสนับสนุนให้กองทัพใช้งานยุทธภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในประเทศ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ในขณะเดียวกันรัฐบาลส่งเสริมกฎระเบียบการส่งออกขายต่างประเทศอย่างจริงจัง และให้บริษัทร่วมทุนดำเนินการขายอากาศยานไร้คนขับ รวมถึงการบริการหลังการขาย อาทิ การส่งกำลังและซ่อมบำรุง และการฝึกอบรม เป็นต้น ให้กับกองทัพทั้งในประเทศและต่างประเทศต่อไป



รูปที่ 1 บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ ด้วยการวาดเหตุการณ์จำลองอนาคต (Scenario Planning)

4.3.2 สังเคราะห์การบูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ

โดยนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสาร ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก ที่ผ่านการวิเคราะห์/จำแนกแยกแยะเนื้อหาสาระ ข้อมูลที่มีประเด็นสำคัญออกเป็นกลุ่ม (Classify) และนำผลการสังเคราะห์บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ ตามแนวคิดในการปฏิบัติภารกิจระบบอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ มาสังเคราะห์ จัดหมวดหมู่ สรุปข้อมูลสำคัญของเนื้อหาใหม่อีกครั้ง ด้วยตรรกะ เหตุผล (Category) แล้วจัดระบบข้อมูลที่แยกหมวดหมู่ไว้แล้ว เป็นแผนภาพ Conceptual model โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 บูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ

4.3.2.1 แนวทางบริหารและกลไกความร่วมมือเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

ผู้นำระดับยุทธศาสตร์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศต้องมีกรอบความคิดที่ถูกต้องเพื่อกำหนดทิศทางและยุทธศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตอย่างยั่งยืน โดยให้ความสำคัญกับความโปร่งใสในทุกกระบวนการ เพื่อให้บุคลากรมีความเข้าใจที่ตรงกัน และสามารถสร้างอากาศยานไร้คนขับที่มีมาตรฐานระดับสากล นอกจากนี้ กลไกความร่วมมือระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคการศึกษา เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยผลักดันกิจการอากาศยานไร้คนขับที่เอื้อต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งต้องอาศัยความร่วมมืออย่างเป็นระบบ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถ ด้านการแข่งขันในระดับนานาชาติ

4.3.2.2 ความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชนเพื่อขับเคลื่อนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

ความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชนเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ตามแนวทาง UAS CONOPs เน้นการพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับแบบร่วมมือ (Joint development for UAS technologies) รวมถึงพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562 ส่งเสริมการจัดตั้งบริษัทร่วมทุนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้น กองทัพอากาศจึงสนับสนุน บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด ซึ่งได้ปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ขององค์กร ยกระดับการบูรณาการความเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศทั้งด้านการซ่อมบำรุงและการผลิต ให้สามารถผลิตอากาศยานไร้คนขับได้ในอนาคต ซึ่งกองทัพอากาศมีพื้นที่กองบิน 3 สามารถรองรับการดำเนินกิจการและเปิดโอกาสให้เกิดความร่วมมือกับทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ รวมถึง การส่งบุคลากรทุกภาคส่วนเข้าร่วมวิจัย พัฒนา ผลิต ซ่อมบำรุง และทดสอบเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างเป็นระบบและยั่งยืน

4.3.2.3 มาตรการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

แนวทางและมาตรการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศควรมุ่งเน้น การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน มาตรการทางภาษี และการสนับสนุนด้านงบประมาณเพื่อสร้างความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมอากาศยานไร้คนขับ โดยภาครัฐควรกำหนดมาตรการลดหย่อนภาษีนำเข้าสำหรับอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตและทดสอบ พร้อมเพิ่มสิทธิพิเศษทางภาษี ของ BOI เพื่อดึงดูดการลงทุน นอกจากนี้ รัฐบาล

ต้องเร่งผลักดันกฎระเบียบที่เอื้อต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านอากาศยานไร้คนขับ เพื่อให้ประเทศไทยสามารถแข่งขันได้ในระดับสากล

4.3.2.4 การรับการถ่ายทอดเทคโนโลยี

UAS CONOPs ได้กำหนดแนวทางพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ โดยการถ่ายทอดเทคโนโลยีแบบก้าวกระโดด ซึ่งช่วยยกระดับขีดความสามารถของบุคลากรทุกภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นนักวิจัย ผู้ผลิต ผู้ทดสอบ หรือช่างซ่อมบำรุง ให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมืออาชีพ แนวทางสำคัญคือการจัดตั้งบริษัทร่วมทุนระหว่างภาครัฐหรือภาคเอกชนและบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ เช่น TAI ของตุรกี ตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562 และรัฐควรส่งเสริมการพัฒนาขีดความสามารถของนักวิจัยจากกองทัพ ภาครัฐ ภาคการศึกษา และภาคเอกชน ผ่านการฝึกอบรมและถ่ายทอดเทคโนโลยีจากบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำของบริษัทร่วมทุน เพื่อให้ประเทศไทยสามารถพัฒนาอากาศยานไร้คนขับที่ได้มาตรฐานระดับโลก และสนับสนุนการเติบโตของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศได้อย่างมั่นคง

4.3.2.5 การพัฒนาองค์ความรู้และบุคลากร

รัฐบาลส่งเสริมการพัฒนาองค์ความรู้และบุคลากรในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ เพื่อยกระดับขีดความสามารถของประเทศ อาทิ การจัดทำฐานข้อมูลองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อให้เกิดการต่อยอดองค์ความรู้ในระยะยาว การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับในอนาคต รวมถึงการส่งเสริมการสร้างนักวิจัยด้านอากาศยานไร้คนขับอย่างต่อเนื่อง สนับสนุนการฝึกอบรมบุคลากรจากบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ และการส่งบุคลากรไปศึกษาและฝึกอบรมในต่างประเทศเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับที่มีมาตรฐานสูง ตลอดจนส่งเสริมศูนย์ฝึกอากาศยานไร้คนขับกองทัพอากาศเป็นสถานที่ฝึกอบรมนักบินและช่างเทคนิค เป็นต้น เพื่อให้ไทยสามารถพึ่งพาตนเองและพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับได้อย่างยั่งยืน

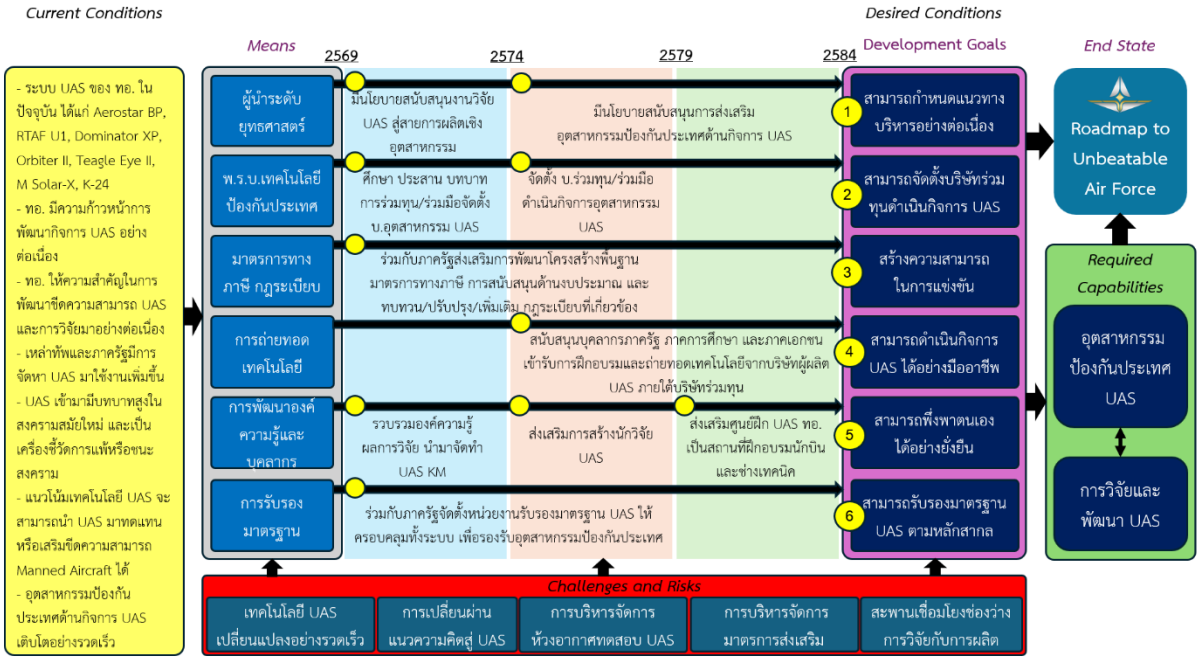
4.3.2.6 การรับรองมาตรฐาน

การจัดตั้งหน่วยงานรับรองมาตรฐานอากาศยานไร้คนขับให้ครอบคลุมทั้งระบบมีความสำคัญในการยกระดับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ แม้ว่ากองทัพอากาศจะมีสำนักงานการบินกองทัพอากาศที่ทำหน้าที่รับรองมาตรฐานด้านการบินอยู่แล้ว แต่การพัฒนาให้มีหน่วยงานรับรองเฉพาะด้านอากาศยานไร้คนขับในระดับประเทศจะช่วยให้มาตรฐานมีความชัดเจนและเป็นไปตามหลักสากล บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด ซึ่งมีขีดความสามารถและความพร้อม สามารถเข้ามามีบทบาทในการเป็นหน่วยงานรับรองมาตรฐานอากาศยานไร้คนขับที่ผลิตจากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศได้ และสนับสนุนให้บุคลากรจากกองทัพอากาศมีส่วนร่วมในการกำหนดมาตรฐานและตรวจสอบคุณภาพด้วย เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล

4.3.2.7 บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

สิ่งที่ทำให้การพัฒนาศักยภาพและขีดความสามารถอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว คือ ส่งเสริมการเปลี่ยนผ่านสู่อากาศยานไร้คนขับด้วยการพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืน เมื่อสังเคราะห์บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ ตามแนวคิดในการปฏิบัติภารกิจระบบอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ ด้วยการวาดเหตุการณ์จำลองอนาคต สามารถสรุปการประยุกต์บทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศที่สามารถนำไปปฏิบัติได้ 4 รูปแบบ ดังนี้ 1) บูรณาการความร่วมมือระหว่างบริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ อาศัยอำนาจตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562 จัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้นด้านกิจการ

อากาศยานไร้คนขับในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ 2) บูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ จัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้น หรือลงนามความร่วมมือด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ 3) บูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ อาศัยอำนาจตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562 จัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้นด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่กองบิน 3 และ 4) บูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับชั้นนำ จัดตั้งบริษัทร่วมทุนและถือหุ้น หรือลงนามความร่วมมือ ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่กองบิน 3 ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสม ขึ้นอยู่กับระดับแนวทางบริหารของผู้นำระดับยุทธศาสตร์ และกลไกความร่วมมือเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอย่างยั่งยืน สรุปผลเป็น Strategic Design Approach ดังแสดง



รูปที่ 3 Strategic Design Approach บูรณาการการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ

5. สรุป

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นระบบนิเวศที่ครอบคลุมการวิจัย พัฒนาการผลิต การประกอบรวม การปรับปรุง การซ่อมสร้าง การเปลี่ยนลักษณะ การแปรสภาพ หรือการให้บริการซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการป้องกันประเทศ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างความมั่นคงของประเทศ โดยช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าและเพิ่มความพร้อมรบของกองทัพทั้งในยามสงบและสงคราม ปัจจุบัน อากาศยานไร้คนขับมีบทบาทสำคัญในการป้องกันประเทศ เช่น การลาดตระเวน ค้นหาเป้าหมาย และภารกิจพิเศษต่าง ๆ ท่ามกลางความตึงเครียดทางภูมิรัฐศาสตร์ ทำให้หลายประเทศเร่งพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้จนเกิดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับ หรือระบบนิเวศอากาศยานไร้คนขับ (UAS Ecosystem) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การวิจัยและพัฒนา การผลิต การประกอบรวม การทดสอบ การส่งกำลังซ่อมบำรุง การฝึกอบรม และการรับรองมาตรฐาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถด้านการป้องกันประเทศและทดแทนอากาศยานที่มีคนขับในภารกิจของกองทัพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงความเชื่อมโยงกับแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านอากาศยานไร้คนขับ แนวคิดนี้สอดคล้องกับข้อค้นพบของการวิจัยที่เน้นการพึ่งพาตนเอง การลดการนำเข้า และการส่งเสริมความร่วมมือระหว่างรัฐและเอกชน รวมถึงการถ่ายทอดเทคโนโลยี นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังเชื่อมโยงกับกรณีศึกษาจากตุรกี อิสราเอล เกาหลีใต้ และสิงคโปร์ โดยพบว่าการสนับสนุนจากกองทัพและภาครัฐในตุรกีและอิสราเอลช่วยขับเคลื่อนอุตสาหกรรมอากาศยานไร้คนขับ ส่วนมาตรการส่งเสริมภาษีและโซนอุตสาหกรรมพิเศษในตุรกี เกาหลีใต้ และสิงคโปร์ช่วยดึงดูดการลงทุน ด้านการพัฒนาบุคลากรและการถ่ายทอดเทคโนโลยี อิสราเอลและเกาหลีใต้มีแนวทางที่คล้ายคลึงกันผ่านความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยและบริษัทเทคโนโลยี ขณะที่การรับรองมาตรฐานอุตสาหกรรมของตุรกีและสิงคโปร์แสดงให้เห็นถึงระบบสนับสนุนที่เป็นรูปธรรมและเป็นระบบเพื่อเสริมสร้างศักยภาพของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังแสดงถึงบทบาทการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านกิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศที่สามารถนำไปปฏิบัติได้ 4 รูปแบบ ดังนี้ 1) บูรณาการความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับ จัดตั้งบริษัทร่วมทุนในนิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562 2) ความร่วมมือระหว่าง บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด และบริษัทผู้ผลิตอากาศยานไร้คนขับ ในรูปแบบการร่วมทุนหรือข้อตกลงความร่วมมือในนิคมอุตสาหกรรม 3) ความร่วมมือแบบเดียวกับรูปแบบที่ 1 แต่ดำเนินการในพื้นที่กองบิน 3 และ 4) ความร่วมมือแบบเดียวกับรูปแบบที่ 2 แต่ดำเนินการในพื้นที่กองบิน 3 ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมขึ้นอยู่กับระดับแนวทางบริหารของผู้นำระดับยุทธศาสตร์ และกลไกความร่วมมือเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

เอกสารวิจัยฉบับนี้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยความกรุณาและคำแนะนำจากอาจารย์ผู้รับผิดชอบเอกสารวิจัย คือ นาวาอากาศเอก โอฬาร บัวทอง รวมทั้งจากที่ปรึกษาเอกสารวิจัยภายนอกวิทยาลัยการทัพอากาศ คือ นาวาอากาศเอก ศาสตราจารย์ วันชัย เจียจันทร์ อาจารย์กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ให้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก ได้แก่ พลอากาศเอก เสกสรร คันธา ผู้บัญชาการทหารอากาศ พลเอก ดร.ชรัติ อุ่มสัมฤทธิ์ ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พลอากาศเอก พิบูลย์ วรวรรณปรีชา กรรมการผู้จัดการ บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด นาวาอากาศเอก ทรงศักดิ์ ธรรมสาร ผู้บังคับการกองบิน 3 และ นาวาอากาศตรี จินตสิทธิ์ ประวิตร ณ อยุธยา อาจารย์กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช นักวิจัย โครงการระบบอากาศยานไร้คนขับพลังงานแสงอาทิตย์สมรรถนะสูงเพดานบินต่ำ แบบ M Solar-X รวมถึง นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ อนุรักษ์ โชติดิลก อาจารย์พิเศษ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และอาจารย์พิเศษ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ที่ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอขอบพระคุณผู้บัญชาการวิทยาลัยการทัพอากาศ คณาจารย์วิทยาลัยการทัพอากาศ และเพื่อนนักศึกษาหลักสูตรการทัพอากาศรุ่นที่ 59 ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และแลกเปลี่ยนประสบการณ์อันเป็นประโยชน์ในระหว่างการศึกษา และการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัว ได้แก่ คุณสุดคำนึง นิยมไทย มารดา, นางสาวนพวรรณ นิยมไทย ภรรยา, เด็กหญิง นวรรน และ เด็กหญิง นฐวรรรร์ นิยมไทย บุตรสาว ที่ได้คอยให้กำลังใจและคอยสนับสนุนในการศึกษาหลักสูตรการทัพอากาศจนสำเร็จได้เรียบร้อย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงกลาโหม, *“แผนปฏิบัติการด้านการพัฒนา วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ (พ.ศ. 2563 – 2580),”* 2563.

[2] กองทัพอากาศ, *“นโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศ ประจำปีพุทธศักราช 2567-2568,”* 2568.

[3] กองทัพอากาศ, *“แนวความคิดในการปฏิบัติภารกิจระบบอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ (UAS CONOPs) พ.ศ.2566,”* 2566.

[4] กองทัพอากาศ, *“ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 - 2580) (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2563),”* 2563.

[5] กองทัพอากาศ, *“สมุดปกขาวกองทัพอากาศ พ.ศ.2567,”* 2567.

[6] กองทัพอากาศ, *“หลักนิยมกองทัพอากาศ พ.ศ.2562,”* 2567.

[7] คณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก, “ประกาศคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก เรื่อง การกำหนดอุตสาหกรรมเป้าหมายพิเศษในพื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก,” *ราชกิจจานุเบกษา,* เล่ม 136, ตอนที่ 113 ง, 7 พฤษภาคม, 2562.

[8] คณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน, *“ประกาศคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน ที่ ส. 2 /2561 เรื่อง การให้การส่งเสริมการลงทุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ,”* 2561.

[9] ชิษณุพงศ์ รื่นภาคแดน, วันชัย เจียจันทร์ และเทพวินทร์ โรจนพิสิฐ, “การออกแบบและวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีขีดความสามารถในการขึ้น-ลงทางดิ่ง,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ,* ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, หน้า 1-21, มกราคม – มิถุนายน, 2567.

[10] ณัฐฐ์วัฒน์ สุทธิโยธิน, *“การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัยสำหรับการวิจัยเชิงคุณภาพ,”* [ออนไลน์].Available: https://nattawatt.blogspot.com/2017/03/blog-post.html (เข้าถึงเมื่อ: 14 กุมภาพันธ์ 2568).

[11] ทรงศักดิ์ ธรรมสาร, *“การพัฒนากิจการอากาศยานไร้คนขับของกองทัพอากาศ,”* เอกสารวิจัยส่วนบุคคล, วิทยาลัยการทัพอากาศ, กรุงเทพมหานคร, 2565.

[12] นภัทร์ แก้วนาค, *“เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพ,”* [ออนไลน์].Available: https://pubhtml5.com/xens/urnf/basic/ (เข้าถึงเมื่อ: 14 กุมภาพันธ์ 2568).

[13] บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด, *“ข่าวประชาสัมพันธ์,”* [ออนไลน์].Available: https://www.taithailand.com (เข้าถึงเมื่อ: 16 มกราคม 2568).

[14] รักษ์พงศ์ วงศาโรจน์, *“Scenario Planning คืออะไร สร้างขึ้นได้อย่างไร,”* [ออนไลน์].Available: https://futurist.nida.ac.th/scenario-planning-คืออะไร-สร้างขึ้นได้อย่างไร (เข้าถึงเมื่อ: 21 กุมภาพันธ์ 2568).

[15] วิษณุ มั่งคั่ง, “แนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายใต้กรอบยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี,” *วารสารสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ,* ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 7-17, มกราคม – เมษายน, 2560.

[16] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, *“นโยบายและเป้าหมายการดำเนินงานของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศในด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ (พ.ศ.2564 - 2580),”* 2565.

[17] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, “พระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562,” *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 136, ตอนที่ 56 ก, 30 เมษายน, 2562.

[18] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, *“Executive Summary: นิคมอุตสาหกรรม DTI ภายใต้โครงการพัฒนาพื้นที่รองรับอุตสาหกรรมความมั่นคง,”* 2567.

[19] สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ, *“รายงานการศึกษา เรื่องการศึกษาโครงสร้างระบบนิเวศอุตสาหกรรมอากาศยานไร้คนขับและแนวทางเสริมสร้างความพร้อมของระบบนิเวศอุตสาหกรรมในประเทศไทย ภายใต้โครงการการพัฒนาศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมซ่อมบำรุงและผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน ปี พ.ศ. 2567. เสนอ สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม,”* 2567.

[20] สุภัททา ปิณฑะแพทย์, “การสัมภาษณ์เพื่อการวิจัยเชิงคุณภาพ,” *วารสารพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรม*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 3, หน้า บทบรรณาธิการ, กันยายน – ธันวาคม, 2564.

[21] สุวัฒน์ สุขวิบูลย์, “แนวทางการสนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของภาคเอกชน,” *รายงานวิชาการหลักสูตรการพัฒนานักบริหารระดับสูงสำหรับข้าราชการรัฐสภาสามัญ รุ่นที่ 13*, สถาบันพระปกเกล้า, กรุงเทพมหานคร, 2564.

[22] Innolife Thailand, *“M Solar X” อากาศยานไร้คนขับพลังงานแสงอาทิตย์สมรรถนะสูง ลำแรกในอาเซียน!! ที่พร้อมเข้าสู่สายการผลิตเพื่อใช้งานจริง,”* [ออนไลน์].Available: https://www.innolifethailand.com (เข้าถึงเมื่อ: 17 มกราคม 2568).

[23] Arman Sidhu, *“Türkiye’s Defense Industry emerges as a global player,”* [Online]. Available: https://www.geopoliticalmonitor.com/turkiyes-defense-industry-emerges-as-a-global-player/ (Accessed: January 10, 2025).

[24] Aydin Ulu, *“Power from above: Why Turkey is increasing its use of drones,”* [Online]. Available: https://manaramagazine.org/2020/12/power-from-above-why-turkey-is-increasing-its-use-of-drones/?utm_source=chatgpt.com (Accessed: January 10, 2025).

[25] Elbit Systems, *“Wide range of UAV's Solutions,”* [Online]. Available: https://elbitsystems.com/product/ elbit-systems-uavs/ (Accessed: January 10, 2025).

[26] Farid Zohrabov, *“Bayraktar TB2 UAV making waves at Azerbaijan's ADEX expo,”* [Online]. Available: https://en.trend.az/azerbaijan/politics/3949881.html (Accessed: January 10, 2025).

[27] IAI, *“Unmanned Aerial Systems,”* [Online]. Available: https://www.iai.co.il/aerospace-defense/air/unmanned-aerial-systems (Accessed: January 10, 2025).

[28] Korean Aerospace Industries (KAI), *“Aircraft Production Capability,”* [Online]. Available: https://m.koreaaero.com/EN/Company/ProductionCapability.aspx (Accessed: January 10, 2025).

[29] Rohit Goel, *“Drone Revolution in the Israel Defence Forces (IDF),”* [Online]. Available: https://www.sps-aviation.com/story/?id=3425&h=Drone-Revolution-in-the-Israel-Defence-Forces-IDF (Accessed: January 10, 2025).

[30] Singapore Ministry of Defence, *“Defence Science and Technology,”* [Online]. Available: https://www. mindef. gov.sg/ defence-matters/defence-topic/defence-science-technology (Accessed: January 10, 2025).

[31] ST Engineering, *“ST Engineering,”* [Online]. Available: https://www.stengg.com/ (Accessed: January 10, 2025).

[32] Uri Sadot, *“Proliferated Drones: A Perspective on Israel,”* [Online]. Available: https://drones.cnas.org/reports/a-perspective-on-israel/ (Accessed: January 10, 2025).

[33] Wooyeal Paik, *South Korea’s Emergence as a Defense Industrial Powerhouse,* Asie Visions, 2024, 139.

การพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

The Development of Surveillance and Reconnaissance for Electronic Intelligence of the RTAF in Air Domain and Space Domain to Counter Electromagnetic Threats

นาวาอากาศเอก วัชรพงษ์ กลีบม่วง

นักศึกษาหลักสูตรการทัพอากาศ รุ่นที่ 59 วิทยาลัยการทัพอากาศ กรมยุทธศึกษาทหารอากาศ

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขีดความสามารถด้านการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทางอากาศและอวกาศด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในปัจจุบัน และเพื่อเสนอแนวทางการพัฒนา โดยกระบวนการวิจัยเริ่มจากการศึกษาปัญหาและข้อขัดข้องจากผลการรวบรวมข่าวสารด้วยการลาดตระเวนของกองทัพอากาศ และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพจากแนวคิด ทฤษฎี การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากนั้นวิเคราะห์ภาพอนาคตภัยคุกคาม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไทยและประเทศรอบบ้าน 20 ปีข้างหน้า เพื่อกำหนดวิสัยทัศน์ เป้าหมายการพัฒนา กำหนดเทคโนโลยีระบบตรวจจับและเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา ใช้แนวคิด Horizons Framework (3H) เพื่อกำหนดห้วงเวลาการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีและเครื่องมือ Roadmap เพื่อกำหนดแผนงานการพัฒนา

ผลการวิจัยสรุปแนวทางการพัฒนาประกอบด้วย การพัฒนากลุ่มดาวเทียมตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อากาศยานไร้คนขับแบบ High Altitude Pseudo Satellites การจัดหาข้อมูลสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การพัฒนาหลักสูตรข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การพัฒนาระบบเครือข่ายรับส่งข้อมูลที่ซ่อมแซมตัวเองได้ และการพัฒนาระบบวิเคราะห์ข้อมูลด้วยปัญญาประดิษฐ์(AI) ภายใต้วิสัยทัศน์กองทัพอากาศมีขีดความสามารถด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์การเฝ้าระวังและแจ้งเตือนรองรับภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งปัจจุบันและอนาคต บนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเอง ร่วมกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและมิตรประเทศ

คำสำคัญ: การเฝ้าตรวจและการลาดตระเวน ข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ ภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

This research "The Development of Surveillance and Reconnaissance for Electronic Intelligence of the RTAF in Air Domain and Space Domain to Counter Electromagnetic Threats,

aims to evaluate the current capabilities of the RTAF in electronic intelligence surveillance and reconnaissance within the air and space domains, and to synthesize development proposals. The research process begins with studying problems and obstacles identified from information gathered through reconnaissance mission, followed by qualitative analysis based on concepts, theories, and a review of relevant literature. Then, analyze the future threat landscape of electromagnetic waves in Thailand and neighboring countries over the next 20 years to define a vision and set development goals. Specify the detection system technologies and tools to be used in development, applying the Horizons Framework (3H) concept to determine the technology transition timeline, and the Roadmap tool to define the development plan.

The research findings propose several development strategies, including Development of a constellation of electromagnetic detection satellites, High Altitude Pseudo Satellites, Acquisition of electromagnetic signal data, Creation of training courses on electronic intelligence and electromagnetic spectrum, Development of self-healing data transmission network systems, and Implementation of data analysis systems using AI. These efforts align with the vision that the Royal Thai Air Force will possess robust electronic intelligence, surveillance, and warning capabilities to address both current and future electromagnetic threats, founded on self-reliance and collaboration with the defense industry and allied nations.

Keywords: Surveillance and Reconnaissance Electronic Intelligence Electromagnetic Threats

1. บทนำ

สถานการณ์การขยายอิทธิพลของชาติมหาอำนาจและความขัดแย้งระหว่างรัฐที่เกิดขึ้นในภูมิภาคต่าง ๆ ในปัจจุบัน มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัย มาใช้งานเพื่อสร้างความได้เปรียบ ตั้งแต่ภาวะปกติจนถึงภาวะสงคราม โดยเฉพาะด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) ที่เชื่อมโยงกับการปฏิบัติการในหลายมิติ และใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่าง ๆ ในการสู้รบ เช่น การโจมตีด้วยเลเซอร์พลังงานสูง การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงทำลายระบบอิเล็กทรอนิกส์ การตรวจจับเป้าหมายในอากาศและอวกาศด้วยเรดาร์ การรบกวนและการลวงสัญญาณนำร่องจากดาวเทียม และการดักรับและดักฟังสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ระบุตำแหน่งและความเคลื่อนไหวของฝ่ายตรงข้าม สำหรับสนับสนุนการวางแผนปฏิบัติการ

ทั้งนี้การรับมือกับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องดำเนินภารกิจการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทางอากาศและอวกาศอย่างต่อเนื่อง โดยต้องไม่ถูกตรวจพบจากฝ่ายตรงข้าม เพื่อค้นหาพิกัด ระบุคลื่นสัญญาณและชนิดของยุทโธปกรณ์ที่ปล่อยสัญญาณ จากนั้นพิสูจน์ทราบด้วยภาพถ่ายดาวเทียมหรือภาพถ่ายทางอากาศ แล้วนำมาจัดทำแฟ้มเป้าหมายทางอากาศ รวมทั้งติดตามความเคลื่อนไหวห้วงเวลาในการปล่อย

คลื่นสัญญาณจากการใช้งานจริง เพื่อประเมินขีดความสามารถของยุทโธปกรณ์ฝ่ายตรงข้าม นำไปสู่การผลิตข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสนับสนุนการวางแผนการปฏิบัติการทางทหารและการป้องกัน

ปัจจุบันกองทัพอากาศมีการดำเนินการจัดทำแผนรวบรวมข่าวสารด้วยการลาดตระเวนของกองทัพอากาศประจำปี ซึ่งมีการลาดตระเวนในมิติทางอากาศ มิติอวกาศ และมิติไซเบอร์ สำหรับการลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ใช้อากาศยานในการบินรวบรวมข้อมูล ขณะที่ปัจจุบันมีรายงานการรบกวนสัญญาณนำร่องด้วยดาวเทียมจากอากาศยานพาณิชย์ผ่านระบบ Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) และอากาศยานทางทหารในห้วงเวลาที่ผ่านมา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการบิน

จากประเด็นภัยคุกคามดังกล่าวจำเป็นต้องมีการพัฒนาภารกิจการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวน ในด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศ ในมิติทางอากาศและอวกาศ เพื่อให้มีขีดความสามารถในการตอบสนองต่อภัยคุกคามจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ครอบคลุมและต่อเนื่อง

2. ทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นโยบาย หลักนิยม และกลยุทธ์ด้านการข่าวกรอง และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกองทัพอากาศ

2.1.1 นโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศ ด้านการข่าวกรองกำหนดแนวทางการพัฒนาระบบบริหารจัดการข่าวกรองด้วยเครื่องมือที่ทันสมัย เชื่อมโยงระบบข่าวกรองและภูมิสารสนเทศกับหน่วยงานด้านความมั่นคงได้ ด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามุ่งเน้นการพัฒนาบุคลากร เครื่องมือ และรูปแบบในการปฏิบัติการ [1]

2.1.2 ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี มีกลยุทธ์การเสริมสร้างขีดความสามารถระบบตรวจจับ มุ่งเน้นการพัฒนาระบบตรวจจับในมิติทางอากาศ อวกาศ และไซเบอร์ รวมทั้งการพัฒนาดาวเทียมสำหรับการลาดตระเวนและเฝ้าตรวจทางอวกาศที่ตรวจจับได้ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย ด้วยการพึ่งพาตนเองร่วมกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ [2]

2.1.3 สมุดปกขาว กองทัพอากาศ ได้ระบุถึงการใช้ประโยชน์จากห้วงอวกาศในการได้มาซึ่งข้อมูลข่าวสารที่ครอบคลุมพื้นที่การปฏิบัติการ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแฟ้มบัญชีเป้าหมายร่วมของพื้นที่สำคัญ และการจัดทำข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ ข่าวกรองการสื่อสาร และข่าวกรองการภาพ [3]

2.2 แนวทางการพัฒนาขีดความสามารถการปฏิบัติการคลื่นเหล็กไฟฟ้าของกองทัพอากาศ

มีแนวทางในการติดตั้งระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนอากาศยานไร้คนขับ และพัฒนาดาวเทียมของกองทัพอากาศให้สามารถตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่ปฏิบัติการได้ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์(AI) มาประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติ [4]

2.3 หลักนิยมกองทัพอากาศ พ.ศ.2566

ระบุว่า การข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวน เป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้ผู้บังคับบัญชาเกิดความหยั่งรู้สถานการณ์ และนำไปสู่การตัดสินตกลงใจ ต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยยุทโธปกรณ์และเครื่องมือที่มีสมรรถนะสูง มีการบูรณาการระบบตรวจจับแบบต่าง ๆ ขณะที่ในมิติอวกาศ เป็นการใช้การปฏิบัติการทางอวกาศเพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถการปฏิบัติการด้านการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนของระบบตรวจจับแบบอื่น ๆ ของกองทัพอากาศ [5]

2.4 สภาพแวดล้อมการปฏิบัติการด้านการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ในมิติทางอากาศและอวกาศ

การปฏิบัติการด้านการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการปฏิบัติการเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ และพิกัดจุดปล่อยสัญญาณของฝ่ายตรงข้าม เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเคลื่อนไหวการปล่อยคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่เป้าหมาย และดำเนินกรรมวิธีข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับจัดทำแฟ้มเป้าหมาย และทำเนียบกำลังรบทางอิเล็กทรอนิกส์ฝ่ายตรงข้าม ซึ่งเป็นการดำเนินการต่อเนื่องตั้งแต่ภาวะปกติจนถึงภาวะสงคราม จำเป็นต้องใช้ระบบตรวจจับที่ทันสมัยทั้งในมิติทางอากาศและอวกาศ เพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย และต่อเนื่อง

2.5 ขีดความสามารถการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ในมิติทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศในปัจจุบัน

ในปัจจุบันภารกิจการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศ เป็นการดำเนินการเพื่อให้ได้มาซึ่งข่าวกรองสำหรับสนับสนุนการตัดสินตกลงใจในทุกระดับของสงคราม โดยเป็นการดำเนินการตั้งแต่ภาวะปกติตามแผนรวบรวมข่าวสารด้วยการลาดตระเวนประจำปีของกองทัพอากาศ สำหรับระบบการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มระบบตรวจจับประกอบด้วย ระบบทางอากาศ ระบบทางอวกาศ ระบบทางภาคพื้น ระบบทางไซเบอร์ และทรัพยากรข่าวกรองบุคคล กลุ่มระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ประกอบด้วย ระบบการสื่อสาร ระบบคอมพิวเตอร์ และกลุ่มระบบการคิดวิเคราะห์ คือกระบวนการคิดวิเคราะห์ของผู้ปฏิบัติการข่าวกรอง [6]

2.6 เทคโนโลยีด้านระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในมิติทางอากาศและอวกาศของต่างประเทศ

2.6.1 กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาใช้อากาศยานและอากาศยานไร้คนขับหลายแบบในการบินลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อรวบรวมสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่เป้าหมาย มีอากาศยานที่มีเพดานบินสูงสามารถตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ได้จากระยะไกล [7]

2.6.2 สำนักงานการลาดตระเวนแห่งชาติสหรัฐอเมริกา ได้ทำสัญญาจัดหาข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับข่าวกรองทางอิเล็กทรอนิกส์จากภาคเอกชน เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติภารกิจของหน่วยงานพันธมิตร [8]

2.6.3 กองทัพอากาศสหราชอาณาจักร ได้กำหนดยุทธศาสตร์ Royal Air force Autonomous Collaborative Platform Strategy ซึ่งเป็นการกำหนดกลยุทธ์ในการใช้อากาศยานไร้คนขับในการป้องกันประเทศด้วยการบูรณาการร่วมกับกองทัพบกและกองทัพเรือ โดยในส่วนข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ กำหนดให้มีการใช้ระบบเครือข่ายสำหรับรับส่งข้อมูลจากระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ [9]

2.6.4 กองทัพอากาศและอวกาศฝรั่งเศส มีการพัฒนาขีดความสามารถในการตรวจจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอวกาศ ด้วยการส่งกลุ่มดาวเทียม CERES จำนวน 3 ดวง ขึ้นสู่วงโคจรรอบโลกระดับต่ำเมื่อปี พ.ศ.2564 สำหรับรวบรวมสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และสัญญาณสื่อสาร โดยเป็นการบูรณาการร่วมกันระหว่างองค์การศึกษาวิจัยแห่งชาติฝรั่งเศส และกรมข่าวกรองทหารของกองทัพฝรั่งเศส [10]

2.6.5 กองทัพรัสเซีย มีการใช้งานระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทั้งในมิติทางอากาศและอวกาศในเหล่าทัพต่างๆ ในการทำภารกิจตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเป้าหมายทางทะเลอย่างต่อเนื่อง ในการค้นหาเป้าหมายจุดปล่อยสัญญาณ [11]

2.6.6 กองทัพปลดปล่อยประชาชนจีน มีการพัฒนายุทโธปกรณ์สำหรับภารกิจการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ทั้งในมิติทางอากาศและอวกาศ เช่น ในมิติทางอากาศ บ.Y-9LG ที่มีการติดตั้งระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการบินลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ และปฏิบัติการสงครามอิเล็กทรอนิกส์ [12]

2.6.7 เทคโนโลยี Stratospheric ISR (การข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนที่ระดับความสูงในชั้นสตราโตสเฟียร์) เป็นการปฏิบัติภารกิจที่ความสูงระดับ 32,800 - 164,042 ฟุตจากพื้นโลก เป็นช่วงความสูงระหว่างเพดานบินของอากาศยานกับดาวเทียม สามารถทดแทนการใช้อากาศยานและดาวเทียมในการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนเพื่อรวบรวมข้อมูลข่าวสารในพื้นที่เป้าหมายได้ ปัจจุบันกลุ่มประเทศในยุโรปได้มีการ

พัฒนาโครงการ EuroHAPS (Euro High Altitude Pseudo Satellite) ในการสร้างแพลตฟอร์มหรือพาหนะสำหรับติดตั้งระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย Stratobus เรือเหาะพลังงานแสงอาทิตย์ ที่บินได้นานและบรรทุกได้มาก Hybrid High Altitude Airship เรือเหาะที่มีการติดตั้งปีกเพื่อช่วยในการยกตัว Autonomous Stratospheric Balloon System ระบบบอลลูนอัตโนมัติที่สามารถติดตั้งระบบตรวจจับและลอยอยู่เหนือพื้นที่เป้าหมายได้เป็นเวลานาน [13]

2.6.8 งานวิจัยเรื่อง “โปรแกรมฝึกอบรมเพื่อพัฒนาสมรรถนะที่จำเป็นสำหรับผู้ปฏิบัติงานด้านข่าวกรองทางสัญญาณของกองทัพอากาศ” พบว่าสมรรถนะที่จำเป็นสำหรับผู้ปฏิบัติด้านข่าวกรองทางสัญญาณของกองทัพอากาศ ประกอบด้วย 7 สมรรถนะ โดยมีสมรรถนะที่เกี่ยวข้องกับข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย ความรู้ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความรู้พื้นฐานการทำงานของอุปกรณ์เรดาร์ ความเข้าใจผลผลิตของงานที่รับผิดชอบและความต้องการของหน่วยผู้ใช้งาน การประเมินประสิทธิภาพของข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรงความต้องการของผู้ใช้ และความสามารถในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีกับงานด้านการข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ให้เกิดประโยชน์ [14]

2.6.9 งานวิจัยเรื่อง “แนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในงานข่าวกรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับหน่วยข่าวกรองกองทัพบก” พบว่าสามารถนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ประโยชน์ในการรวบรวมข้อมูลข่าวสาร ประมวลผล และวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลข่าวสาร ซึ่งสามารถใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพงานข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ได้ [15]

2.6.10 งานวิจัยเรื่อง “Space Based ELINT – A Chinese Case Study: Measures to Develop Capabilities in Indian Context” พบว่าระบบการตรวจจับทางสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งบนดาวเทียมแบบกลุ่มมีความสำคัญต่อการปฏิบัติภารกิจแบบหลายมิติ โดยอ้างถึงการใช้กลุ่มดาวเทียม Yaogan ของจีนในการตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถใช้ในการติดตามกองเรือบรรทุกเครื่องบินของสหรัฐอเมริกาในมหาสมุทรแปซิฟิก และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ด้วยระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สำหรับดาวเทียม [16]

2.6.11 งานวิจัยเรื่อง “Impact of India’s ISR Capabilities on South Asian Security Dynamics” พบว่ากองทัพอินเดียให้ความสำคัญในการพัฒนาการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในหลายมิติ เช่น มิติทางอากาศและอวกาศ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลแบบ Realtime หรือ Near Realtime สำหรับการวางแผนทางทหาร รวมทั้งมีความร่วมมือกับกองทัพสหรัฐอเมริกาทำให้อินเดียสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีและข้อมูลทางทหารขั้นสูงจากสหรัฐอเมริกาได้ ขณะที่การประมวลผลข้อมูลจำนวนมากที่ได้รับจากระบบตรวจจับในมิติต่าง ๆ เป็นความท้าทายที่สำคัญสำหรับกองทัพอินเดีย [17]

2.6.12 งานวิจัยเรื่อง “The E-Intelligence System” พบว่าข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ มีบทบาทสำคัญต่อการวางแผนการปฏิบัติการทางทหาร โดยการวิจัยและพัฒนาในอนาคตมุ่งเน้นการใช้ดาวเทียมและอากาศยานไร้คนขับในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรวบรวมข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ [18]

2.6.13 งานวิจัยเรื่อง “The Operational Capacity of Turkish Intelligence within the Scope of Use High-Technology Products” พบว่าตุรกีมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และอากาศยานไร้คนขับ โดยขีดความสามารถในการตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และสัญญาณการสื่อสารด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุเป้าหมายและวางแผนปฏิบัติการ รวมทั้งการรวบรวมข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ได้แบบ Realtime เป็นการสนับสนุนการตัดสินตกลงใจในการปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ [19]

2.6.14 งานวิจัยเรื่อง “India’s Space-based ISR Capabilities and Regional Deterrence” พบว่าการพัฒนาขีดความสามารถด้านการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติอวกาศ มีการพัฒนาดาวเทียมสำหรับรวบรวมข้อมูลข่าวสารแบบต่าง ๆ เช่น ภาพถ่ายความละเอียดสูง สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ดาวเทียมแบบกลุ่มจำนวน 3 ดวง เพื่อให้สามารถระบุพิกัดของจุดปล่อยสัญญาณ รวมทั้งการพัฒนาระบบอินเทอร์เน็ตดาวเทียมเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลจากระบบตรวจจับบนดาวเทียมเพื่อรองรับสถานการณ์วิกฤต [20]

2.6.15 งานวิจัยเรื่อง “Challenges and Opportunities for Intelligence Services in The Context of Technological Developments and Information Overload” พบว่าการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการข่าวกรอง เช่น ข่าวกรองการภาพ ข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ ข่าวกรองมาตรวัดและแสดงผล กำลังเผชิญกับความท้าทายจากข้อมูลข่าวสารจำนวนมากที่รวบรวมได้จากระบบตรวจจับที่หลากหลาย ซึ่งการนำระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการประมวลผลจะช่วยให้สามารถคัดกรองข้อมูลข่าวสารที่เกี่ยวข้องกับภารกิจได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งการพึ่งพาระบบอินเทอร์เน็ตในงานด้านการข่าวกรองมีความเสี่ยงจากการหยุดให้บริการจากผู้ให้บริการ [21]

2.6.16 งานวิจัยเรื่อง “Requirement and Challenges of Multi-Sensor Data Fusion” พบว่าการผสมผสานข้อมูลจากระบบตรวจจับที่หลากหลายช่วยให้ได้ข้อมูลข่าวสารที่มีความแม่นยำ ลดความคลุมเครือในการวิเคราะห์ ใช้ในการติดตามและระบุเป้าหมายแบบอัตโนมัติ เช่น การใช้ระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในการค้นหาพิกัดเป้าหมาย และทำการยืนยันด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียมหรืออากาศยานไร้คนขับ นอกจากนั้นแล้วการใช้ยานพาหนะแบบ High Altitude Pseudo Satellites(HAPS) คือ อากาศยานไร้คนขับ เรือเหาะ หรือบอลลูน ที่สามารถลอยหรือบินวนอยู่เหนือพื้นที่เป้าหมายได้เป็นเวลานาน เพื่อทำการรวบรวมข้อมูลข่าวสารด้วยระบบตรวจจับแบบต่าง ๆได้อย่างต่อเนื่อง ทดแทนการใช้งานดาวเทียมในการรวบรวมข้อมูลข่าวสารได้ [22]

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือในการวิเคราะห์ STEEP-M (Social Technology Economic Environment Political Military) สำหรับวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ได้แรงขับและแนวโน้ม สำหรับการวิเคราะห์ภาพอนาคตด้วยเครื่องมือ Strategic Foresight เพื่อให้ได้โอกาส ภัยคุกคามและ ISR System Model (ระบบตรวจจับ เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กระบวนการคิดวิเคราะห์) สำหรับวิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อนในกองทัพอากาศที่เกี่ยวข้องกับภารกิจการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวน

3.1.2 เครื่องมือในการสังเคราะห์ Cross Matrix Synthesis เพื่อกำหนดวิสัยทัศน์ เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์สำหรับแนวทางการพัฒนา Linear Matrix เพื่อกำหนดเทคโนโลยีเครื่องมือและแนวทางการพัฒนา กรอบแนวคิด Horizons Framework (3H) เพื่อกำหนดห้วงเวลาการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี และเครื่องมือ Roadmap ในการกำหนดแผนงานการพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศ ในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

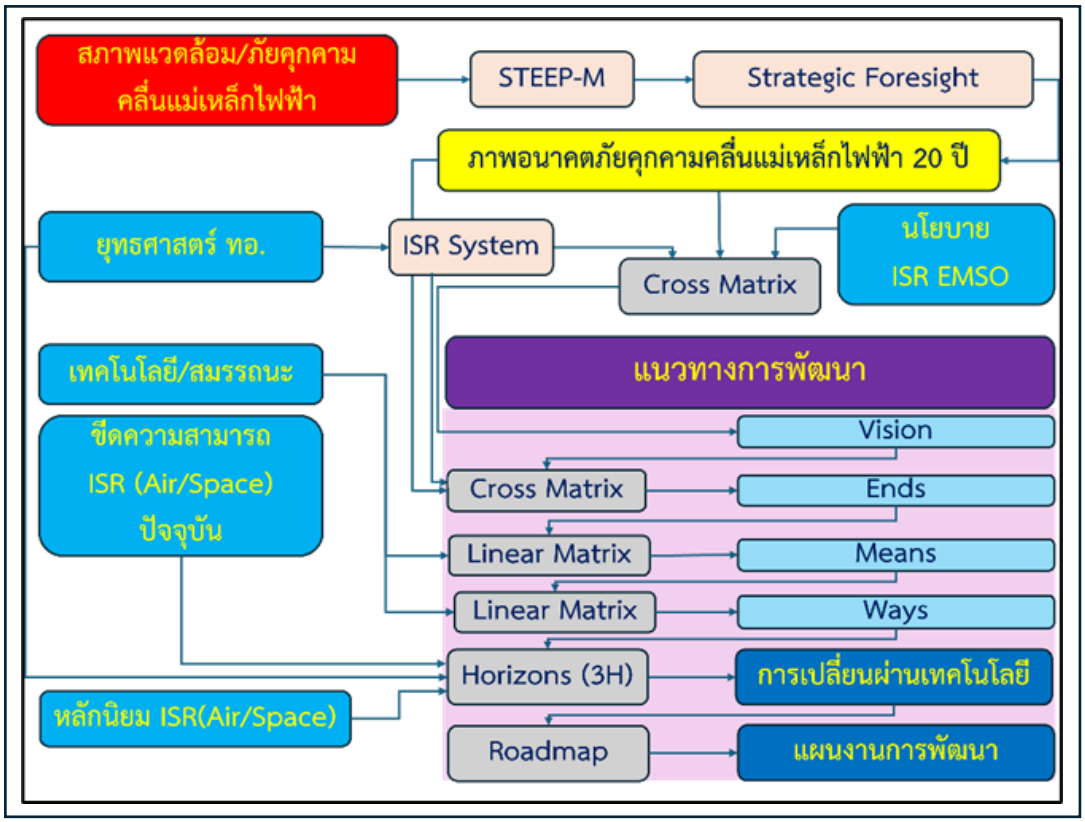
3.2 ขั้นตอนการวิจัยดังนี้

3.2.1 ศึกษาข้อมูลจากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิ ได้แก่ ผลการรวบรวมข้อมูลข่าวสารด้วยการลาดตระเวนประจำปี กองทัพอากาศ (พ.ศ.2566 - 2567) ของกองการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและลาดตระเวน สำนักข่าวกรอง กรมข่าวทหารอากาศซึ่งเป็นหน่วยงานต้นสังกัดของผู้วิจัย ปัญหาข้อขัดข้องในการปฏิบัติภารกิจการบินลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์จากผู้เชี่ยวชาญด้านการบินลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ กองการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและลาดตระเวน สำนักข่าวกรองกรมข่าวทหารอากาศ แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ เช่น นโยบายและแผนปฏิบัติการ หลักนิยม เอกสารทางราชการ หนังสือ บทความวิชาการ ข้อมูลข่าวสารจากอินเทอร์เน็ต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2.2 จำแนกหรือจัดกลุ่มข้อมูลก่อนดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ด้วยวิธีวิเคราะห์เนื้อหา ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ภาพอนาคตเพื่อให้ได้ภาพอนาคตของภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไทยและประเทศรอบบ้าน 20 ปีข้างหน้า รวมทั้งการใช้เครื่องมือสังเคราะห์ขั้นที่ 1 เพื่อให้ได้วิสัยทัศน์สำหรับแนวทางการพัฒนา และนำไปสังเคราะห์ขั้นที่ 2 เพื่อให้ได้เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ของแนวทางการพัฒนา

3.2.3 นำเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ของแนวทาง มาทำการสังเคราะห์ขั้นที่ 3 ร่วมกับเทคโนโลยีระบบตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในมิติทางอากาศและอวกาศ สมรรถนะที่จำเป็นสำหรับผู้ปฏิบัติงานด้านการข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ได้เทคโนโลยีระบบตรวจจับ เครื่องมือที่จะใช้ในแนวทางการพัฒนา และทำการสังเคราะห์ขั้นที่ 4 เพื่อกำหนดแนวทางการพัฒนาจากเทคโนโลยีระบบตรวจจับ เครื่องมือที่กำหนด

3.2.4 นำผลจากการสังเคราะห์ขั้นที่ 4 ร่วมกับห้วงเวลาการพัฒนาระบบตรวจจับในมิติทางอากาศและอวกาศจากยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี ขีดความสามารถการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ในมิติทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศในปัจจุบัน การปฏิบัติการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทางอากาศและอวกาศตามหลักนิยมของกองทัพอากาศมาสังเคราะห์เพื่อให้ได้ห้วงเวาการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี และทำการสังเคราะห์ขั้นสุดท้ายเพื่อให้ได้แนวทางการพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศ ในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

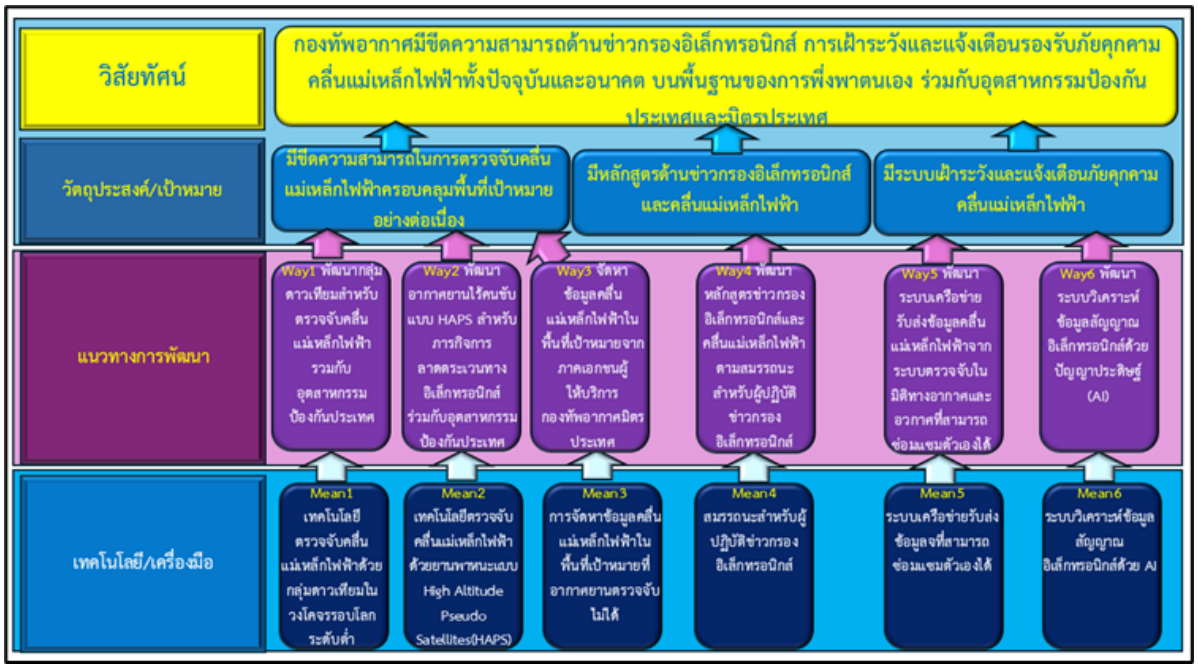


รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย

4. ผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” เป็นงานวิจัยเชิงคุณภาพ มีวัตถุประสงค์การวิจัยใน 2 หัวข้อ คือ 1. เพื่อศึกษาขีดความสามารถด้านการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทาง

อากาศและอวกาศ ในภารกิจด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในปัจจุบัน และ 2. เพื่อเสนอแนวทางการพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศ ให้สามารถรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับในวัตถุประสงค์ที่ 1 พบว่าขีดความสามารถการข่าวกรอง การเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทางอากาศและอวกาศด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในปัจจุบัน มีการปฏิบัติภารกิจด้วยอากาศยานในการเฝ้าตรวจและลาดตระเวนเพื่อรวบรวมสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เพียงเท่านั้น ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณในพื้นที่เป้าหมายได้อย่างครอบคลุมและต่อเนื่อง รวมทั้งขาดผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการรบกวนสัญญาณนำร่องจากดาวเทียม ส่งผลกระทบต่อการปฏิบัติภารกิจของกองทัพอากาศในการรักษาความมั่นคง ในวัตถุประสงค์ที่ 2 จากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากผลการปฏิบัติการจริง ข้อมูลข่าวสาร และการทบทวนวรรณกรรม วิเคราะห์ภาพอนาคตของภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเครื่องมือ STEEP-M และ Strategic Foresight วิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อนของกองทัพอากาศด้วย ISR System Model และทำการสังเคราะห์เพื่อกำหนดวิสัยทัศน์สำหรับแนวทางการพัฒนา และวัตถุประสงค์ ด้วย Cross Matrix Synthesis จากนั้นทำการสังเคราะห์เทคโนโลยีระบบตรวจจับ เครื่องมือ แนวทางการพัฒนา ด้วย Linear Matrix Synthesis การกำหนดห้วงเวลาการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีด้วยกรอบแนวคิด Horizons Framework(3H) และเครื่องมือ Roadmap ในการกำหนดแผนงาน โดยมีข้อเสนอแนวทางการพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศ สรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2 แนวทางการพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1. วิสัยทัศน์ “กองทัพอากาศมีขีดความสามารถด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ การเฝ้าระวังและแจ้งเตือนรองรับภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งปัจจุบันและอนาคต บนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเอง ร่วมกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และมิตรประเทศ”

2. วัตถุประสงค์ มีขีดความสามารถในการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าครอบคลุมพื้นที่เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง มีหลักสูตรด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมีระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3. แนวทางการพัฒนา

3.1 ด้านระบบตรวจจับ

3.1.1 พัฒนาอากาศยานไร้คนขับแบบ HAPS สำหรับภารกิจการลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ ร่วมกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

3.1.2 พัฒนากลุ่มดาวเทียมสำหรับตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ร่วมกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

3.2 ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

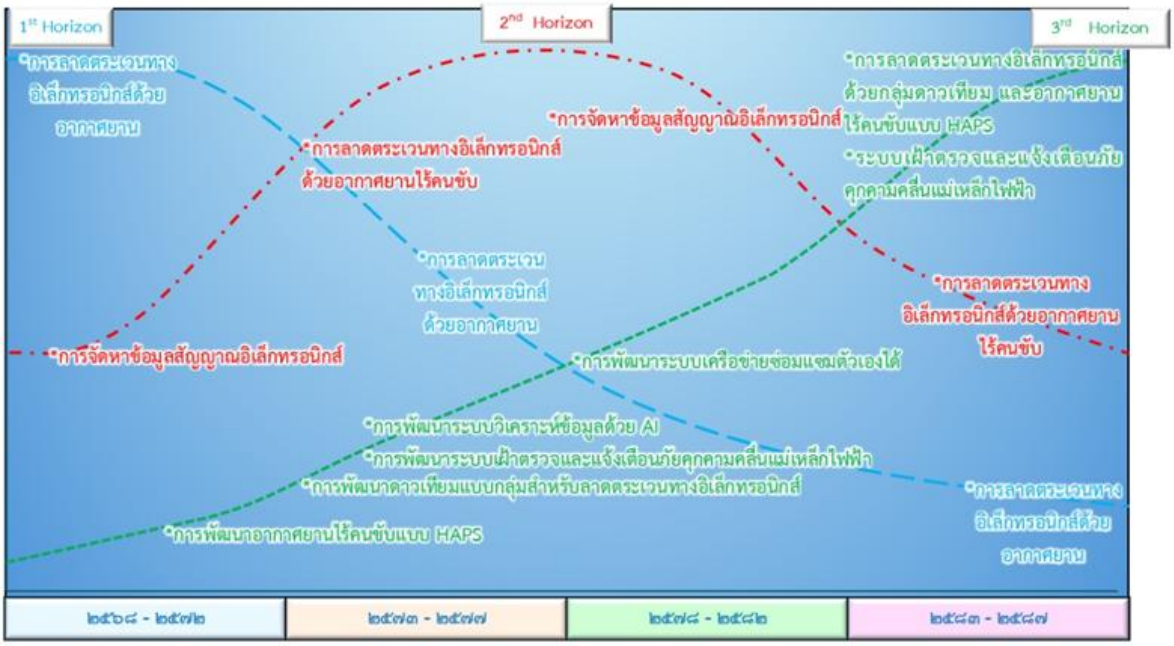
3.2.1 พัฒนาระบบเครือข่ายรับส่งข้อมูลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบตรวจจับในมิติทางอากาศและอวกาศที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้

3.2.2 พัฒนาระบบเฝ้าตรวจและแจ้งเตือนภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3.3 ด้านกระบวนการคิดวิเคราะห์

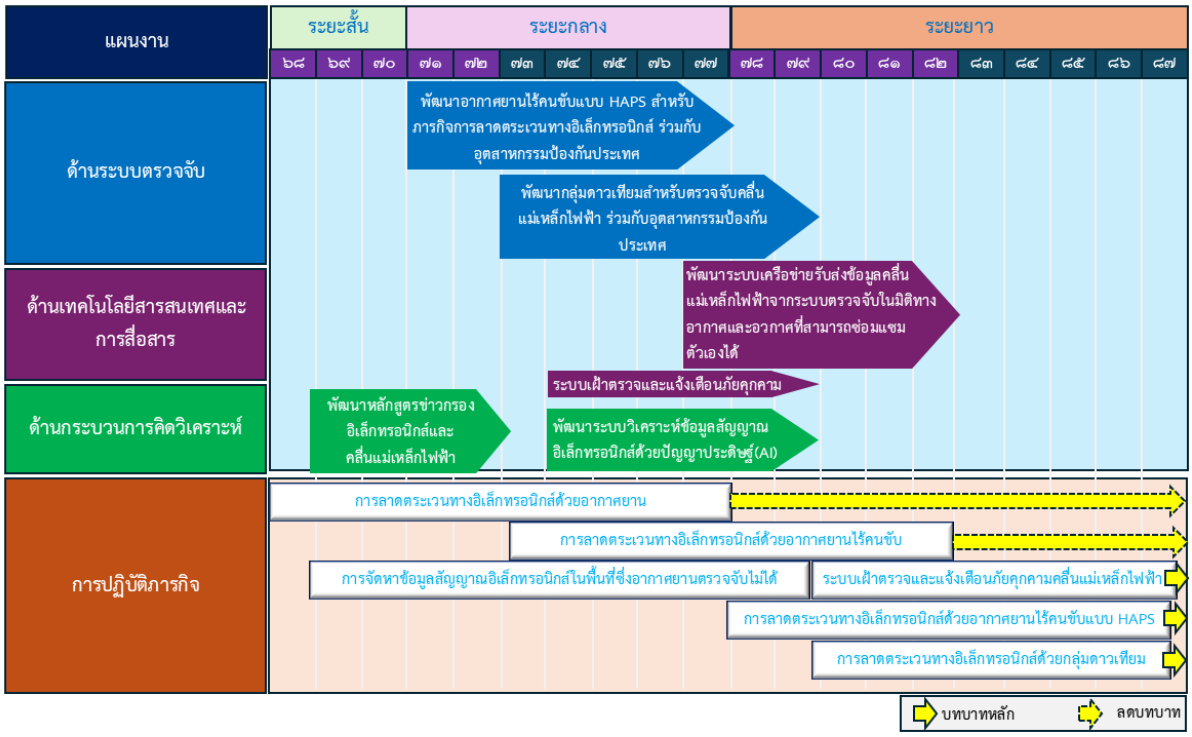
3.3.1 พัฒนาหลักสูตรข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3.3.2 พัฒนาระบบวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ด้วยปัญญาประดิษฐ์



รูปที่ 3 การเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีระบบตรวจจับในมิติทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศ ตามกรอบแนวคิด Horizons Framework (3H)

4. ห้วงเวลาการพัฒนา พ.ศ.2568 - 2587 มีการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีจากการใช้อากาศยานในการลาดตระเวนในปัจจุบัน สู่การใช้อากาศยานไร้คนขับ อากาศยานไร้คนขับแบบ HAPS กลุ่มดาวเทียม ร่วมกับระบบแจ้งเตือนภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วิเคราะห์ด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์



รูปที่ 4 แผนงานการพัฒนาขีดความสามารถการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในมิติทางอากาศและอวกาศที่รองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5. สรุป

จากวัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่ 1. เพื่อศึกษาขีดความสามารถด้านการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในมิติทางอากาศและอวกาศในภารกิจด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในปัจจุบัน ผลการวิจัยพบว่าการลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์มีข้อจำกัดในการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และขาดผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการรบกวนสัญญาณนำร่องจากดาวเทียม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศใช้อากาศยานเพียงอย่างเดียว ทำให้มีข้อจำกัดในการบินลาดตระเวนเป็นเวลานานและการตรวจจับระยะไกล รวมทั้งการรบกวนสัญญาณนำร่องจากดาวเทียมเป็นภัยคุกคามใหม่ที่เกิดขึ้นในแนวชายแดนของไทย ทำให้เจ้าหน้าที่ยังไม่มีองค์ความรู้และฐานข้อมูลในการวิเคราะห์คลื่นสัญญาณรบกวนระบบนำร่องจากดาวเทียม สอดคล้องกับผลการรวบรวมข่าวสารด้วยการลาดตระเวนของกองทัพอากาศประจำปี พ.ศ.2566-2567 ที่มีผลการตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ได้เพียงบางส่วน และจากรายงานสรุปพื้นที่มีการรบกวนสัญญาณนำร่องจากดาวเทียมประเทศรอบบ้านและเวียดนามประจำเดือนสิงหาคม พ.ศ.2567 ของกรมข่าวทหารอากาศ มีเพียงการรายงานพื้นที่มีการรบกวนสัญญาณแต่ไม่สามารถระบุย่านความถี่ของสัญญาณที่ใช้และพิกัดของจุดปล่อยสัญญาณ

วัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่ 2. เพื่อเสนอแนวทางในการพัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านการข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ทางอากาศและอวกาศของกองทัพอากาศ ให้สามารถรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผลการวิจัยพบว่า แนวทางการพัฒนาด้านระบบตรวจจับจำเป็นต้องมีการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับแบบ High Altitude Pseudo Satellite สำหรับภารกิจการลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ การพัฒนากลุ่มดาวเทียมสำหรับตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ร่วมกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เพื่อให้สามารถลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างต่อเนื่องครอบคลุมพื้นที่เป้าหมายในประเทศรอบบ้านและเวียดนาม เป้าหมายระบบป้องกันภัยทางอากาศแบบเคลื่อนที่ สอดคล้องกับ งานวิจัยของ Amitabh Mathur (2024) เรื่อง Requirement and Challenges of Multi-

Sensor Data Fusion ที่ว่า การใช้ยานพาหนะแบบ High Altitude Pseudo Satellite(HAPS) สามารถรวบรวมข้อมูลข่าวสารด้วยระบบตรวจจับแบบต่างๆ ได้อย่างต่อเนื่องจากการบินวนเหนือพื้นที่เป้าหมายได้เป็นเวลานาน ทดแทนการใช้งานดาวเทียมในการรวบรวมข้อมูลข่าวสารได้ [22] งานวิจัยของ Vibhor Gautam, Vikalp Shishodia (2022) เรื่อง The E-Intelligence System ที่ว่าการวิจัยและพัฒนาในอนาคตมุ่งเน้นการใช้ดาวเทียมและอากาศยานไร้คนขับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรวบรวมข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ [18] และงานวิจัยของ Mshl Sanjay Bhatnagar (2024) เรื่อง Space Based ELINT – A Chinese Case Study: Measures to Develop Capabilities in Indian Context ที่อ้างถึงการใช้กลุ่มดาวเทียม Yaogan ของจีนในการตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถติดตามกองเรือบรรทุกเครื่องบินของสหรัฐอเมริกาที่แล่นในมหาสมุทรแปซิฟิกซึ่งเป็นเป้าหมายแบบเคลื่อนที่ได้ [16]

ด้านแนวทางการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร พบว่าจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบเฝ้าตรวจและแจ้งเตือนภัยคุกคามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พัฒนาระบบเครือข่ายรับส่งข้อมูลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบตรวจจับในมิติทางอากาศและอวกาศที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ สอดคล้องกับ ยุทธศาสตร์ Royal Air Force Autonomous Collaborative Platform Strategy ของกองทัพอากาศสหราชอาณาจักร ที่กำหนดให้มีการใช้ระบบเครือข่ายสำหรับรับส่งข้อมูลจากระบบตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เพื่อรักษาการรับส่งข้อมูลและความปลอดภัยของข้อมูล [9] และงานวิจัยของ Amjad Mahmood, Adil Sultan (2021) เรื่อง Impact of India’s ISR Capabilities on South Asian Security Dynamics ที่ว่า กองทัพอินเดียให้ความสำคัญในการพัฒนาการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนในหลายมิติ เช่น ทางอากาศและอวกาศ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลแบบ Realtime หรือ Near Realtime ซึ่งแนวคิดนี้สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาระบบแจ้งเตือนภัยคุกคามจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการบูรณาการข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากระบบตรวจจับในหลายมิติ [17]

ด้านแนวทางการพัฒนาในด้านกระบวนการคิดวิเคราะห์ พบว่าจำเป็นต้องมีการพัฒนาหลักสูตรข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การพัฒนาระบบวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ตะวัน รักสลาม นวลลออ แสงสุข วันชัย ปานจันทร์ (๒๕๖๒) เรื่อง โปรแกรมฝึกอบรมเพื่อพัฒนาสมรรถนะที่จำเป็นสำหรับผู้ปฏิบัติงานด้านข่าวกรองทางสัญญาณของกองทัพอากาศ ที่มีสมรรถนะที่จำเป็นสอดคล้องกับการปฏิบัติภารกิจด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหลักสูตรสำหรับพัฒนาขีดความสามารถด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ได้ [14] งานวิจัยของ ปาลิตา ไพศาลรุ่งพนา วุฒิรงค์ คงวุฒิ พัฒน์ศรัญย์ เลาหไพบูลย์ อรณิชา คงวุฒิ (๒๕๖๗) เรื่อง แนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในงานข่าวกรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับหน่วยงานข่าวกรองกองทัพบก ที่ว่า ระบบปัญญาประดิษฐ์ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลข่าวสารได้ [15] งานวิจัยของ Robert Calinoiu (2021) เรื่อง Challenges and Opportunities for Intelligence Services in The Context of Technological Developments and Information Overload ที่ว่าระบบปัญญาประดิษฐ์สามารถนำมาใช้ในการประมวลผลเพื่อคัดกรองข้อมูลข่าวสารที่เกี่ยวข้องได้อย่างรวดเร็ว [21]

6. กิตติกรรมประกาศ

เอกสารวิจัย เรื่อง “พัฒนาการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนด้านข่าวกรองอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศในมิติทางอากาศและอวกาศรองรับภัยคุกคามด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรการทัพอากาศ รุ่นที่ 59 ปีการศึกษา 2568 วิทยาลัยการทัพอากาศ กรมยุทธศึกษาทหารอากาศ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก นาวาอากาศเอก วัชรพงษ์ นาคสิงห์ อาจารย์ผู้รับผิดชอบเอกสารวิจัยวิทยาลัยการทัพอากาศ นาวาอากาศเอก ณรงค์ คำเนตร ที่ปรึกษาวิจัยภายนอกวิทยาลัยการทัพอากาศ รวมทั้งคณาจารย์ของวิทยาลัยการทัพ

อากาศทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ให้ข้อคิด ให้กำลังใจ ข้อเสนอแนะ เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ต่าง ๆ อันมีคุณค่าแก่ผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พลอากาศตรี ประภาส ศรีประเสริฐ ผู้บัญชาการวิทยาลัยการทัพอากาศ ที่กรุณาให้โอกาส และการสนับสนุนการเข้าศึกษาในหลักสูตรการทัพอากาศในครั้งนี้ รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิจัย และความช่วยเหลือในการทำวิจัยนี้ จนทำให้เอกสารวิจัยสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากเอกสารวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ บิดา มารดา คณาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กองทัพอากาศ, *นโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศ ประจำปีพุทธศักราช ๒๕๖๗-๒๕๖๘*, กรุงเทพมหานคร, 2567, 4-8.

[2] กองทัพอากาศ, *ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี พ.ศ.2561-2580 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2568)*, กรุงเทพมหานคร, 2568, 81-82.

[3] กองทัพอากาศ, *สมุดปกขาวกองทัพอากาศ พ.ศ.2567,* กรุงเทพมหานคร, 2568, 18.

[4] กรมเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารทหารอากาศ และคณะกรรมการพัฒนาแนวความคิดการปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเทคโนโลยีควอนตัมของกองทัพอากาศ, *แนวทางการพัฒนาขีดความสามารถการปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกองทัพอากาศ*, กรุงเทพมหานคร, 2567, 52.

[5] กองทัพอากาศ, *หลักนิยมปฏิบัติการกองทัพอากาศ พ.ศ.2566,* กรุงเทพมหานคร, 2566, 11-44.

[6] กองทัพอากาศ, *แนวคิดในการปฏิบัติการข่าวกรองการเฝ้าตรวจและการลาดตระเวนของกองทัพอากาศ พ.ศ. 2566,* กรุงเทพมหานคร, 2566, 9.

[7] US Air Force, *ISR-040 ISR Collection Platforms*, 2023, 8.

[8] Thomas D. Taverney, "*The Evolution of Space-Based ISR.*", AIR&SPACE FORCES MAGAZINE. [Online]. Available: https://www.airandspaceforces.com/article/the-evolution-of-space-based-isr (Accessed: February.3, 2025).

[9] Royal Air Force, *Royal Air force Autonomous Collaborative Platform Strategy*, 2024, 12.

[10] Charlotte Le Breton, "*France's signal ambition for space-based intelligence.*", MILITARY BALANCE BLOG. [Online]. Available: https://www.iiss.org/online-analysis/military-balance/2021/12/frances-signal-ambition-for-space-based-intelligence (Accessed: February.3, 2025).

[11] Matthew Mowthorpe, "*The threat from China and Russia's space-based SIGINT satellites.*", The Space Review. [Online]. Available: https://www.thespacereview.com/article/4831/1 (Accessed: February.3, 2025).

[12] Naval News Staff, "*Rare Chinese Y-9LG ELINT Aircraft Spotted in Thailand.*", NAVALNEWS. [Online]. Available: https://www.navalnews.com/naval-news/2024/09/rare-chinese-y-9lg-elint-aircraft-spotted-in-thailand (Accessed: February.3, 2025).

[13] UNMANNED AIRSPACE Staff, "*EuroHAPS to demonstrate three stratospheric platforms to improve ISR capabilities.*", UNMANNED AIRSPACE. [Online]. Available: https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/eurohaps-to-demonstrate-three-stratospheric-platforms-to-improve-isr-capabilities/?form=MG0AV3 (Accessed: February.3, 2025).

[14] ตะวัน รักสลาม, นวลลออ แสงสุข, วันชัย ปานจันทร์, “*โปรแกรมฝึกอบรมเพื่อพัฒนาสมรรถนะที่จำเป็นสำหรับผู้ปฏิบัติงานด้านข่าวกรองทางสัญญาณของกองทัพอากาศ*,” วารสารดุษฎีบัณฑิตทางสังคมศาสตร์, ปีที่ 9, ฉบับที่ 3, หน้า 818-829, 2562 [ออนไลน์]. Available: https://so05.tci-thaijo.org/index.php/phdssj/article/view/148575 (เข้าถึงเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2568).

[15] ปาลิตา ไพศาลรุ่งพนา, วุฒิรงค์ คงวุฒิ, พัฒน์ศรัญย์ เลาหไพบูลย์, อรณิชา คงวุฒิ., “*แนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในงานข่าวกรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับหน่วยข่าวกรองกองทัพบก*,” วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, หน้า 87-69, 2567 [ออนไลน์]. Available: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/crma-journal/article/view/256325 (เข้าถึงเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2568).

[16] Mshl Sanjay Bhatnagar, “*Space Based ELINT – A Chinese Case Study: Measures to Develop Capabilities in Indian Context*.”, SYNERGY, Volume 2, Issue 1, page 162 – 175, 2024 [Online]. Available: https://cenjows.in/wp-content/uploads/2024/05/11.-Space-Based-ELINT-A-Chinese-Case-study-Measures-to-develop-capabilities-in-Indian-Context-by-AVM-Sanjay-Bhatnagar-Retd.pdf (Accessed: February.8, 2025).

[17] Amjad Mahmood, Adil Sultan, “*Impact of India’s ISR Capabilities on South Asian Security Dynamics*.”, JSTOR, Volume 41, Issue 4, page 17 – 39, 2021 [Online]. Available: https://www.jstor.org/stable/48732337?seq=1 (Accessed: February.8, 2025).

[18] Vibhor Gautam, Vikalp Shishodia, “*The E-Intelligence System*.”, arXiv, [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2201.02590 (Accessed: February.8, 2025).

[19] Daricili Ali Burak, “*The Operational Capacity of Turkish Intelligence within the Scope of Use of High-Technology Products*.”, Insight Turkey, Volume 24, Issue 3, page 135-150, 2022 [Online]. Available: https://www.jstor.org/stable/48733381 (Accessed: February.8, 2025).

[20] Muhammad Zeeshan, “*India’s Space-based ISR Capabilities and Regional Deterrence*.”, BJSSH, Volume 3, Issue 1, page 66-78, 2024 [Online]. Available: https://bjssh.buitms.edu.pk/index.php/content/article/view/44 (Accessed: February.8, 2025).

[21] Robert Calinoiu, “*Challenges and Opportunities for Intelligence Services in The Context of Technological Developments and Information Overload*.”, Proceedings of the 17th International Scientific Conference Strategies XXI, Volume 17, Issue 1, page 111-117, 2021 [Online]. Available: https://revista.unap.ro/index.php/XXI_FSA/article/view/1269 (Accessed: February.8, 2025).

[22] Amitabh Mathur, “*Requirement and Challenges of Multi-Sensor Data Fusion*.”, SYNERGY, Volume 3, Issue 1, page 45-58, 2024 [Online]. Available: https://cenjows.in/wp-content/uploads/2024/05/4.-Requirement-and-Challenges-of-Multi-Sensor-Data-Fusion-by-Gp-Capt-Amitabh-Mathur-Retd-Wg-Cdr-Vishal-Jain.pdf (Accessed: February.8, 2025).

NCDT2025

ขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุน
การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ครั้งที่ 2

บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด

NCDT2025

บริษัท ดับบลิวเอ็ม ซิมูเลเตอร์ จำกัด

NCDT2025

บริษัท เอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด และ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

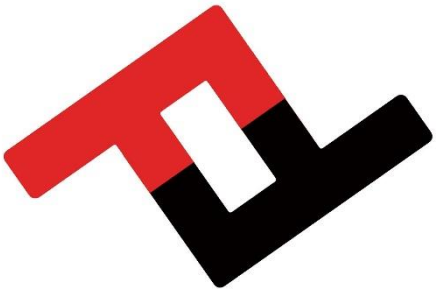
บริษัท จาร์ตัน กรุ๊ป จำกัด

สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย

ENTECH

Where Solutions Begin

บริษัท เอ็นเทค อินดัสเทรียล โซลูชั่น จำกัด



DOF INTERACT

บริษัท ดีโอเอฟ อินเตอร์แอ็คชั่นแนล กรุ๊ป จำกัด

ASTRA TECHNOLOGY

NCDT2025

บริษัท แอสตร้า เทคโนโลยี จำกัด

Accellum Technology Co.,Ltd.

บริษัท แอ็กเซลลัม เทคโนโลยี จำกัด

MD Presupply Co.,Ltd.

บริษัท เอ็ม ดี โปรซัพพลายส์ จำกัด

บริษัท สยาม-อินเตอร์ไซเอนซ์ แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

ARROW IT SYSTEMS CO., LTD.

บริษัท แอร์โรว์ ไอที ซิสเต็มส์ จำกัด

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
487 อาคารวิศวกรรมสถานฯ (วสท.) ชั้น 3
ซอยรามคำแหง 39 (ซอยเทพลีลา) ถนนรามคำแหง
แขวงพลับพลา กรุงเทพฯ 10310
HOMEPAGE : HTTP://WWW.THAITCA.OR.TH