



ISSN 2651-0669 (Print)

ISSN 2822-1206 (Online)

DTAJ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

Defence Technology Academic Journal

Volume 7 Issue 16 / July - December 2025

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าหลังปรับปรุงระบบควบคุมแท่นยิงจรวด
- การประยุกต์ใช้ Discrete Element Method สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิด

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- นวัตกรรมแบบเปิดกับโครงการวิจัยและพัฒนาของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

บทความวิจัย (Research Articles)

- การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน (Performance Ratio) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลางในช่วงระยะเวลา 6 เดือน
- เทคนิคในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนในสวนยางพาราด้วยอากาศยานไร้คนขับ
- การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพเพื่อการตรวจจับกรวยจราจรในช่วงเวลาพลบค่ำ ด้วย YOLOv8
- การประยุกต์ใช้แขนกลบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยอัคคีภัย
- การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนนิเกิลโพลิมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าสำหรับการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์
- ระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมและนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณเพื่อเพิ่มความปลอดภัยใต้น้ำ

รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

คณะที่ปรึกษา

พลเอก ดร.ชรัติ อุ่มสัมฤทธิ์
พลตรี พีรพงศ์ โพธิ์เหมือน
พันเอก จิรศักดิ์ จิวไม้แดง
พันเอก ดร.อำพันธ์ จันทร์เพ็งเพ็ญ
พันเอก ดร.ชัชพงษ์ พันธุ์พยัคฆ์

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธารีบุญ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวินิจ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ กฤษเจริญ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

ฝ่ายจัดการ

นางสาวอินทิวรา จุลชาติ
นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชยชาติ
นางสาวสวาทวีรี ระวังพิช
ว่าที่ร้อยตรีหญิง ดร.ลำยอง แสนทวี
นางสาวธนิस्ता ประภาสทิธิ

สารบัญ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
ปีที่ 7 ฉบับที่ 16 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าหลังปรับปรุงระบบควบคุมแทนอิงจรวด
ชานนทร์ เล็กอ่ำรง, เกียรติศักดิ์ เพ็ชรมีศรี และ วรณชพัฒน์ ฤทธิเลื่อน A1 – A8
- การประยุกต์ใช้ Discrete Element Method
สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างหุ่นระเบิด
อรรถพล เจริญผล และ วรณชพัฒน์ ฤทธิเลื่อน A9 – A20

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- นวัตกรรมแบบเปิดกับโครงการวิจัยและพัฒนาของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
บัณฑิต สันทัด D1 – D18

บทความวิจัย (Research Articles)

- การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน
(Performance Ratio) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลาง
ในช่วงระยะเวลา 6 เดือน
สันติภาพ สุขสวัสดิ์, ดุสิต งามรุ่งโรจน์ และ ปรีดา จันทวงษ์ R1 – R10
- เทคนิคในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนในสวนยางพาราด้วยอากาศยานไร้คนขับ
ปิยะธิดา อะวีชิน, สาธิต แสงประดิษฐ์, ทินกร อังคะฮาด, เจนจิรา เปี่ยมดี, ญาณวุฒิ อุทร์ักษ์,
กิตตากร วิริยะศาสตร์ และ อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ R11 – R30
- การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพเพื่อการตรวจจับกรวยจรวด
ในช่วงเวลาพลบค่ำด้วย YOLOv8
วิระ ศรีมาลา, กฤษณะ ชินสาร, อธิดา อ่อนเอื้อน, และ คงกฤษ ปิตานนท์ R31 – R44
- การประยุกต์ใช้แขนกลบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยอัคคีภัย
ประสงค์ศักดิ์ สองศรี และ ธรรมราช อาษาสุวรรณ R45 – R54
- การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนนิเกิลโพลีเมอร์เคลือบด้วยไฟฟ้า
สำหรับการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์
สุวิชา จันทน์กะพ้อ, วีระชาติ กุลศิริเกษม และ อภิรัฐ โกสิตานนท์ R55 – R64
- ระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมและนักดำน้ำผ่านหุ่นสัญญาณ
เพื่อเพิ่มความปลอดภัยใต้น้ำ
พรเทพ บุญรักษา R65 – R76

บทบรรณาธิการ

งานวิจัยและพัฒนา ตลอดจนบทความทางวิชาการเป็นแรงขับเคลื่อนการพัฒนาบุคลากร โดยใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างความรู้ใหม่ ส่งเสริมนวัตกรรม เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดนโยบายไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นของสังคม ซึ่งท้ายที่สุดแล้วจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันของบุคลากร อีกทั้งการวิจัยยังสร้างเครื่องมือที่ดีขึ้นโดยตรงและเพิ่มจำนวนแรงงานที่มีทักษะ ในขณะที่งานวิชาการเป็นฐานข้อมูลเชิงประจักษ์สำหรับนโยบายที่สร้างทุนมนุษย์และความสามารถในการแข่งขัน ซึ่งจะนำพาสังคมไปข้างหน้า การวิจัยและพัฒนาช่วยส่งเสริมการพัฒนาของมนุษย์ได้ โดยเป็นแรงขับเคลื่อนการปฏิวัติทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียกระดับศักยภาพโดยรวมด้วยการขับเคลื่อนของสังคม

การเติบโตทางเศรษฐกิจและรายได้ นำไปสู่รายได้ส่วนบุคคลที่สูงขึ้น และมีมาตรฐานการครองชีพที่ดีขึ้น ส่วนบทความวิชาการช่วยส่งเสริมการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ผ่านการนำเสนอหลักฐานเชิงประจักษ์ ทฤษฎี และแบบจำลอง ซึ่งช่วยให้เข้าใจปัญหาต่าง ๆ ได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการดำเนินการ นำเสนอข้อมูลเชิงลึกสำหรับผู้กำหนดนโยบายโดยแสดงให้เห็นว่าการวิจัยและพัฒนา การศึกษา และความมั่นคงทางสังคมส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของดัชนีการพัฒนายุทธศาสตร์มนุษย์ จะเห็นว่าความเชื่อมโยงของการวิจัยและพัฒนาและการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการสามารถเป็นดัชนีชี้วัดการขับเคลื่อนการพัฒนามนุษย์ เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาเป็นการสร้างความรู้และนวัตกรรมใหม่ ๆ โดยบทความทางวิชาการเป็นกรอบความคิดและหลักฐานเชิงประจักษ์ ที่งานวิจัยและพัฒนากับการพัฒนาบุคลากรทำงานร่วมกันนำไปสู่การเสริมสร้างสังคมที่แข็งแกร่ง มีศักยภาพ และแข่งขันในระดับนานาชาติได้

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ขุมทรัพย์

บรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าหลังปรับปรุงระบบควบคุมแท่นยิงจรวด

ชานนท์ เล็กอึ้ง^{1*}, เกียรติศักดิ์ เพ็ชรมีศรี¹ และ วรณชัชพัฒน์ ฤทธิ์เลื่อน¹

วันที่รับ 7 กรกฎาคม 2568 วันที่แก้ไข 9 ธันวาคม 2568 วันตอบรับ 17 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การปรับปรุงชุดอุปกรณ์ที่ไม่มีความพร้อมรบหรือล่าสมัยจัดเป็นการเสริมสร้างขีดความสามารถทางด้านการรบของกองทัพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงสมรรถนะรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องที่มีการใช้งานมายาวนานให้สามารถรองรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น นับได้ว่าเป็นแนวทางที่คุ้มค่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดซื้อรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องคันใหม่ การศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองและประเมินการใช้พลังงานทางไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบควบคุมการยิงของรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องที่ได้รับการปรับปรุงให้มีความสามารถในการตั้งมุมทิศและมุมยิงได้อัตโนมัติ ด้วยการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าและความแม่นยำของระบบควบคุมการเล็งในแท่นยิงจรวดแบบสองแกน ขนาด 122 มิลลิเมตร โดยใช้ระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop) ที่ขับเคลื่อนด้วย PLC และมอเตอร์เซอร์โว พร้อมเซนเซอร์วัดตำแหน่งในแนวราบ (Azimuth) และแนวตั้ง (Elevation) นอกจากนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลจากการทดสอบในสถานการณ์จำลองการรบและนำไปใช้ในการคำนวณผลเชิงทฤษฎีและประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละช่วงการปฏิบัติการยิงจรวด ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าการใช้พลังงานสูงสุดของมอเตอร์สำหรับหมุนแท่นยิงจรวดในแนวราบ (Azimuth) และแนวตั้ง (Elevation) มีค่า 400 วัตต์ และพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งรอบการเล็งเท่ากับ 12.3 วัตต์-ชั่วโมง หากพิจารณาการเล็ง 15 - 20 ครั้งต่อภารกิจ จะมีความต้องการพลังงานรวมประมาณ 250 - 300 วัตต์-ชั่วโมง โดยระบบสามารถควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเพียงพอสำหรับการยิงระยะไกลแบบกลุ่ม และใช้งานได้ตลอดภารกิจ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า, ระบบไฟฟ้าทางทหาร, ระบบควบคุมอาวุธ, รถยิงจรวดหลายลำกล้อง

¹ ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: chanon.l@dti.or.th

The Analysis of Electrical System for the Upgraded Rocket and Missile Launcher

Chanon Lekthamrong ^{1*}, Kiattisak Phetmeesri ¹ and Watchaphat Ridluan ¹

Received 7 July 2025, Revised 9 December 2025, Accepted 17 December 2025

Abstract

The modernization of obsolete or non-operational military equipment serves as an efficient means to enhance the combat capabilities of the military. Specifically, upgrading the performance of long-serving multiple-launch rocket systems (MLRS) to support modern technologies is a cost-effective alternative to purchasing new systems. This study developed a model and assessed the electrical energy consumption of the firing control system in an upgraded MLRS, which is capable of automatic azimuth and elevation angle adjustment. The system's energy usage and accuracy were analyzed using a closed-loop control system powered by a PLC and servo motors, with position sensors for both azimuth and elevation. Data collected from simulated combat scenarios were used to calculate theoretical results and assess energy consumption during rocket firing operations. The results showed that the maximum power consumption of the motors for azimuth and elevation rotation is 400 watts, with an energy consumption of 12.3 watt-hours per aiming cycle. Given 15 to 20 aiming cycles per mission, the total energy demand would be approximately 250 - 300 watt-hours. The system can accurately control the positioning, which is sufficient for long-range salvo firing and can operate continuously throughout the mission.

Keywords: electrical analysis, Vetronics, weapon control system, multiple rocket and missile launcher

¹ Military Vehicle Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author: chanon.l@dti.or.th

1. ความเป็นมา

เทคโนโลยีทางทหารถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของความมั่นคงแห่งชาติ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพด้านการรบให้บรรลุเป้าหมายระดับชาติหรือใช้เป็นเครื่องมือป้องปรามภัยคุกคามจากภายนอก อีกทั้งปกป้องตามผลประโยชน์ของประเทศ เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถด้านความมั่นคง ยานพาหนะทางทหารรุ่นใหม่จึงถูกจัดหาเข้าประจำการอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การพัฒนาอย่างต่อเนื่องนี้ส่งผลให้ยานพาหนะรุ่นเก่าที่มีอยู่จำนวนมากเริ่มล้าสมัย ทั้งที่ยังมีโครงสร้างพื้นฐานที่แข็งแรง ดังนั้นหากสามารถนำยานพาหนะรุ่นเก่ามาปรับปรุงให้สามารถรองรับเทคโนโลยีปัจจุบัน จะถือได้ว่าเป็นแนวทางที่คุ้มค่าและมีความเหมาะสมทางเศรษฐกิจมากกว่าการจัดหาใหม่ [1]

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ได้ริเริ่มโครงการปรับปรุงรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31 (Type 85) การปรับปรุง ได้แก่ การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง การติดตั้งระบบปรับอากาศ (HVAC) การซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ และพัฒนาระบบควบคุมแท่นยิงจรวดขนาด 122 มิลลิเมตร แบบอัตโนมัติ แสดงในรูปที่ 1 ระบบควบคุมแท่นยิงจรวดขนาด 122 มิลลิเมตร ส่งผลโดยตรงต่อระบบรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31 (Type 85) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์จากระบบกลไกการตั้งยิงเดิมเป็นระบบไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบระบบไฟฟ้าทางทหาร (Vetronics) ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับการทำงานของระบบควบคุมการยิงอัตโนมัติในการทำหน้าที่เชื่อมโยงระบบย่อยต่าง ๆ เข้าด้วยกันให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบควบคุมการยิงจรวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Elamvazuthi และคณะ [2] ได้พัฒนาเครื่องมือวัดแหล่งจ่ายพลังงานระบบไฟฟ้าแบบสามเฟส และใช้ปรับปรุงการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม ในขณะที่ Kaytez และคณะ [3] ได้เปรียบเทียบวิธีทำนายการใช้พลังงานสามรูปแบบ ได้แก่ การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และวิธี Support Vector Machine แบบกำลังสองน้อยที่สุด (LS-SVMs) ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า LS-SVMs ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น

ดังนั้น บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมการยิงจรวดอัตโนมัติที่ติดตั้งบนรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31 (Type 85) ด้วยการใช้การทดลองภาคสนามและการจำลองทางคณิตศาสตร์

2. ระเบียบวิธีวิจัย

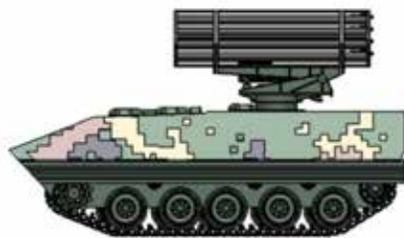
กระบวนการดำเนินการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมแท่นยิงจรวดในรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การพัฒนาและติดตั้งระบบ และการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมแท่นยิงจรวดโดยละเอียดต่อไป

2.1 การปรับปรุงรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31

การดำเนินการปรับปรุงขีดความสามารถของรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31 ประกอบการเปลี่ยนเครื่องยนต์ ประกอบด้วย

- การเปลี่ยนเครื่องยนต์
- การติดตั้งระบบปรับอากาศ (HVAC)
- การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติแท่นยิงจรวดอัตโนมัติ
- การเสริมโครงสร้างตัวถังให้สามารถรับแรงและน้ำหนักของระบบยิงจรวดขนาด 122 มิลลิเมตร ซึ่งเพิ่มระยะยิงสูงสุดจากเดิม 10 กิโลเมตร เป็น 40 กิโลเมตร

การออกแบบเบื้องต้นดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD เพื่อจำลองตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ และจัดสรรพื้นที่สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าใหม่ รวมถึงโครงสร้างเสริมกำลังที่จำเป็น



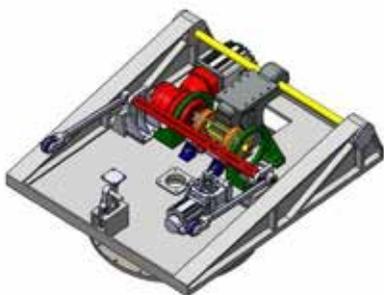
รูปที่ 1 การออกแบบด้วย CAD ของรถถังหลายลำกล้องแบบ จลก.31

2.2 การออกแบบระบบควบคุมแท่นยิงจรวด

ระบบควบคุมแท่นยิงจรวดเดิมใช้ระบบแมนนวลหรือมือหมุน ทั้งในการเล็งแนวตั้ง (Elevation) และแนวราบ (Azimuth) โดยเป็นการติดตั้งแท่นยิงจรวดหลายลำกล้องขนาด 130 มิลลิเมตร (30 นิ้ว) บนหลังคาตัวถังสามารถยิงจรวดได้สูงสุด 60 นัด การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติแท่นยิงจรวดแบบใหม่ได้ออกแบบให้ติดตั้งระบบควบคุมแท่นยิงจรวดขนาด 122 มิลลิเมตรอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่ม

ระยะยิ่งได้มากขึ้น จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม ให้สามารถรองรับการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส AC สำหรับการขับเคลื่อนแท่นยิง พร้อมระบบควบคุมด้วย PLC (Programmable Logic Controller) เชื่อมต่อกับชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 24V DC เป็นไป 380V AC สำหรับจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ นอกจากนี้ภายในรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องแบบ จลก.31 ได้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม ได้แก่ ชุดเซนเซอร์ Proximity และ Encoder สำหรับระบุตำแหน่งสูงสุด - ต่ำสุดของการหมุน หน่วยแสดงผล (Display Unit) และชุดควบคุม (Controller Unit) ระบบจ่ายไฟ (Power Distribution Unit) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

การออกแบบระบบเน้นการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในพื้นที่จำกัดของรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องแบบ จลก.31 ได้อย่างเหมาะสมโดยคงความสามารถในการบำรุงรักษาที่ง่าย และความทนทานในการใช้งานภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 2 - 3



รูปที่ 2 การออกแบบแท่นยิงจรวดโดยเป็นมอเตอร์ต่อกับชุดเกียร์ทดและเฟืองสำหรับยกชุดท่อยิงจรวด



รูปที่ 3 ชุดควบคุมของระบบแท่นยิงจรวดแบบปิดด้วย PLC (ติดตั้งภายในยานพาหนะ)

2.3 การเพิ่มแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับโหมดยิงด้วยปิดเครื่องยนต์

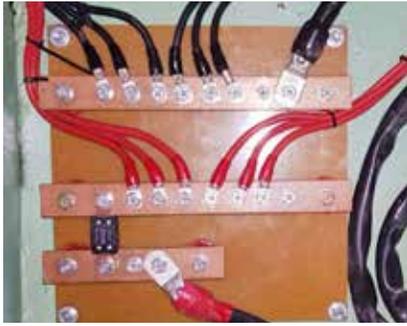
เนื่องด้วยระบบเดิมเป็นการยิงแบบแมนนวล จึงจำเป็นต้องเพิ่มแหล่งพลังงานสำหรับการจ่ายไฟไปยังชุดควบคุมมวมติคมมยิงอัตโนมัติ โดยเป็นการใช้แบตเตอรี่ยี่ห้อ Optima ขนาด 12V 75Ah จำนวน 12 ลูก ต่ออนุกรมและขนานกัน เพื่อให้ได้แรงดัน 24V 450Ah การต่อสายไฟจะใช้คอนเน็กเตอร์แบบชนิดหัวแบตเตอรี่ โดยแบ่งออกเป็นขั้วบวก (เส้นสีแดง) และขั้วลบ (เส้นสีดำ) อย่างละสามเส้นทั้งสองด้าน นำมาต่อลง Bus bar บริเวณกลางรถด้านหลัง โดยขั้วลบทั้งหมดจะมารวมกันและรวมเป็นสายไฟเส้นใหญ่ไปยัง PDB เพื่อทำการต่อลงกราวด์ ส่วนสายไฟเส้นใหญ่จะต่อลง Bus bar ผ่านชุดจำกัดแรงดันที่ 300A แล้วต่อเข้ากับเส้นใหญ่เพื่อต่อไปยังไฟขั้วบวกของชุดกระจายไฟ PDB ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4 - 7



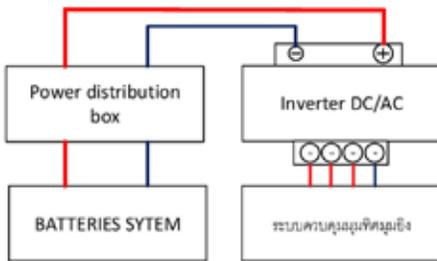
รูปที่ 4 ชุดแบตเตอรี่ที่เพิ่มเข้ามาสำหรับภารกิจยิงโดยไม่สตาร์ทเครื่องยนต์ของระบบแท่นยิงจรวดอัตโนมัติติดตั้งอยู่ 6 ลูก ได้ฝั่งพลโดยสารฝั่งซ้ายของรถฐานยิงจรวด



รูปที่ 5 ชุดแบตเตอรี่ที่เพิ่มเข้ามาสำหรับภารกิจยิงโดยไม่สตาร์ทเครื่องยนต์ของระบบแท่นยิงจรวดอัตโนมัติติดตั้งอีก 6 ลูก ได้ฝั่งพลโดยสารฝั่งขวาของรถฐานยิงจรวด



รูปที่ 6 แผง Bus bar ของชุดแบตเตอรี่โดยจะทำการต่ออนุกรมและขนานกันเพื่อให้ได้แรงดัน 24 V 450A



รูปที่ 7 แผนผังการต่อพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบควบคุมมุมยิงของรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้อง

2.4 สถาปัตยกรรมและองค์ประกอบของระบบควบคุมแท่นยิงจรวด

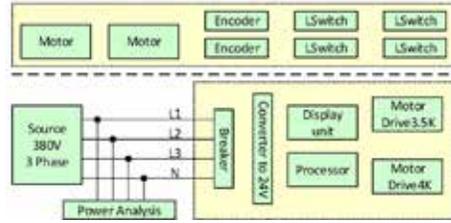
บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแท่นยิงจรวด แสดงในรูปที่ 8-9 โดยแบ่งองค์ประกอบหลักของระบบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนติดตั้งภายนอก และส่วนติดตั้งภายในของรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องแบบ จลก.31

อุปกรณ์ส่วนติดตั้งภายนอก ประกอบด้วย

- มอเตอร์เซอร์โว (Servo Motors)
- เซนเซอร์ตรวจจับระยะใกล้ (Proximity Sensors)
- อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งเชิงมุม (Encoders)

อุปกรณ์ส่วนติดตั้งภายในตัวรถ ประกอบด้วย

- ชุดแบตเตอรี่
- อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส
- หน่วยกระจายไฟฟ้า (Power Distribution Unit)
- ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC-DC Converter)
- หน่วยแสดงผล (Display Unit)
- คอนโทรลเลอร์ PLC (Programmable Logic Controller)
- ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive Systems)



รูปที่ 8 แผนผังของเซนเซอร์และอุปกรณ์ทั้งภายนอกและภายในของระบบยิงจรวดอัตโนมัติรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องแบบ จลก.31

แท่นยิงจรวดได้รับการออกแบบให้รองรับจรวดขนาด 122 มิลลิเมตร มีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับระยะใกล้ (Proximity Sensor) เพื่อกำหนดตำแหน่งมุมสูงสุดและวางอีกตำแหน่งตรงจุดเริ่มต้น (Home Position) สำหรับการหมุนในแนวตั้ง และเคลื่อนที่ในแนวราบ (Azimuth) ที่ใช้เซนเซอร์อีก 2 จุด เพื่อตรวจจับขีดจำกัดของมุมการหมุนและการยก โดยใช้ Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ส่งค่ามาเพื่อออกมุมในระบบ PID และใช้พลังงานไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งแปลงไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 24V DC ไปเป็น 380V AC สำหรับจ่ายไฟให้มอเตอร์ระบบควบคุมแท่นยิง



รูปที่ 9 หน้าตาของชุด PLC โดยด้านซ้ายเป็นการกำหนดมุมยก และหน้าทางด้านขวาเป็นการกำหนดมุมทิศ

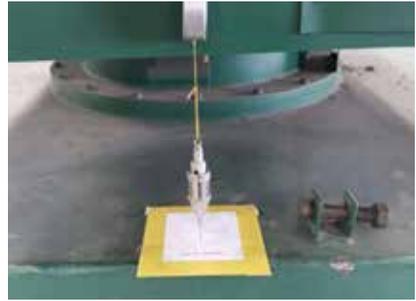
3. กระบวนการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์

ในการเก็บข้อมูลได้มีการทดสอบการตั้งค่ามุมทิศมุมยิงที่ระดับมุมต่าง และทำการเปรียบเทียบค่าให้เห็นถึงความแม่นยำของค่าที่ตั้ง ค่าที่ทำได้ และมีการตรวจสอบภายนอกด้วยเครื่องมือวัดมุมมาตรฐานของทางกองทัพอีกครั้ง โดยผลค่าความแม่นยำมีดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าความแม่นยำเมื่อทำการเพิ่มมุมยิง

ค่ากำหนด (Setting Value)		ค่าที่วัดได้ จาก PLC		Error (Mil)
(องศา)	SV (Mil)	PV (Mil)	(SV-PV)	
0	0	1.1	1.1	
5	89	88	-1	
10	178	176.5	-1.5	
15	267	266.6	-0.4	
20	356	357	1	
25	445	446.7	1.7	
30	533	534.2	1.2	
35	622	621.6	-0.4	
40	711	709.1	-1.9	
45	800	798.4	-1.6	
50	889	890.8	1.8	
55	978	986	8	
ค่า Error เฉลี่ย				0.7

เครื่องวัดมุม	Diff. (Mil)
ปรับตั้ง	(SV-เครื่องวัดมุม)
29.7	29.7
109	20
191	13
292.1	25.1
383.1	27.1
478.1	33.1
571.5	38.5
667.9	45.9
744.2	33.2
827	27
926.7	37.7
1020.7	42.7
ค่า Diff. เฉลี่ย	31.1



รูปที่ 10 การวัดค่าความแม่นยำของมุมทิศ จะใช้เป็นการวางจุดทดสอบเทียบค่าที่ตั้งค่าจากชุด PLC

ตารางที่ 3 การตรวจสอบค่าความแม่นยำของมุมทิศ

ค่ากำหนด (Setting Value)		ค่าที่วัดได้ จาก PLC		Error (Mil)
(องศา)	SV (Mil)	PV (Mil)	(SV-PV)	
0	0	0	0	อยู่ในจุดทดสอบ
90	1600	1600	0	อยู่ในจุดทดสอบ
180	3200	3200	0	อยู่ในจุดทดสอบ
270	4800	4800	0	อยู่ในจุดทดสอบ
360	6400	6400	0	อยู่ในจุดทดสอบ

ตารางที่ 2 ค่าความแม่นยำเมื่อทำการลดมุมยิง

ค่ากำหนด (Setting Value)		ค่าที่วัดได้ จาก PLC		Error (Mil)
(องศา)	SV (Mil)	PV (Mil)	(SV-PV)	
50	889	890.8	1.8	
45	800	798.4	-1.6	
40	711	709.1	-1.9	
35	622	621.6	-0.4	
30	533	534.2	1.2	
25	445	446.7	1.7	
20	356	357	1	
15	267	266.6	-0.4	
10	178	176.5	-1.5	
5	89	88	-1	
0	0	1.1	1.1	
ค่า Error เฉลี่ย				0

เครื่องวัดมุม	Diff. (Mil)
ปรับตั้ง	(SV-เครื่องวัดมุม)
948.4	59.4
844.2	44.2
758.4	47.4
669.9	47.9
583.2	50.2
499.6	54.6
395.6	39.6
304	37
212.8	34.8
120.2	31.2
31.8	31.8
ค่า Diff. เฉลี่ย	43.5

จากผลของตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นว่ามอเตอร์และ Encoder ที่ใช้มีความแม่นยำ โดยหากวัดมุมเทียบกับแท่นวาง จะได้ค่าที่แม่นยำสูง แต่เมื่อเทียบกับเครื่องวัดมุมของทางกองทัพแล้วจะพบว่าค่าที่ได้มีค่าต่างเฉลี่ย 31.1 และ 43.5 Mil. เนื่องด้วยการวัดมุมด้วยเครื่องมือของกองทัพ ดังแสดงในรูปที่ 10 จะใช้เป็นการเทียบมุมกับระดับน้ำของพื้นโลก ซึ่งตัวรถฐานยิงจรวดนี้บางครั้งไม่ได้ตั้งอยู่บนพื้นที่ราบเรียบสนิท ทำให้มีช่องว่างตรงนี้เกิดขึ้น ทำให้ในอนาคตอาจต้องคำนึงถึง IMU ที่บอกระนาบของตัวรถฐานยิงจรวดมาใช้ในการคำนวณต่อไป

เนื่องด้วยเครื่องมือของกองทัพเป็นการวัดความสูงเทียบกับระดับน้ำ ทำให้ในการตรวจสอบค่าความแม่นยำของมุมทิศจึงเป็นการกำหนดจุดทุก ๆ 90 องศาแทน ซึ่งผลการทดสอบทั้งการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาแม่นยำทุกจุด ดังตารางที่ 3

การเก็บข้อมูลและวัดค่าทางไฟฟ้าในระบบควบคุมแท่นยิงจรวดด้วยอุปกรณ์วัดไฟฟ้า CHUVIN ARNOUX รุ่น CA-8335 ซึ่งมีช่วงเวลาการเก็บข้อมูล (Sampling Period) เท่ากับ 1 วินาที โดยการทดลองได้ครอบคลุมสถานการณ์การทำงานในรูปแบบและการทำงานในสถานการณ์การรบ

3.1 สมการการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า

เพื่อประเมินระยะเวลาใช้งานระบบ จำเป็นต้องทราบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ:

$$P = \sum_{i=1}^n V_i * A_i * PF_i \quad (1)$$

โดยที่

- P** คือ กำลังไฟฟ้ารวม (วัตต์)
- V** คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) ของแต่ละเฟสจากอินเวอร์เตอร์
- A** คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
- PF** คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor)

3.2 การเก็บข้อมูลจากการทดลอง

วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่อไปนี้ กระแสไฟฟ้า (Current), แรงดันไฟฟ้า (Voltage), ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานภายนอกที่มีความเสถียร และดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะโหลดเต็มกำลังของแท่นยิง

3.3 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบควบคุมแท่นยิงของรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

3.3.1 การทดสอบการตั้งมุมยิง (Elevation Test)

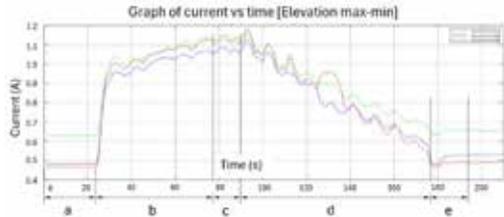
แท่นยิงเริ่มหมุนจากตำแหน่ง 0 องศา ไปยังมุมยกสูงสุด และกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 11 โดยแบ่งช่วงเวลาการทำงานออกเป็น:

- a: ตำแหน่งเริ่มต้น
- b: ระยะเวลาการหมุนจาก 0 ถึงมุมสูงสุด
- c: ค้างอยู่ที่มุมสูงสุดเป็นเวลา 2 นาที
- d: ระยะเวลาการหมุนกลับจากมุมสูงสุดสู่ตำแหน่งเริ่มต้น
- e: กลับสู่ตำแหน่ง 0 องศา

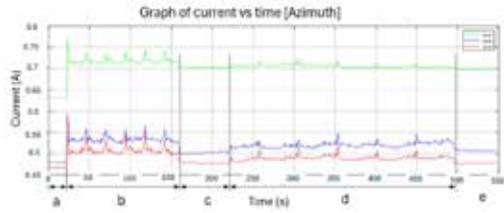
3.3.2 การทดสอบการหมุนในแนวราบ (Azimuth Test)

แท่นยิงเริ่มหมุนจาก 0 องศา (ด้านหน้ารถ) หมุนรอบในแนวราบแล้วกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น โดยผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 12 โดยช่วงเวลาทดลองประกอบด้วย:

- a: ตำแหน่งเริ่มต้น
- b: การหมุนไปยังมุมสูงสุด (ตามเข็มนาฬิกา)
- c: ค้างที่มุมสูงสุด 2 นาที
- d: หมุนกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น
- e: กลับสู่ตำแหน่ง 0 องศา



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลการวัดการทดสอบการหมุนในตั้ง



รูปที่ 12 กราฟแสดงผลการวัดการทดสอบการหมุนในราบ

4. ผลการจำลอง

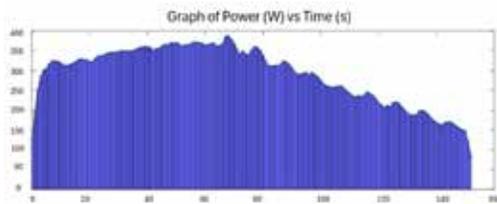
นำข้อมูลการทดลองจริงใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการคำนวณค่าพลังงานในระบบไฟฟ้า โดยใช้หลักการคำนวณพื้นฐานจากสมการที่ (1) โดยข้อมูลจากการทดลองที่ได้จะอยู่ในรูปของกราฟกระแสไฟฟ้าตามช่วงเวลา ซึ่งค่าพลังงานรวมของระบบในแต่ละกรณีสามารถหาค่าได้จาก พื้นที่ใต้กราฟ (Area Under Curve) ซึ่งแทนค่าพลังงานทั้งหมดที่ถูกใช้ในเวลานั้น

จำลองสถานการณ์การรบ (Combat Operation Scenario) ซึ่งเป็นกรณีที่ครอบคลุมการขับเคลื่อนแท่นยิงของระบบควบคุมทั้งในแนวราบ (Azimuth) และแนวตั้ง (Elevation) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงการใช้งานระบบไฟฟ้าในการควบคุมการทำงานแท่นยิงจรวดจริงในสนามรบ ดังแสดงในรูปที่ 13

ผลการวิเคราะห์และคำนวณด้วยพบว่า พลังงานรวมที่ใช้หนึ่งรอบการทำงานของระบบควบคุมการตั้งมุมยิงมีค่าเท่ากับ 44,191 วัตต์ - วินาที (W-s) หรือ 12.3 วัตต์ - ชั่วโมง (Wh) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญและจำเป็นเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและเลือกสมรรถนะของแบตเตอรี่ให้สามารถรองรับการทำงานของระบบควบคุมการตั้งมุมยิงในกรณีที่ต้องใช้งานในโหมดเจ็บบ (ไมส์ตาร์ตเครื่องยนต์)

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power) ที่ระบบใช้ระหว่างการดำเนินงานอยู่ที่ 385 วัตต์ (W) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบขนาดของสายไฟและระบบแหล่งจ่ายไฟ (Power Source) ให้สามารถรองรับภาระกรรมได้อย่างปลอดภัยและมีเสถียรภาพ

จากผลการทดลองและคำนวณดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่า ระบบไฟฟ้าทางทหารที่ได้รับการออกแบบ (Designed Vetronics System) สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง และวงจรไฟฟ้าได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานจริง นอกจากนี้ระบบยังสามารถใช้งานในการกิจทางยุทธวิธีที่มีความเจ็บในการปฏิบัติภารกิจได้ ส่งผลต่อความได้เปรียบในการรบ



รูปที่ 13 การคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า

$$\text{Total power} = \frac{44,191\text{W}}{S} = \frac{44,191\text{W}}{3600\text{hr}} = 12.3 \text{ Watt/hr}$$

$$\text{Maximum power} = 385 \text{ Watt}$$

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมแท่นยิงจรวดระบบควบคุมการยิงจรวดอัตโนมัติที่ติดตั้งบนรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องแบบ จลก.31 (Type 85) โดยมุ่งเน้นการศึกษาการใช้พลังงานจริงจากการวัดค่าตัวแปรทางไฟฟ้าและการจำลองข้อมูลเพื่อนำผลลัพธ์ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้า (Electrical Power Distribution System) ให้สามารถรองรับภารกิจทางทหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

- ค่าความแม่นยำของมุลยเฉลี่ยสูงสุดที่ 43.5 Mil. (ขึ้นกับระนาบของพื้น)
- ค่าความแม่นยำของมุลยที่อยู่ในเกณฑ์แม่นยำ
- กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้สำหรับการหมุนแท่นยิง 400 วัตต์
- การใช้พลังงานรวมในสถานการณ์การรบต่อหนึ่งรอบการยิงทั้งหมด 12.3 วัตต์-ชั่วโมง (Wh)
- เมื่อพิจารณาที่ระบบแบตเตอรี่ 1 ชุด 24V 75ah ซึ่งคิดเป็น 1800 Wh ทำให้ระบบสามารถใช้งานต่อเนื่องในโหมดเงียบ (ไม่สตาร์ทเครื่องยนต์) ได้ยาวนานสูงสุดถึง 146 ครั้ง ภายใต้ความจุของแบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้ตามค่าพลังงานที่คำนวณได้

ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและปรับแต่งระบบพลังงานของระบบไฟฟ้าหลักของรถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องแบบ จลก.31 (Type 85) เพื่อให้สามารถรองรับภารกิจเฉพาะทาง เช่น ภารกิจที่ต้องการความเงียบสูงสุด และยังสามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาขบวนรบสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมต่อภารกิจทางทหารยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์สำหรับการวัดและเก็บข้อมูลจากการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Threepopnartkul and A. Ridluan, "Load analysis and structural improvement of the tracked armored vehicle," in *Proc. Int. Conf. on Engineering, Technology, and Innovative Cultural and Applied Sciences (ITETICAS)*, Tokyo, Japan, Jun. 2017,.
- [2] I. Elamvazuthi, M. K. A. Ahamed Khan, S. B. B. Shaari, R. Sinnadurai, and M. Amudha, "Electrical power consumption monitoring using a real-time system," in *Proc. 2012 IEEE Conf. Sustainable Utilization and Develop. in Eng. and Technol. (STUDENT)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 6-9, 2012, pp. 295-298.
- [3] F. Kaytez, M. C. Taplamacioglu, E. Cam, and F. Hardalac, "Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 431-438, May 2015.
- [4] P. Puaspis and A. Ridluan, "Validation of HVAC system simulation for armored vehicle," *Int. J. Ind. Electron. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 11, pp. 32-34, Nov. 2018.

การประยุกต์ใช้ Discrete Element Method สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างถนน

อรรถพล เจริญผล^{1*} วรณชพัฒน์ ฤทธิเลื่อน²

วันที่รับ 2 กันยายน 2568 วันที่แก้ไข 23 ธันวาคม 2568 วันที่ตอบรับ 27 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ในการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างถนน การพิจารณาแรงต้านจากดินและการทำนายพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพในการกวาดล้างถนนโดยการคำนวณแรงต้านดินเชิงทฤษฎีโดยใช้สมการ Reece และศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินโดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method, DEM) ซึ่งผลจากการคำนวณแรงต้านทานโดยสมการของ Reece และการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นจริงระหว่างอนุภาคดินกับใบไถในระดับจุลภาคด้วย DEM แสดงให้เห็นว่าแรงที่ได้จาก DEM มีการเพิ่มขึ้นตามความลึกของการไถและมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎี ค่าของแรงที่สูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการกระทำระหว่างอนุภาคดินที่มีการสัมผัสและผลัดกันเป็นช่วง ๆ ส่งผลให้ค่าแรงจากระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการคำนวณแบบเชิงทฤษฎีมากถึง 30% ที่การไถที่ความลึก 0.3 เมตร สำหรับการไถที่ความลึกน้อยกว่า 0.15 เมตร นั้นค่าแรงต้านทานจากทฤษฎีและจากระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องนั้นใกล้เคียงกัน ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องสามารถทำนายพฤติกรรมการตัดของดินและแสดงพฤติกรรมการไหลของดินผ่านใบไถดินได้อย่างละเอียด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและปรับปรุงใบไถดินให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: กลศาสตร์ดิน, แรงต้านดิน, อุปกรณ์กวาดล้างถนน

¹ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: attapon.c@dti.or.th

Simulation of the tillage process using LIGGGHTS based on the Discrete Element Method (DEM)

Attapon Charoenpon ^{1*} Watchaphat Ridluan ²

Received 2 September 2025, Revised 23 December 2025, Accepted 27 December 2025

Abstract

In the design of mine-clearing equipment, consideration of soil resistance and the prediction of soil mechanical behavior are critically important for achieving effective mine-clearance performance. In this study, soil resistance was first estimated theoretically using the Reece equation, and the mechanical behavior of soil was further investigated by applying the Discrete Element Method (DEM). The results show that both the resistance predicted by the Reece equation and the forces obtained from DEM simulations increase with increasing plowing depth; however, the forces predicted by DEM are consistently higher than those obtained from the theoretical calculation. This difference arises from the intermittent contact and interaction between individual soil particles and the plow, which are explicitly captured at the microscale in DEM simulations. As a result, the resistance force predicted by DEM is up to 30% higher than that obtained from the theoretical model at a plowing depth of 0.3 m. For shallower plowing depths below 0.15 m, the resistance forces predicted by the theoretical approach and by DEM are in close agreement. Overall, the DEM simulations are able to predict the soil cutting behavior and to visualize the detailed flow of soil over the plow blade, providing valuable insight for the design and further optimization of plow blades for improved performance.

Keywords: Soil Mechanical, Soil Resistance Force, Surface Clearance Device

¹ Research and Development Division, Defence Technology Institute

² Research and Development Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author: attapon.c@dti.or.th

1. บทนำ

ทุ่นระเบิดที่หลงเหลือจากความขัดแย้งและสงครามนับเป็นภัยคุกคามต่อความปลอดภัยของมนุษย์และกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจภาคประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง การเก็บกู้หรือการกวาดล้างทุ่นระเบิดจึงเป็นสิ่งสำคัญและต้องดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยสูง

วิธีการขจัดทุ่นระเบิดที่มีการใช้อย่างแพร่หลายคือการใช้เครื่องจักรกลติดตั้งไปไถดิน (Mine Plow) [1] ซึ่งสามารถเปิดเส้นทางจราจรให้มีความปลอดภัยโดยการขุดหรือเบี่ยงเบนทุ่นระเบิดจากแนวการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

อย่างไรก็ตามการออกแบบไปไถดินสำหรับอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดให้สามารถเคลื่อนที่ทุ่นระเบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องอาศัยความรู้ทางกลศาสตร์ของดิน การประเมินแรงต้านจากดิน และประสิทธิภาพในการตัดดินในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายเพื่อให้แน่ใจว่าไปไถดินสามารถกวาดหรือเบี่ยงเบนทุ่นระเบิดได้โดยไม่สร้างความเสียหาย

บทความนี้นำเสนอการหานายแรงต้านจากการไถดินโดยอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณด้วยทฤษฎีกลศาสตร์ประยุกต์และการจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินและแรงที่กระทำต่อไปไถดินอย่างละเอียดและนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นทั้งในด้านความปลอดภัยของยานพาหนะและความสามารถในการปฏิบัติการเคลื่อนที่ทุ่นระเบิดในสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- (1) ทฤษฎีแรงต้านจากดินและกลศาสตร์ของดิน
- (2) การออกแบบทางกล
- (3) การประยุกต์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

เช่น การจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบภาคสนาม

Reece [2] ได้นำเสนอสมการพื้นฐานของกลศาสตร์งานดินซึ่งใช้ในการคำนวณแรงต้านทานจากดินที่กระทำต่อไปไถดิน โดยสมการดังกล่าวอธิบายว่าแรงต้านเกิดจากผลรวมขององค์ประกอบหลัก ได้แก่ แรงจากการยึดเหนี่ยวของดิน แรงจากน้ำหนักของดินแรงที่สัมพันธ์กับมุมเสียดทานภายในของดินและแรงกดทับผิวดินที่เกิดจากความลึกของการทำงานของไปไถ โดยแรงต้านจะเพิ่มขึ้นตามความกว้างและความลึกของไปไถ รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของดิน

McKyes [3] แรงต้านที่เกิดขึ้นระหว่างการไถดินขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างมุมของไปไถ ความเร็วในการไถ และชนิดของดิน โดยมุมของไปไถมีผลโดยตรงต่อกลไกการตัดและการไหลของดิน มุมที่เพิ่มขึ้นทำให้ดินถูกตัดได้ดีแต่จะมีแรงต้านสูง และที่มุมไปไถต่ำลงนั้นแรงต้านทานจะน้อยแต่การตัดดินก็จะมีประสิทธิภาพน้อยลงตาม สำหรับความเร็วในการไถเมื่อความเร็วสูงขึ้นแรงต้านจะเพิ่มขึ้นจากผลของแรงเฉื่อยและการแตกตัวของดิน ทั้งนี้ จะแตกต่างกันไปตามชนิดดิน ขณะที่ดินที่มีการยึดเหนี่ยวสูง เช่น ดินร่วนหรือดินเหนียว จะมีแรงต้านจากแรงยึดเหนี่ยวของดินและแรงยึดติดระหว่างดินกับผิวไปไถสูง

สำหรับการออกแบบทางกลของไปไถดิน Harrison [4] แสดงให้เห็นว่าไปไถแบบขาอ (bent-leg) ซึ่งมีส่วนของไปไถบิดเอียงออกด้านข้าง ทำให้ดินด้านหน้าถูกฉีกเป็นลิ่มและไหลเบี่ยงไปตามทิศของไปไถแทนที่

จะถูกดันกองอยู่ด้านหน้าเท่านั้น ไบโกลเียงออกด้านข้าง ส่งผลให้เกิดแรงดันข้างที่ช่วยควบคุมการไหลของดิน และวัตถุที่ฝังอยู่ในดินอย่างเป็นระบบ หลักการนี้ถูกนำไปใช้โดยตรงกับการออกแบบไบโกลดินแบบ V-shape ของ mine plough โดยจัดปีกซ้าย-ขวาให้เอียงออกจากแนวศูนย์กลางรถอย่างสมมาตร ทำให้มวลดินและท่อนระเบิดที่ถูกยกตัวขึ้นมาหน้าไบโกลดินและถูกบังคับให้ไหลออกไปตามผิวของไบโกลดินทั้งสองด้านไปสู่ด้านข้างของรถ ขณะเดียวกันแรงดันข้างจากปีกซ้ายและขวา จะหักล้างกัน ทำให้เครื่องมือยังคงเคลื่อนที่อยู่แนวตรงได้

Hoseinian [5] ได้เปรียบเทียบรูปทรงไบโกลไต้ผิวดินสามแบบ ได้แก่ ไบทรงสี่เหลี่ยม ไบทรงสามเหลี่ยม และไบทรงตัววี โดยวัดแรงดันการไถ (draft) และคุณลักษณะการแตกตัวของดินรอบเครื่องมือ ผลการทดลองพบว่าไบทรงตัววีให้ค่าแรงดันการไถต่ำที่สุด ในขณะที่ยังคงความสามารถในไถดินในแนวราบได้ดีเทียบเท่าหรือดีกว่าทรงอื่นซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปทรงตัววีสามารถลดความเข้มของแรงดันต่อหน่วยความกว้างซึ่งช่วยลดกำลังลากที่ต้องใช้

จากความก้าวหน้าทางคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมในการวิเคราะห์อย่างแพร่หลาย เช่น Finite Element Method (FEM) และ Discrete Element Method (DEM) Bashir & Yahya [6] ได้ทบทวนงานวิจัยที่ใช้ FEM ในการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างไบมิตกับดิน เพื่อตรวจสอบแรงดันแรงสั่นสะเทือน และพฤติกรรมของดินที่เปลี่ยนไปขณะไบโกลดินเคลื่อนผ่าน การจำลองเหล่านี้ช่วยลดต้นทุนในการทดสอบจริง และสามารถปรับปรุงการออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพดินที่หลากหลาย เช่น ดินทราย ดินเหนียว หรือดินปนหิน

S. Murray [7] เมื่อความเร็วในการไถมากขึ้น ความลึกทำงานเพิ่มขึ้น หรือรูปทรงไบโกลที่มีความซับซ้อน ความแตกต่างระหว่างผลคำนวณแบบ DEM กับแบบ

เชิงวิเคราะห์ตามทฤษฎี Reece จะเด่นชัดขึ้น แบบจำลอง Reece อาศัยสมมติฐานแบบสองมิติและสภาวะกึ่งสถิตยศาสตร์ทำให้ได้ค่าแรงดันการไถเฉลี่ยที่ราบเรียบและไม่สามารถแสดงแรงที่เกิดจากการแตกตัวของดิน การชนกันของอนุภาค และการไหลสามมิติรอบไบโกลได้ ขณะที่ DEM จำลองดินเป็นอนุภาคเดี่ยวจำนวนมาก ทำให้สามารถจับพฤติกรรมแบบไม่ต่อเนื่องได้ ส่งผลให้เกิดค่าแรงปฏิกิริยาในช่วงสั้นซึ่งมักสูงกว่าค่าแรงเฉลี่ย จากทฤษฎี Reece โดยความคลาดเคลื่อนของค่าแรง ณ ช่วงเวลาหนึ่งอาจอยู่ในช่วงประมาณ 15% และอาจสูงถึง 20-30% ได้

สามารถสังเกตได้ว่าถึงแม้มีความก้าวหน้าในการออกแบบไบโกลดินและการใช้แบบจำลองทางกลศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพในการเคลียร์ท่อนระเบิด แต่ยังคงมีช่องว่างในด้านการพิจารณาข้อมูลจากการทดสอบรวมเข้ากับการจำลองทางวิศวกรรม และการออกแบบที่สามารถปรับตัวได้กับสภาพดินที่ไม่สม่ำเสมอหรือซับซ้อน

บทความนี้จึงเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้สมการ Reece ร่วมกับ DEM ในการวิเคราะห์แรงดันจากดินสำหรับการพัฒนาไบโกลดินและสามารถนำไปปรับใช้ในภารกิจเคลียร์ท่อนระเบิดได้ในสภาวะแวดล้อมทางทหาร

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบที่ไม่คำนึงแรงดันดินอาจทำให้ไบโกลดินหักหรือระบบจับยึดหลุดหรือเสียหายระหว่างการกวาดล้างท่อนระเบิด นอกจากนี้หากแรงดันสูงเกินไปและยานพาหนะไม่มีกำลังเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันดินได้ เครื่องยนต์หรือระบบขับเคลื่อนอาจไม่สามารถดึงไบโกลดินผ่านดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของดิน กลศาสตร์การตัดดิน และสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงดันจากดินอย่างแม่นยำมีความสำคัญและมีผลต่อ

กระบวนการออกแบบอุปกรณ์กำจัดทุ่นระเบิดสำหรับภารกิจเคลียร์ทุ่นเป็นอย่างยิ่ง

กลศาสตร์ของดินเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินภายใต้แรงกระทำซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญต่อที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ดิน เช่น ความหนาแน่น ความยึดเหนี่ยวภายใน มุมเสียดทานภายใน และความสามารถในการรับน้ำหนัก พารามิเตอร์ดังกล่าวส่งผลต่อการพัฒนาแรงต้านที่ดินส่งไปสู่วัตถุใต้อุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดขณะที่ไถดินเคลื่อนที่แทรกผ่านชั้นดิน

กลศาสตร์การตัดดินอธิบายพฤติกรรมของดินเมื่อถูกไถดินกวาด โดยดินจะแตกตัว เคลื่อนที่ และไหลไปรอบไถดินตามแรงเฉือนและแรงดันที่กระทำซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อารออกแบบมุมความโค้ง ความลึกที่เหมาะสม และรูปทรงของไถดิน

เพื่อให้พัฒนาความเข้าใจถึงกลไกการเกิดแรงต้านดินที่สามารถควบคุมได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการเบี่ยงเบนวัตถุที่ฝังอยู่ในดิน เช่น ทุ่นระเบิด งานวิจัยนี้ได้นำสมการของ Reece ซึ่งจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คำนวณแรงต้านจากดินที่กระทำต่อไถดินโดยพิจารณาทั้งแรงจากน้ำหนักของดิน ความยึดเหนี่ยว การยึดเกาะผิวไถดิน แรงกดดันจากภายนอก และแรงในแนวตั้ง โดยสมการของ Reece แสดงในสมการที่ (1)

$$D_S = \frac{[yz^2N_\gamma + czN_c + c_a zN_a + qzN_q]}{\sin(\alpha + \delta) + V \tan \phi} \quad (1)$$

โดยที่ D_S คือ แรงต้านทานจากดิน, γ คือ ความหนาแน่นของดิน, z คือ ความลึกของการตัดดิน, c คือ ค่าความยึดเหนี่ยวของดิน, c_a คือ แรงยึดเกาะระหว่างดินกับไถดิน, q คือ แรงกดดันภายนอก เช่น น้ำหนักจากล้อหรือเครื่องจักร, V คือ แรงแนวตั้งจากดิน, ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน, α คือ มุมของไถดิน และ δ คือ มุมเสียดทานระหว่างดินกับไถดิน

ส่วน N_γ, N_c, N_a, N_q เป็นค่าคงที่ทางทฤษฎีที่ใช้แสดงอิทธิพลของแต่ละองค์ประกอบต่อแรงต้านโดยรวม

จากสมการที่ (1) สามารถสังเกตได้ว่าแรงต้านดินประกอบด้วยแรงจากน้ำหนักของดิน แรงจากความยึดเหนี่ยวของดิน แรงยึดเกาะกับผิวไถดิน และแรงจากแรงกดทับบนผิวดิน ซึ่งแรงทั้งหมดจะถูกปรับทิศทางตามมุมไถดินและมุมเสียดทาน นอกจากนี้ยังมีแรงเสริมจากแรงแนวตั้งของดินที่เปลี่ยนเป็นแรงต้านผ่านมุมเสียดทานภายใน ซึ่งสมการ ของ Reece จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถประเมินแรงที่ต้องใช้ในการออกแบบและใช้งานเครื่องจักรที่มีการกระทำต่อดินในสถานะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม สมการของ Reece มีลักษณะเป็นสถิตยศาสตร์ซึ่งยังไม่คำนึงถึงผลจากการเคลื่อนที่ ดังนั้นจำเป็นต้องมีพจน์ที่สามารถอธิบายผลทางพลศาสตร์เสนอโดย Gill & Vanden Berg [8] แสดงในสมการที่ (2) สำหรับการไถอย่างรวดเร็วดังนี้

$$D_D = \rho A v_b^2 \quad (2)$$

โดยที่ D_D คือ แรงต้านทานจากดินแบบพลศาสตร์, ρ คือ ความหนาแน่นของดิน, A คือ หน้าตัดของไถตัดดินที่สัมผัสกับดิน, v_b คือ ความเร็วของการไถ

จากสมการ (1) และ (2) แรงต้านดินรวม (D) นั้นจะเท่ากับแรงต้านดินเชิงสถิตยศาสตร์และทางพลศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$D = D_S + D_D \quad (3)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ ของ Reece เป็นสมการที่ใช้คำนวณแรงต้านดินแบบแม่นยำซึ่งไม่สามารถอธิบายทางกลศาสตร์ของดินและลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ตัดดินอย่างละเอียดและเป็นระบบ

ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์กวาดล้างทุ่นระเบิดนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้สมการของ Reece

ควบคู่ไปกับการใช้ระเบียบวิธีการแบบองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method: DEM) ซึ่งสามารถจำลองดินในลักษณะของกลุ่มอนุภาคแยกจากกัน แทนที่จะมองดินเป็นตัวกลางต่อเนื่องโดยอนุภาคสามารถเปลี่ยนตำแหน่ง หมุนตัว และส่งแรงกระทำต่อกันได้อย่างอิสระ ในแต่ละช่วงเวลา DEM จะคำนวณแรงรวมที่กระทำต่ออนุภาคโดยใช้กฎของนิวตัน ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ (4) [9]

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sum F_{ij} + F_i^{ext} \quad (4)$$

โดยที่ m_i คือ มวลของอนุภาค, u_i คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค, F^{ext} คือ แรงภายนอกที่กระทำต่ออนุภาค เช่น แรงจากการไถ หรือแรงโน้มถ่วง เป็นต้น และ F_{ij} คือ แรงที่อนุภาคอื่นกระทำต่ออนุภาค i ที่สนใจ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแรงปกติ F_n และแรงเฉือน F_t ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$F_n = k_n \delta_n n - \gamma_n v_n n \quad (5)$$

$$F_t = \min(k_t \delta_t - \gamma_t v_t, \mu |F_n|) \cdot t \quad (6)$$

โดยที่ k_n, k_t คือ ค่าคงที่ของสปริงในแนวปกติและแนวเฉือน, γ_n, γ_t คือ ค่าหน่วงในแนวปกติและแนวเฉือน, δ_n, δ_t คือ การแทรกซ้อนของอนุภาคในแนวปกติและแนวเฉือน, v_n, v_t คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาค, μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส

การรวมแรงเหล่านี้ในแต่ละอนุภาคจะถูกนำไปคำนวณการเคลื่อนที่โดยใช้วิธี explicit Euler หรือ Velocity-Verlet [10] เพื่อคำนวณตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคตลอดช่วงเวลาการจำลอง

อย่างไรก็ตาม DEM มีข้อจำกัดในด้านต้นทุนการคำนวณที่สูง และจำเป็นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์อย่าง

ระมัดระวัง เช่น ค่าสปริง ค่าหน่วง และขนาดอนุภาค เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง การเปรียบเทียบระหว่าง DEM และสมการของ Reece จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของดินและประสิทธิภาพของไบโกลในการเคลียร์ทุ่งระเบิดอย่างปลอดภัยได้อย่างลึกซึ้ง

ในการศึกษานี้ ใช้ซอฟต์แวร์ LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) [11] ซึ่งเป็นโปรแกรม Open Source ที่พัฒนามาจาก LAMMPS ซึ่งเน้นการจำลองวัสดุเม็ด (granular materials) ด้วยวิธี Discrete Element Method (DEM) โดยเฉพาะเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเมื่อถูกไบโกลดินแหวกผ่าน LIGGGHTS มีความสามารถในการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคจำนวนมาก คำนวณแรงปะทะแรงเสียดทาน การหมุนของอนุภาค รวมถึงการจำลองแรงภายนอกที่กระทำจากไบโกลดินหรือการระเบิดได้ด้วยความสามารถในการกำหนดขอบเขตที่ยืดหยุ่นและรองรับการจำลองแบบขนาน (Parallel Computing)

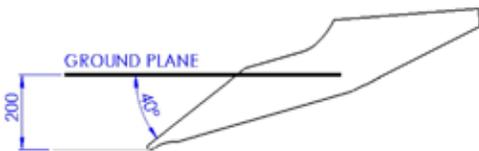
4. แบบไบโกลดิน

แบบจำลองของไบโกลดินได้จากการวัดขนาดจริงของไบโกลดินที่ ศูนย์การทหารม้า ค่ายอดิศร จ.สระบุรี และนำมาพัฒนาต่อยอดโดยมุ่งเน้นหลักการเบี่ยงและแยกวัตถุระเบิดออกจากแนวการเคลื่อนที่ของรถ ดังแสดงในรูปที่ 1 ไบโกลดินของอุปกรณ์ขจัดทุ่งระเบิดมีลักษณะเป็นไบโกลคู่แบบแยกซ้าย-ขวา ติดตั้งอยู่บนแขนกลที่สามารถปรับระดับและมุมได้ด้วยกระบอกลไฮดรอลิก ไบโกลดินแต่ละข้างประกอบด้วยไบโกลวางตัวแบบ V-shape พร้อมฟันชุด (Tine) ปลายแหลมด้านล่างสำหรับเจาะและยกดินขึ้นและเพื่อเบี่ยงวัตถุที่ฝังอยู่ใต้ดิน เช่น ทุ่งระเบิด ไปยังด้านข้างของยานพาหนะ



รูปที่ 1 การออกแบบไ้ไ้ดิน
สำหรับภารกิจเคลียร์ทุ่นระเบิด

ไ้ไ้ดินทั้งสองถูกยึดโยงไว้ด้วยโครงสร้างแบบไขว้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยไม่เพิ่มน้ำหนักเกินความจำเป็น และยังรองรับแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้นในกรณีที่ทุ่นระเบิดทำงานโดยตรงกับไ้ไ้ดิน ดังนั้นการออกแบบไ้ไ้ดินมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในภารกิจทางทหารหรืองานที่ต้องการความปลอดภัยสูง และสามารถเข้าถึงพื้นที่เสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

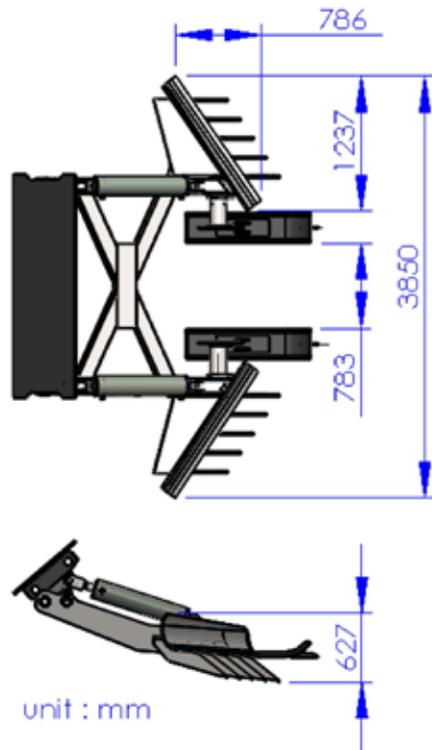


รูปที่ 2 รูปตัดด้านข้างของฟันขุด (tine)

รูปที่ 2 แสดงรูปตัดด้านข้างของฟันขุด (Tine) ซึ่งมีลักษณะเป็นซี่แหลมติดอยู่ด้านล่างของไ้ไ้ดิน ฟันขุดเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเจาะทะลุและพลิกผิวดินเพื่อให้ดินเคลื่อนที่ผ่านไปตามรูปทรงของไ้ไ้ดินเพื่อเบี่ยงทุ่นระเบิด รูปทรงของฟันขุดถูกออกแบบให้มีความลาดเอียงเข้าหาพื้นดินที่มุมประมาณ 40 องศา จากพื้นระนาบ มีความยาวจากพื้นดินถึงจุดปลายที่ 200 มิลลิเมตร โดยฟันขุดออกแบบให้เรียวยาวตลอดความยาวของไ้ไ้ดินทั้งสองข้าง

ความกว้างของไ้ไ้ดินออกแบบให้มีความกว้างไม่น้อยกว่าความกว้างของรถ เพื่อให้มั่นใจว่าทุ่นระเบิด

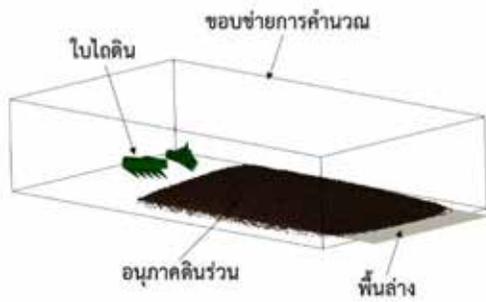
จะถูกขจัดออกจากในพื้นที่ที่รถวิ่งผ่านแสดงในรูปที่ 3 โดยความกว้างมากที่สุดมีขนาด 3850 มิลลิเมตร และสูง 627 มิลลิเมตร การจัดวางของไ้ไ้ดินมีลักษณะเป็นรูปตัววี ซึ่งช่วยลดแรงต้านในการแหวกดิน แต่ยังคงเพิ่มประสิทธิภาพในการเบี่ยงทุ่นระเบิดออกจากแนววิ่งตรงของรถ ทำให้ลดความเสี่ยงที่ทุ่นจะอยู่ใต้ท้องรถหรือใต้ล้อ



รูปที่ 3 ขนาดของไ้ไ้ดิน

5. แบบจำลองการดันดิน

รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองการดันดินด้วยวิธีการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method: DEM) โดยใช้ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส LIGGGHTS เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินและเปรียบเทียบแรงต้านดินที่ได้จากการคำนวณทฤษฎี



รูปที่ 4 แบบจำลองการดันดินใน LIGGGHTS

เงื่อนไขขอบเขตของวิธีการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีองค์ประกอบหลักสำคัญคือไบโอดินที่เป็นวัสดุแข็งเกร็งจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินด้วยความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อผลักดันอนุภาคดินไปด้านหน้าและข้าง โดยอนุภาคดินร่วนเป็นกลุ่มของอนุภาคจำลอง (Spherical Particles) ที่แทนดินร่วนโดยกำหนดขนาดที่ 40 มิลลิเมตร [11] จำนวนทั้งหมด 200,000 อนุภาค ที่รวมคุณสมบัติเชิงกลของดินร่วนและค่าการยึดเหนี่ยวของดิน (Cohesion) ในการจำลอง พื้นล่างทำหน้าที่เป็นผิวกั้นเพื่อให้อนุภาคดินกองรวมอยู่ในที่ระดับความสูงที่ต้องการ

การจำลองนี้ซึ่งเปรียบเทียบความลึกของการไถ 3 ระดับ ได้แก่ 0.1 เมตร, 0.2 เมตร และ 0.3 เมตร โดยความลึกนี้พิจารณาจากขอบเขตของการฝังทุ่นระเบิดและกำลังของเครื่องยนต์ของรถที่มี

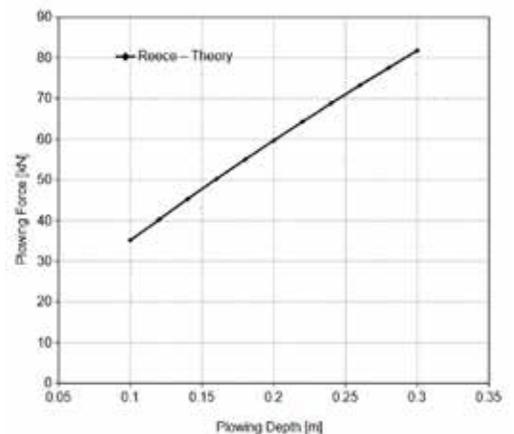
ขอบข่ายการคำนวณ (Computational Domain) เป็นขอบเขตพื้นที่ของการคำนวณที่จะเกิดขึ้น พื้นที่ผิวของขอบข่ายการคำนวณนี้จะเปิดโล่งทั้งหมด อนุภาคสามารถที่จะทะลุผ่านผิวนี้ออกไปได้ ขอบเขตคำนวณต้องมีขนาดเหมาะสมครอบคลุมการเคลื่อนที่ทั้งหมด แต่ออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อลดการใช้ทรัพยากรที่ใช้คำนวณ ในการวิเคราะห์นี้ใช้ขอบข่ายการคำนวณขนาด กว้าง 7 เมตร ยาว 13 เมตร และ สูง 3 เมตร

สำหรับแบบจำลองนี้ยังไม่ได้รวมทุ่นระเบิดลงไปในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ทุ่นระเบิดนั้นทำให้อนุภาคดินมีความไม่สม่ำเสมอ (Non-homogeneous) ซึ่งทำให้การเปรียบเทียบกับสมการที่ 1 นั้นมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นได้

5. ผลการวิเคราะห์

จากข้อมูลทางเรขาคณิตที่ได้จากการออกแบบไบโอดิน ความกว้างของไบโอดิน มุมเอียงของไบโอดิน ความลึกของการแทรกลงดิน รวมถึงรูปทรงของทุ่นชุดใช้ในการคำนวณแรงต้านดินที่กระทำต่อไบโอดินด้วยสมการที่ (1)

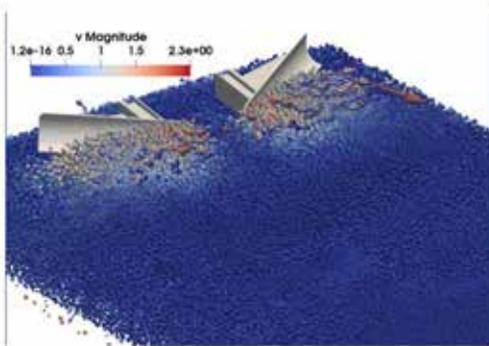
ทั้งนี้กำหนดให้ดินที่ถูกไถนั้นเป็นดินร่วน (Loam) [12] ซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทย โดยที่ γ มีค่า 17.95 kN/m³, c มีค่า 30 kN/m² และ c_a มีค่า 15 kN/m² และมีกำหนดความเร็วการไถ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถทำนายค่าแรงต้านดินรวม (Plowing Force) ที่ระยะความลึก (Plowing Depth) ต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 5 สามารถสังเกตได้ว่าที่ระยะความลึก 0.2 เมตร นั้นจะใช้แรงต้านดินรวมเท่ากับ 60 กิโลนิวตัน



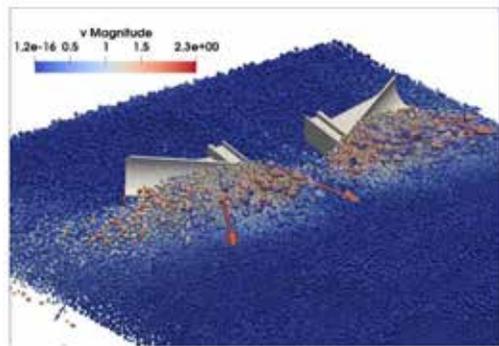
รูปที่ 5 แรงต้านดินที่เกิดขึ้นที่ระยะความลึกต่าง ๆ

รูปที่ 6 เป็นพฤติกรรมการดันดินจากการคำนวณด้วยวิธีการจำลององค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลองไปเถดินรูปตัววีดินผ่านชั้นของอนุภาคดินร่วน (Loam Soil Particles) ซึ่งถูกแทนด้วยอนุภาคทรงกลมขนาดเท่ากันภายในขอบเขตการคำนวณที่กำหนดไว้ โดยลูกศรในภาพแสดงเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector) ของอนุภาคในช่วงเวลาของการไถดินทิศทางและความยาวและสีของลูกศรแสดงถึงทิศทาง

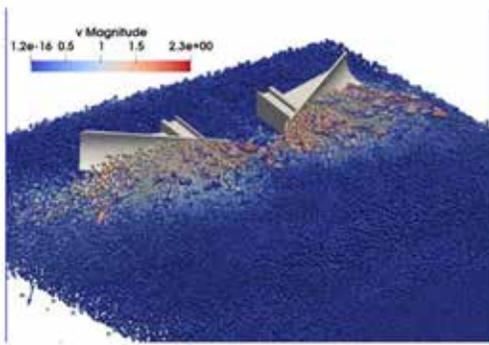
และขนาดของความเร็วของอนุภาคนั้น ๆ รูปที่ 6ก) ช่วง Timestep 10500 นั้นเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นของการไถดิน รูปที่ 6ข) ช่วง Timestep 11500 เป็นช่วงเวลาที่การไถดินเริ่มเต็มใบไป รูปที่ 6ค) ช่วง Timestep 12000 เป็นช่วงเวลาที่เกิดแรงต้านสูงสุดกระทำที่ใบไถ รูปที่ 6 ง) ช่วง Timestep 13000 เป็นช่วงเวลาเมื่อแรงต้านลดลงและเกิดการไถอย่างต่อเนื่อง



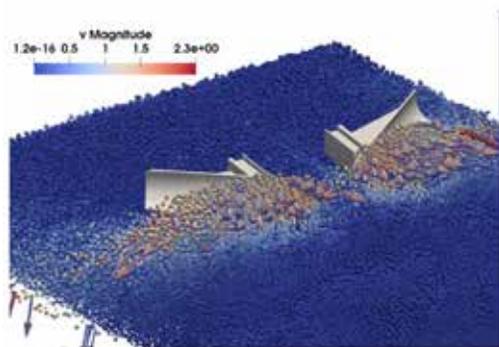
ก)



ข)



ค)

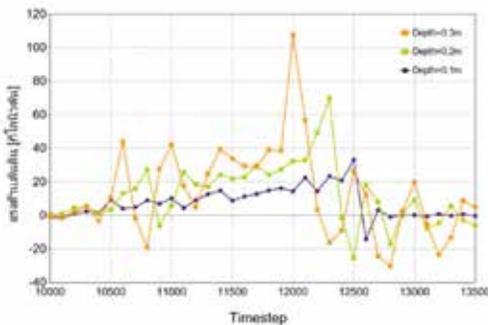


ง)

รูปที่ 6 ผลการจำลองการดันดินตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

ก) Timestep 10500 ข) Timestep 11500 ค) Timestep 12000 ง) Timestep 13000

จากผลการจำลองสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระหว่างที่ไถไถดินไถดินก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลดินออกไปทางด้านข้างทั้งสองฝั่ง โดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเฉียงขึ้นและออกด้านข้างตามแนวของไถไถดินแสดงดังทิศทางของเวกเตอร์ความเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับรูปทรงที่ได้ออกแบบไว้และเป็นไปตามหลักการทำงานของไถไถดินตัววี ไถไถดินสามารถผลักดันดินให้เบี่ยงออกจากแนวกลางของการเคลื่อนที่

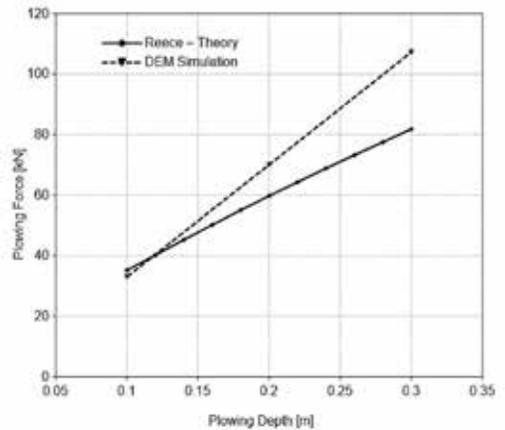


รูปที่ 7 แรงต้านดันดินที่เกิดขึ้นที่ไถไถดินจากการจำลอง DEM

รูปที่ 7 แสดงผลการทำนายแรงต้านดินที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) โดยใช้วิธีการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องซึ่งเปรียบเทียบความลึกของการไถ 3 ระดับ ได้แก่ 0.1 เมตร (สีม่วง), 0.2 เมตร (สีเขียว) และ 0.3 เมตร (สีส้ม)

โดยผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงที่กระทำต่อไถไถมีลักษณะเพิ่มขึ้นจนถึงเรื่อยจนไถไถดินสามารถเอาชนะแรงเสียดทาน แรงยึดเกาะของดินได้แล้วแรงที่กระทำจะลดลงมาซึ่งเป็นลักษณะปกติของการตัดดินแบบอนุภาค (Particle-Based-Interaction) โดยแรงที่เปลี่ยนแปลงตามการกระแทกและการหมุนของอนุภาคดินในแต่ละช่วงเวลา สำหรับความลึก 0.1 เมตร (เส้นสีม่วง) พบว่าแรงต้านดินมีค่าอยู่ในช่วง 10-30 กิโลนิวตัน ส่วนความลึก 0.2 เมตร (เส้นสีเขียว) ให้ค่าแรงต้านดินสูงกว่าและมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ

30-70 กิโลนิวตัน ในขณะที่ความลึก 0.3 เมตร (เส้นสีส้ม) ให้ค่าแรงต้านดินสูงที่สุด โดยมีค่าสูงสุดเฉียบพลัน 100 กิโลนิวตัน



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าแรงต้านดินระหว่างผลการคำนวณด้วยทฤษฎีของ Reece และค่าที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี DEM

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบแรงต้านดินระหว่างผลการคำนวณด้วยทฤษฎีของ Reece และค่าที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี DEM โดยพิจารณาความลึกของการไถที่แตกต่างกัน ผลการเปรียบเทียบพบว่าสำหรับความลึกน้อยกว่า 0.15 เมตร ค่าแรงจาก DEM ใกล้เคียงกับที่ได้จาก Reece หรืออาจต่ำกว่าเล็กน้อยโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-10% อย่างไรก็ตาม เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ค่าแรงต้านดินที่ทำนายได้จาก DEM สูงกว่าค่าแรงต้านดินที่คำนวณด้วยทฤษฎี Reece โดยเฉพาะในช่วงความลึกดินมากกว่า 0.2 เมตร ความแตกต่างสูงถึง 20-30% ซึ่งทฤษฎีของ Reece นั้นตั้งอยู่บนสมมติฐานสมการเชิงเส้น อาจประเมินแรงต้านดินต่ำเกินไปในกรณีที่มีความลึกมาก ซึ่งอาจมีผลมาจากพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของดิน อย่างไรก็ตาม การคำนวณในครั้งนี้ได้นำสมการทางทฤษฎีของ Reece เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการจำลองแบบ DEM เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมแรงต้านดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ

ซึ่งผลการเปรียบเทียบนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบใบไถเบื้องต้นให้มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมกับสภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. สรุปผล

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ดำเนินการประเมินแรงต้านทานจากดินด้วยสมการเชิงทฤษฎีของ Reece และการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ให้ผลที่สอดคล้องกันในช่วงความลึกการไถดิน โดยเฉพาะที่ความลึกน้อยกว่า 0.15 เมตร ซึ่งค่าแรงต้านจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงหรืออาจต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎี Reece เล็กน้อย โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 5–10% อย่างไรก็ตาม เมื่อความลึกในการไถเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.2 เมตร ค่าแรงต้านดินที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีอย่างชัดเจน และความแตกต่างอาจเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 20–30% ซึ่งสะท้อนให้เห็นข้อจำกัดของสมการ Reece ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานของพฤติกรรมดินแบบต่อเนื่องและความสัมพันธ์เชิงเส้น ขณะที่การจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องสามารถอธิบายพฤติกรรมไม่เชิงเส้น การเปลี่ยนแปลงของแรงตามเวลา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคดินกับใบไถ ความแตกต่างดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า สมการ Reece ยังเหมาะสมสำหรับการประมาณค่าแรงต้านดินในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น แต่สำหรับการออกแบบใบไถดินที่ต้องการความแม่นยำสูง โดยเฉพาะในกรณีการไถลึก ควรอาศัยผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องร่วมด้วย ทั้งนี้ แนวทางในการลดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเชิงทฤษฎีและการจำลองสามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ดินในสมการ Reece ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงจากการจำลอง

ด้วยระเบียบวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่องหรือการใช้ค่าตัวปรับแก้ (correction factor) ที่ขึ้นกับความลึกการไถหรือการพัฒนาสมการของ Reece ที่รวมปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคดินกับใบไถในอนาคตต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pearson Engineering, "Route opening mine plough." [Online]. Available: <https://www.pearson-eng.com/product/route-opening-mine-plough/>. Accessed: Oct. 1, 2024.
- [2] A. R. Reece, "The fundamental equation of earth-moving mechanics," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 179, pp. 16-22, 1964.
- [3] E. McKyes, *Soil Cutting and Tillage*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., 1985.
- [4] H. P. Harrison, "Soil reacting forces for models of three bentleg plows," *Soil Tillage Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 325-340, 1989.
- [5] S. H. Hoseinian *et al.*, "Development of a dual sideways-share subsurface tillage tool," *Soil Tillage Res.*, vol. 216, Art. no. 105247, 2022.
- [6] M. R. Bashir and A. Yahya, "Simulation of soil-tool interaction using finite element method and discrete element method: A review," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 127, pp. 615-626, 2016.
- [7] S. Murray, "Modelling of soil-tool interactions using the discrete element method," M.Sc. thesis, Dept. Biosyst. Eng., Univ. Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 2016.

- [8] W. R. Gill and G. E. Vanden Berg, *Soil Dynamics in Tillage and Traction*, USDA Agric. Handbook No. 316. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1968.
- [9] K. Bagi, *Introduction to Discrete Element Methods: A Numerical Method for Granular and Discontinuous Materials*. Cham, Switzerland: Springer, 2022.
- [10] M. Marigo and J. P. K. Seville, "Discrete element method (DEM) for industrial applications," *KONA Powder Part. J.*, vol. 32, pp. 201-223, 2015.
- [11] C. Kloss, C. Goniva, A. Hager, S. Amberger, and S. Pirker, "Models, algorithms and validation for open source DEM and CFD-DEM," *Prog. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 12, no. 2-3, pp. 140-152, 2012.
- [12] L. Lyle and N. P. Woodruff, "Surface soil cloddiness in relation to soil density at time of tillage," *Soil Sci.*, vol. 91, no. 3, pp. 150-159, 1961. (หมายเหตุ: ตรวจสอบปีที่พิมพ์อีกครั้ง ข้อมูลต้นฉบับระบุ 1961)

นวัตกรรมแบบเปิดกับโครงการวิจัยและพัฒนา ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ปดิษฐ์ สันต์

วันที่รับ 5 ธันวาคม 2567 วันที่แก้ไข 7 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 16 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ

บทความวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เสนอการใช้แนวคิด “นวัตกรรมแบบเปิด” (Open Innovation) ในโครงการวิจัยและพัฒนาของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และขยายขีดความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยการผสมผสานองค์ความรู้และขีดความสามารถทั้งจากภายในและภายนอกองค์กร เช่น มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัย และภาคเอกชน เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้มีขีดความสามารถการแข่งขันและระดับนวัตกรรมสูงขึ้น แนวคิดนี้ช่วยลดการทำงานแบบไซโล (Silo) และเพิ่มการบูรณาการระหว่างโครงการต่าง ๆ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ตอบสนองความต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศได้อย่างรวดเร็วและยืดหยุ่น พร้อมตัวอย่างการศึกษาการจับคู่เมทริกซ์เพื่อสร้างการบูรณาการเทคโนโลยีที่มีอยู่เข้าด้วยกันด้วย 2) วิเคราะห์การใช้เทคโนโลยีในระบบความขัดแย้งปัจจุบัน อันเป็นบริบทที่มีเรื่องเศรษฐกิจและความต่อเนื่องในห่วงโซ่อุปทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย นอกจากนี้ บทความนี้ยังระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จ เช่น การบริหารจัดการทรัพย์สินทางปัญญา (IP Management) การบูรณาการเทคโนโลยี และการสร้างความร่วมมือกับพันธมิตร ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การนำแนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดมาใช้สามารถยกระดับศักยภาพของ สทป. ในการพัฒนายุทธโศปกรณ์ที่มีความคุ้มค่า ต้นทุนไม่สูง แต่มีประสิทธิภาพสูง ตามแนวคิด Low Technology Supremacy ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบสงครามและความขัดแย้งในปัจจุบัน มากกว่าการลงทุนการวิจัยและพัฒนาตามระบบปกติที่ต้องเริ่มจากศูนย์ ที่ทำให้ใช้เวลานานและงบประมาณสูงมาก

คำสำคัญ: นวัตกรรมแบบเปิด, การบูรณาการเทคโนโลยี, ความเหนือกว่าของเทคโนโลยีที่ต่ำกว่า, ยุทธโศปกรณ์ทางทหาร

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: bodin.s@dti.or.th

Open Innovation in the Research and Development Projects of the Defence Technology Institute

Bodin Suntud

Received 5 December 2024, Revised 7 May 2025, Accepted 16 July 2025

Abstract

This analysis aims to 1) propose the adoption of the “Open Innovation” concept in the research and development projects of the Defence Technology Institute (DTI) to enhance efficiency, reduce costs, and expand capabilities in defense technology development. By integrating knowledge and competencies from both internal and external sources—such as universities, research institutes, and private sectors—the concept seeks to upgrade existing products to achieve higher levels of competitiveness and innovation. Open Innovation mitigates siloed operations and fosters project integration, resulting in a diverse range of products that can swiftly and flexibly meet the demands of domestic and international markets. The study also demonstrates a matrix matching study to facilitate the integration of existing technologies. 2) analyze the application of technology in current conflict systems, which increasingly involve economic considerations and the continuity of supply chains. Additionally, this study identifies critical success factors, such as effective intellectual property (IP) management, the integration of technologies, and partnership building. The findings reveal that employing Open Innovation can significantly enhance DTI’s capability to develop cost-effective, high-performing defence equipment in line with the “Low Technology Supremacy” concept. This approach addresses contemporary warfare and conflict dynamics more effectively than conventional research and development methods, which often require starting from scratch and incur significant time and financial cost.

Keywords: Open innovation, Technology integration, Low technology supremacy, Military equipment

¹ Defence Technology Analysis Department, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: bodin.s@dti.or.th

1. บทนำ

แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิด (Open Innovation) คือ แนวคิดที่เปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบการสร้างนวัตกรรมแบบ “ปิด” ที่องค์กรพึ่งพาทรัพยากรภายในของตนเองแบบแยกกันทำหรือไซโล (Silo) จากเดิมที่มักเน้นการควบคุมเทคโนโลยี และการพึ่งพาตนเองแบบปิด ด้วยข้อจำกัดของแนวทางนี้ นวัตกรรมแบบเปิดได้เสนอรูปแบบที่ส่งเสริมให้องค์กรสามารถใช้ความรู้ทั้งจากภายในและภายนอกองค์กรอย่างสิ้นไหล ยืดหยุ่น และไม่เป็นทางการ โดยเฉพาะในยุคที่ความรู้เข้าถึงได้ง่ายและวงจรนวัตกรรมเร็วขึ้นอย่างมากกว่าในอดีต จึงเสนอแนวคิดใหม่นี้ขึ้น ทั้งนี้ แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดนำเสนอโดย ศาสตราจารย์เฮนรี เซสโบรท์ (Henry Chesbrough) ในปี พ.ศ. 2546 กรรมการบริหารของศูนย์พัฒนานวัตกรรมแบบเปิด สถาบันพัฒนาธุรกิจด้านนวัตกรรม มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ที่มีชื่อเสียงระดับโลก หนังสือวิชาการเรื่อง Open Innovation: Researching a New Paradigm [1]

หลักการดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายองค์กรด้วย เพราะเป็นการใช้ “การไหลเข้าและไหลออกขององค์ความรู้โดยเจตนาตั้งใจ” เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนาศักยภาพภายในและสร้างมูลค่าทางการตลาดเพิ่มเติม แนวคิดนี้สนับสนุนการใช้ประโยชน์จากไอเดียจากภายนอกจากแห่งองค์กรที่ตนเองสังกัดอยู่ โดยยังคงใช้คุณค่าจากสิ่งที่พัฒนาภายในองค์กรผ่านตัวแบบธุรกิจที่มีการจัดโครงสร้างไว้อย่างเหมาะสม โดยนวัตกรรมแบบเปิดนี้ มองการวิจัยและพัฒนาเป็นระบบเปิดที่ช่วยให้นวัตกรรมจากภายนอกสามารถเข้ามามีส่วนร่วมในกระบวนการ หรืออาจนำไปสู่การออกสู่ตลาดผ่านการอนุญาตให้ใช้สิทธิ การร่วมทุน หรือการตั้งบริษัทแยกจากองค์กรก็ได้

นวัตกรรมแบบเปิดต่างจากนวัตกรรมแบบปิดที่มีการเน้นศักยภาพคนภายในแห่งองค์กรหรือสังกัดเดิมนวัตกรรมแบบเปิดให้ความสำคัญกับการสร้างโครงสร้างของโมเดลธุรกิจที่เชื่อมโยงแหล่งความรู้ที่หลากหลาย แนวคิดนี้ไม่ได้เน้นเพียงการจับคุณค่าจากนวัตกรรมภายในเท่านั้น แต่ยังพยายามเพิ่มศักยภาพในการรับรู้และสร้างมูลค่าจากทรัพย์สินทางปัญญาภายนอก ซึ่งถือเป็นการพัฒนาครั้งสำคัญในการทำความเข้าใจนวัตกรรมอุตสาหกรรมในยุคใหม่ด้วย

ทั้งนี้ บทวิเคราะห์นี้ได้พยายามนำแนวคิดนวัตกรรมแบบเปิด มาประยุกต์ใช้ ผ่านการใช้แนวคิดการจับคู่ระหว่างเทคโนโลยีต่าง ๆ ของ สทป. ที่มีอยู่แล้วให้ทำงานร่วมกันให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พร้อมใช้งาน และสร้างความเป็นไปได้ของการบูรณาการทางเทคโนโลยีที่แท้จริงด้วย ดังจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 3 ในหัวข้อ 4.3

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

บทวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการประยุกต์ใช้ นวัตกรรมแบบเปิดกับโครงการวิจัยและพัฒนาของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ผ่านการบูรณาการองค์ความรู้จากภายนอกและการต่อยอดเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม พร้อมทั้งมุ่งสร้างผลิตภัณฑ์ในรูปแบบแพ็คเกจ (Package) ในรูปแบบของเมทริกซ์การจับคู่เทคโนโลยีที่มีอยู่แล้วของ สทป. ที่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยเน้นการออกแบบให้มีความอ่อนกประสงค์และเสริมศักยภาพของเทคโนโลยีที่มีอยู่ นอกจากนี้ ยังมุ่งเสริมศักยภาพทางการตลาดเพื่อเพิ่มโอกาสในการส่งออกและ

¹ Chesbrough, H. W. (2003). Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology. Harvard Business School Press.

ขยายขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทย
ในตลาดโลกด้วยการนำเสนอนวัตกรรมในรูปแบบ
ที่ครอบคลุมและใช้งานได้อย่างสะดวก

3. แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดกับ สทป.

3.1 การศึกษาการประยุกต์ใช้แนวคิดนวัตกรรม แบบเปิดด้านโครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

จากการศึกษาจากเอกสารทางวิชาการของ
สถาบันวิจัย ข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐ เช่น NATO
รวมถึงหน่วยงานนวัตกรรมทางทหารทั้งของสหรัฐ
และฝรั่งเศส ผู้ศึกษาค้นพบว่า นวัตกรรมแบบเปิด
ถือเป็นข้อพิจารณาที่สำคัญในการวิจัยพัฒนาและ
ในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ตัวอย่างการพิจารณา
ประเทศกรณีศึกษาและคุณลักษณะด้านต่าง ๆ
มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดด้านโครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

งานวิชาการ	ข้อเสนอหลัก	ประเทศที่ใช้ กรณีศึกษา	กลยุทธ์ การดำเนินการ	ความท้าทาย
CEPR (2024)[2]	การปฏิรูปจากล่างขึ้นบน โดยกองทัพ และหน่วยงานวิจัยเน้นการเปิดรับผนวกรวม นวัตกรรมจากภายนอกกระทรวงกลาโหม โดยเฉพาะ Startups การใช้นวัตกรรม แบบเปิด เปลี่ยนจากการที่รัฐ “กำหนด ความต้องการการใช้งาน” เป็น “เปิดกว้าง ให้บริษัทแนะนำไอเดีย” ผลการวิจัยบ่งชี้ว่า การเปิดกว้างให้บริษัทใหม่ ๆ เสนอแนะ ไอเดียจะเกิดการรับเอาเทคโนโลยีใหม่ ๆ แต่วิธีการเดิม ๆ เช่น การกำหนดความต้องการ จะสร้างการล่อกลบเพียงเพื่อจะเป็นผู้ชนะ สัญญาณในอนาคต	สหรัฐอเมริกา (กองทัพอากาศ โดยสำนักงาน US Air Force Small Business Innovation Research)	การเปิดโอกาสให้มีการแข่งขัน ที่เปิดกว้าง ไม่รวมศูนย์ มีการรับความรู้ จากพันธมิตรภายนอก และการลด ความซับซ้อนกระบวนการวิจัย	การต่อต้าน จากระบบราชการ เดิมที่ยังยึดติดกับ โครงสร้างแบบปิด ต้องใช้เวลา ในการปรับตัว
ARES Report No.60 (2020) [3]	การสร้างระบบนิเวศนวัตกรรมแบบเปิด ในภาคการป้องกันประเทศ เปรียบเทียบ วิธีการแบบเปิดกับวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อเสริมสร้างความร่วมมือกับภาคเอกชน และสถาบันวิจัย นวัตกรรมแบบเปิดถูกใช้ เพื่อดึงดูดบุคลากรที่มีความเป็นเลิศ และขยายขอบเขตชุมชนอุตสาหกรรม ป้องกันประเทศ	ประเทศสมาชิก สหภาพยุโรป (EU) สำนักงานวิจัย พัฒนาทางทหาร ของสหรัฐ (DARPA) ห้องวิจัยทางทหาร ฝรั่งเศส และ สำนักงาน NATO Innovation Hub	การสร้างความร่วมมือกับภาคเอกชน และสถาบันวิจัย โดยใช้ระบบ การแบ่งปันทรัพย์สินทางปัญญา และ การบริหารทรัพย์สินทางปัญญา อย่างมีประสิทธิภาพ มีการใช้ตัวกลาง (Intermediaries) เช่น หน่วยงานเพาะ ธุรกิจของบริษัทเอกชน ผู้เร่งนโยบาย ฮับ (Hub) ด้านนวัตกรรมเป็นผู้เล่นหลัก ของกรอบนโยบายนี้	ความซับซ้อน ในการบริหาร จัดการทรัพย์สิน ทางปัญญา การขาดกรอบ นโยบายที่ชัดเจน

² J. N. Cummings, S. J. Dokko, and E. E. Zuckerman, "Open innovation in U.S. defense research: The causal impact of bottom-up reforms," National Bureau of Economic Research Working Paper No. 28700, May 2021. Available: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w28700/w28700.pdf

³ A. Guillou, "Open Innovation in the Defence Sector," ARES Report No. 60, Institut de Relations Internationales et Stratégiques (IRIS), July 2020. Available: <https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2020/07/ARES-60.pdf>

⁴ R. James, "Closing the Innovation Performance Gap: Open Innovation in Military Bureaucracies," California Management Review, vol. 66, no. 3, May 2024. Available: <https://cmr.berkeley.edu/2024/05/66-3-closing-the-innovation-performance-gap-open-innovation-in-military-bureaucracies>

ตารางที่ 1 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดด้านโครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (ต่อ)

งานวิชาการ	ข้อเสนอหลัก	ประเทศที่ใช้กรณีศึกษา	กลยุทธ์การดำเนินการ	ความท้าทาย
CMR Berkeley (2024) [4]	การใช้นวัตกรรมแบบเปิดในระบบราชการทหารทำได้ด้วยความยากลำบาก มีกรณีศึกษาที่ทำสำเร็จแล้วเป็นส่วนน้อย แต่ส่วนมากจะไม่สำเร็จ แต่ก็จำเป็นต้องทำ	DARPA สหรัฐอเมริกาและสหราชอาณาจักร (Defense Science and Technology Laboratory: DSTL) และเนเธอร์แลนด์ ¹	การปรับปรุงโครงสร้างภายใน การทำงานแบบไฮโล และสนับสนุนการทำงานร่วมกับพันธมิตรภายนอก เช่น มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัย และบริษัทเทคโนโลยี การทำงานร่วมกันในลักษณะนี้ช่วยให้การพัฒนาเทคโนโลยีมีความรวดเร็วขึ้นและลดเวลาในการเข้าสู่ตลาดด้วย	การรักษาความลับ การปกป้อง ข้อมูลสำคัญ การปรับตัว ระบบราชการ การพึ่งพา กระบวนการภายในที่ซับซ้อน และปัญหา 3 ข้อ คือ Political Misfit, Cultural Misfit, และ Technical Misfit ²
Airpower Journal (2024) [5]	เทคโนโลยีสองทาง (Dual-use) เช่น AI หุ่นยนต์ Big Data เทคโนโลยีที่สำคัญมากขึ้นในการตอบสนองต่อภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงในยุคดิจิทัล การสร้างความร่วมมือที่แข็งแกร่งระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ ทำได้โดยให้ผู้ใช้งานมีส่วนร่วมตั้งแต่เริ่มโครงการในฐานะผู้สร้างร่วม โดยไม่ผ่านคนกลาง ผู้ใช้และผู้สร้างมีปฏิสัมพันธ์แนบราบ ไม่เน้นความเป็นทางการ แล้วกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์นั้นหลังโครงการเสร็จสิ้น	รัฐใน NATO จัดตั้ง NATO Hub เพื่อสร้าง Pool of researchers จากรัฐสมาชิก, ประเทศฝรั่งเศส ² หรือ Thales ที่จัดตั้งศูนย์ บ่มเพาะเทคโนโลยี และศูนย์เร่งการพัฒนา สำหรับ Cyber security ขึ้น	ต้องสร้างกลไกใหม่ เพื่อปฏิสัมพันธ์กับผู้มีส่วนร่วมนอกวงกว้างกว่าเดิม เช่น ศูนย์บ่มเพาะ หน่วยเร่งการเติบโต นวัตกรรม การส่งเสริมสถาปัตยกรรม เปิดจะช่วยให้รวมเทคโนโลยีสองทางเข้ากับโครงการทางทหารที่มีประสิทธิภาพ โดยต้องปรับกรอบการจัดซื้อจัดจ้างที่กำหนดข้อกำหนดการใช้งานให้กว้างกว่าเดิม	วัฒนธรรมองค์กร ต้องใช้การปรับตัว จากระบบปิด ไปสู่ระบบเปิด อาศัย การเปลี่ยนแปลง ด้านวิสัยคิดและทัศนคติของผู้บริหาร และเจ้าหน้าที่ในองค์กร ซึ่งต้องพร้อมที่จะรับฟังความคิดเห็น จากภายนอก

¹ หน่วยงานความมั่นคงของประเทศเนเธอร์แลนด์ได้รับเอานวัตกรรมแบบเปิดมาใช้แล้วในปี 2016 จนเป็นโครงการ Netherland Radar Country ที่หมายถึงความร่วมมือภาครัฐและเอกชนที่ดำเนินการสำเร็จด้วยการส่งผ่านองค์ความรู้จากภาคราชการไปยังผู้ผลิตอุปกรณ์ดั้งเดิมได้ กระทรวงกลาโหมกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์เรดาร์กลับไปใช้ด้วย

² 1. Political Misfit ระบบราชการทหารมีโครงสร้างอำนาจที่รวมศูนย์และลำดับขั้นที่ชัดเจน การเปิดรับนวัตกรรมจากภายนอกอาจขัดแย้งกับโครงสร้างการตัดสินใจแบบรวมศูนย์ และอาจเกิดความเสี่ยงต่อความปลอดภัยและอำนาจของผู้บริหาร
 2. Cultural Misfit วัฒนธรรมองค์กรทหารมักมีแนวโน้มไปทางอนุรักษ์นิยม และให้ความสำคัญกับการปฏิบัติตามมาตรฐานมากกว่า การสำรวจสิ่งใหม่ แนวคิด "Not-Invented-Here Syndrome" (ไม่ใช่สิ่งที่เราคิดค้น) จึงอาจเป็นอุปสรรคต่อการนำนวัตกรรมจากภายนอกมาใช้
 3. Technical Misfit ความกังวลเกี่ยวกับการสูญเสียข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญไปสู่บุคคลหรือองค์กรที่ไม่พึงประสงค์หรือรัฐศัตรู รวมทั้งการปกป้องทรัพย์สินทางปัญญามากเกินไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลและเป็นอุปสรรคต่อการทำงานร่วมกับพันธมิตรภายนอก

³ โดยสำนักงาน Defence Innovation Agency กระทรวงกลาโหมฝรั่งเศส เพื่อจัดตั้ง Red Team Program ร่วมกับนักเขียนนิยายวิทยาศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ภัยคุกคามในอนาคต ด้วยวิธีการคิดจินตนาการแบบนอกกรอบจากเดิม

จากการศึกษาวิจัยทั้ง 4 ชิ้นงานนั้น ผู้เขียนพบว่า นวัตกรรมแบบเปิดนับเป็นแนวคิดสำคัญที่ช่วยขับเคลื่อนการพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงที่เทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การเปิดรับความรู้จากภายนอกองค์กร เช่น มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัย และภาคเอกชน ทำให้องค์กรสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีใหม่ ๆ ได้อย่างรวดเร็ว ลดเวลาในการพัฒนา เพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ และเพิ่มโอกาสในการเข้าสู่ตลาด การใช้นวัตกรรมแบบเปิด ยังช่วยลดปัญหาการทำงานแบบไซโลภายในระบบราชการทหาร (ที่จริงๆ แล้วเป็นไซโลทุกประเทศ) โดยสนับสนุนการทำงานข้ามหน่วยงานและเสริมสร้างความร่วมมือกับพันธมิตร อย่างไรก็ตาม ความท้าทายที่สำคัญคือการต่อต้านจากระบบราชการแบบดั้งเดิม ซึ่งมักยึดติดกับโครงสร้างที่เน้นการควบคุมภายใน การบริหารจัดการทรัพย์สินทางปัญญา (IP Management) ก็เป็นอีกหนึ่งปัญหาที่พบ เนื่องจากการแบ่งปันความรู้ และทรัพยากรระหว่างองค์กรต้องมีกรอบนโยบายที่ชัดเจน เพื่อป้องกันการสูญเสียสิทธิ์ทางปัญญา นอกจากนี้ การเปลี่ยนไปใช้แนวทางนวัตกรรมแบบเปิดยังต้องการการปฏิรูปเชิงโครงสร้างภายในองค์กรและการสร้างระบบนิเวศที่เอื้อต่อการบูรณาการเทคโนโลยีและการทำงานร่วมกันข้ามภาคส่วน ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถทางการทหารและสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรมในระยะยาวอย่างยั่งยืน ทั้งนี้ งานวิจัยเหล่านี้เน้นให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับตัวและเปลี่ยนแปลงเชิงกลยุทธ์ในภาคการป้องกันประเทศ หากต้องการใช้ประโยชน์จากนวัตกรรมแบบเปิดอย่างเต็มที่และสามารถแข่งขันในระดับนานาชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างในหัวข้อต่อไป จะเป็นการจับคู่เมทริกซ์ของเทคโนโลยีของ สทป. เพื่อทดสอบว่าแนวคิดนวัตกรรมแบบเปิด จะนำไปใช้ได้กับบริบทใดบ้าง

3.2 การวิเคราะห์เชิงระบบด้วยการจับคู่เมทริกซ์โครงการวิจัยและพัฒนาของ สทป.

ในการวิเคราะห์จะใช้การจัดทำเมทริกซ์ 2 มิติ โดยใช้ยุทธโศปกรณ์แต่ละประเภทเป็นแกนทั้งแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการบูรณาการและจับคู่ยุทธโศปกรณ์เหล่านี้ การวิเคราะห์จะพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้ากันได้ของระบบ ขีดความสามารถในการบูรณาการ ข้อจำกัดทางเทคนิค แล้วทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการบูรณาการยุทธโศปกรณ์แต่ละคู่ โดยพิจารณาความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Interoperability) และผลประโยชน์ที่ได้รับจากการผสมผสานเทคโนโลยี

ตารางที่ 2 เป็นการแสดงให้เห็นถึงโอกาสการพัฒนาเทคโนโลยีของโครงการวิจัยและพัฒนาที่มีอยู่ของ สทป. เพื่อตอบสนองทั้งศักยภาพทางขีดความสามารถด้านการทหารและศักยภาพทางธุรกิจ ไปจนถึงการส่งออกได้ ข้อมูลในตารางสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโครงการของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นการเชื่อมโยงเทคโนโลยีที่หลากหลาย เพื่อให้เกิดแพ็คเกจผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถหลากหลายในการใช้งาน เช่น สิ่งที่น่าจะดำเนินการเป็นลำดับแรก เพราะมีโครงการเดียวที่ได้รับการรับรองมาตรฐานไปแล้ว และอยู่ในศักยภาพที่ดำเนินการต่อไปได้ทันที คือ การนำระบบยานเกราะล้อยาง ระบบอากาศยานไร้คนขับ หรือระบบจรวดหลายลำกล้อง มาผสมกันเป็นแพ็คเกจการใช้งานเดียวที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการด้านการป้องกันประเทศได้ครบถ้วน และแม้ว่าขีดความสามารถในการบูรณาการเทคโนโลยีเดี่ยวสำเร็จรูปของ สทป. อาจจะยังเกินขีดความสามารถของบุคลากรภายใน สทป. แต่สามารถใช้แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดเพื่อให้องค์กรภายนอก ไม่ว่าจะเป็นภาคเอกชนหรือสถาบันการศึกษา รั่วภัยวิจัยที่ สทป. ยังไม่สามารถดำเนินการได้ ให้เป็นความจริงขึ้นมาได้ด้วย

ตารางที่ 2 โอกาสการบูรณาการเทคโนโลยีโครงการวิจัยและพัฒนาที่มีอยู่ของ สทป.

โครงการต่างๆ	อากาศยานไร้คนขับ	ยานเกราะล้อยาง	เรือเนกประสงค์เพื่อความมั่นคงทางทะเล	จรวดหลายลำกล้อง DTI-1/DTI-1G/DTI-2
อากาศยานไร้คนขับทั้งปีกตรึง ปีกหมุน และ Hand Launch		สามารถพัฒนาให้ยานเกราะล้อยางแบบต่าง ๆ มีแท่นปล่อย (Launcher) UAV ขณะเดินทางได้ โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [6]	สามารถพัฒนาให้เรือเนกประสงค์สามารถปล่อย (Launch) UAV ในทะเลได้ โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [7]	สามารถขายอากาศยานไร้คนขับพร้อมระบบจรวดเพื่อทดแทนผู้ตรวจการณ์หน้าและทำการชี้เป้าหมายการยิงจรวดด้วยเลเซอร์ [8]
ยานเกราะล้อยาง 8x8 / รถฐานยิง จลก.31 / รถฐานยิงจรวดหลายลำกล้องอนเนกประสงค์			เรือเนกประสงค์บรรทุกรถทางทหารบางชนิดเพื่อลาดตระเวนต่อบนฝั่งได้ เช่น 4x4 หรือ 8x8 เป็นต้น โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [12]	ดำเนินการไปแล้วคือ รถฐานยิง จลก.31 ที่ สทป. ปรับปรุงสามารถติดตั้งจรวด 122 มม. ของ สทป. โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [13]
เรือเนกประสงค์เพื่อความมั่นคงทางทะเล				ติดตั้งจรวด 122 มม. บนเรือเนกประสงค์ของ สทป. ได้ [17]
จรวดหลายลำกล้อง DTI-1 / DTI-1G / DTI-2				
ระบบเครื่องช่วยฝึกและระบบเสมือนจริง				
หุ่นยนต์เก็บกู้				
วัตถุระเบิด				
ปืนเล็กและปืนพก				
WMI กระสุน 30 มม.				
(ปืนเรือและ BTR)				

สีดำ ไม่สามารถดำเนินการได้ เพราะเป็นเทคโนโลยีแบบเดียวกัน	สีแดง ไม่สามารถดำเนินการได้ เพราะไม่สามารถเข้ากันได้	สีเหลือง มีความเป็นไปได้ที่จะดำเนินการได้ โดย สทป. กระทรวงกลาโหม หรือภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศ	สีเขียว ดำเนินการไปแล้ว สำเร็จแล้ว กำลังใช้งานอยู่	สีส้ม มีความเป็นไปได้ที่จะดำเนินการได้ แต่ต้องอาศัยความช่วยเหลือทางเทคนิคหรือการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศบางส่วน
--	--	---	--	--

ระบบเครื่องช่วยฝึกและระบบเสมือนจริง	หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด	ปืนเล็กและปืนพก WMI	กระสุน 30 มม. (ปืนเรือและยานเกราะล้อย่าง)
สามารถจัดทำ Training Simulator สำหรับอากาศยานไร้คนขับ ของ สทป. ได้ โดยขายเป็นแพ็คเกจ [9]	สามารถพัฒนาให้หุ่นยนต์สามารถปล่อย (Launch) UAV ได้ หรือให้อากาศยานไร้คนขับสามารถบรรทุกหุ่นยนต์ในฐานะ Payload โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [10]	สามารถพัฒนาให้อากาศยานไร้คนขับสามารถยิงอาวุธปืนพกหรือปืนเล็กยาวได้ โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [11]	
สามารถจัดทำ Training Simulator สำหรับการขับขี่ยานรบทางบก ของ สทป. ได้ โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [14]	สามารถนำหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดติดตั้งภายในรถยานเกราะล้อย่างเพื่อช่วยปฏิบัติงาน โดยขายเป็นแพ็คเกจได้ [15]		สามารถขายยานเกราะล้อย่างพร้อมกระสุน 30 มม. แบบ 165 โดยขายเป็นแพ็คเกจ [16]
สามารถจัดทำ Training Simulator สำหรับเรือเนกประสงค์ของ สทป. ได้ [18]	สามารถนำหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดติดตั้งภายในเรือเนกประสงค์เพื่อช่วยปฏิบัติงาน [19]		สามารถขายกระสุน 30 มม. แบบ 173 ที่ใช้กับปืนเรือ [20]
สามารถจัดทำ Training Simulator สำหรับรถยิงจรวดแบบต่าง ๆ ของ สทป. ได้ [21]			
	สามารถจัดทำ Training Simulator ของหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดของ สทป. ได้ [22]	สามารถจัดทำ Training Simulator สำหรับปืนเล็กและปืนพกของ WMI ได้ [23]	สามารถจัดทำ Training Simulator สำหรับการยิงกระสุน 30 มม. ได้ [24]
		พัฒนาให้หุ่นยนต์สามารถติดตั้งอาวุธปืนเล็กที่ควบคุมการยิง	

จะเห็นได้ว่า การใช้นวัตกรรมแบบเปิดในกรณีนี้ จะช่วยให้ สทป. สามารถเข้าถึงความรู้จากภายนอกได้อย่างยืดหยุ่น ไม่ว่าจะเป็นจากสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัย หรือพันธมิตรทางธุรกิจ เพื่อเพิ่มความหลากหลายของเทคโนโลยีที่สามารถใช้ในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ การนำเอาแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ยังช่วยให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดได้อย่างรวดเร็ว ลดเวลาและต้นทุนในการพัฒนา ขณะเดียวกันยังช่วยเพิ่มโอกาสในการเข้าสู่ตลาดใหม่ ๆ

นอกจากนี้ การสร้างแพ็คเกจที่มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบทำให้ผลิตภัณฑ์ของ สทป. มีศักยภาพสูง และมีความยืดหยุ่นในการใช้งานในสถานการณ์ต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งตรงกับแนวคิดของนวัตกรรมแบบเปิดที่เน้นการบูรณาการองค์ความรู้จากแหล่งต่าง ๆ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นนวัตกรรม โดยสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และขยายช่องทางการตลาดของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้

3.3 ตัวอย่างโครงการจากการจับคู่เมทริกซ์

บทวิเคราะห์ในข้อ 4.2 ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เมทริกซ์การจับคู่เพื่อสร้างการบูรณาการระหว่างเทคโนโลยีต่าง ๆ ของโครงการต่าง ๆ ใน สทป. โดยเปลี่ยนการพัฒนาแบบแยกส่วนให้เป็นระบบที่ต่อเนื่องและเชื่อมโยงกันอย่างลงตัว การจับคู่เทคโนโลยีนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานในภาคปฏิบัติ ลดความซ้ำซ้อนและปัญหาทางเทคนิค เปิดโอกาสให้กับโจทย์วิจัยใหม่ ๆ โดยเฉพาะการทำหน้าที่เป็น System Integrator เพื่อเชื่อม Standard Platforms ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน การดำเนินการนี้ได้เพิ่มความเร็วในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยแนวคิดนี้ยังช่วยเปิดพื้นที่ให้กับการใช้ทรัพยากรภายนอกและความร่วมมือจากผู้เชี่ยวชาญหลายสาขา ทำให้เกิดการพัฒนาก่อนกรอบเดิม ๆ ซึ่งไม่เพียงแต่ตอบสนองต่อความต้องการในสถานการณ์ปัจจุบัน แต่ยังพร้อมรับมือกับการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างโครงการจากการจับคู่เมทริกซ์โครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศของ สทป.

โครงการบูรณาการ	การใช้งานทางยุทธการและความมั่นคง	ความเป็นไปได้ของโครงการ	เทคโนโลยี/ วิธีการที่ต้องจัดหา/พัฒนา เพื่อบูรณาการจากขีดความสามารถภายใน/นอก สทป.
<p>ยานเกราะล้อยาง/ อากาศยานไร้คนขับ</p> 	<p>ภารกิจลาดตระเวนหาข่าว ภารกิจการเข้าตีที่มั่นคง ตัดแปลงแข็งแกร่ง สามารถใช้กับภารกิจของหน่วยทหารราบพื้นฐานได้</p>	<p>มีความเป็นไปได้สูง ขีดความสามารถภาคเอกชนและภาคการศึกษา มีเพียงพอ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบแคร่หรือแท่นยิง (Mounting System) ที่ออกแบบมาให้ติดตั้ง UAV บนยานเกราะล้อยาง โดยต้องคำนึงถึงการยึดติดที่มั่นคง - ระบบเชื่อมต่อข้อมูลและการสื่อสารระหว่างยานเกราะและ UAV เพื่อให้ข้อมูล Real-Time - ระบบควบคุมการบินอัตโนมัติ (Autonomous Flight Control) เพื่อช่วยให้ UAV สามารถทำงานร่วมกับยานเกราะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างโครงการจากการจับคู่เมทริกซ์โครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศของ สทป. (ต่อ)

โครงการบูรณาการ	การใช้งานทางยุทธการและความมั่นคง	ความเป็นไปได้ของโครงการ	เทคโนโลยี/วิธีการที่ต้องจัดหา/พัฒนา เพื่อบูรณาการจากขีดความสามารถภายใน/นอก สทป.
<p>เรือเนกประสงค์/อากาศยานไร้คนขับ</p> 	<p>ภารกิจลาดตระเวนหาข่าว ภารกิจการค้นหาขอบเขตน้ำมันรั่วกลางทะเล ภารกิจการป้องกันและปราบปรามโจรสลัด และค้นหาผู้ประสบภัยทางทะเลได้</p>	<p>มีความเป็นไปได้สูงขีดความสามารถภาคเอกชนและภาคการศึกษา มีเพียงพอ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - การออกแบบลานจอด UAV ขนาดเล็กบนเรือ รวมถึงขาจับไฟฟ้า (Electrical Landing Gear) ที่สามารถยึดจับ UAV ได้ - ระบบควบคุมการบินและการนำทางของ UAV ที่สามารถใช้งานในทะเลและสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย
<p>อากาศยานไร้คนขับ/หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด</p> 	<p>ภารกิจการเก็บกู้วัตถุระเบิด ที่ต่อระยะการปฏิบัติงานที่เดิมที่เป็นพื้นที่ที่ EOD Robot เข้าไม่ถึง โดยสามารถวางกำลังได้ทุกสนามอุปสรรค ทั้งขาเข้าและขาออก ทั้งยังประหยัดแบตเตอรี่ให้กับ EOD Robot ด้วย</p>	<p>มีความเป็นไปได้ระดับปานกลาง อาจมีความท้าทายบ้างจาก payload ของ UAV ที่รับน้ำหนักได้ไม่มากนัก (เพราะต้องขึ้น-ลง พื้นที่แคบ) ต้องสอดคล้องกับน้ำหนักหุ่นยนต์ ต้อง balance การใช้งานให้ดี</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบควบคุมการวางแผนและการเรียกคืนหุ่นยนต์ผ่าน UAV โดยใช้การส่งงานระยะไกล - กล้องติดตั้งการทำงานของหุ่นยนต์บน UAV
<p>อากาศยานไร้คนขับ/อาวุธปืนประจำกาย</p> 	<p>ภารกิจโดรนติดอาวุธที่แท้จริง ลดการสูญเสียกำลังพลในพื้นที่เสี่ยงภัย ที่โดรนขนาดใหญ่ยากแก่การเข้าถึง เช่น ถนน หรือขอยเล็ก ๆ รวมทั้งสามารถป้องปรามการกระทำผิดกฎหมายได้</p>	<p>มีความเป็นไปได้ระดับปานกลาง ในปัจจุบันอาจจะต้องพึ่งพาเทคโนโลยีบางส่วนผ่านการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - การยิงแต่ละนัด UAV มีแรงสะท้อนถอยหลัง จึงต้องมี stabilizer เพื่อรักษาเสถียรภาพของ UAV สทป. อาจร่วมมือกับ ST Kinetics ที่วิจัยเรื่องนี้สำเร็จแล้วให้ใช้ software นี้ได้ - ระบบเลเซอร์สำหรับช่วยเล็งเป้าหมาย (Laser Targeting System) - ระบบลั่นไกปืน (triggering system)
<p>เรือเนกประสงค์ หรือ ยานเกราะล้อยาง/โครงการจรวด 122 มม.</p> 	<p>ภารกิจโจมตีเรือผิวน้ำและที่มั่นบนบกยกพลขึ้นบก เป็นเรือสะเทินน้ำสะเทินบกไร้คนขับที่ติดตั้งจรวด 122 มม. ของยูเครน ชื่อ Sea baby Uncrewed Surface Vessel (USV) ที่ใช้ในสมรภูมิจริงกับรัสเซียมาแล้ว</p>	<p>มีความเป็นไปได้ปานกลาง เพราะหากติดตั้งจรวด 122 มม. บนเรือขนาดเล็กไร้คนขับก็สามารถลดความกังวลเกี่ยวกับความเสี่ยงของกำลังพลได้</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบแท่นยิงจรวด (Rocket Launcher System) ที่สามารถติดตั้งบนเรือหรือยานเกราะได้ - ระบบนำทางอัตโนมัติสำหรับเรือสะเทินน้ำสะเทินบกเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการยกพลและโจมตี - ระบบควบคุมการยิงระยะไกล (Remote Firing Control System) ที่ปลอดภัยต่อกำลังพล - ระบบ water jets เพื่อความคล่องแคล่วในการเคลื่อนที่ในน้ำ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างโครงการจากการจับคู่เมทริกซ์โครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศของ สทป. (ต่อ)

โครงการบูรณาการ	การใช้งานทางยุทธการและความมั่นคง	ความเป็นไปได้ของโครงการ	เทคโนโลยี/ วิธีการที่ต้องจัดหา/พัฒนา เพื่อบูรณาการจากขีดความสามารถภายใน/นอก สทป.
<p>อากาศยานไร้คนขับ/ระบบ AI (hardware+ software) (เสนอโดย นายธนรัตน์ ธนะสมบูรณ์ STA3)</p> 	<p>ภารกิจทางทหาร, ภารกิจเพื่อมนุษยธรรมเป็นโดรนกล้อง AI ที่ให้ภาพลักษณ์ของทุ่นระเบิดแต่ละแบบก่อน (learning) แล้วจึงไปวางกำลังตรวจจับในสนามทุ่นระเบิดจริง เพื่อลดการเคลียร์สนามทุ่นระเบิดด้วยการใช้คนหรือยานพาหนะที่มีความเสี่ยงและดำเนินการได้ช้ากว่า</p>	<p>มีความเป็นไปได้ปานกลาง ปัจจุบันกล้องติดโดรนถือว่าละเอียดและกำลังสูงที่สูงขึ้น สามารถตรวจจับสนามทุ่นระเบิดในพื้นที่ที่กว้างได้ในระยะเวลาสั้น หลีกเลี่ยงเส้นทางหรือวางแผนการทำลายทุ่นระเบิดได้</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบ Software AI ที่ใช้สามารถใช้ได้หลากหลาย เช่น YOLO (You Only Look Once), Detectron2, TensorFlow Object Detection API อันเป็น software ที่มีใช้ในตลาดทั่วไปอยู่แล้ว - กล้องติดโดรนความละเอียดสูงที่มีระบบซุมและตรวจจับอัตโนมัติ - ระบบการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ที่สามารถจำภาพทุ่นระเบิดและทดสอบในพื้นที่จริง - ระบบฝึกอบรมแบบเสมือนจริง (Virtual Training Environment) เพื่อให้กำลังพลฝึกซ้อม เพราะยังมีการใช้งานที่ยากลำบากและไม่คุ้นเคย
<p>ทุก weapon systems ต้องมี simulation</p> 	<p>ภารกิจเพื่อการเตรียมกำลังพลในการปฏิบัติงานจริง การใช้ simulation ของระบบอาวุธ จะช่วยให้กำลังพลได้มีการปฏิบัติใช้งานมีความเชี่ยวชาญในการปฏิบัติจริง สร้างความประหยัดต่ออัตราการใช้ออมกัณฑ์ในการซ่อมรบ และการฝึกเพื่อแก้ไขข้อขัดข้องในการยิงได้ด้วย</p>	<p>มีความเป็นไปได้สูงมาก เพราะปัจจุบัน สทป. มีขีดความสามารถในการให้บริการเครื่องจำลองยุทธ์ของการยิงอาวุธประจำกายอากาศยานไร้คนขับ และยานรบทางบกแล้ว สทป. สามารถต่อยอดไปยังโครงการเรืออเนกประสงค์โครงการจรวด และอื่นๆ ได้ทันที</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Software ด้านระบบเสมือนจริงที่ สทป. มีใช้งานอยู่แล้ว

ตารางที่ 3 ตัวอย่างโครงการจากการจับคู่เมทริกซ์โครงการเทคโนโลยีป้องกันประเทศของ สทป. (ต่อ)

โครงการบูรณาการ	การใช้งานทางยุทธการและความมั่นคง	ความเป็นไปได้ของโครงการ	เทคโนโลยี/ วิธีการที่ต้องจัดหา/พัฒนา เพื่อบูรณาการจากขีดความสามารถภายใน/นอก สทป.
<p>เรือเนกประสงค์ติดตั้งเครื่องยิงลูกระเบิดขนาด 60 มม./120 มม. ที่หัวเรือ</p> 	<p>ภารกิจปฏิบัติกรตามลำน้ำสามารถอำนาจกำลังยิงของหน่วยรักษาความสงบเรียบร้อยตามลำแม่น้ำโขงหรือ นรข. ที่มีภารกิจป้องกันปราบปรามการกระทำผิดกฎหมาย⁴</p>	<p>มีความเป็นไปได้สูงมาก เพราะเป็นเทคโนโลยีเก่าที่มีใช้มาตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 และสงครามเวียดนามมาแล้ว แต่ยังมีความต้องการการใช้งานอยู่ เพราะชายแดนไทยมีลำน้ำโขงยาวหลายร้อยกิโลเมตร</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมี UAV เพื่อตรวจตำบลกระสุนตกก่อนทำการยิงหวังผล - เครื่องยิงลูกระเบิดต้องเป็นเครื่องยิงลูกระเบิดอัตโนมัติ - แท่นติดตั้งต้องเป็น modular recoil mitigation mount ที่รองรับแรงสะท้อนถอยหลังที่ส่งผลน้อยต่อเสถียรภาพของเรือ - ต้องมีระบบเลเซอร์ช่วยเล็งและระบบวัดระยะด้วย GPS เพื่อความแม่นยำในการยิง - อาจต้องใช้ซอฟต์แวร์ CAD สำหรับการออกแบบแท่นยิงและการวางแผนการติดตั้ง - สามารถบูรณาการผลิตภัณฑ์ของ สทป. (เรือเนกประสงค์) และเครื่องยิงลูกระเบิดขนาด 60 มม. ที่โรงงานของกองทัพบกหรือสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหมมีขีดความสามารถอยู่แล้ว

สีเขียว

มีความเป็นไปได้สูง สามารถดำเนินการได้รวดเร็ว/ขีดความสามารถของ สทป. หรือหน่วยงานในประเทศ มีเพียงพอ/ ใช้งบประมาณไม่มากนัก

สีเหลือง

มีความเป็นไปได้ปานกลาง สามารถดำเนินการได้แบบจำกัดหรือมีเงื่อนไขบ้าง/ อาจจะต้องพึ่งพาการถ่ายทอดเทคโนโลยี หรือความช่วยเหลือทางเทคนิคจากภายนอก/ อาจจะใช้ระยะเวลาที่นาน/ อาจจะใช้งบประมาณที่ในระดับหนึ่งจึงจะดำเนินการได้

⁴ 1. ภาพด้านบน มาจากคู่มือราชการสนามของกองทัพเรือสหรัฐในปี 1945 เรื่อง 60-MM Mortar M2 for Shipboard ที่เดิมเป็นเอกสารปกปิด แต่ปัจจุบันเกิน 50 ปี ได้รับการเปิดเผยสู่สาธารณะแล้ว และในกองทัพบกและกองทัพเรือหลายประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ก็ยังมีเรือที่มีลักษณะเช่นนี้ใช้ปฏิบัติงานอยู่ ส่วนภาพด้านล่าง เป็นเรือ Mortar Vessel ของบริษัท Patria ที่ผลิตเครื่องยิงลูกระเบิดวิถีโค้งที่ยังไกลกว่า 60 มม. ชื่อ Patria NEMO ขนาด 120 มม. ที่เป็นป้อมที่ควบคุมจากระยะไกลเรือนี้เป็นเรือที่ผลิตโดยบริษัท Patria ของประเทศฟินแลนด์ และถูกสั่งซื้อโดยกรมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของสวีเดนเข้าประจำการในกองทัพเรือราชอาณาจักรสวีเดนเมื่อปี 2024 นี้

2. โดยแม้จะดูเหมือนเป็นอาวุธสมัยโบราณ แต่ความต้องการการใช้งานยังมีอยู่อย่างต่อเนื่อง เพราะภัยคุกคามยังไม่ได้เปลี่ยนไปดังรายละเอียดของเรือ Patria NEMO Mortar System ที่กล่าวไปแล้ว

4. บทวิเคราะห์การใช้เทคโนโลยีต่อ ความขัดแย้งในปัจจุบัน: มุมมอง เชิงปริมาณและความได้เปรียบ จากเทคโนโลยีต้นทุนต่ำ⁵

ในบริบทสถานะแวดล้อมของประเทศกำลังพัฒนา ด้วยสถานะแวดล้อมทางวัฒนธรรม ระบบเศรษฐกิจ สังคม และขีดความสามารถทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องที่มีอยู่อย่างจำกัด การประยุกต์ใช้แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิด (Open Innovation) อาจยังทำงานได้ไม่เต็มที่ แม้ว่าจะยังไม่สามารถทำให้เกิดการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่างก้าวกระโดด (Technological Breakthrough) ได้แบบประเทศตะวันตก ที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและขีดความสามารถอย่างต่อเนื่องของตลาดอาวุธตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมา เช่น โครงการเครื่องบินขับไล่รุ่นที่ 5 เรดาร์ทางทหารขั้นสูง จรวดพิสัยข้ามทวีป เรือดำน้ำนิวเคลียร์สมรรถนะสูง หรือแม้กระทั่งระบบพลังงานทางตรง (Directed Energy) ซึ่งการครอบครองเทคโนโลยีขั้นสูงเหล่านี้ ส่วนหนึ่ง เพราะการสร้างขีดความสามารถต่อยอดจากฐานเทคโนโลยีเดิมที่มีเป็นระยะเวลายาวนาน การนำแนวคิดนี้ มาใช้จึงมีความเฉพาะตัวด้านบริบททางประวัติศาสตร์

ที่ต่างกันด้วย แต่ข้อจำกัดเชิงคุณภาพดังกล่าว ไม่ใช่เหตุผลที่วันนี้จะไม่ดำเนินการใด ๆ ด้านนวัตกรรมแบบเปิดเลย ดังนั้น ในวันนี้จะนำเสนอแนวทางที่ควรพิจารณาการใช้งานในบริบทประเทศที่มีขีดความสามารถระดับกลางน่าจะดำเนินการได้

การกล่าวว่า เทคโนโลยีทางทหารที่เหนือกว่า หรือคุณลักษณะเชิงคุณภาพที่เหนือกว่า ถือเป็น การประกันความได้เปรียบและชัยชนะในการทำสงครามได้มากกว่าการครอบครองเทคโนโลยีทางทหารที่ต่ำกว่า ตามหลักการและเหตุผลทั่วไปแล้วอาจไม่มีผิดนัก แต่เมื่อพิจารณาสถานการณ์การใช้งานทางทหารในพื้นที่ขัดแย้งในปี ค.ศ. 2024 คำตอบอาจไม่ตรงไปตรงมาเท่าที่คาดไว้ เพราะมีข้อพิจารณาทางปริมาณ ข้อพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ ห้วงระยะเวลาที่เข้ามาเกี่ยวข้อง และ “ความเหนือกว่าของเทคโนโลยีที่ต่ำกว่า” หรือ Low Technology Supremacy⁶ ดังเหตุผลต่อไปนี้

แม้ว่าเทคโนโลยีทางทหารในปัจจุบันจะยังคงใช้อาวุธที่มีเทคโนโลยีขั้นสูง แต่ความขัดแย้งในปัจจุบันส่วนใหญ่ไม่ได้จบลงในระยะเวลา 5-7 วัน เหมือนในอดีต เพราะแม้แต่ประเทศที่เหนือกว่าทางทหารก็ยังคงใช้หลักการออมกำลัง (Economy of Force) หรือสงวนไว้ซึ่งยุทธโศปกรณ์ราคาสูงไม่ให้ถูกทำลาย ไม่ให้ถูกแย่งชิง

⁵ การพิจารณากำลังเปรียบเทียบด้วยคุณลักษณะเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเป็นแนวคิดที่มาจาก Samuel Huntington คุณลักษณะเชิงปริมาณหมายถึง การขยายจำนวนกำลังทหารและยุทธโศปกรณ์ที่มีอยู่ โดยมาจากการใช้ขีดความสามารถทางเศรษฐกิจ สังคม การเมือง เพื่อแปรเปลี่ยนจัดสรรทรัพยากรจากภาคพลเรือนไปสู่ภาคการทหาร ส่วนคุณลักษณะเชิงคุณภาพนั้น หมายถึง การปลดระวางยุทธโศปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว แทนที่ด้วยกำลังทหารและยุทธโศปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีที่ทันสมัย และมีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นการพัฒนาขีดความสามารถที่มีความเร่งรีบและต่อเนื่องเพื่อความเหนือกว่าทางเทคโนโลยี ไม่นับการที่มีอาวุธที่มากกว่า เน้นอาวุธที่คุณภาพดีกว่า สามารถศึกษารายละเอียดได้จาก บดินทร์ สันทัด (2559). ปรากฏการณ์การแข่งขันสะสมอาวุธในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้: กรณีศึกษา ประเทศมาเลเซีย สิงคโปร์ อินโดนีเซีย (ดุขนิพนธ์ปรัชญาดุขบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

⁶ Brown, E. (2020, September 18). Low-tech supremacy in high-tech warfare. Diplomatic Courier. <https://www.diplomaticcourier.com/posts/low-tech-supremacy-in-high-tech-warfare> บทความนี้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของทหารในหน่วยปฏิบัติการพิเศษที่ต้องการเรียกร้องให้มีการพิจารณาความสำคัญของการรักษาความสามารถในการปฏิบัติการในสภาพแวดล้อมที่ถูกจำกัดทางเทคโนโลยี ที่แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารและการควบคุมที่ทันสมัย เช่น ระบบ Advanced Battle Management System (ABMS) แต่บทความชี้ให้เห็นว่าการพึ่งพาเทคโนโลยีมากเกินไปอาจเป็นจุดอ่อนในสถานการณ์ที่เทคโนโลยีล้มเหลว ดังนั้น ทหารหน่วยรบพิเศษ ไม่สามารถละเลยการปฏิบัติการใช้งานทางทหารขั้นพื้นฐาน และควรฝึกฝนและเตรียมพร้อมสำหรับการปฏิบัติการในสภาพแวดล้อมที่ถูกจำกัดทางเทคโนโลยี เพื่อให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ในสถานการณ์ที่เทคโนโลยีไม่สามารถใช้งานได้

ในสนามรบเพื่อไปศึกษาออกแบบ ด้วยประเทศที่ด้อยกว่า หรือกองทัพใช้งานยุทธโประกรณ์ราคาต่ำกว่าอย่างไม่คุ้มค่า ซึ่งหมายความว่า ความขัดแย้งในยุคนี้มีองค์ประกอบของการปะทะกันระหว่างเทคโนโลยีขั้นพื้นฐานที่อาจยึดเยื่อเป็นเดือนหรือหลายปีได้ และสิ่งที่กลายเป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่สำคัญ ที่อาจชิงความเด็ดขาดของสงครามยึดเยื่อ คือ คุณลักษณะเชิงปริมาณที่เกี่ยวข้องกับราคาต่อหน่วยของยุทธโประกรณ์ ที่ต้องกดให้ต่ำที่สุด สายการผลิตต้องยาวนานที่สุด ส่งกำลังบำรุงง่ายที่สุด คงคลังสำรองมากที่สุด ซ่อมบำรุงง่ายที่สุด และยุทธโประกรณ์นั้นพร้อมที่จะเสียหายหรือสิ้นเปลืองมากที่สุด โดยเสียความมั่นคงน้อยที่สุด โดยไม่ต้องมีเทคโนโลยีขั้นสูงที่สุด หรือไม่ต้องแข็งแกร่งทนทานจากการใช้งานมากที่สุด เพื่อให้แต่ละฝ่ายสามารถใช้งานอาวุธขั้นพื้นฐานเหล่านั้นได้อย่างยาวนาน และเมื่อฝ่ายใดหมดกำลัง หรือหมดทรัพยากรก่อน หรือแลงไม่คุ้มที่จะเสีย ฝ่ายนั้นจะพ่ายแพ้ไปในที่สุด

ในสภาวะปัจจุบันนี้ ยุทธโประกรณ์ทางทหาร เช่น จรวดต่อสู้อากาศยาน (Anti-Tank Guided Missiles) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีมานานแล้ว แต่ราคาถูกกว่ารถถังหลัก 1 คัน และอาวุธต่อสู้อากาศยาน สามารถฝึกใช้งานโดยใครก็ได้ภายใน 30 นาที รถถังหลักก็ถูกรั้งหน่วงด้วยจรวดต่อสู้อากาศยานที่ราคาต่ำกว่าหลายร้อยเท่า อาวุธที่ด้อยกว่า แต่จำนวนมากกว่านี้ กลับกลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเดินทัพทางบกของรถถังหลักของประเทศมหาอำนาจต้องหยุดชะงัก เนื่องจากรถถังกลายเป็น "เป้าหมายที่มีมูลค่าสูง" (High Valued Targets) ที่เสี่ยงต่อการถูกทำลายได้ง่าย ประเทศมหาอำนาจต้องออกมาล่าช้า เมื่อรถถังหลักไม่สามารถใช้ในการปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประเทศมหาอำนาจจึงจำเป็นต้องหันมาใช้ทหารราบเดินเท้าแทน ซึ่งเป็นยุทธศาสตร์ที่ช่วยประหยัดกำลังและทรัพยากร แต่การเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์นี้ก็ยังไม่สามารถสร้างความได้เปรียบได้อย่างเต็มที่ เพราะทหารราบเดินเท้าก็ต้องเผชิญกับ อากาศยานไร้คนขับ

(UAV) ซึ่งมีราคาถูกและสามารถทิ้งระเบิดราคาถูกได้ ทำให้เกิดอำนาจการทำลายล้างสูงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องใช้ทรัพยากรหรือกำลังทหารจำนวนมาก การทิ้งระเบิดจาก UAV ทำให้ทหารราบเดินเท้าต้องหยุดชะงัก นำมาซึ่งความยึดเยื่อที่น่าหวาดกลัว

ด้วยเหตุนี้ ความขัดแย้งที่ยึดเยื่อในยุคปัจจุบันจึงไม่สามารถวัดผลเชิงคุณภาพ ว่าฝ่ายใดมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่สุดหรือมีกำลังทหารที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเพียงอย่างเดียว ในสงครามมีบริบทเชิงคุณภาพมาเกี่ยวข้องมากกว่าที่คิด โดยอาจจะวัดจากฝ่ายที่สามารถครอบครองยุทธโประกรณ์ที่มีราคาต่อหน่วยต่ำ และมีคงคลังมากพอที่จะสามารถใช้งานได้อย่างยาวนานกว่าฝ่ายตรงข้าม ฝ่ายที่สามารถรักษาความได้เปรียบนี้ได้ จะมีโอกาสชนะในสงครามครั้งนั้น รวมทั้งอาจเป็นเรื่องของการใช้เทคโนโลยีราคาถูกมาสร้างความปั่นป่วนทางจิตวิทยา สร้างความสับสน วิดกกังวล กดดันทางการเมืองและสร้างความหวาดหวั่นต่อประชาชนให้แก่ประเทศมหาอำนาจได้ โดยที่จรวดยุทธศาสตร์ข้ามทวีปไม่สามารถทำอะไรได้ เช่น การใช้อากาศยานไร้คนขับมาบินในเมืองหลวงที่ไม่มีใครคาดคิด เป็นต้น

จะเห็นได้ว่า การประยุกต์ใช้ นวัตกรรมแบบเปิดเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยให้ประเทศที่มีทรัพยากรจำกัดสามารถพัฒนาอาวุธราคาถูก แต่มีประสิทธิภาพ ในการตอบโต้ในสงครามที่ใช้เวลายึดเยื่อ เช่น อากาศยานไร้คนขับแบบประสมค์ จรวดต่อสู้อากาศยานขนาดกลาง เรือติดเครื่องยิงลูกระเบิดหรือจรวด และอาวุธราคาถูกอื่น ๆ ที่สร้างมาจากความคิดสร้างสรรค์จากสิ่งที่มีอยู่เดิม อันเป็นขีดความสามารถที่ประเทศเพื่อนบ้านอาจจะไม่มีในครอบครอง หรือไม่รู้ว่ฝ่ายเราจะมียาก่อน ถือเป็น การสร้าง Element of Surprises ที่ไม่สามารถคาดเดา และฝ่ายตรงข้ามไม่มีหลักนิยามการต่อสู้อาวุธรับภัยคุกคามจากการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มาก่อน การใช้นวัตกรรมแบบเปิดไม่จำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีขั้นสูงหรืออาวุธราคาแพง

เทคโนโลยีเหล่านี้สามารถสร้างความเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต ในขณะที่ยังคงสร้างผลกระทบต่อทั้งในทางทหารและทางจิตวิทยาได้ด้วย ถือเป็นการใช้ กลยุทธ์สงครามอสมมาตร ที่ยังช่วยให้ ก่อทวนหรือสร้างความสับสนให้กับฝ่ายตรงข้าม โดยที่ ฝ่ายนั้นไม่สามารถตอบโต้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ ทำให้ความยืดหยุ่นของสงคราม กลายเป็นประโยชน์ ในการรักษาความได้เปรียบในระยะยาว

5. ประโยชน์ของข้อเสนอนวัตกรรมแบบเปิด ที่มีต่อโครงการวิจัยและพัฒนาของ สทป.

โครงการวิจัยและพัฒนาของ สทป. ที่ส่วนใหญ่ ดำเนินการแบบแยกโครงการเดี่ยวที่ละโครงการ สามารถได้รับการยกระดับขนานใหญ่ ด้วยการใช้นวัตกรรมแบบเปิดนี้ได้ เนื่องจากแนวคิดนี้เน้น การผสมผสานความรู้และทรัพยากรจากแหล่งภายนอก เข้ากับการพัฒนาภายในแห่งโครงการที่แยกเดี่ยว ซึ่งเป็นแนวทางที่มีประโยชน์อย่างมาก เพราะจะสร้าง คุณค่าดังต่อไปนี้

1. การผนวกรวมเทคโนโลยี (Technology Integration) ช่วยให้ สทป. สามารถผนวกเทคโนโลยี ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ในรูปแบบแพ็คเกจ ที่สามารถใช้งานในหลายภารกิจ เช่น การผสมผสานระบบ UAV (ยานพาหนะไร้คนขับ) เข้ากับยานเกราะล้อยาง หรือเรือเนกประสงค์ หรือการพัฒนาระบบจรวด ที่สามารถติดตั้งบนแพลตฟอร์มอื่น ๆ ได้ ซึ่งการรวม เทคโนโลยีเช่นนี้จะเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และสร้างความยืดหยุ่นในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า

2. การบริหารทรัพย์สินทางปัญญา (Intellectual Property) อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะนวัตกรรมแบบ เปิดให้ความสำคัญกับ IP เป็นอย่างมาก โดยเน้นให้ IP ไม่ใช่เพียงแค่เครื่องมือในการป้องกันคู่แข่ง แต่ยังสามารถ ใช้เป็นทรัพยากรเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม สทป. สามารถนำ IP ที่ไม่ได้ใช้ภายในองค์กรไปนำเสนอแก่บริษัทหรือ

องค์กรอื่น ๆ ผ่านการอนุญาตให้ใช้สิทธิ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่ม รายได้และเปิดโอกาสในการจับมือกับพันธมิตร ทางเทคโนโลยี โดยเฉพาะเมื่อการบูรณาการเทคโนโลยี เกิดขึ้น เรียกได้ว่า มี IP ใหม่เกิดขึ้น เป็นการยกระดับ โอกาสทางการตลาดให้สูงขึ้น จะทำให้ลิขสิทธิ์ทางปัญญา มีมูลค่าเพิ่มตามปริมาณการขายทันที

3. การลดการทำงานแบบไซโล (Silo) นวัตกรรมแบบเปิดช่วยลดปัญหาการทำงานแยกส่วนหรือไซโล โดยส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้และการทำงาน ร่วมกันระหว่างโครงการต่าง ๆ การบูรณาการเทคโนโลยี ต่าง ๆ เข้าด้วยกันจะช่วยให้แต่ละหน่วยงานในสถาบัน เทคโนโลยีป้องกันประเทศสามารถใช้ประโยชน์ จากทรัพยากรที่มีอยู่ได้อย่างเต็มที่ ลดความซ้ำซ้อน ในการพัฒนา และสร้างสรรค์นวัตกรรมที่ตอบสนองต่อ ความต้องการของลูกค้าได้ดีขึ้น

6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้กล่าวถึงการนำแนวคิดนวัตกรรมแบบเปิด (Open Innovation) มาใช้ในโครงการวิจัย และพัฒนาของ สทป. โดยยึดหลักการของ Professor Henry Chesbrough ซึ่งมุ่งเน้นให้เกิดการแลกเปลี่ยน ความรู้ทั้งจากภายในและภายนอกองค์กร แตกต่าง จากนวัตกรรมแบบไซโลที่เน้นการพัฒนาเฉพาะภายใน และขาดการบูรณาการระหว่างหน่วยงาน แนวคิด นวัตกรรมแบบเปิดนี้ทำให้ สทป. สามารถผสมผสาน ความรู้จากโครงการต่าง ๆ รวมทั้งขยายขีดความสามารถ ในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่หลากหลายได้ แม้ว่าในบางกรณี สทป. อาจต้องพึ่งพาความร่วมมือ จากหน่วยงานภายนอกหรือพันธมิตรต่างประเทศที่มี เทคโนโลยีที่พัฒนาสำเร็จแล้ว ซึ่งจะช่วยให้ สทป. สามารถ ต่อยอดและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ แนวคิดนี้ยังช่วยให้ สทป. บริหาร จัดการทรัพย์สินทางปัญญา (IP) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมีความแตกต่างจาก

ภาคเอกชนในประเทศอย่างชัดเจน เช่น บริษัทเอกชนที่ผลิตยานเกราะล้อภายในประเทศยังไม่สามารถติดตั้งระบบอาวุธหรือระบบ UAV ได้ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนกว่าทำให้ สทป. สามารถใช้ IP เป็นเครื่องมือในการสร้างรายได้และเปิดโอกาสในการร่วมมือกับพันธมิตรในอนาคต

ในขณะเดียวกัน สทป. ยังสามารถสนับสนุนให้บริษัทเอกชนร่วมมือกันบูรณาการเทคโนโลยี โดย สทป. จะเข้ามามีบทบาทในการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถรวมอุปกรณ์ทางยุทธโธปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างความสามารถทางเทคโนโลยีของภาคเอกชน และเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ในประเทศ

การนำแนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดมาใช้ในโครงการของ สทป. ยังช่วยลดปัญหาการทำงานแบบแยกส่วน (ไซโล) โดยส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความรู้ และทรัพยากรระหว่างหน่วยงาน ช่วยให้สามารถพัฒนาอาวุธที่มีต้นทุนต่ำ แต่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ในสถานการณ์สงครามที่ยืดเยื้อ หรือภายใต้แนวคิด Low Technology Supremacy นอกจากนี้ แนวทางนี้ยังช่วยให้ สทป. สามารถบูรณาการเทคโนโลยีที่มีอยู่เข้าด้วยกันอย่างยืดหยุ่น เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายรองรับทั้งตลาดการป้องกันประเทศและการส่งออก

โดยรวมแล้วการประยุกต์ใช้แนวคิดนวัตกรรมแบบเปิดใน สทป. ช่วยลดความซ้ำซ้อน เพิ่มการมีส่วนร่วมและการเชื่อมโยงความรู้ภายในองค์กร ทำให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้าได้ดีขึ้น พร้อมทั้งเปิดช่องทางใหม่ ๆ สำหรับการขยายตลาดและการส่งออกยุทธโธปกรณ์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทยในเวทีโลก

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. W. Chesbrough, *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Boston, MA, USA: Harvard Business School Press, 2003.
- [2] J. N. Cummings, S. J. Dokko, and E. E. Zuckerman, "Open innovation in U.S. defense research: The causal impact of bottom-up reforms," National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, USA, Working Paper 28700, May 2021. [Online]. Available: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w28700/w28700.pdf
- [3] A. Guillou, "Open innovation in the defence sector," Institut de Relations Internationales et Stratégiques (IRIS), Paris, France, ARES Rep. 60, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2020/07/ARES-60.pdf>
- [4] R. James, "Closing the innovation performance gap: Open innovation in military bureaucracies," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 66, no. 3, pp. 116-136, May 2024. [Online]. Available: <https://cmr.berkeley.edu/2024/05/66-3-closing-the-innovation-performance-gap-open-innovation-in-military-bureaucracies/>
- [5] J. Edwards, "Leading innovation in defense: The transformation from closed defense industrial bases to open innovation ecosystems," *Airpower J.*, Apr. 2024. [Online]. Available: theairpowerjournal.com

- [6] “The Army is testing arming its light tactical vehicles with drones,” *The War Zone (TWZ)*, May 14, 2021. [Online]. Available: www.twz.com
- [7] “Enabling drone operations on small boats,” *sUAS News*, Mar. 17, 2021. [Online]. Available: www.suasnews.com
- [8] “Shift in allocating UAS can increase the sensor-to-shooter lethality,” U.S. Army, Fort Novosel, AL, USA, White Paper, Jan. 2023. [Online]. Available: api.army.mil
- [9] “ยานเกราะล้อกะทะ (Steel Wheel Armored Vehicle),” Defence Technology Institute (DTI), 2023. [Online]. Available: www.dti.or.th
- [10] “First-ever flying robot UGV launched,” *Joint Forces News*, Mar. 8, 2022. [Online]. Available: www.joint-forces.com
- [11] “DTI mock-up tank driver simulator,” Defence Technology Institute (DTI) Facebook Page, Jul. 20, 2017. [Online Video]. Available: www.facebook.com. Accessed: Jan. 29, 2026.
- [12] M. Eckstein, “Navy officials reveal details of new \$100M light amphibious warship concept,” *USNI News*, Nov. 19, 2020. [Online]. Available: <https://news.usni.org/2020/11/19/navy-officials-reveal-details-of-new-100m-light-amphibious-warship-concept>
- [13] “DTI virtual reality training system,” Defence Technology Institute (DTI), 2023. [Online]. Available: www.dti.or.th
- [14] “DTI mock-up tank driver simulator,” Defence Technology Institute (DTI) Facebook Page, Jul. 20, 2017. [Online Video]. Available: www.facebook.com. Accessed: Jan. 29, 2026.
- [15] “EOD vehicles,” HOS Technology R&D LTD., 2020. [Online]. Available: <https://www.hosrnd.com/eod-vehicles/>
- [16] “RTN BTR-3E1,” *Thai Defense News*, Feb. 2, 2017. [Online]. Available: <https://thaidefense-news.blogspot.com/2017/02/rtn-btr-3e1.html>
- [17] “Ukrainian ‘Sea Baby’ USV fitted with 122 mm Grad rocket launchers,” *Defense Mirror*, May 22, 2024. [Online]. Available: www.defensemirror.com
- [18] Naval Education Department, Royal Thai Navy. [Online]. Available: rtnakm.com. Accessed: Jan. 29, 2026.
- [19] “Naval combat simulation,” YouTube, May 22, 2017. [Online Video]. Available: www.youtube.com
- [20] *Manual for 60-mm Mortar M2 for Shipboard*, Naval Ordnance Department, Royal Thai Navy, 2019. [Online]. Available: www.ordn.navy.mi.th
- [21] I. H. Baig, “Marines’ new mortar rocket simulator delivers training with no blast,” *Marine Corps Times*, Aug. 28, 2024. [Online]. Available: www.marinecorpstimes.com
- [22] “Simulation of EOD disposal robots such as the PackBot and TALON,” CM Labs Simulations, 2024. [Online Video]. Available: www.cm-labs.com

- [23] “Weapon training simulator system (ระบบเครื่องช่วยฝึกอาวุธ),” *Defence Technology Journal (DTI)*, 2023. [Online]. Available: <https://www.dtechjournal.tech/>
- [24] “Automatic 30mm artillery test (การทดสอบยิงกระสุนปืนใหญ่อัตโนมัติขนาด 30 มม.),” Defence Technology Institute (DTI) Facebook Page, Dec. 24, 2016. [Online Video]. Available: www.facebook.com
- [25] “Naval training and simulation,” YouTube, Nov. 15, 2012. [Online Video]. Available: www.youtube.com

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน (Performance Ratio) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลางในช่วงระยะเวลา 6 เดือน

สันติภาพ สุขสวัสดิ์^{1*}, ดุสิต งามรุ่งโรจน์¹ และ ปรีดา จันทวงษ์¹

วันที่รับ 2 พฤษภาคม 2568 วันที่แก้ไข 9 กรกฎาคม 2568 วันตอบรับ 15 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน (Performance Ratio: PR) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลาง โดยอาศัยข้อมูลจริงย้อนหลัง 6 เดือน ระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 จากศูนย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าจังหวัดอุดรธานี ซึ่งเป็นระบบขนาด 358.80 kWp การวิเคราะห์ดำเนินการโดยคำนวณค่า PR ที่ปรับตามสภาพอากาศจริง (PRact) รายวันจากข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบ (Energy to Grid) และปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ และนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์แนวโน้มรายเดือน ผลการวิจัยพบว่าค่า PRact เฉลี่ยในแต่ละเดือนอยู่ระหว่างประมาณ 72.4% ถึง 81.2% โดยเดือนที่มีค่าต่ำที่สุดคือเดือนกุมภาพันธ์ และมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนภายหลังการล้างแผงในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 แสดงให้เห็นว่าความสะอาดของแผงมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรมจำลอง PVsyst ซึ่งให้ค่า PR จำลองเฉลี่ยเท่ากับ 81.11% พบว่าระบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะช่วงต้นการเก็บข้อมูล ข้อมูลจากการวิจัยสามารถนำไปใช้สนับสนุนการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการประเมินสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, ดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน, การวิเคราะห์เชิงเวลา

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลังวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, บริษัท มณฑา ชิสเท็ม จำกัด

* ผู้แต่ง, อีเมล: santipap.mondha@gmail.com

An Analysis of Factors Affecting the Variation of Performance Ratio in a Medium-Scale Solar Photovoltaic System Over a Six-Month Period

Santipap Suksavut^{1*,2} Dusit Ngamrunroj¹ and Preeda Chantawong¹

Received 2 May 2025, Revised 9 July 2025, Accepted 15 August 2025

Abstract

This research aims to analyze the performance ratio (PR) of a utility-scale solar photovoltaic system based on six months of operational data collected from October 2024 to March 2025. The study utilized actual field data from a 358.80 kWp PV system at the power distribution center in Udon Thani, Thailand. The daily weather-corrected performance ratio (PR_{act}) was calculated using the energy injected into the grid (E_{grid}) and global solar irradiation (H_i). The results were then analyzed for monthly trends. The findings revealed that the average PR_{act} ranged from approximately 72.4% to 81.2% across the observed months, with the lowest value in February. A significant improvement in PR_{act} was observed after a panel cleaning event on February 24, 2025, indicating that soiling had a substantial impact on system efficiency. When compared with the PVsyst simulation, which estimated an average PR of 81.11%, the actual values were closely aligned during certain periods, particularly in the early stages of the observation. These results suggest that ongoing PR monitoring, combined with appropriate maintenance strategies, can enhance system reliability and support long-term performance evaluation of utility-scale solar PV systems.

Keywords: Solar photovoltaic system, Performance ratio, Seasonal performance analysis

¹ Department of Energy Engineering Technology, Division of Prime Mover Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Research and Development Division, Mondha System Co., Ltd.

* Corresponding author, E-mail: santipap.mondha@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนถือเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์สำคัญที่ช่วยเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่มีศักยภาพสูง เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าในระดับอุตสาหกรรม และได้รับการส่งเสริมจากภาครัฐทั่วโลก โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา [1] – [2] ประเทศไทยเองก็มีศักยภาพรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีอยู่ในเกณฑ์สูง โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [3]

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลางจำเป็นต้องอาศัยการออกแบบที่เหมาะสม การจำลองทางเทคนิค และการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในส่วนของ การติดตามและประเมินค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน (Performance Ratio: PR) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสากลที่ใช้ประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมจริง [4] PR ยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบต่าง ๆ ได้อย่างมีมาตรฐาน โดยไม่ขึ้นกับขนาดหรือสภาพอากาศของพื้นที่ติดตั้ง [5]

ในเชิงการออกแบบระบบ โปรแกรม PVsyst เป็นเครื่องมือจำลองที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสามารถประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานได้จากข้อมูลภูมิอากาศ ทิศทางและมุมเอียงของแผง ตลอดจนการสูญเสียในระบบ [6] ผลจากการจำลองด้วย PVsyst มักใช้เป็น “ค่ามาตรฐาน” สำหรับเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงเพื่อระบุประสิทธิภาพที่ลดลง หรือความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบจริง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าดัชนี PR ที่ได้จากข้อมูลภาคสนามของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 kWp ณ จังหวัดอุดรธานี เป็นระยะเวลา 6 เดือน และนำมาเปรียบเทียบกับค่าจำลองที่ได้จากโปรแกรม PVsyst เพื่อประเมินแนวโน้มของสมรรถนะจริง และวิเคราะห์ความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น อันจะช่วยสนับสนุนแนวทางการวางแผนบำรุง

รักษา และการประเมินความมั่นคงของระบบพลังงานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data Analysis) จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลาง ณ ศูนย์จ่ายพลังงานของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี โดยทำการเก็บข้อมูลย้อนหลังเป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568

ระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบโซลาร์เซลล์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline Silicon) ขนาดกำลังการติดตั้งรวม 358.80 kWp ติดตั้งในลักษณะแบบคงที่ (fixed tilt) โดยมีมุมเอียงและทิศทางเหมาะสมต่อพื้นที่จังหวัดอุดรธานี ระบบใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด String Inverter ยี่ห้อ Huawei รุ่น SUN2000-50KTL-M3 ขนาดรวม 300 kWAC โดยเชื่อมต่อแบบ On-Grid ทั้งนี้ ไม่มีระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Storage) และมีการดำเนินการล้างแผงโซลาร์เซลล์ตามแผนบำรุงรักษา โดยเฉพาะในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าดัชนีประสิทธิภาพ

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายวัน (Energy to Grid) หน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) และค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันบนระนาบของแผง (Global Irradiation) หน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร (kWh/m²) โดยวัดจากเซนเซอร์ pyranometer ที่ติดตั้งร่วมกับแผงข้อมูลทั้งหมดบันทึกผ่านระบบ FusionSolar Monitoring และนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

การคำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงานตามสภาพอากาศจริงรายวัน (Performance Ratio: PRact) ใช้สมการที่ได้รับการอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 61724-1:2017 [4] และแนวทางจากงานวิจัยของ Müller และคณะ [5] และ Audouin และคณะ [6] ดังสมการ (1)

$$(PR_{act}) = \frac{\sum E_{grid}}{\frac{P_0}{G_{ref}} \sum_i [H_i \times (1 + \frac{\beta}{100} (T_{meas,i} - T_{mod}))]} \quad (1)$$

เมื่อ

PR_{act} คือ ดัชนีประสิทธิภาพการทำงานที่ปรับตามสภาพอากาศจริง

E_{grid} คือ พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสุทธิที่ผลิตจากระบบ PV (kWh) ที่วัดจริงจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ารุ่น UMG511 ที่ตู้ Monitoring (บันทึกผ่านระบบ Fusion Solar Application)

H_i คือ ปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ (kWh/m²)

P_0 คือ กำลังไฟฟ้ากระแสตรงของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งทั้งหมดที่สภาวะอ้างอิงตามมาตรฐาน (kW)

G_{ref} คือ ปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ที่สภาวะอ้างอิงตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบ (1kW/m²)

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์ตามผู้ผลิตแนะนำ (- 0.30%/°C)

T_{mod} คือ อุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์เฉลี่ยน้ำหนักตามปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ตลอดทั้งปีจาก PVsyst (51.41 °C)

$T_{meas,i}$ คือ อุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์เฉลี่ยน้ำหนักตามปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องใช้ในการคำนวณเป็นข้อมูลจากทุกวันในช่วงเวลา 10.00 - 14.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลา

ที่ระบบผลิตไฟฟ้าทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ข้อมูลรายวันของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบและค่ารังสีแสงอาทิตย์ เพื่อนำมาคำนวณค่า PR_{act} รายวัน แล้วสรุปเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน จากนั้นวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 6 เดือน และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ซึ่งใช้ข้อมูลอุณหภูมิมิถุนายนเฉลี่ยระยะยาว (Typical Meteorological Year: TMY) เป็นเกณฑ์อ้างอิง

3. ผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงานตามสภาพอากาศจริง (Performance Ratio: PR_{act}) รายวันของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 กิโลวัตต์พีค (kWp) จากข้อมูลจริงในช่วงเดือนตุลาคม 2567 ถึงเดือนมีนาคม 2568 รวมระยะเวลา 6 เดือน พร้อมเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม PVsyst ซึ่งให้ค่า PR จำลองเฉลี่ยเท่ากับ 81.11% โดยนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละวันมาสรุปเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน พร้อมวิเคราะห์แนวโน้มและความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา

3.1 ค่าดัชนี PR_{act} รายเดือน

ผลการคำนวณค่า PR_{act} รายวันของแต่ละเดือนถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยรายเดือน แล้วแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเปรียบเทียบกับค่า PR จำลองจาก PVsyst พบว่าเดือนตุลาคมมีค่า PR_{act} เฉลี่ยใกล้เคียงที่สุดกับค่าจำลอง (81.2%) ขณะที่เดือนกุมภาพันธ์มีค่าต่ำที่สุดที่ 72.4% โดยพบว่าหลังจากการล้างแผงในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ย PRact รายเดือนเทียบกับค่า PR จำลอง (PVsyst Reference) ตลอดช่วงเดือนตุลาคม 2567 ถึงเดือนมีนาคม 2568

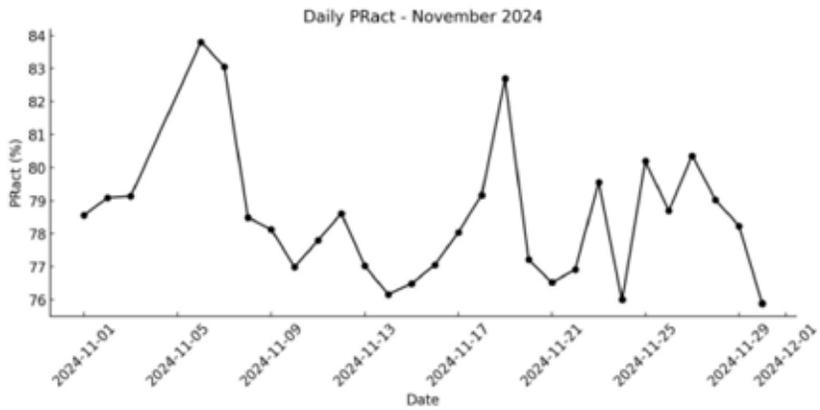
3.2 ค่าดัชนี PRact รายวัน

รูปที่ 2 ถึงรูปที่ 7 แสดงแนวโน้มค่าดัชนี PRact รายวันในแต่ละเดือน ซึ่งพบความแปรปรวนขึ้นลง โดยเฉพาะในเดือนที่มีฝนตกต่อเนื่องหรือท้องฟ้ามีเมฆมาก ค่าดัชนี PRact จะลดลงอย่างชัดเจน ขณะที่เดือนที่มีสภาพอากาศแจ่มใส ค่าดัชนีจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยทั้งเดือนประมาณ 81.2% เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2567 ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยทั้งเดือนประมาณ 78.5% เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยทั้งเดือนประมาณ

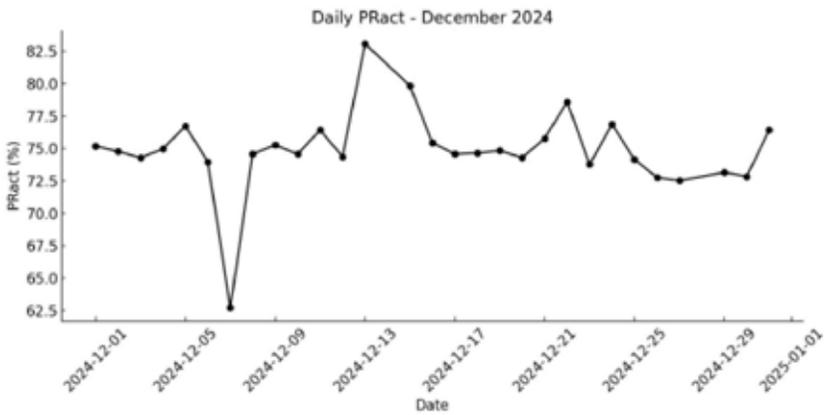
75.4% เดือนมกราคม พ.ศ. 2568 ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยทั้งเดือนประมาณ 73.6% เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยทั้งเดือนประมาณ 72.4% โดยมีค่าต่ำกว่า 70% ในช่วงก่อนวันที่ 24 กุมภาพันธ์ เนื่องจากมีฝนตกติดต่อกันหลายวัน เดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยทั้งเดือนประมาณ 76.1% จากผลการวิเคราะห์ พบว่า แนวโน้มค่าดัชนี PRact อยู่ในช่วง 72 - 81% โดยมีความสัมพันธ์กับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเดือน โดยเฉพาะฝนตกและเมฆมาก ซึ่งส่งผลให้ค่าดัชนีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



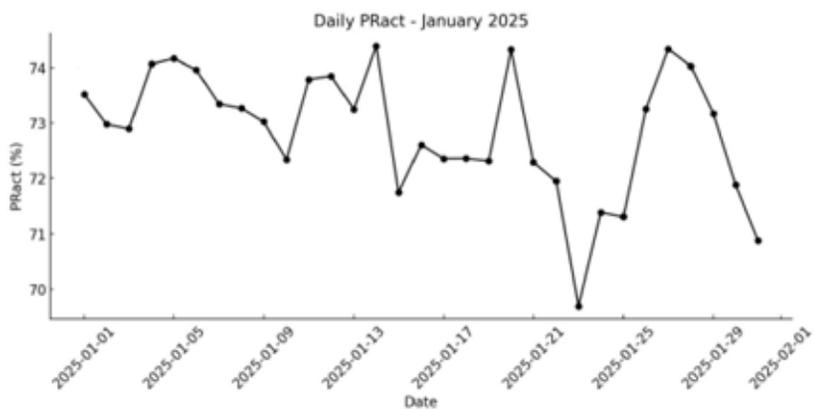
รูปที่ 2 เดือนตุลาคม มีค่า PRact สม่าเสมอและใกล้เคียงค่าจำลองมากที่สุด



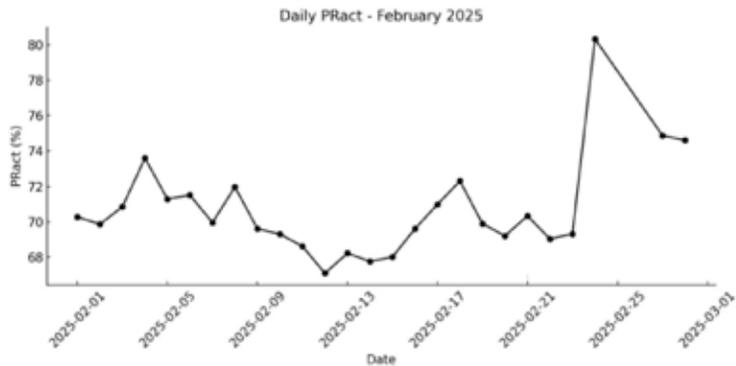
รูปที่ 3 เดือนพฤศจิกายน มีแนวโน้มลดลงในช่วงกลางเดือน และค่อนข้างแปรปรวนในปลายเดือน



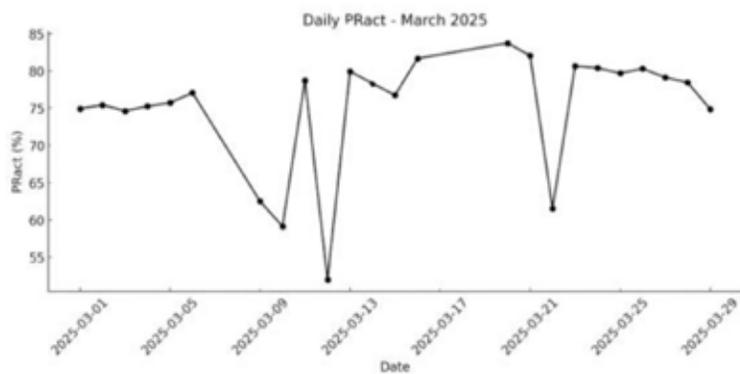
รูปที่ 4 เดือนธันวาคม ค่า PRact แสดงการลดลงต่อเนื่อง โดยเฉพาะวันที่มีเมฆมาก



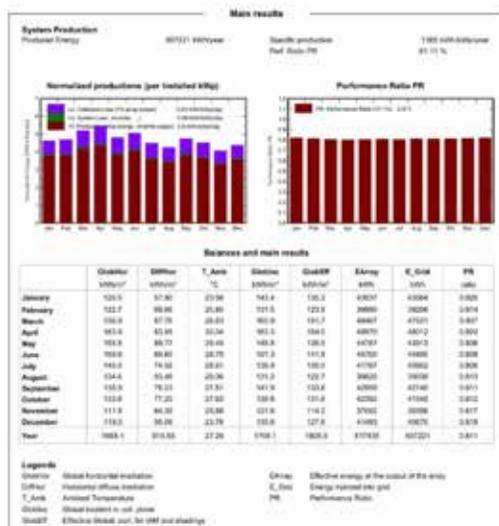
รูปที่ 5 เดือนมกราคม มีค่าประสิทธิภาพต่ำเกือบตลอดทั้งเดือน อยู่ในช่วง 70 - 74%



รูปที่ 6 เดือนกุมภาพันธ์ ค่าลดลงต่ำกว่า 70% ก่อนวันที่ 24 และพุ่งขึ้นหลังการล้างแผง



รูปที่ 7 เดือนมีนาคม ค่าประสิทธิภาพกลับมาใกล้เคียงระดับ 76 - 80% อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 358.80 kWp โดยใช้โปรแกรม PVsyst สำหรับช่วงเวลา 1 ปี

3.3 ผลการจำลองจาก PVsyst

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ตลอดระยะเวลา 1 ปี โดยประสิทธิภาพ (PR) มีค่าคงที่อยู่ระหว่าง 80.06 - 80.2% แสดงถึงเสถียรภาพตามแบบจำลองที่ไม่มีปัจจัยภายนอกกระทบ เช่น ฝุ่นหรือความผิดปกติทางเทคนิค ซึ่งต่างจากค่าที่วัดได้จริงในภาคสนามที่มีความแปรปรวนตามสภาพแวดล้อมและการดูแลรักษา

3.4 ข้อวิเคราะห์เพิ่มเติม

ข้อเท็จจริงอันเป็นที่ทราบกันว่า นอกจากอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้นกว่าค่าที่บริษัทผู้ผลิตออกแบบไว้แล้ว ความสกปรกบนพื้นผิวแผงโซลาร์เซลล์ยังมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการผลิตไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพก่อนและหลังการทำความสะอาดแผงในเดือนกุมภาพันธ์จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน การศึกษานี้จึงสะท้อนความสำคัญของ การบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ สิ่งที่ควรเพิ่มเติมในการศึกษาคั้งถัดไป คือ การเปรียบเทียบความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ในการทำความสะอาด ซึ่งเกี่ยวข้องกับต้นทุนการดำเนินการกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น อาจวิเคราะห์ว่าใน 1 ปี ควรล้างกี่ครั้งจึงจะคุ้มค่ามากที่สุดในการลงทุนพลังงาน

4. วิจัย/อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงานตามสภาพอากาศจริง (PRact) รายวันของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 kWp เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า ค่าเฉลี่ย PRact รายเดือนอยู่ในช่วง 72.4% - 81.2% โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ประมาณ 76.2% ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ซึ่งให้ค่าเฉลี่ย 81.11% ความแตกต่างนี้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของปัจจัยภาคสนามที่แบบจำลองอาจไม่สามารถสะท้อนได้ทั้งหมด

4.1 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจริงกับค่าจำลอง

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในเดือนตุลาคม 2567 ค่า PRact เฉลี่ยอยู่ที่ 81.2% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจำลองจาก PVsyst ที่ 81.11% สะท้อนว่าสภาพระบบในช่วงต้นของการติดตามมีประสิทธิภาพดี และแสดงความสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 4 ถึง 6 ซึ่งเป็นช่วงเดือนธันวาคม ถึงกุมภาพันธ์ พบว่าค่าประสิทธิภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 72.4% แสดงให้เห็นว่าในช่วงฤดูหนาวระบบมีความเสี่ยงต่อการสูญเสียประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากสภาพอากาศมีหมอกหรือเมฆมากในช่วงเช้า ประกอบกับไม่มีการล้างแผงอย่างสม่ำเสมอ

ในรูปที่ 6 ช่วงก่อนวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 PRact ต่ำกว่า 70% แต่หลังการล้างแผงในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 ค่าดัชนีพุ่งขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งยืนยันผลจากการศึกษาของ M. S. Adaramola และ E. E. T. Vågnes [7] ที่ชี้ว่าค่าความสกปรก (Soiling Loss) สามารถลด PR ได้ถึง 15 - 30% และส่งผลต่อความแม่นยำในการประเมินพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

4.2 การอภิปรายสาเหตุของความเบี่ยงเบน

ค่าที่ต่ำกว่าค่าจำลองจาก PVsyst อาจมีสาเหตุจากหลายปัจจัย ได้แก่

ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม: ฝุ่นและคราบสกปรกที่สะสมบนแผงตลอดหลายสัปดาห์สามารถลดการรับแสงของแผงได้อย่างมีนัยสำคัญ [8] รวมถึงหมอกหรือเมฆในช่วงเช้าของฤดูหนาว ซึ่งพบได้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ปัจจัยด้านการดำเนินงาน: รูปแบบการบำรุงรักษาแบบไม่สม่ำเสมอ เช่น การล้างแผงไม่ตรงตามรอบที่เหมาะสม ทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นมากขึ้น และข้อมูลที่บันทึกผ่านระบบอัตโนมัติอาจมีข้อผิดพลาดในบางวัน เช่น การสะสมพลังงานข้ามช่วงเวลา (data roll-over) ซึ่งต้องใช้การคัดกรองก่อนนำมาวิเคราะห์

ข้อจำกัดของการจำลอง: แม้ PVsyst จะใช้ข้อมูล TMY (Typical Meteorological Year) ที่มีความแม่นยำสูง แต่ก็ไม่สามารถแทนสภาพอากาศเฉพาะวันหรือเหตุการณ์เฉพาะหน้าได้ เช่น วันฝนตกเฉพาะพื้นที่ หรือการเกิด partial shading ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดเฉพาะในสนามจริงเท่านั้น นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ เช่น Loss factor หรือ Soiling factor ที่ใช้ใน PVsyst อาจต่ำกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง

4.3 ประโยชน์ของการเปรียบเทียบข้อมูลจริงกับค่าจำลอง

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพ PRact เทียบกับค่าจำลองจาก PVsyst สามารถใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยการใช้แนวโน้มรายเดือนเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพระบบ หากค่า PRact รายเดือนเบี่ยงเบนจากค่าจำลองอย่างต่อเนื่อง อาจบ่งชี้ถึงปัญหาในระบบ เช่น ฝุ่น การเสื่อมของอุปกรณ์ หรือข้อผิดพลาดของการติดตั้ง ซึ่งสนับสนุนแนวทางของ M. Bhatnagar และคณะ [9] ที่แนะนำให้ใช้ PR trend เป็นตัวชี้วัดสำหรับ predictive maintenance

การใช้ค่าจากสนามจริงยังสามารถนำไปปรับเทียบ (calibrate) ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของระบบและพื้นที่ใช้งานจริง เช่น ปรับค่า soiling loss ใน PVsyst ให้เหมาะสมกับฤดูกาล เพื่อให้การจำลองระบบในอนาคตมีความแม่นยำมากขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงานตามสภาพอากาศจริง (Performance Ratio: PRact) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลางจากข้อมูลภาคสนามย้อนหลัง 6 เดือน (ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2568) ณ ศูนย์จ่ายพลังงาน จังหวัดอุดรธานี และเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม PVsyst ซึ่งให้ค่า PR จำลองเฉลี่ยอยู่ที่ 81.11%

ผลการทดสอบคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของค่า PRact ภายหลังจากการล้างแผงโซลาร์เซลล์ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 โดยค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นทันทีในวันถัดมา จากค่าที่ต่ำกว่า 70% กลับขึ้นสู่ระดับใกล้ 80% สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของฝุ่นและคราบสกปรกต่อการลดประสิทธิภาพของระบบในระดับที่มีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่ได้สะท้อนอยู่ในแบบจำลอง PVsyst

โดยสรุป งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การติดตามค่า PRact อย่างต่อเนื่องและนำมาเปรียบเทียบกับค่าจำลองสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินสมรรถนะระบบจริงได้อย่างแม่นยำ ทั้งยังเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงรุก การจัดการพลังงาน และการคาดการณ์สมรรถนะในอนาคตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency, “Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028,” IEA, Paris, France, 2023. [Online]. Available: [iea.blob.core.windows.net](https://www.iea.org/blob.core/windows.net)
- [2] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, and H. Fayaz, “A review on global solar energy policy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 2149-2163, May 2011.
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), “Thailand solar radiation potential map,” Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2023. [Online]. Available: www.dede.go.th
- [4] *Photovoltaic System Performance - Part 1: Monitoring*, IEC Standard 61724-1:2017, 2017.

- [5] B. Müller, M. Gasteiger, and C. Reise, "Weather-corrected performance ratio: Empirical validation using satellite-based irradiance data," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 28, no. 3, pp. 189-199, Mar. 2020.
- [6] L. Audouin, T. Cebecauer, and M. Šúri, "Validation of solar resource and energy yield estimation with PVsyst software: Case study in Europe and the US," *Sol. Energy*, vol. 206, pp. 634-645, Aug. 2020.
- [7] M. S. Adaramola and E. E. T. Vågnes, "Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 90, pp. 458-465, Jan. 2015.
- [8] M. Mani and R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 3124-3131, Dec. 2010.
- [9] M. Bhatnagar, M. Gupta, and R. Singh, "Performance monitoring and degradation analysis of rooftop PV systems using performance ratio trend," *Renew. Energy*, vol. 179, pp. 1425-1435, Dec. 2021.

เทคนิคในการประมาณการกักเก็บคาร์บอน ในสวนยางพาราด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ปิยะธิดา อะวิชิน^{1,5} สาธิต แสงประดิษฐ์^{2,5} ทินกร อังคะฮาด^{1,5} เจนจิรา เปี่ยมดี¹
ญาณวุฒิ อุทรักษ์^{3,5} กิตติการ วิริยะศาสตร์⁴ และ ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ^{1,5*}

วันที่รับ 1 พฤษภาคม 2568 วันที่แก้ไข 9 มิถุนายน 2568 วันตอบรับ 10 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของต้นยางพาราด้วยอากาศยานไร้คนขับและการเรียนรู้ของเครื่อง วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามด้วยการตรวจวัดกายวิภาคของต้นไม้ และการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ โดยพื้นที่จำนวน 2 ไร่ ขนาด 40x40 เมตร จาก 345 ไร่ของสวนยางพาราได้ถูกกำหนดให้เป็นแปลงตัวอย่างเพื่อทดสอบและแสดงผลในการวิจัยนี้ ผลการศึกษาจากแปลงตัวอย่างพบว่า ต้นยางพาราทั้งหมด 181 ต้นเมื่อวิเคราะห์และคำนวณปริมาณมวลชีวภาพในแปลงตัวอย่างโดยใช้สมการแอลโลเมตริก (Allometric) พบว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนที่เป็นใบ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0060 ต้น/ต้น ส่วนของลำต้นและกิ่ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4050 ต้น/ต้น และส่วนที่เป็นตอไม้และราก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0696 ต้น/ต้น รวมมวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4806 ต้น/ต้น การประเมินการกักเก็บคาร์บอน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2259 tCO₂e/ต้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณการกักเก็บคาร์บอนจากการสำรวจภาคสนามและการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ จากแปลงตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็นแปลงทดสอบ 2 แปลง โดยแปลงแรกพบจำนวนต้นยางพารา 82 ต้น มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดของข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับโหมดหลายช่วงคลื่นด้วยดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2058 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.18889 tCO₂e /ต้น ตามลำดับ สำหรับแปลงที่สองพบจำนวนต้นยางพารา 99 ต้น พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2425 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2390 tCO₂e /ต้น ตามลำดับ

คำสำคัญ: มวลชีวภาพ, การกักเก็บคาร์บอน, อากาศยานไร้คนขับ, การเรียนรู้ของเครื่อง

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ภาควิชาภูมิสารสนเทศ, คณะวิทยาการสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

⁴ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

⁵ ศูนย์วิจัยและปฏิบัติการก๊าซกระจก, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้แต่ง, อีเมล: teerawong@msu.ac.th

Techniques for Estimating Carbon Sequestration in Rubber Plantations using an Unmanned Aerial Vehicle

Piyatida Awichin^{1,5} Satith Sangpradid^{2,5} Thinnakon Angkahad^{1,5} Janjira Piamdee¹
Yannawut Uttarak^{3,5} Kittakorn Viriyasatr⁴ and Teerawong Laosuwan^{1,5}

Received 1 May 2025, Revised 9 June 2025, Accepted 10 June 2025

Abstract

The objective of this research is to estimate the above-ground biomass and carbon sequestration of rubber trees using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and machine learning. The research methodology is divided into two parts: field data collection and analysis through anatomical measurements of the trees, and image analysis from a UAV. A sample plot of 2 rai, sized 40x40 meters, from a total of 345 rai of rubber plantation, was designated for testing and demonstration in this study. The study results from the sample plot revealed that there were 181 rubber trees. When analyzing and calculating the biomass quantity in the sample plot using the Allometric equation, it was found that the average above-ground biomass for leaves was 0.0060 ton/tree, for trunks and branches was 0.4050 ton/tree, and for stumps and roots was 0.0696 ton/tree, with a total average above-ground biomass of 0.4806 tons/tree. The average carbon sequestration was estimated to be 0.2259 tCO₂e/tree. Subsequently, the results from calculating carbon sequestration from field surveys and UAV image analysis were compared. The sample plot was divided into two test plots. In the first plot, 82 rubber trees were identified, with the total carbon sequestration from field data and UAV data using the NDVI vegetation index averaging 0.2058 and 0.1889 tCO₂e/tree, respectively. In the second plot, 99 rubber trees were identified, with averages of 0.2425 and 0.2398 tCO₂e/tree, respectively.

Keywords: Biomass, Carbon Sequestration, UAV, Machine Learning

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Maharakham University

² Department of Geoinformatics, Faculty of Informatics, Maharakham University

³ Department of Biology, Faculty of Science, Maharakham University

⁴ Defence Technology Institute

⁵ Greenhouse Gas Research Center and Operations, Maharakham University

* Corresponding author, E-mail: teerawong@msu.ac.th

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในปัจจุบัน ภาวะโลกร้อนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความกังวลอย่างกว้างขวางในประชาคมระหว่างประเทศ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อสังคมมนุษย์และทวีความรุนแรงมากขึ้นในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า [1]-[2] เนื่องจากภาวะโลกร้อนเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเป็นแหล่งกำเนิดของคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง อาทิเช่น การใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลจำนวนมาก ส่งผลทำให้ก๊าซเรือนกระจก และอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3]-[4] ตามรายงานของ IPCC [5] ได้ระบุว่า เพื่อจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไม่ให้เกิน 1.5 °C จำเป็นต้องลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในทุกภาคส่วน ทั้งด้านพลังงาน ระบบนิเวศ เมืองและโครงสร้างพื้นฐาน ตลอดจนภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ยังได้กล่าวถึงแนวคิด “ความเป็นกลางทางคาร์บอน” (carbon neutrality) ซึ่งมีกลยุทธ์หลักสองประการ ได้แก่ (1) การลดการปล่อยคาร์บอน มีเป้าหมายเพื่อลดปริมาณคาร์บอนจากแหล่งกำเนิด และ (2) การเพิ่มแหล่งดูดซับคาร์บอน ซึ่งมุ่งเน้นการดูดซับหรือกักเก็บคาร์บอนที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ [6] โดยในปัจจุบันได้มีแหล่งดูดซับคาร์บอนหลากหลายรูปแบบ เช่น การจัดการป่าไม้และการปลูกป่าทดแทน การนำแนวทางปฏิบัติด้านการจัดการการเกษตรมาใช้ การอนุรักษ์พื้นที่ชุ่มน้ำและระบบนิเวศทางทะเล รวมถึงการใช้เทคโนโลยีดักจับคาร์บอน [7]-[8]

ป่าไม้เป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญระดับโลก โดยมีการครอบคลุมพื้นผิวโลกเท่ากับ 31% [9] ซึ่งป่าไม้มีบทบาทที่สำคัญในการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการดูดซับ CO₂ จากชั้นบรรยากาศ ให้เก็บไว้ในต้นไม้ ดิน และอินทรีย์วัตถุอื่น ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ [10]-[11] การกักเก็บคาร์บอนในรูปของมวลชีวภาพ (Aboveground Biomass: AGB) ถูกประเมินว่าคิดเป็น 86% ของปริมาณคาร์บอนทั้งหมด

บนบก ขณะที่คาร์บอนในดินคิดเป็น 73% [12] เพื่อให้ได้ปริมาณคาร์บอนในป่าอย่างละเอียดและแม่นยำ มีการศึกษามากมายที่จัดทำแผนที่การกระจายเชิงพื้นที่ของมวลชีวภาพในป่าโดยใช้อัลกอริทึมต่าง ๆ โดยถือว่าปริมาณคาร์บอนในมวลชีวภาพของพืชคงที่ประมาณ 50% โดยการประมาณค่า AGB ของป่าไม้ มีวิธีการประมาณค่า ได้แก่ การสำรวจภาคพื้นดิน การสำรวจระยะไกล [13]-[14] และการจำลองแบบจำลองทางนิเวศวิทยา [15] วิธีที่แม่นยำที่สุดในการประมาณมวลชีวภาพของพืชคือการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจภาคพื้นดินโดยใช้สมการแอลโลเมตริก [16] ข้อเสียของการสำรวจภาคพื้นดินคือค่าใช้จ่ายของแรงงานค่อนข้างสูง เนื่องจากงานประเภทนี้ต้องมีการสำรวจภาคสนามจำนวนมากในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด [17]-[18] นอกจากนี้ ปัญหาในการติดตามภาคพื้นดินยังเกี่ยวข้องกับ ความห่างไกลของจำนวนสถานที่ศึกษาจากถนนและชุมชน ความยากลำบากในการเคลื่อนตัวข้ามพื้นที่ศึกษา และมักไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ป่าได้ [19]

เนื่องจากข้อจำกัดของการสำรวจภาคพื้นดินแบบเดิมดังที่กล่าวข้างต้น จึงได้ศึกษาการสำรวจระยะไกล ซึ่งได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีการใช้งานครอบคลุมถึงภาพถ่ายดาวเทียม อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle) หรือ UAV และ เซนเซอร์ภาคพื้นดิน ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา UAV ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการสำรวจระยะไกลทางการเกษตรและป่าไม้ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเฉพาะตัว เช่น ดัชนีพืชพรรณที่รวดเร็วแบบเรียลไทม์ และมีความละเอียดสูง โดยอิงจากภาพแบบมัลติสเปกตรัม [20]-[21] ซึ่งในการประมาณหามวลชีวภาพโดยอาศัยการสำรวจระยะไกลนั้น ยังต้องอาศัยการสำรวจภาคพื้นดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื่องจากการสำรวจภาคพื้นดินมีความจำเป็นทั้งในการเปรียบเทียบข้อมูลที่รับรู้จากระยะไกลและการตรวจสอบเพื่อหาผลลัพธ์ของมวลชีวภาพที่ประมาณการไว้ [8]

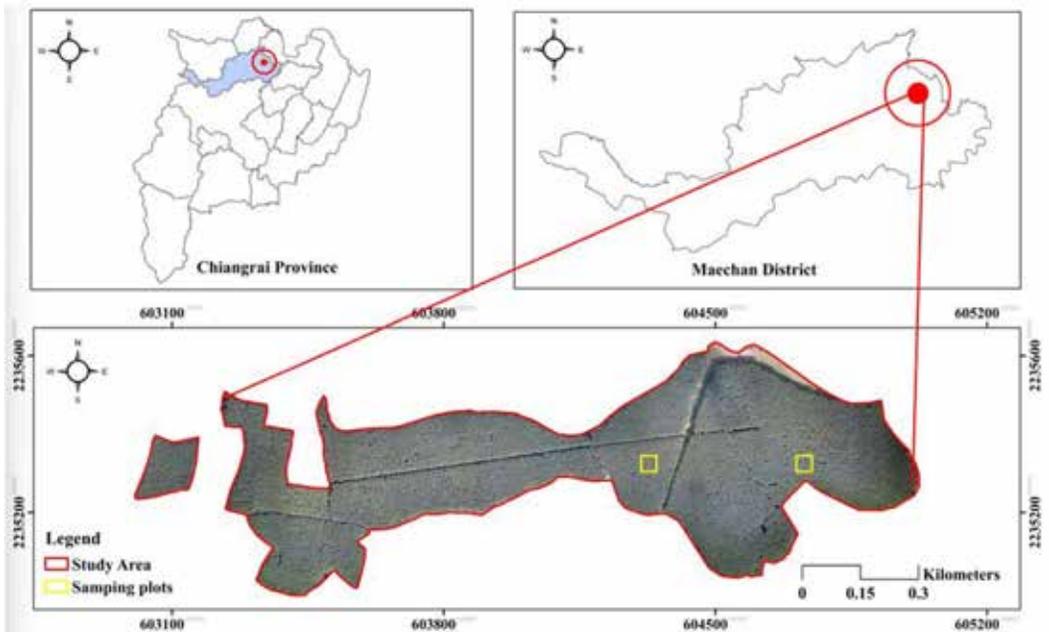
ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) เป็นพืชทางเศรษฐกิจของประเทศไทยและภูมิภาคอาเซียน โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 19 ล้านไร่ การส่งออกผลิตภัณฑ์ยางพาราของไทยปี 2565 อยู่ที่ 11,694 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ขณะเดียวกันงานวิจัยหลายฉบับระบุว่ายางพารามีศักยภาพในการดูดซับและกักเก็บคาร์บอนได้สูง โดยอัตราการดูดซับคาร์บอนของต้นยางพาราอยู่ในช่วงประมาณ 3.5-7.5 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อปี ขึ้นอยู่กับอายุและความหนาแน่นของการปลูก เมื่อเปรียบเทียบกับพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น เช่น ปาล์มน้ำมัน ซึ่งอัตราการกักเก็บคาร์บอนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4.5-6.0 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี หรืออ้อย ซึ่งต่ำกว่า 3 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี ยางพาราจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมต่อการส่งเสริมการปลูกเพื่อเน้นการกักเก็บคาร์บอน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีศักยภาพด้านภูมิอากาศและดิน สำหรับพื้นที่ศึกษาที่เลือกคือ ตำบลจันจว้า อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย เนื่องจาก

เป็นพื้นที่ที่มีการขยายพื้นที่ปลูกยางพาราอย่างต่อเนื่อง มีสภาพภูมิประเทศที่หลากหลายทั้งที่ราบและที่ลาดเอียง รวมถึงมีการจัดการสวนยางที่หลากหลาย ทั้งในรูปแบบสวนยางอายุแตกต่างกัน รูปแบบการปลูกแบบผสมผสาน ทำให้ตำบลจันจว้าเป็นพื้นที่ตัวอย่างที่เหมาะสมในการประเมินศักยภาพของยางพาราในการกักเก็บคาร์บอนอย่างเป็นระบบ และสามารถต่อยอดผลการศึกษาไปยังพื้นที่ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ในภาคเหนือของประเทศไทย ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของต้นยางพาราด้วย UAV และการเรียนรู้ของเครื่อง

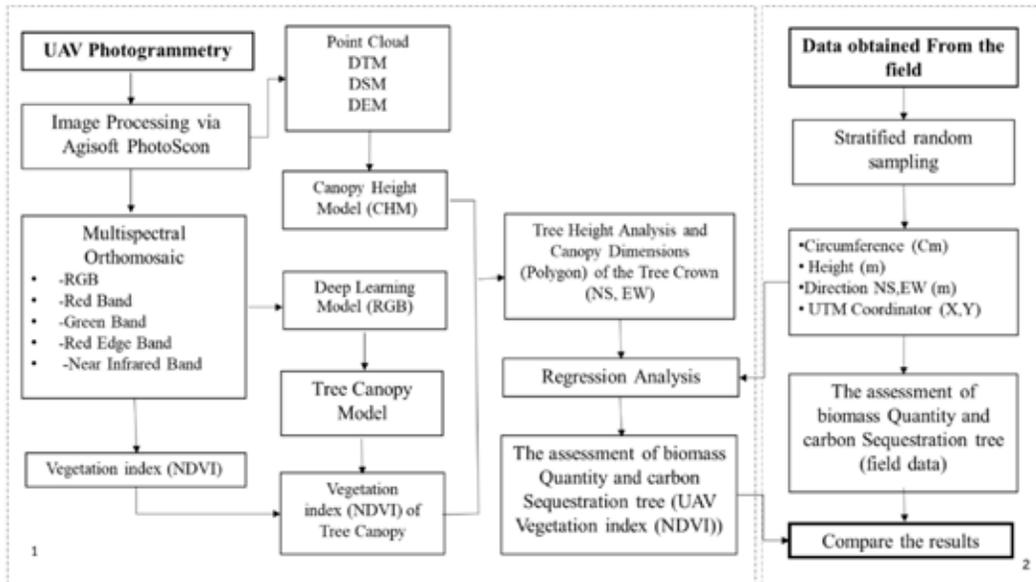
2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่การศึกษาตั้งอยู่ในพื้นที่สวนยางพารา ตำบลจันจว้า อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย ตั้งอยู่ที่ตำแหน่งพิกัดที่ 2,233,080 N และ 604,880 E (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2 วิธีการดำเนินการ

ทั้งนี้ พื้นที่ของเทศบาลตำบลจันจว้าส่วนใหญ่เป็นป่าไม้และมีภูเขาล้อมรอบ จึงทำให้มีอากาศหนาวเย็นในฤดูหนาว แบ่งแยกได้ 3 ฤดู คือ ฤดูฝน ฝนจะตกชุกตลอดฤดูกาล ปริมาณฝนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1,736.2 มิลลิเมตรต่อปี ฤดูหนาว จะมีอากาศหนาวถึงหนาวจัด อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 20.1 °C และฤดูร้อน อากาศจะร้อนจัดมากในตอนกลางวัน อุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 34.7 °C

2.2 วิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการได้ถูกแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการวิเคราะห์และคำนวณปริมาณมวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ โดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศของ UAV ในการประมาณค่าและการสำรวจภาคสนาม เพื่อคำนวณหามวลชีวภาพโดยตรง ทำให้งานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

2.2.1 ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

การวิจัยนี้ได้ใช้ UAV รุ่น DJI Phantom Pro 4 โดยกำหนดพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่การศึกษาตามพิภ

ที่สำรวจภาคสนาม กำหนดความสูงในการบินสำรวจ กำหนดความเร็วการบิน โดยปรับ Advanced ในส่วนซ้อนของภาพในช่วง (Front Overlap Radio) 80% และส่วนของภาพ (Side Overlap) 70% จากนั้นนำภาพที่ได้มาทำการประมวลผลภาพถ่ายของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional (64 bit) [22] โดยภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จะอยู่ในโหมดหลายช่วงคลื่น จากนั้นทำการกำหนดแนวบิน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับผ่านการประมวลผลภาพถ่าย คือ Multispectral Orthomosaic ของ 5 ช่วงแบนด์ Digital Elevation Model (DEM), Digital Terrain Model (DTM) และ Digital Surface Model (DSM) [23]-[24]

2.2.2 การสำรวจภาคสนาม

การสำรวจในภาคสนาม ถูกกำหนดแปลงตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มแบบ Stratified random sampling แปลงตัวอย่างขนาด 40x40 เมตร 2 จำนวน 2 แปลง หรือคิดเป็นพื้นที่ 2 ไร่ โดยแปลงตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็นแปลงทดสอบย่อย 2 แปลงของพื้นที่ศึกษา โดยมีพื้นที่

การศึกษาทั้งหมดประมาณ 348 ไร่ เก็บข้อมูล 5 ด้าน ได้แก่ 1) ความสูง (H) 2) เส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราที่ระดับอก ประมาณ 1.30 เมตร จากพื้นดิน 3) ข้อมูลพิกัดรายต้น 4) ค่าขนาดทรงพุ่มตามแกนทิศเหนือ-ใต้ (NS) และ 5) ค่าขนาดทรงพุ่มตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (EW)

2.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายจาก UAV

(1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ

การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ NDVI [25]-[27] จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

โดย NIR คือ Near Infrared Band

RED คือ Red Band

ทั้งนี้ ข้อมูลดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่วิเคราะห์ได้ จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผล regression analysis เพื่อประมาณหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนต่อไป

(2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ Canopy Height Model (CHM) [28]-[29]

เป็นการสร้างแบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดของต้นยางพารา สามารถหาได้โดย ค่าความแตกต่างของความสูงระหว่างข้อมูลจาก Digital Terrain Model (DTM) กับ Digital Surface Model (DSM) สำหรับการประมวลผลของแบบจำลองความสูงทรงพุ่มของเรือนยอดของต้นยางพาราดังสมการที่ (2) ดังนี้

$$CHM = DSM-DEM \quad (2)$$

โดย CHM คือ แบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอด

DSM คือ แบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล

DEM คือ แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข

(3) การวิเคราะห์ด้วยโมเดล Deepness

เพื่อประเมินลักษณะทางโครงสร้างของต้นไม้ในแปลงปลูก ข้อมูลภาพถ่าย RGB ซึ่งประกอบด้วยสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในการวิเคราะห์ โดยบริเวณที่นำมาวิเคราะห์จะถูกระบุโดยรูปทรงหลายเหลี่ยม (Polygon) ที่ได้จากเลเยอร์ (Layer) ของต้นไม้ ซึ่งได้มาจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง YOLOv9 [30]-[31] สำหรับการตรวจจับวัตถุ จากนั้นได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือ Minimum Bounding Geometry เพื่อสร้างรูปทรงเรขาคณิตที่เล็กที่สุดที่ครอบคลุมขอบเขตของแต่ละต้นไม้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของทรงพุ่ม ซึ่งจะได้ค่าความกว้างของทรงพุ่มในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE) และแนวตะวันออก-ตะวันตก (EW) หน่วยเป็นเมตร (m) ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโมเดล Deepness ประกอบด้วย ค่าทรงพุ่ม (NE, EW) ของแต่ละต้นไม้ในหน่วยเมตร และค่าความสูงของทรงพุ่มของแต่ละแปลงหรือแต่ละ Polygon

(4) การวิเคราะห์การถดถอย

สมการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 5 ตัว คือ ตัวประมาณการ (Predictor, X) ซึ่งมีค่าขนาดทรงพุ่มของต้นยางพาราตามแกนทิศเหนือ-ใต้ (NS) ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นยางพาราตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (EW) ค่า High tree ขนาดความสูงทรงพุ่มต้นยางพารา (Canopy) และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ซึ่งเป็นตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ผลและตัวตอบสนอง (Response, Y) คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ ทั้งนี้ เนื่องจากไม่สามารถทราบปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ ผู้วิจัยจึงทำการสร้างพารามิเตอร์การวิเคราะห์โมเดลด้วยวิธีการวิเคราะห์ผล regression analysis ดังสมการ (3) ดังนี้

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon \quad (3)$$

เมื่อ

y คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้

β คือ Coefficients ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการประมาณการ

x_1 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นยางพาราตามแกนทิศเหนือ-ใต้ (NS)

x_2 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นยางพาราตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (EW)

x_3 คือ ค่า High tree ขนาดความสูงทรงพุ่มต้นยางพารา (Canopy)

x_4 คือ ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI

ε คือ ค่าคงที่

โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกใช้ในการประเมินปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นยางพารา

2.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม

เป็นการคำนวณมวลชีวภาพและการประมาณการกักเก็บคาร์บอน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้สมการ Allometric ของ Hytonen และคณะ [32] ดังสมการที่ (4)-(7) ดังนี้

$$W_L = 0.00193 * DBH^{2.499} \quad (4)$$

$$W_{AGB} = 0.05155 * DBH^{2.783} \quad (5)$$

$$W_{STUMP} = 0.02440 * DBH^{2.470} \quad (6)$$

โดย DBH คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอกประมาณ 130 เซนติเมตร

W_L = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนที่เป็นใบ

W_{AGB} = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนของลำต้นและกิ่ง

W_{STUMP} = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนที่เป็นตอไม้และราก

$$TotalBiomass = W_L + W_{AGB} + W_{STUMP} \quad (7)$$

เมื่อ $TotalBiomass$ = ปริมาณมวลชีวภาพทั้งหมด

นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นไม้เป็นส่วนโดยตรงกับปริมาณมวลชีวภาพ (Biomass) ซึ่งเป็นค่ามวลรวมขององค์ประกอบทางโครงสร้างของพืชทั้งส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8) ดังนี้

$$CS = TotalBiomass \times 0.47 \quad (8)$$

เมื่อ CS คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ (กิโลกรัม)

$TotalBiomass$ คือ ปริมาณมวลชีวภาพทั้งหมด (กิโลกรัม) และ 0.47 คือ สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวลชีวภาพของต้นไม้ [5]

2.2.5 การวัดประสิทธิภาพของโมเดลการถดถอย

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคทางสถิติที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variable) เพื่อสร้างโมเดลที่สามารถทำนายค่าของตัวแปรตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกระบวนการนี้ สามารถทำได้โดยการใช้ตัวชี้วัดต่าง ๆ โดยใช้สถิติทดสอบดังสมการที่ (9)-(12) ดังนี้

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (9)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{(y_i - \hat{y}_i)^2} = 1 - \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (12)$$

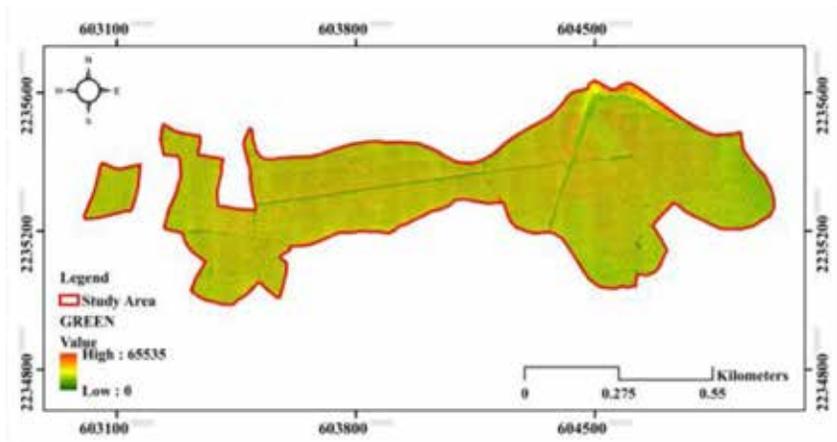
โดย Y_i คือ ข้อมูลที่วัดได้จริง
 \hat{Y}_i คือ ข้อมูลจากแบบจำลอง
 n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

เมื่อ **MAE** = Mean Absolute Error, **MSE** = Mean Squared Error, **RMSE** = Root Mean Squared Error

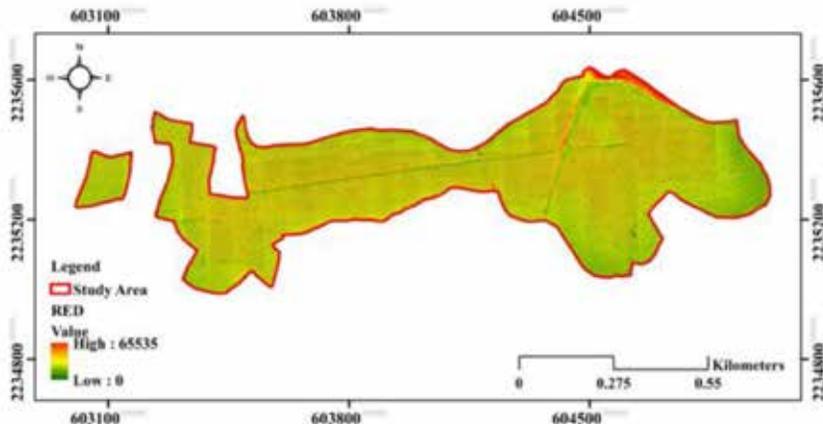
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

ผลการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยการสร้างภาพ 3 มิติ ใช้การประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก-ข)

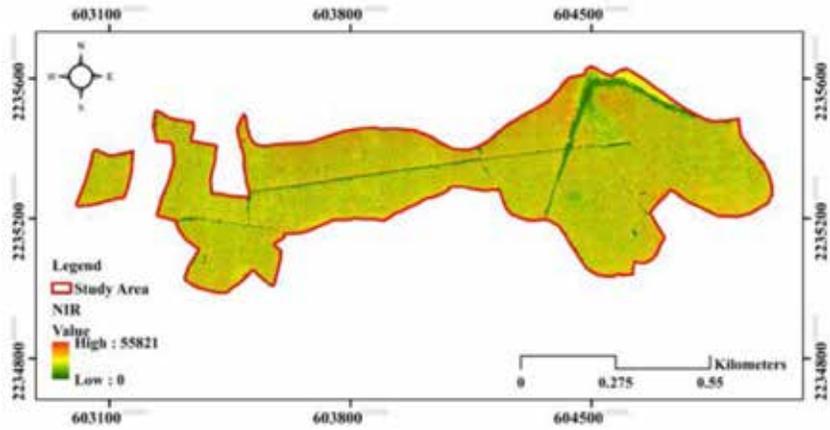


ก

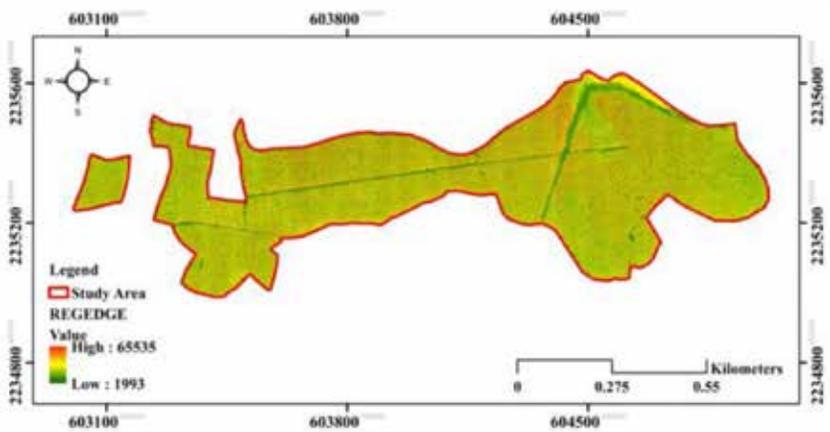


ข

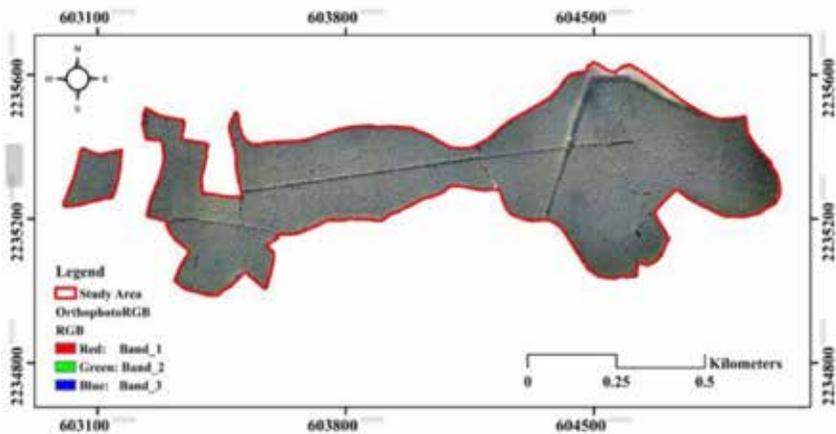
รูปที่ 3 (ก-ข) ผลการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV



ค

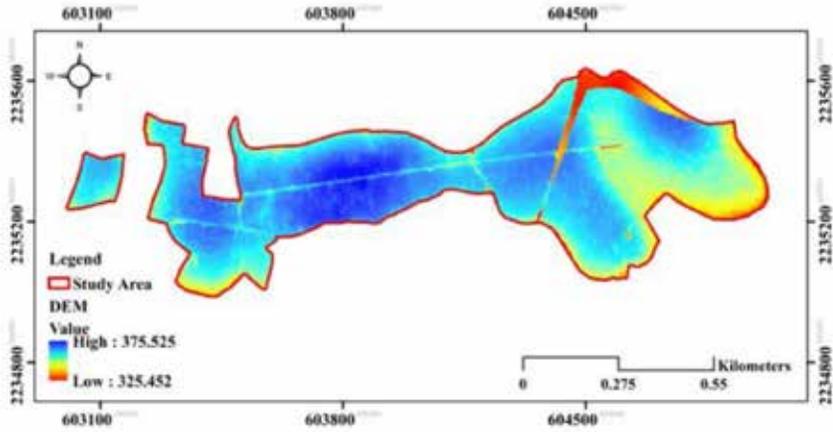


ง

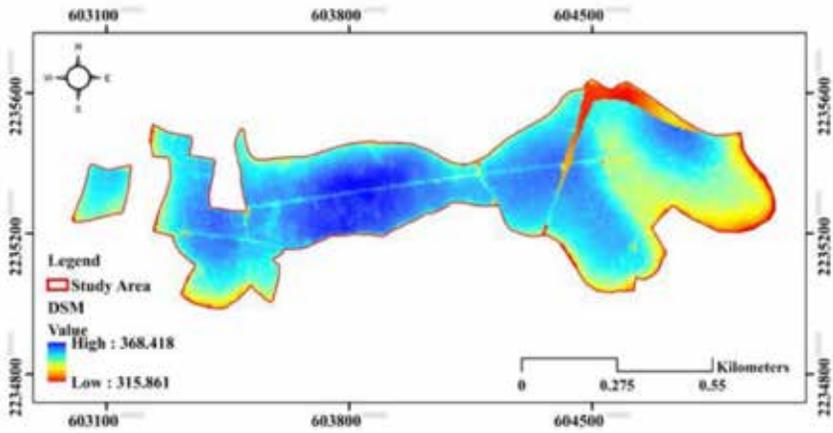


จ

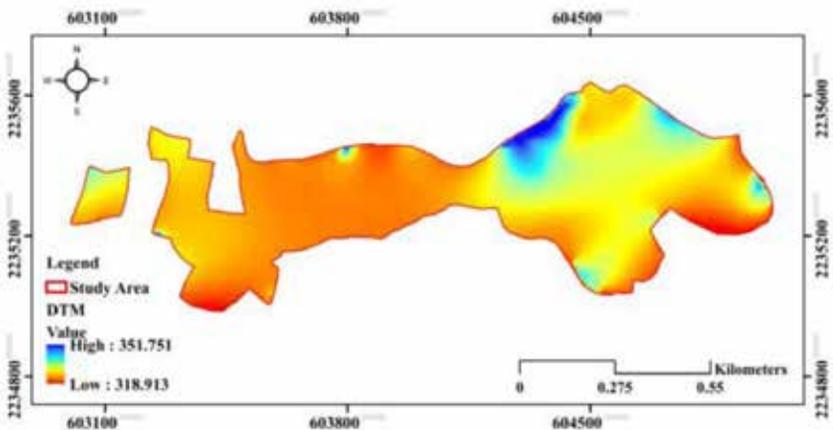
รูปที่ 3 (ก-จ) ผลการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV (ต่อ)



ฉ



ช



ซ

รูปที่ 3 (ก-ซ) ผลการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV (ต่อ)

นอกจากนี้ ข้อมูลดังกล่าวได้นำมาวิเคราะห์ทางกายภาพรายต้นของต้นยางพารา ผ่านการเรียนรู้ด้วยเครื่อง Deepness Model ด้วยโปรแกรม QGIS ร่วมกับ การวิเคราะห์ Canopy high model และการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาใช้ในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นยางพารา รายต้นในพื้นที่ศึกษา

จากรูปที่ 3 (ก-ข) การประมวลผลของภาพออร์โธ (Orthophoto) ที่ประกอบไปด้วยการรวมภาพย่อยในภาพย่าน Green Band 3 (ก), ภาพย่าน Red Edge Band 3 (ข), Near Infrared Band 3 (ค), ภาพย่าน Red edge Band 3 (ง) และภาพ Orthophoto RGB Band 3 (จ) ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากการถ่ายภาพทางอากาศด้วยเทคโนโลยี UAV ที่ผ่านกระบวนการปรับแก้ความผิดเพี้ยน โดยการแก้ไขความผิดเพี้ยนที่เกิดจากมุมกล้องและความโค้งของพื้นผิวโลก เพื่อให้ได้ภาพที่มีความแม่นยำทางภูมิศาสตร์ (Orthorectification) โดยอ้างอิงข้อมูลความสูงต่ำของภูมิประเทศ และระบบพิกัด UTM ทำให้ภาพมีความถูกต้องทั้งตำแหน่ง ขนาด และรูปร่างของวัตถุภาพ RGB ประกอบด้วย 3 สีหลัก ได้แก่ แดง (Red), เขียว (Green), และน้ำเงิน (Blue) ซึ่งเป็นแม่สีของแสงที่ช่วยให้ดวงตาสามารถรับแสงสีได้ ทำให้ได้ภาพในย่านที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้

รูปที่ 3 (ฉ) ผลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ผลการวิเคราะห์ DEM ช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์ความสูงของภูมิประเทศได้อย่างละเอียดและแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวางแผนและการจัดการด้านต่าง ๆ เช่น การวางผังเมือง ซึ่งในพื้นที่ศึกษา

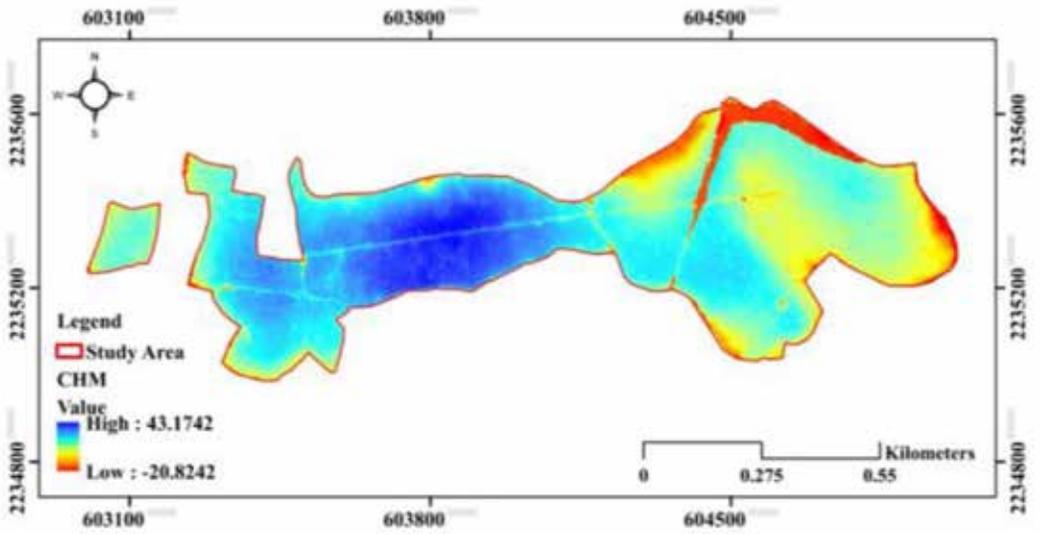
พบว่า ความสูงอยู่ระหว่าง 325.452 - 375.525 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ซึ่งสะท้อนถึงความหลากหลายของภูมิประเทศที่ประกอบด้วยเนินเขา พื้นที่ราบลุ่ม และที่ราบสูง

รูปที่ 3 (ช) ผลแบบจำลองความสูงปกคลุมพื้นผิว DSM เป็นแบบจำลองที่แสดงระดับความสูงขององค์ประกอบต่าง ๆ บนพื้นดิน เช่น ต้นไม้และสิ่งก่อสร้าง และองค์ประกอบอื่น ๆ ผลการศึกษาพบว่า พื้นในพื้นที่ศึกษามีความสูงอยู่ระหว่าง 368.481 - 315.861 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะภูมิประเทศที่มีทั้งที่ราบและที่สูง ซึ่งส่งผลต่อการวางแผนการใช้พื้นที่ เช่น การกำหนดเขตการก่อสร้าง ถนน และระบบสาธารณูปโภค

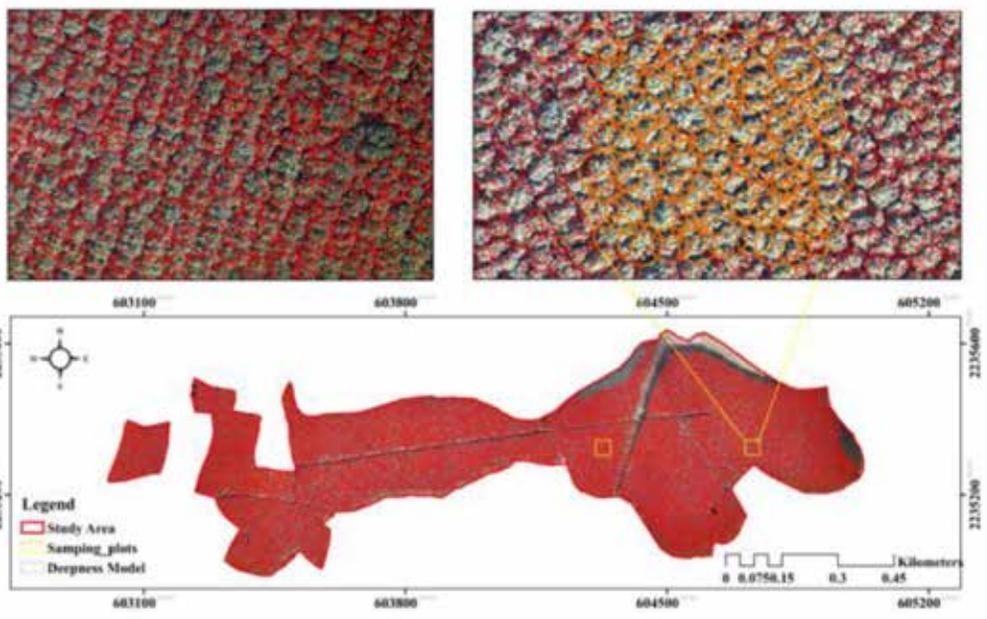
รูปที่ 3 (ซ) แบบจำลองภูมิประเทศดิจิทัล (Digital Terrain Model: DTM) ผลการวิเคราะห์ DTM ในพื้นที่ศึกษาพบว่า ความสูงอยู่ระหว่าง 351.751 - 318.913 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง โดยสามารถสะท้อนถึงความสูงของภูมิประเทศที่มีผลต่อการพัฒนาพื้นที่ในหลายด้าน เช่น การวางแผนการก่อสร้าง การจัดการน้ำ และการป้องกันภัยธรรมชาติ

3.2 ผลการวิเคราะห์ Canopy height และผลการวิเคราะห์ (Deepness model)

การใช้ข้อมูลจาก UAV ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับและวิเคราะห์ลักษณะของทรงพุ่มต้นไม้ เช่น ขนาดเรือนยอดและความสูงของต้นไม้ ผลการวิเคราะห์ Canopy height เป็นต้น และผลการวิเคราะห์ (Deepness model) ในการศึกษาครั้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4 (ก-ข)

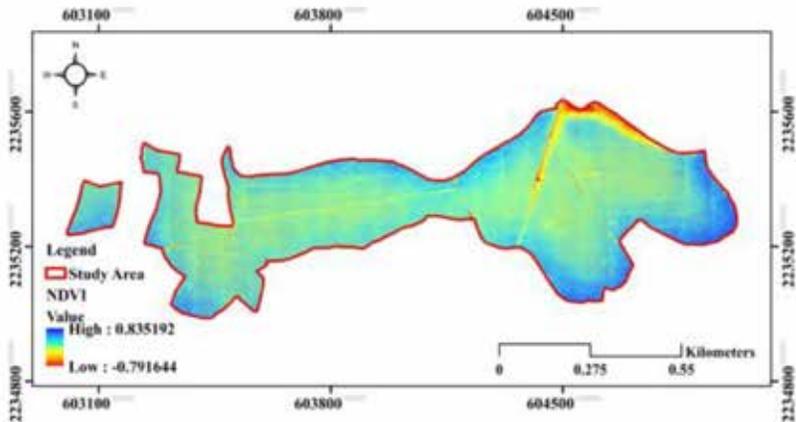


ก



ข

รูปที่ 4 (ก-ข) ผลการวิเคราะห์ Canopy Height และ ผลการวิเคราะห์ (Deepness Model)



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ NDVI

จากรูปที่ 4 (ก) ข้อมูล CHM ได้ถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม ArcMap สำหรับข้อมูล CHM คำนวณได้จากค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูล DTM และ DSM สร้างแบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดของต้นยางพาราใช้เครื่องมือ Raster เพื่อหาความสูงในพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับ ผลที่ได้ค่าที่สูงสุดเท่ากับ 43 เมตร และ -21 เมตร

จากรูปที่ 4 (ข) เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดต้นยางพาราจากข้อมูล UAV ด้วยการประมวลผลผ่าน Deepness model ทำให้สามารถแสดงพิกัดและความสูงของทรงพุ่ม พบทรงพุ่มทั้งหมด 20,384 Polygons โดยแต่ละ Polygon คำนวณค่ากว้าง-ยาวของจุดกึ่งกลาง Polygon ขนาดทรงพุ่มมีค่าเฉลี่ย 5 เมตร ความสูงมีค่าเฉลี่ย 24 เมตร

3.3 ผลการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ

ผลการวิเคราะห์ NDVI เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินความเขียวข่มและสุขภาพของพืชพรรณในพื้นที่เฉพาะ ช่วยคำนวณจากความเข้มของแสงที่พืชสะท้อนในช่วงคลื่นต่าง ๆ ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงปริมาณคลอโรฟิลล์และการเจริญเติบโตของพืชได้ สำหรับผลการวิเคราะห์ NDVI ในการศึกษาครั้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5

จากภาพรูปที่ 5 การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ NDVI ดัชนีที่ใช้ในการวัดความเขียวของพืชพรรณ โดยคำนวณจากความแตกต่างระหว่างแสงที่พืชดูดซับและสะท้อนกลับ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -0.7916 ถึง 0.8351 ซึ่งสะท้อนถึงค่า NDVI มีค่าเท่ากับ 0.8351 บ่งชี้ถึงพืชที่มีสุขภาพดีและเขียวข่ม ขณะที่ค่าเท่ากับ -0.7916 บ่งชี้ถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณน้อย

3.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่าง NDVI ขนาดทรงพุ่ม (NS, EW) ความสูง (H) ร่วมกับข้อมูลปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในต้นยางพารา โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

Regression Statistics	NDVI
Multiple R	0.9882263
R Square	0.9765913
Adjusted R Square	0.9753753
Standard Error	0.008320
Observations	82

จากตารางที่ 1 ค่า Multiple R มีค่าเท่ากับ 0.9882263 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่กระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระในโมเดล ค่า R Square มีค่าเท่ากับ 0.9765913 แสดงถึงสัดส่วนของความแปรปรวนในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ถึง 97.66% ค่า Adjusted R Square มีค่าเท่ากับ 0.9753753 โดยการทำนายได้อย่างแม่นยำมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มตัวแปรอิสระใหม่เข้าไป ค่า Standard error มีค่าเท่ากับ 0.008320 ซึ่งแสดงถึงค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างค่าจริงและค่าที่คาดการณ์โดยโมเดล ยิ่งค่า Standard error ต่ำ แสดงว่าโมเดลมีความแม่นยำสูง มีข้อมูลทั้งหมดจำนวน 82 ข้อมูล ซึ่งใช้ในการสร้างโมเดลการถดถอยนี้

3.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม

จากการสำรวจภาคสนามในแปลงตัวอย่าง พยุงพาราทั้งหมด 181 ต้น จำนวน 2 แปลง หรือ 2 ไร่ โดยแบ่งออกเป็นแปลงตัวอย่างมีจำนวนยางพารา 82 ต้น และแปลงสำหรับทดสอบสถิติ 99 ต้น โดยมีชื่อท้องถิ่น คือ ยางพารา ชื่อสามัญ Para Rubber ชื่อวิทยาศาสตร์ *Hevea brasiliensis* Muell. Arg วงศ์ Euphorbiaceae สำหรับการคำนวณมวลชีวภาพและประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน แยกเป็นมวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนที่เป็นใบ (WL), มวลชีวภาพ

เหนือพื้นดินส่วนของลำต้นและกิ่ง (WAGB), มวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนที่เป็นตอไม้และราก (WSTUMP) และประเมินการกักเก็บคาร์บอน (CS) แสดงได้ดังตารางที่ 2

โดยจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าปริมาณมวลชีวภาพและประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมีความแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของต้นยางพาราที่มีความแตกต่างและขนาดของเส้นรอบวงที่มีความแตกต่างกัน

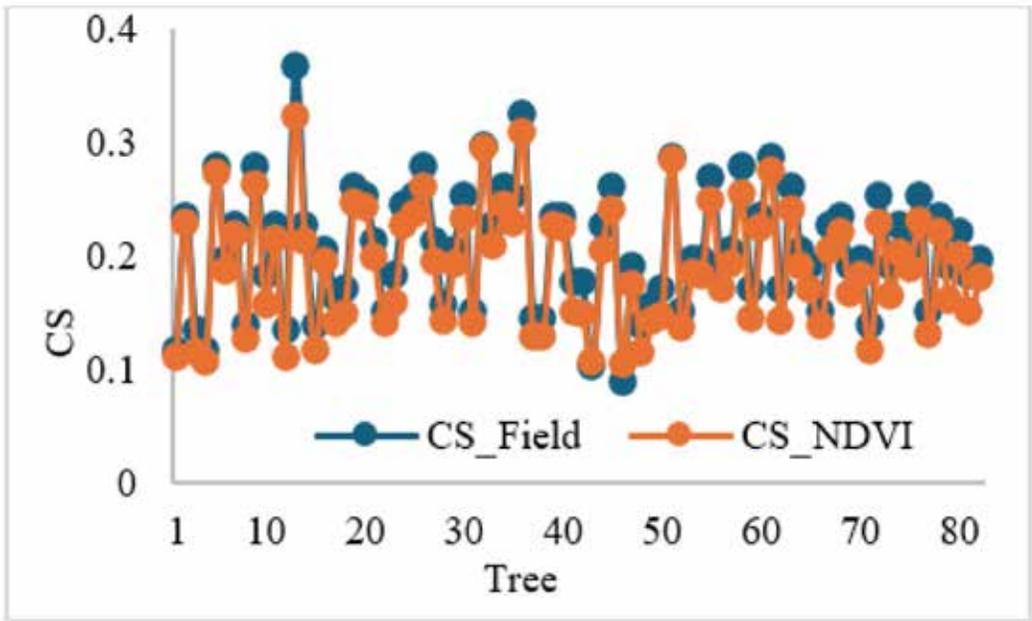
3.6 ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูล

เป็นผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมทหลายช่วงคลื่นด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI โดยแบ่งเป็น

1) ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลแปลงตัวอย่างแปลงที่ 1 ทั้งนี้ ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลแปลงตัวอย่างแปลงที่ 1 พบต้นยางพาราทั้งสิ้น จำนวน 82 ต้น แสดงได้ดังรูปที่ 6 จากรูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลข้อมูลระหว่างข้อมูลปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมทหลายช่วงคลื่นด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0.1 ถึง 0.37 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2058 tCO₂e/ต้น และมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0.1 ถึง 0.35 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.18889 tCO₂e/ต้น ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลจากการคำนวณปริมาณมวลชีวภาพจากข้อมูลภาคสนาม

ID	WL (ต้น/ไร่)	WSTUMP (ต้น/ไร่)	WAGB (ต้น/ไร่)	Total Biomass (ต้น/ไร่)	CS (tCO ₂ e/ไร่)
P01	0.4557	5.2506	30.1988	35.9050	16.8754
P02	0.6391	7.3512	43.0985	51.0888	24.0117
Total	1.0948	12.6018	73.2973	86.9938	40.8871
Total/tree	0.0060	0.0696	0.4050	0.4806	0.2259



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลแปลงตัวอย่าง แปลงที่ 1

นอกจากนี้ เมื่อนำผลข้อมูลระหว่างข้อมูลปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดจากภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วย NDVI มาทำการวัดประสิทธิภาพของโมเดล สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

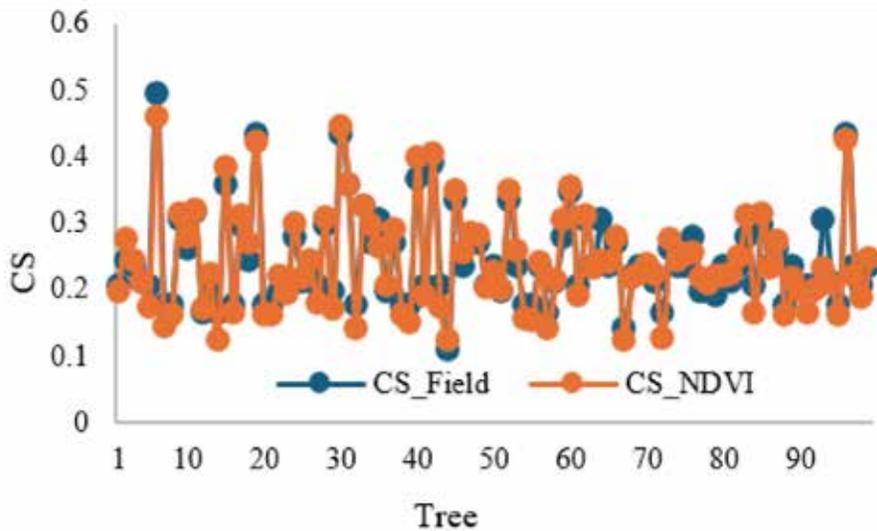
ตารางที่ 3 การวัดประสิทธิภาพของโมเดล

สถิติ	NDVI
n	82
MAE	0.0173698
MSE	0.0003512
RMSE	0.0187391

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI โดยใช้ค่าทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบและวัดความแตกต่างระหว่างข้อมูล

ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAE) พบว่ามีค่าต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำที่สูงของข้อมูลจาก UAV เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคสนาม ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MSE) พบว่ามีค่าต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำที่สูงของข้อมูลจาก UAV เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคสนาม ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MSE) พบว่ามีค่าที่ต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำที่สูงของข้อมูลจาก UAV เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคสนาม รากที่สองของค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) พบว่ามีค่าต่ำ แสดงถึงความใกล้เคียงและความสอดคล้องสูงระหว่างค่าที่คาดการณ์และค่าจริง

2) ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลแปลงตัวอย่าง แปลงที่ 2 ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลแปลงตัวอย่าง แปลงที่ 2 พบต้นยางพาราทั้งสิ้น จำนวน 99 ต้น แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบผลข้อมูลแปลงตัวอย่าง แปลงที่ 2

ทั้งนี้ จากรูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลข้อมูลระหว่างข้อมูลปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0.1 ถึง 0.50 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2425 tCO₂e/ตัน และมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0.1 ถึง 0.48 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.239 tCO₂e/ตัน ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อนำผลข้อมูลระหว่างข้อมูลปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดจากภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วย NDVI มาทำการวัดประสิทธิภาพของโมเดลก็สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวัดประสิทธิภาพของโมเดล

สถิติ	NDVI
n	99
MAE	0.0173243
MSE	0.0004619
RMSE	0.0214910

จากตารางที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI โดยใช้ค่าทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบและวัดความแตกต่างระหว่างข้อมูลค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAE) พบว่ามีค่าต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำที่สูงของข้อมูลจาก UAV เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคสนาม ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MSE) พบว่ามีค่าที่ต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำที่สูงของข้อมูลจาก UAV เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคสนาม รากที่สองของค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) พบว่ามีค่าต่ำ แสดงถึงความใกล้เคียงและความสอดคล้องสูงระหว่างค่าที่คาดการณ์และค่าจริง

3) ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลผลรวม เป็นผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลผลรวมของมวลชีวภาพจากข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วย NDVI ของจำนวนต้นยางพาราทั้งหมดจากพื้นที่ 345 ไร่ พบจำนวนต้นยางพาราทั้งหมด 20,384 ต้น พบผลรวมมวลชีวภาพเท่ากับ 0.4684 ตัน/ตัน นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการกักเก็บคาร์บอน

จากข้อมูลจาก UAV โหมดหลายช่วงคลื่นด้วย NDVI ของจำนวนต้นไม้ทั้งหมด ก็พบผลรวมการกักเก็บคาร์บอน เท่ากับ 0.2201 tCO₂e/ตัน

3.7 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้พื้นที่แปลงตัวอย่าง เพียง 2 ไร่ จากพื้นที่ทั้งหมด 345 ไร่ (คิดเป็นประมาณ ร้อยละ 0.58) เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา ทรัพยากร และบุคลากรในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ซึ่งอาจส่งผลต่อความครอบคลุมและความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนา อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยเบื้องต้นสามารถแสดงศักยภาพของการใช้เทคโนโลยี UAV และการวิเคราะห์ภาพถ่ายหลายช่วงคลื่นร่วมกับข้อมูลภาคสนามได้อย่างชัดเจน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความครอบคลุมของผลลัพธ์ ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางสำหรับการศึกษาในอนาคตดังนี้

- 1) ขยายพื้นที่แปลงตัวอย่างให้ครอบคลุมอย่างน้อย 5 - 20% ของพื้นที่ทั้งหมด หรือประมาณ 17 - 69 ไร่
- 2) พัฒนาแบบจำลองโดยใช้ตัวแปรจากภาพถ่ายหลายช่วงคลื่นร่วมกับข้อมูลภาคสนาม
- 3) ทดสอบเทคนิค Machine learning หรือ Deep learning เพื่อประเมินชีวมวลอัตโนมัติจากภาพถ่าย UAV
- 4) ศึกษาฤดูกาลอื่นเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของฤดูกาลต่อค่าดัชนีพืชพรรณและความแม่นยำในการประเมิน

4. สรุปผล

การวิจัยนี้ใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เพื่อสร้างภาพ 3 มิติ และภาพออร์โธรีเฟอรัล โปรแกรม Agisoft PhotoScan และ QGIS ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางกายภาพของต้นยางพารา ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์แบบจำลองความสูงของ Canopy และดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ซึ่งสะท้อนถึงความเขียวขุ่มและ

สุขภาพของพืชพรรณ เพื่อประเมินการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลภูมิประเทศถูกนำมาใช้ในการปรับแก้ความผิดเพี้ยน เพื่อให้ได้ภาพที่มีความแม่นยำทางภูมิศาสตร์ ซึ่งมีความสำคัญต่อการวางแผนและจัดการพื้นที่ สำหรับการใช้อินพุตจาก UAV ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) ช่วยให้สามารถตรวจจับและวิเคราะห์ลักษณะทรงพุ่ม ต้นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบว่าทรงพุ่มของต้นยางพาราสามารถแสดงพิกัดและความสูงได้อย่างละเอียด ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวางแผนการใช้พื้นที่ และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ ในการวิเคราะห์ NDVI แสดงถึงความเขียวขุ่มและสุขภาพของพืชพรรณ ซึ่งมีค่าระหว่าง -0.7916 ถึง 0.8351 ค่า NDVI ที่สูงบ่งชี้ถึงพืชที่มีสุขภาพดี ขณะที่ค่าต่ำอาจบ่งชี้ถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณน้อย

นอกจากนี้ การวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอย เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI, ความสูง และการกักเก็บคาร์บอน พบว่า มีความสัมพันธ์ที่ดีมาก ซึ่งบ่งบอกถึงความแม่นยำในการคาดการณ์ข้อมูลจากโมเดล ผลการเปรียบเทียบข้อมูลภาคสนาม และ UAV พบว่า มีความสอดคล้องกันดี โดยการวัดประสิทธิภาพของโมเดลแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำสูงของข้อมูลจาก UAV เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคสนาม ดังนั้นการใช้เทคโนโลยี UAV และการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องมีประสิทธิภาพในการตรวจจับและประเมินสถานะของพืชพรรณในพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด ได้แก่ การพึ่งพาภาพถ่ายที่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง อาจไม่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณในระยะยาว และความแม่นยำของผลลัพธ์อาจได้รับผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศหรือเงื่อนไขแสงขณะบินเก็บภาพ แนวทางการศึกษาต่อไปควรเน้นการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดทั้งปี เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล รวมถึงการเพิ่มพารามิเตอร์

ทางชีวภาพอื่น ๆ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางทรงพุ่มหรือปริมาณใบ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินคาร์บอนและขยายการศึกษาไปยังพื้นที่หรือชนิดพืชอื่น เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนในระดับภูมิภาค

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Liu, H. Tang, M. Aamer, and G. Huang, "Emission mechanism and reduction countermeasures of agricultural greenhouse gases: A review," *Greenh. Gases: Sci. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 160-174, Apr. 2019. doi: 10.1002/ghg.1848.
- [2] M. Abunyewah *et al.*, "Understanding climate change adaptation in Ghana: The role of climate change anxiety, experience, and knowledge," *Environ. Sci. Policy*, vol. 150, pp. 103594-103594, Dec. 2023. doi: 10.1016/j.envsci.2023.103594.
- [3] L. Al-Ghussain, "Global warming: Review on driving forces and mitigation," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 13-21, Jan. 2019. doi: 10.1002/ep.13041.
- [4] V. Eyring *et al.*, "Human influence on the climate system," in *Climate Change 2021—The Physical Science Basis*, V. Eyring *et al.*, Eds. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2023, pp. 423-552.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Summary for policymakers," in *Climate Change 2022—Mitigation of Climate Change*, P. R. Shukla *et al.*, Eds. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2023, Art. no. 001. doi: 10.1017/9781009157926.001.
- [6] Y. Zhang, C.-L. Pan, and H.-T. Liao, "Carbon neutrality policies and technologies: A scientometric analysis of social science disciplines," *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, Art. no. 799861, Feb. 2022. doi: 10.3389/fenvs.2021.799861.
- [7] D. R. Liyanage, K. Hewage, H. Karunathilake, and R. Sadiq, "Feasibility of carbon-capturing in building heating systems: A life cycle thinking-based approach," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 132, Feb. 2024, Art. no. 104056. doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104056.
- [8] B. Zhang, J. I. Arachchi, and S. Managi, "Forest carbon removal potential and sustainable development in Japan," *Sci. Rep.*, vol. 14, Jan. 2024, Art. no. 1162. doi: 10.1038/s41598-024-51308-z.
- [9] Food and Agriculture Organization (FAO), *In Brief to The State of the World's Forests 2022: Forest Pathways for Green Recovery and Building Inclusive, Resilient and Sustainable Economies*. Rome, Italy: FAO, 2022. doi: 10.4060/cb9363en.
- [10] T. A. M. Pugh *et al.*, "Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 116, no. 10, pp. 4382-4387, Mar. 2019. doi: 10.1073/pnas.1810512116.
- [11] J. Qin, P. Liu, A. R. Martin, W. Wang, Y. Lei, and H. Li, "Forest carbon storage and sink estimates under different management scenarios in China from 2020 to 2100," *Sci. Total Environ.*, vol. 927, Jun. 2024, Art. no. 172076. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172076.

- [12] S. Saha and S. Bera, "Carbon estimation in the undershrub layer and the soil of a dry deciduous forest of West Bengal (Eastern India)," *Trop. Ecol.*, vol. 61, no. 4, pp. 487-496, Dec. 2020. doi: 10.1007/s42965-020-00108-3.
- [13] Y. Zhang, S. Liang, and L. Yang, "A review of regional and global gridded forest biomass datasets," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 23, Nov. 2019, Art. no. 2744. doi: 10.3390/rs11232744.
- [14] M. Chopping, Z. Wang, C. Schaaf, M. A. Bull, and R. R. Duchesne, "Forest aboveground biomass in the southwestern United States from a MISR multi-angle index, 2000-2015," *Remote Sens. Environ.*, vol. 275, Jun. 2022, Art. no. 112964. doi: 10.1016/j.rse.2022.112964.
- [15] Y. Li *et al.*, "Modeling ecological resilience of alpine forest under climate change in western Sichuan," *Forests*, vol. 14, no. 9, Aug. 2023, Art. no. 1769. doi: 10.3390/f14091769.
- [16] H. B. Huang, C. X. Liu, X. Y. Wang, X. L. Zhou, and P. Gong, "Integration of multi-resource remotely sensed data and allometric models for forest aboveground biomass estimation in China," *Remote Sens. Environ.*, vol. 221, pp. 225-234, Mar. 2019. doi: 10.1016/j.rse.2018.11.017.
- [17] V. A. Slavskiy and S. M. Matveev, "Some aspects of the laying of permanent trial plots during the state inventory of forests," *Lesotechnical J.*, vol. 11, no. 1, pp. 56-63, 2021. doi: 10.34220/2222-7962-2021-11-1-56-63.
- [18] R. Zhang, Y. Wang, Y. Wang, and Y. Wang, "Estimating aboveground biomass in subtropical forests of China by integrating multisource remote sensing and ground data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 232, Oct. 2019, Art. no. 111341. doi: 10.1016/j.rse.2019.111341.
- [19] V. Slavskiy *et al.*, "Assessment of phytomass and carbon stock in the ecosystems of the central forest steppe of the East European Plain: Integrated approach of terrestrial environmental monitoring and remote sensing with unmanned aerial vehicles," *Life*, vol. 14, no. 5, May 2024, Art. no. 632. doi: 10.3390/life14050632.
- [20] S. Mustafa, M. A. Butt, M. Ali, M. U. Sadiq, and T. Tauqeer, "Precision agriculture and unmanned aerial vehicles (UAVs)," in *Agriculture and Aquaculture Applications of Biosensors and Bioelectronics*, S. J. Prakash *et al.*, Eds. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2024, pp. 125-142.
- [21] U. Surendran, K. Ch. V. Nagakumar, and M. P. Samuel, "Remote sensing in precision agriculture," in *Digital Agriculture*, P. M. Priyadarshan, S. M. Jain, S. Penna, and J. M. Al-Khayri, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2024, pp. 201-223.
- [22] T. Angkahad, W. Chokkuea, S. Sangpradid, Y. Uttaruk, K. Viriyasatr, and T. Laosuwan, "The assessment of above-ground biomass

- and carbon sequestration in community forests using UAV technology,” *Def. Technol. Acad. J.*, vol. 7, no. 15, pp. R11R 2 8 , Jan.-Apr. 2025.
- [23] T. Angkahad *et al.*, “Developing a drone-based machine learning for spatial modeling and analysis of biomass and carbon sequestration in forest ecosystems,” *ES Eng. Sci.*, vol. 35, 2025, Art. no. 1508. doi: 10.30919/es1158.
- [24] S. Jarahizadeh and B. Salehi, “A comparative analysis of UAV photogrammetric software performance for forest 3D modeling: A case study using Agisoft Photoscan, PIX4Dmapper, and DJI Terra,” *Sensors*, vol. 24, no. 1, Jan. 2024, Art. no. 286. doi: 10.3390/s24010286.
- [25] V. Reinprecht and D. S. Kieffer, “Application of UAV photogrammetry and multispectral image analysis for identifying land use and vegetation cover succession in former mining areas,” *Remote Sens.*, vol. 17, no. 3, Jan. 2025, Art. no. 405. doi: 10.3390/rs17030405.
- [26] P. K. Parida *et al.*, “Unmanned aerial vehicle-measured multispectral vegetation indices for predicting LAI, SPAD chlorophyll, and yield of maize,” *Agriculture*, vol. 14, no. 7, Jul. 2024, Art. no. 1110. doi: 10.3390/agriculture14071110.
- [27] W. Pan *et al.*, “Karst vegetation coverage detection using UAV multispectral vegetation indices and machine learning algorithm,” *Plant Methods*, vol. 19, Jan. 2023, Art. no. 7. doi: 10.1186/s13007-023-00982-7.
- [28] V. Nasiri, A. A. Darvishsefat, H. Arefi, V. C. Griess, S. M. M. Sadeghi, and S. A. Borz, “Modeling forest canopy cover: A synergistic use of Sentinel-2, aerial photogrammetry data, and machine learning,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 6, Mar. 2022, Art. no. 1453. doi: 10.3390/rs14061453.
- [29] S. Sharma, S. Dhal, T. Rout, and B. S. Acharya, “Drones and machine learning for estimating forest carbon storage,” *Carbon Res.*, vol. 1, Dec. 2022, Art. no. 21. doi: 10.1007/s44246-022-00023-6.
- [30] Z. Chen, M. Wang, and J. Zhang, “Object detection in UAV images based on improved YOLOv5,” in *Proc. 5th Int. Conf. on Cyber Security Intelligence and Analytics (CSIA)*, Z. Xu *et al.*, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 267-278.
- [31] M. B. Schwenke, L. Heinzmann, N. Rehus, A. Gessler, and V. C. Griess, “Individual tree-crown detection and species identification in heterogeneous forests using aerial RGB imagery and deep learning,” *Remote Sens.*, vol. 15, no. 5, Mar. 2023, Art. no. 1463. doi: 10.3390/rs15051463.
- [32] T. Kaakkurivaara, J. Hytönen, N. Kaakkurivaara, and J. Nurmi, “Biomass equations for rubber tree (*Hevea brasiliensis*) components in southern Thailand,” *J. Trop. For. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 256-265, Apr. 2018. doi: 10.26521/jtfs.v30i2.215.

การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพ เพื่อการตรวจจับกรวยจราจรในช่วงเวลาพลบค่ำด้วย YOLOv8

วิระ ศรีมาลา^{1*} กฤษณะ ชินสาร¹ อธิตา อ่อนเอื้อน¹ และ คงฤช ปิตานนท์²

วันที่รับ 11 พฤษภาคม 2568 วันที่แก้ไข 29 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 30 พฤษภาคม 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับกรวยจราจรโดยใช้สถาปัตยกรรม YOLOv8 โดยจำลองสถานการณ์การวางกรวยจราจรตามแนวไหล่ทางทั้งสองฝั่งของถนน เพื่อใช้เป็นสัญญาณเตือนและลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุจากสภาพไหล่ทาง การเก็บข้อมูลดำเนินการผ่านการบันทึกวิดีโอจริงโดยใช้กล้องสมาร์ทโฟนติดหน้ารถยนต์ ซึ่งมีเซนเซอร์ CMOS และเลนส์มุมกว้างที่ความละเอียด 1920 x 1080 พิกเซล ในช่วงเวลาพลบค่ำระหว่างเวลา 18.30 - 19.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความสว่างของแสงโดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 1 - 10 ลักซ์ ส่งผลให้ทัศนวิสัยต่ำและความคมชัดของภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ วิดีโอดังกล่าวถูกสกัดออกมาเป็นจำนวน 900 เฟรม จากนั้นเฟรมทั้งหมดจะถูกจัดเป็นชุดข้อมูลพื้นฐานชุดที่ 1 (SRC) และสำเนาอีก 5 ชุด เพื่อเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ 1) การปรับเชิงเส้น (LIN) 2) การปรับสมดุลฮิสโตแกรม (HE) 3) การเพิ่มคุณภาพของภาพแบบลอการิทึม (LOG) 4) การปรับเชิงเส้นร่วมกับการจัดการความอิมพัลส์ของสี (LIN - SAT) และ 5) การปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) กระบวนการตรวจจับกรวยจราจรดำเนินการด้วยสถาปัตยกรรม YOLOv8 โดยใช้โมเดลเฉพาะทางที่ผ่านการฝึกฝนเพื่อการตรวจจับกรวยโดยเฉพาะ การประเมินประสิทธิภาพใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ จำนวนกรวยเฉลี่ยต่อเฟรม ความแม่นยำ (Precision) ความครอบคลุม (Recall) ค่าความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุม (F1 Score) ความถูกต้อง (Accuracy) และค่าเฉลี่ยความเชื่อมั่น (Average Confidence) ผลการทดลองพบว่า การประมวลผลภาพด้วยการปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความเปรียบต่างให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด โดยได้จำนวนกรวยเฉลี่ยต่อเฟรมเท่ากับ 4.7 ความแม่นยำเท่ากับ 98.74% ความครอบคลุมเท่ากับ 77.78% ค่าความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุมเท่ากับ 87.01% ความถูกต้องเท่ากับ 77.01% และค่าเฉลี่ยความเชื่อมั่นเท่ากับ 62.22% ดังนั้น การประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความเปรียบต่างจึงมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบตรวจจับกรวยจราจรด้วย YOLOv8 ภายใต้สภาพแสงน้อยได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: YOLOv8, การตรวจจับกรวยจราจร, การเพิ่มคุณภาพของภาพ, การตรวจจับวัตถุ

¹ คณะวิทยาการสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยบูรพา

² คณะครุศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

* ผู้แต่ง, อีเมล: 67810033@go.buu.ac.th

Performance Evaluation of Image Enhancement Techniques for Traffic Cone Detection Under Twilight Conditions Using YOLOv8

Wira Srimala^{1*} Krisana Chinnasarn¹ Athita Onuean¹ and Konggrit Pitanon²

Received 11 May 2025, Revised 29 May 2025, Accepted 30 May 2025

Abstract

This paper presents the performance evaluation of various image enhancement techniques applied to traffic cone detection using YOLOv8 architecture. A real - world simulation was conducted by placing traffic cones along both sides of a roadway to serve as visual warning signals in twilight conditions. Data collection was performed through real video recording using a smartphone camera mounted on the car's dashboard. The camera features a CMOS sensor and a wide-angle lens, capturing images at a resolution of 1920 x 1080 pixels during twilight hours (18.30 - 19.00). Ambient illumination levels typically range between 1 and 10 lux, resulting in significantly reduced visibility and image clarity. A total of 900 video frames were extracted and organized into one base dataset (SRC) and then duplicated into five additional sets. They were processed using five enhancement techniques: 1) Linear Adjustment (LIN) 2) Histogram Equalization (HE) 3) Logarithmic Enhancement (LOG) 4) Linear Adjustment with Saturation Handling (LIN-SAT) and 5) Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). Traffic cone detection was performed using a YOLOv8 model specifically trained for this task. Evaluation metrics included Average Cone Count per frame, Precision, Recall, F1 Score, Accuracy, and Average Confidence. Experimental results showed that CLAHE yielded the best overall performance, detecting an average of 4.7 cones per frame with 98.74% Precision, 77.78% Recall, an F1 Score of 87.01%, 77.01% Accuracy, and 62.22% Average Confidence. The results confirm that CLAHE significantly improves the robustness and accuracy of YOLOv8 - based traffic cone detection under low - light conditions.

Keywords: YOLOv8, Safety cone detection, Image enhancement, Object detection

¹ Faculty of Informatics, Burapha University

² Faculty of Education, Rambhai Barni Rajabhat University

* Corresponding author, Email: 67810033@go.buu.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เทคนิคการประมวลผลภาพเข้ามามีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีสมัยใหม่หลากหลายระบบ เช่น ระบบยานยนต์ไร้คนขับ ระบบตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน และระบบรักษาความปลอดภัยอัจฉริยะ โดยระบบเหล่านี้จำเป็นต้องพึ่งพาข้อมูลภาพและวิดีโอที่มีคุณภาพสูงภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะระบบรักษาความปลอดภัยในการขับขี่ยานพาหนะ แม้ว่าปัจจุบันเทคโนโลยีกล้องถ่ายภาพและการประมวลผลภาพจะพัฒนาไปจนมีคุณภาพสูงเพียงพอสำหรับการใช้งานในระบบต่าง ๆ แล้วก็ตาม แต่ในสภาพแวดล้อมจริงยังมีหลายปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้อมูลภาพและวิดีโอ ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการประมวลผลและการวิเคราะห์ โดยเฉพาะในระบบที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยบนท้องถนน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินได้

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ยังคงเป็นอุปสรรคหลักคือ สภาพแสงน้อย ซึ่งพบได้บ่อยในช่วงเวลากลางคืนหรือในพื้นที่ที่มีแสงสว่างจำกัด เช่น ถนนในชนบท อาคาร ใต้ดิน [1] แม้กระทั่งในเขตเมืองที่มีไฟส่องสว่างอย่างเพียงพอ ก็ยังพบปัญหาแสงไม่เพียงพอในช่วงเวลาพลบค่ำ ซึ่งเป็นช่วงเวลาพิเศษที่แสงจากธรรมชาติลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่แสงจากไฟถนนและไฟหน้ารถยังไม่สามารถให้ความสว่างได้อย่างเต็มที่ ปัญหานี้ส่งผลต่อทั้งการบันทึกภาพและการมองเห็นของมนุษย์โดยตรง

การทำงานภายใต้สภาพแสงน้อยนำไปสู่การลดลงของคุณลักษณะเชิงภาพสำคัญ เช่น ความสว่าง ความเปรียบต่าง ความคมชัดของขอบภาพ และความละเอียดของรายละเอียดพื้นผิว ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจจับวัตถุ การจำแนกประเภท และการติดตามวัตถุ ในช่วงไม่กี่ปี

ที่ผ่านมา นักวิจัยได้พัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของภาพ เพื่อยกระดับคุณภาพของภาพในสภาพแสงน้อย โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุต่าง ๆ เช่น การตรวจจับคน การจำแนกรถยนต์ การตรวจจับสัญญาณไฟจราจร และการประเมินสภาพพื้นผิวถนน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่มุ่งเน้นเฉพาะการตรวจจับกรวยจราจรในช่วงเวลาพลบค่ำยังมีค่อนข้างจำกัด [2]

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและทดลองตรวจจับกรวยจราจรในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อสร้างความปลอดภัยบนท้องถนน ภาพที่ใช้ในการศึกษาได้จากวิดีโอที่บันทึกด้วยกล้องสมาร์ทโฟน ซึ่งมีเซ็นเซอร์ CMOS คุณภาพสูง และเลนส์หลักมุมกว้าง 80 - 85 องศา ความละเอียดภาพ 1920 x 1080 พิกเซล ติดตั้งหน้ารถ โดยรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 30 - 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อีกทั้งยังได้จัดทำชุดข้อมูลของกรวยจราจรในช่วงเวลาที่มีสภาพแสงน้อย ระหว่างเวลา 18.30 - 19.00 น. ซึ่งมีค่าความสว่างของแสงโดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 1 - 10 ลักซ์ และมุ่งศึกษาผลกระทบของเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพหลายรูปแบบที่มีต่อประสิทธิภาพของการตรวจจับกรวยจราจรด้วยสถาปัตยกรรม YOLOv8 รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับระหว่างชุดภาพต้นฉบับ (ไม่ปรับแต่ง) กับชุดภาพที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิค 5 รูปแบบ ได้แก่ LIN, HE, LOG, LIN-SAT และ CLAHE

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประมวลผลภาพในสภาพแสงน้อย

สภาพแสงน้อยเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของข้อมูลภาพ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาหลักหลายประการ ได้แก่ ความสว่างต่ำ ความเปรียบต่างต่ำ การสูญเสียรายละเอียดของวัตถุ และการลดทอนความคมชัดของขอบวัตถุ ปัญหาเหล่านี้

มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการวิเคราะห์และประมวลผลภาพ เช่น การนับวัตถุ การตรวจจับวัตถุ การจำแนกประเภท และการติดตามวัตถุ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีแสงจำกัด เช่น ช่วงเวลากลางคืน ถนนในชนบท ช่วงเวลาพลบค่ำที่มีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 1-10 ลักซ์ ทำให้ภาพที่ได้มีคุณภาพต่ำลง การประมวลผลภาพนี้จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญเพื่อฟื้นฟูคุณลักษณะเชิงภาพและช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการวิเคราะห์ภาพให้ถูกต้องและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2.2 เทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพ

s คือ ค่าความเข้มของพิกเซล
หลังการแปลงลอการิทึม

r คือ ค่าความเข้มของพิกเซล
ก่อนการแปลงลอการิทึม

c คือ ค่าคงที่สำหรับการปรับขนาด
ในลอการิทึม

การเพิ่มคุณภาพของภาพ หมายถึง กระบวนการปรับปรุงลักษณะของภาพต้นฉบับ เพื่อให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์และประมวลผลในขั้นตอนถัดไป โดยเฉพาะในกรณีของภาพที่ถ่ายในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการตรวจจับวัตถุ เทคนิคการปรับปรุงภาพที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 5 วิธี ได้แก่

1) วิธีเชิงเส้น (Linear Scaling: LIN)

การปรับค่าความสว่างและความเปรียบต่างของภาพด้วยวิธีเชิงเส้นเป็นเทคนิคพื้นฐานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของภาพดิจิทัล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยืดช่วงค่าความเข้มของพิกเซลให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ เช่น 0 - 255 ซึ่งช่วยเพิ่มความเปรียบต่างของภาพและทำให้รายละเอียดในภาพชัดเจนยิ่งขึ้น [3] กระบวนการของวิธีเชิงเส้นประกอบด้วย การแปลงค่าความเข้มของพิกเซลในภาพต้นฉบับให้อยู่ในช่วงใหม่ที่กำหนด โดยใช้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (1)

$$I_{out} = \left(\frac{I_{in} - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \right) \times (O_{max} - O_{min}) + O_{min} \quad (1)$$

โดยที่

2) การปรับสมดุลฮิสโตแกรม (HE)

เป็นเทคนิคการกระจายค่าความสว่างของภาพให้สม่ำเสมอทั่วทั้งภาพ เพื่อเพิ่มความเปรียบต่างโดยรวม [4] โดยใช้สมการที่ (2)

$$s_k = \text{round} \left(\frac{\text{cdf}(r_k) - \text{cdf}_{min}}{(M \times N) - \text{cdf}_{min}} \times (L - 1) \right) \quad (2)$$

โดยที่

3) การเพิ่มคุณภาพภาพแบบลอการิทึม (LOG)

I_{in} คือ ค่าความเข้มของพิกเซล
ในภาพต้นฉบับ

I_{out} คือ ระดับความเข้มของพิกเซล
หลังการแปลง

I_{min} คือ ค่าความเข้มต่ำสุดของพิกเซล

I_{max} คือ ค่าความเข้มสูงสุดของพิกเซล

O_{min} คือ ค่าความเข้มต่ำในภาพผลลัพธ์

O_{max} คือ ความเข้มสูงสุดในภาพผลลัพธ์

เทคนิคการปรับภาพโดยใช้ฟังก์ชันลอการิทึม เพื่อเน้นรายละเอียดในพื้นที่ที่มีความสว่างต่ำโดยเพิ่มความสว่างในบริเวณเหล่านั้นให้ชัดเจนขึ้น [3] โดยใช้สมการที่ (3)

$$S = c \cdot \log(1 + r) \quad (3)$$

โดยที่

S_k คือ ค่าความเข้มของพิกเซลใหม่

r_k คือ ระดับความเข้มของพิกเซล
ก่อนการแปลง

$cdf(r_k)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม
ที่ระดับความเข้ม r_k

cdf_{min} คือ ค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม
ที่ไม่เป็นศูนย์ที่น้อยที่สุด

$M \times N$ คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมดในภาพ

L คือ จำนวนระดับความเข้ม
(เช่น 256 สำหรับภาพ 8 บิต)

I' คือ ค่าความเข้มของพิกเซล
หลังการแปลง

I คือ ระดับความเข้มของพิกเซล
ภาพต้นฉบับ

I_{min} คือ ค่าความเข้มต่ำสุด

I_{max} คือ ค่าความเข้มสูงสุด

4) การปรับเชิงเส้นพร้อมการจัดการความอึดตัวของสีในภาพ (LIN-SAT)

เป็นเทคนิคที่ต่อยอดจากวิธีเชิงเส้น โดยเพิ่มเติมการจัดการค่าความอึดตัว เพื่อหลีกเลี่ยงการขยายค่าสีเกินจริง [3] โดยใช้สมการที่ (4)

$$I' = \min \left(\max \left(\frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \times 255, 0 \right), 255 \right) \quad (4)$$

โดยที่

5) การปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความแปรปรวนต่าง (CLAHE)

เป็นวิธีปรับปรุงคุณภาพของภาพเพื่อเพิ่มความคมชัดและเน้นรายละเอียดของวัตถุต่าง ๆ ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยวิธีนี้ถูกพัฒนาต่อยอดมาจากเทคนิค การปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบดั้งเดิม [5] ซึ่ง CLAHE จะทำการปรับค่าความสว่างของภาพในแต่ละบริเวณย่อย (local region) แยกกัน โดยเน้นการกระจายค่าเฉพาะในบริเวณที่มีค่าความเข้มของพิกเซลสูงกว่าค่าเฉลี่ย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขยายคอนทราสต์มากเกินไปในพื้นที่ที่มีความสว่างอยู่

2.3 หลักการตรวจจับวัตถุ

การตรวจจับ เป็นกระบวนการพื้นฐานในงานประมวลผลภาพ ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุตำแหน่งและจำแนกประเภทของวัตถุในภาพ กระบวนการนี้ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ การระบุพิกัดของวัตถุด้วยกรอบสี่เหลี่ยม และการจำแนกประเภท [6]

การตรวจจับวัตถุมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบที่ต้องการข้อมูลเชิงพื้นที่แบบเวลาจริง เช่น ระบบขับช้อัตโนมติ และระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง ความแม่นยำและความเร็วของการตรวจจับขึ้นอยู่กับทั้งคุณภาพของข้อมูลภาพและสถาปัตยกรรมของโมเดลที่ใช้

2.4 YOLOv8 สำหรับการตรวจจับวัตถุ

YOLO (You Only Look Once) เป็นสถาปัตยกรรมการตรวจจับวัตถุแบบ Single - Stage ที่มีจุดเด่นในด้านความเร็วและความแม่นยำ โดย YOLOv8 เป็นรุ่นที่พัฒนาจากตระกูล YOLO ซึ่งได้มีการปรับปรุงโครงสร้างโมเดล เช่น การนำโมดูลการเรียนรู้เชิงลึกที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และการใช้เทคนิคการประมวลผลล่วงหน้าแบบอัจฉริยะเพื่อยกระดับผลลัพธ์การตรวจจับ [7] YOLOv8 มีความสามารถในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กในสภาวะแสงน้อยได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการการประมวลผลแบบเวลาจริง เช่น การตรวจจับกรวยจราจรบนถนนในสภาวะแสงน้อยที่มีความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุสูง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งพัฒนาเทคนิคการตรวจจับวัตถุในสภาวะแสงน้อย ตัวอย่าง เช่น [8] ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับกรวยจราจรแบบเรียลไทม์ โดยใช้การผสานข้อมูลสีและข้อมูลความลึกผ่าน YOLOv4 ซึ่งประสบความสำเร็จในการตรวจจับกรวยจราจร แต่ไม่ได้เน้นการแก้ปัญหาในช่วงเวลาพลบค่ำที่มีสภาพแสงจำกัดอย่างชัดเจน นอกจากนี้

Z. Lin และคณะ [9] ได้พัฒนา YOLO - LLTS สำหรับการตรวจจับป้ายจราจรในสภาพแสงน้อย โดยเสริมประสิทธิภาพการเพิ่มคุณภาพภาพและการโต้ตอบคุณลักษณะข้ามสาขา แม้ว่างานวิจัยเหล่านี้จะมีความก้าวหน้า แต่ยังไม่มียานใดที่มุ่งเน้นเฉพาะการตรวจจับกรวยจราจรในช่วงเวลาพลบค่ำโดยตรง ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้จึงมีบทบาทสำคัญในการเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว

3. วิธีการวิจัย

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตรวจจับกรวยจราจรในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อยในช่วงเวลาพลบค่ำ (Twilight) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แสงธรรมชาติลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ระบบไฟส่องสว่างบนท้องถนนยังไม่สามารถให้แสงได้เพียงพอ ส่งผลให้ภาพถ่ายจากกล้องมีความสว่างไม่สม่ำเสมอ และลดทอนความสามารถในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก เช่น กรวยจราจรที่ตั้งอยู่บนผิวถนน โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 1 การวางกรวยจราจรสำหรับการทดลอง

3.1 การจัดเตรียมสภาพแวดล้อม

การทดลองนี้ดำเนินการในพื้นที่ถนนจริงที่มีสภาพแสงใกล้เคียงกับสถานการณ์ใช้งานจริงช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ตก ระหว่างเวลา 18.30 - 19.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กล้องทั่วไปจะเริ่มสูญเสียรายละเอียดของภาพเนื่องจากความสว่างที่ลดลงอย่างรวดเร็ว กรวยจราจร

ถูกวางไว้ในตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวขอบถนน จำนวน 12 กรวย แสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้กรวยจราจรขนาด 27 x 45 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2 เพื่อจำลองสถานการณ์กรวยจราจรกีดขวางขนาดเล็ก



รูปที่ 2 กรวยจราจรขนาด 27 x 45 เซนติเมตร

3.2 การบันทึกวิดีโอ

กล้องบันทึกวิดีโอถูกติดตั้งในยานพาหนะบริเวณกึ่งกลางรถดังแสดงในรูปที่ 3 และขับเคลื่อนผ่านบริเวณที่มีการจัดวางกรวย โดยการบันทึกวิดีโอดำเนินต่อเนื่องจนหมดระยะที่วางกรวยในอัตรา 30 เฟรมต่อวินาที ได้ข้อมูลรวมประมาณ 900 เฟรม ซึ่งถูกนำมาใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพของภาพในขั้นตอนถัดไป

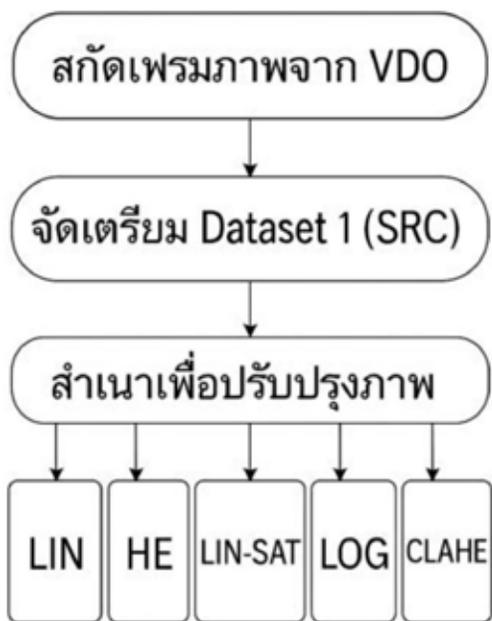


รูปที่ 3 การวางกล้องบันทึกวิดีโอในรถ

3.3 การปรับปรุงคุณภาพของภาพจากวิดีโอ

หลังจากแปลงวิดีโอเป็นภาพนิ่งให้อยู่ในช่วง 900 - 1,000 เฟรม ในช่วงเวลาแสงพลบค่ำ จะทำการตรวจสอบจำนวนเฟรมที่บันทึกได้ โดยก่อนดำเนินการ

ประมวลผลภาพจากวิดีโอ จำเป็นต้องตรวจสอบจำนวนเฟรมทั้งหมดเพื่อควบคุมการวนลูบและประเมินปริมาณข้อมูลที่ต้องประมวลผล โดยในการวิจัยนี้ใช้คำสั่งจากไลบรารี OpenCV เพื่อดึงจำนวนเฟรมทั้งหมดภายในวิดีโอ โดยภาพแต่ละเฟรมจะมีลักษณะของแสงที่ไม่สม่ำเสมอ ความสว่างต่ำ และความเปรียบต่างไม่เพียงพอ ส่งผลต่อการตรวจจับวัตถุโดยตรง โดยได้ภาพชุดแรกที่ยังไม่ได้ปรับแต่งภาพ เป็น ชุดข้อมูลชุดที่ 1 (ชุด SRC) จากนั้นจึงได้นำภาพชุดข้อมูลชุดที่ 1 ทำสำเนาเพิ่มอีก 5 ชุดข้อมูล เพิ่มเข้าสู่กระบวนการเพิ่มคุณภาพภาพ (Image Enhancement) โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ทั้งหมด 5 วิธี ได้แก่ 1) การปรับเชิงเส้น (LIN), 2) การปรับสมดุลฮิสโตแกรม (HE), 3) การเพิ่มคุณภาพของภาพแบบลอการิทึม (LOG), 4) การปรับเชิงเส้นพร้อมการจัดการความอึมตัวของสี (LIN-SAT) และ 5) การปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเตรียมชุดข้อมูลเพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพ

3.4 การตรวจจับกรวยจราจรและการวิเคราะห์ผลเชิงภาพ

ในขั้นตอนนี้เป็นการส่งภาพทั้งหมด 6 ชุดข้อมูลชุดข้อมูลละ 900 ภาพ โดยแบ่งเป็นชุดข้อมูลที่ผ่านการเพิ่มคุณภาพภาพจำนวน 5 เทคนิค และชุดข้อมูลต้นฉบับที่ไม่ได้ปรับแก้ 1 ชุดข้อมูล เข้าสู่กระบวนการตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล YOLOv8n โดยการดำเนินการตรวจจับกรวยจราจรครั้งนี้ได้กำหนดค่า confidence threshold ให้คงที่ และใช้การตรวจจับ ตามค่าพื้นฐานของ YOLOv8n โดยจะทำการตรวจจับกรวยจราจรที่ปรากฏในภาพจากทั้ง 6 ชุดข้อมูล หากตรวจพบกรวยจราจร โมเดลจะทำการวาดกรอบสี่เหลี่ยมรอบวัตถุ พร้อมแสดงค่าความมั่นใจ (Confidence Score) บนภาพและส่งออกเป็นภาพใหม่ที่มีการระบุกรอบวัตถุไว้ เพื่อใช้ในการสร้างวิดีโอ หรือเก็บเป็นผลลัพธ์สำหรับการประเมินประสิทธิภาพต่อไป

3.5 การวิเคราะห์ประเมินประสิทธิภาพและสรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตรวจจับกรวยจราจรในงานวิจัยเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการตรวจจับภาพที่ผ่านการเพิ่มคุณภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ และใช้โมเดล YOLOv8 เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจจับกรวยจราจรในแต่ละเฟรม การวิเคราะห์ประกอบด้วยการประมวลผลภาพที่ได้จากแต่ละเทคนิคผ่านโมเดล YOLOv8 จากนั้นจึงบันทึกผลลัพธ์การตรวจจับเพื่อวิเคราะห์ด้วยตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่

1) Precision: ความแม่นยำของการตรวจจับ

โดยความแม่นยำของการตรวจจับ คือ อัตราส่วนของจำนวนการตรวจจับกรวยจราจรที่ถูกต้อง (True Positives) ต่อจำนวนการตรวจจับได้ทั้งหมด (True Positives + False Positives)

2) Accuracy: ความถูกต้องโดยรวมของระบบ

คือ อัตราส่วนของจำนวนการตรวจจับที่ถูกต้องทั้งหมด (True Positives + True Negatives) ต่อจำนวนทั้งหมดของการตรวจจับและไม่ตรวจจับ

3) Recall: ความครอบคลุมของการตรวจจับ

โดยความครอบคลุมของการตรวจจับ คือ อัตราส่วนของจำนวนการตรวจจับที่ถูกต้อง (True Positives) ต่อจำนวนวัตถุทั้งหมดที่ควรตรวจจับได้ (True Positives + False Negatives)

4) F1 Score คือ ค่าความสมดุลระหว่าง Precision และ Recall โดยมีสมการดังสมการที่ (5)

$$F1\ Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

การใช้ F1 Score จะช่วยให้สามารถประเมินความสมดุลระหว่างการตรวจจับวัตถุที่ถูกต้อง (True Positives) และการหลีกเลี่ยงการตรวจจับวัตถุที่ผิดพลาด (False Positives และ False Negatives) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อยหรือมีสิ่งรบกวนสูง เช่น เวลาากลางคืน ช่วงเวลาพลบค่ำ ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถของโมเดลในการตรวจจับวัตถุได้

5) Average Confidence: ค่าความมั่นใจเฉลี่ยในการตรวจจับ

คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความมั่นใจในการตรวจจับแต่ละครั้ง

6) Average Cone Count: จำนวนกรวยที่ตรวจจับได้โดยเฉลี่ยต่อเฟรม

คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนกรวยที่ตรวจจับได้ในแต่ละเฟรม โดยข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บและประเมินในรูปแบบเชิงตัวเลข โดยนำค่าที่ได้จากแต่ละเทคนิคมาเปรียบเทียบกันในเชิงสถิติ เพื่อวิเคราะห์ว่าเทคนิคใดส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตรวจจับกรวยจราจรได้ดีที่สุดภายใต้สภาพแสงน้อย ทั้งในด้านความแม่นยำและจำนวนการตรวจพบวัตถุ [10]

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลองบันทึกข้อมูล

ในพื้นที่ทดลองช่วงเวลาพลบค่ำ 18.30 - 19.00 น. มีมุมอับแสง มีหลังคาโรงจอดรถ และมีรั้วไม้ปกคลุม เมื่อถึงเวลาพลบค่ำจะมีผลกระทบต่อการถ่ายภาพ จึงเหมาะสมที่จะทดลองบริเวณนี้เป็นอย่างมาก โดยวิดีโอที่บันทึกได้ มีข้อมูลเฟรมภาพ 900 เฟรม ตรงตามกำหนด จากนั้นจะทำการสกัดเพื่อส่งไปดำเนินการปรับปรุงภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ ในขั้นตอนถัดไป โดยตัวอย่าง วิดีโอที่ถ่ายในช่วงเวลาพลบค่ำแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพจากวิดีโอที่บันทึกในช่วงเวลาพลบค่ำ

4.2 ผลการตรวจจับกรวยจราจรและการวิเคราะห์ผลเชิงภาพ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ผลเชิงภาพ เป็นการวิเคราะห์ภาพด้วยสายตาในเบื้องต้น เพื่อพิจารณาลักษณะภาพที่ได้ หลังจากการปรับปรุงภาพโดยตัวอย่างผลการวิเคราะห์เชิงภาพด้วยสายตา จากรูปตัวอย่างรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยเฟรมตัวอย่างที่ได้จากวิดีโอเดียวกันจาก 6 ชุดข้อมูล สามารถวิเคราะห์ภาพด้วยสายตาได้ ดังรูปที่ 6

1) ภาพต้นฉบับ (SRC) ภาพบนซ้าย: ภาพมีระดับความสว่างปานกลาง ให้ภาพที่ไม่สว่างหรือมืดจนเกินไป รายละเอียดของวัตถุในระยะกลางยังสามารถมองเห็นได้ค่อนข้างชัดเจน การตรวจจับวัตถุทำได้ในระดับที่น่าพอใจ

2) ภาพจากการเพิ่มคุณภาพภาพแบบลอการิทึม (LOG) ภาพบนขวา: ภาพโดยรวมดูมืดลงเล็กน้อย แต่มีความเปรียบต่างดีขึ้นในบางพื้นที่ วัตถุใกล้กล้องสามารถมองเห็นและตรวจจับได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม บริเวณพื้นถนนบางส่วนยังมีเงามืด ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการตรวจจับ

3) ภาพจากการปรับเชิงเส้น (LIN) ภาพกลางซ้าย: ผลการปรับเชิงเส้นให้ผลลัพธ์ที่สมดุลทั้งในแง่ของแสงและความเปรียบต่างภาพมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งเฟรม สามารถตรวจจับวัตถุได้แม้ในบริเวณขอบภาพ

4) ภาพจากการปรับเชิงเส้นพร้อมการจัดการความอึมตัวของสี (LIN - SAT) ภาพกลางขวา : ภาพมีลักษณะซีดลง และความเปรียบต่างลดลงเมื่อเทียบกับภาพการปรับเชิงเส้น ส่งผลให้ขอบวัตถุบางส่วนไม่คมชัด โดยเฉพาะวัตถุในระยะไกล ซึ่งอาจทำให้ YOLOv8 ตรวจจับวัตถุได้ไม่ครบถ้วน

5) การปรับสมดุลฮิสโตแกรม (HE) ภาพล่างซ้าย: ภาพมีความสว่างสูงเกินไปในบางบริเวณของภาพ เกิดปรากฏการณ์แสงสี ซึ่งอาจทำให้โมเดลตรวจจับกรวยผิดพลาด หรือระบุขอบวัตถุไม่ถูกต้อง โดยเฉพาะเมื่อฉากหลังมีความสว่างมาก

6) การปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) ภาพล่างขวา: เป็นภาพที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยให้ความเปรียบต่างที่เหมาะสม รายละเอียดของพื้นผิวถนน กรวยจราจร และเส้นจราจรปรากฏอย่างชัดเจน ทำให้ YOLOv8 สามารถตรวจจับกรวยได้เกือบครบทุกตำแหน่งในภาพ

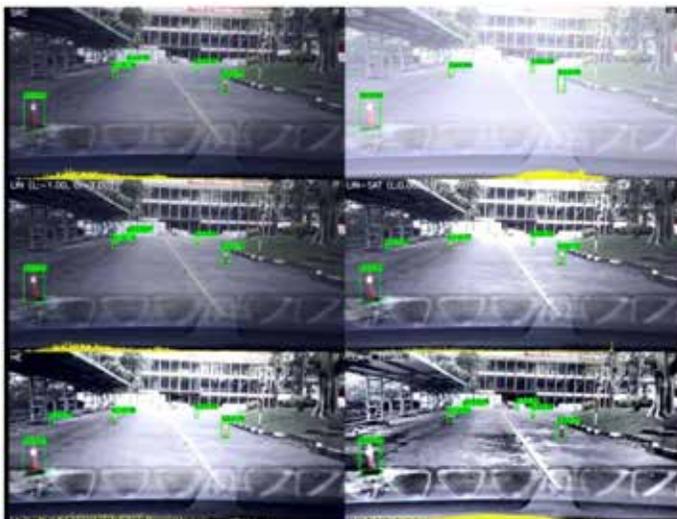
โดยสรุปจากการวิเคราะห์แบบเชิงภาพด้วยสายตาเบื้องต้น พบว่า เทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความเปรียบต่าง ช่วยทำให้ภาพมีคุณภาพที่ดีที่สุด รองรับการตรวจจับวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับผลการประเมินเชิงตัวเลขที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ผลการประเมินผลประสิทธิภาพการตรวจจับกรวยจราจร

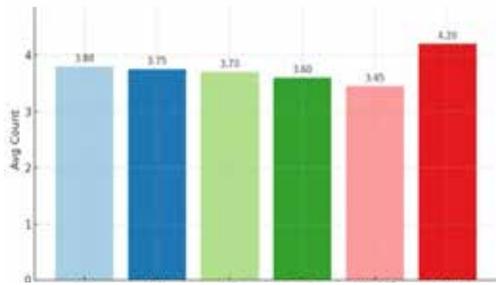
การประเมินผลประสิทธิภาพการตรวจจับจำนวนกรวยจราจร แบ่งผลการประเมินเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ผลการตรวจจับกรวยจราจร

ผลการตรวจจับจำนวนกรวยจราจร เป็นการรายงานผลการเปรียบเทียบด้านจำนวนกรวยจราจรที่พบในแต่ละเฟรมภาพเฉลี่ย จำนวน 900 ภาพจากในแต่ละชุดข้อมูล แสดงดังกราฟแท่งในรูปที่ 7

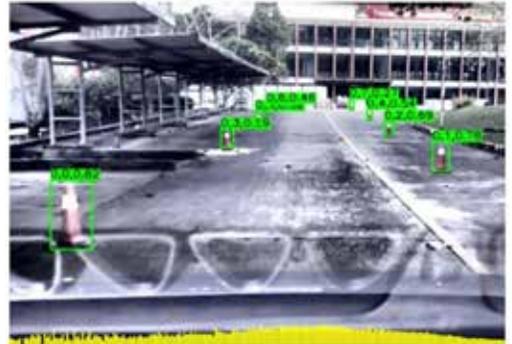


รูปที่ 6 ตัวอย่างผลการตรวจจับกรวยจราจรในเฟรมเดียวกันด้วยเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพทั้ง 6 แบบ



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตรวจพบจำนวนกรวยจราจรจากทั้งหมดชุดข้อมูลละ 900 ภาพ

ซึ่งจากกราฟ พบว่า วิธีการปรับปรุงภาพแบบการปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความแปรปรวนต่าง (CLAHE) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีค่าการตรวจพบเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4.20 ขึ้นต่อเฟรม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถช่วยเพิ่มความชัดเจนของวัตถุในภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้โมเดล YOLOv8 ตรวจจับกรวยจราจรได้เป็นอย่างดี ในขณะที่เทคนิคจากชุดข้อมูลอื่น ๆ ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 3.45 ถึง 3.80 ขึ้นต่อเฟรม ซึ่งแม้จะเพิ่มคุณภาพของภาพได้ในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังไม่เทียบเท่าเทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความแปรปรวนต่างที่สามารถเพิ่มความแปรปรวนของภาพในสภาพแสงน้อยจนมีผลต่อจำนวนกรวยจราจร



รูปที่ 8 ตัวอย่างผลการตรวจจับกรวยจราจรจากภาพแบบ CLAHE

ที่ตรวจจับได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพตัวอย่างรูปที่ 8 ที่แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดภาพและการตรวจพบกรวยจราจรได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ทุกชั้นที่ปรากฏในภาพ

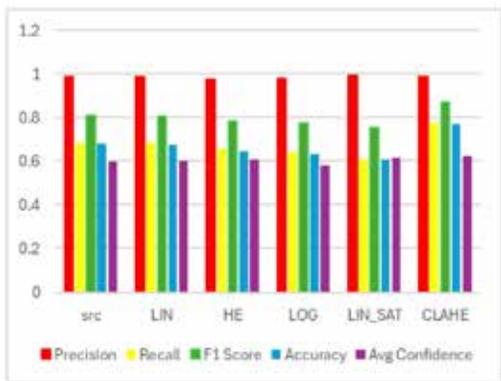
ส่วนที่ 2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการปรับปรุงภาพด้วยตัวชี้วัดมาตรฐาน

จากผลลัพธ์จากการประเมินด้วยตัวชี้วัดมาตรฐานทั้ง 5 ตัวชี้วัด ได้แก่ ความแม่นยำ ความครอบคลุม ค่าความสมมูลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุม ความถูกต้อง และค่าเฉลี่ยความเชื่อมั่น แสดงไว้ในตารางที่ 1 และรูปที่ 9 พบว่ามีความแตกต่างด้านประสิทธิภาพระหว่างเทคนิค

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบผลการประเมินด้วยตัวชี้วัดมาตรฐานของเทคนิคการปรับปรุงภาพ

ชุดข้อมูลภาพ	ความแม่นยำ	ความครอบคลุม	คะแนน F1	ความถูกต้อง	ความเชื่อมั่นเฉลี่ย
1. ไม่ปรับแต่ง (SRC)	0.98	0.68	0.80	0.67	0.59
2. การปรับเชิงเส้น (LIN)	0.98	0.68	0.80	0.67	0.60
3. การปรับสมดุลฮิสโตแกรม(HE)	0.97	0.65	0.78	0.64	0.60
4. การเพิ่มคุณภาพภาพแบบลอการิทึม (LOG)	0.98	0.64	0.77	0.63	0.58
5. การปรับเชิงเส้นพร้อมการจัดการความอิมตัวของสี (LIN-SAT)	0.99	0.60	0.75	0.60	0.61
6. การปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความแปรปรวนต่าง (CLAHE)	0.98	0.77	0.87	0.77	0.62

การปรับปรุงภาพแต่ละวิธีอย่างชัดเจน โดยพบว่าชุดข้อมูลภาพที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง (SRC) และการปรับเชิงเส้น (LIN) ให้ค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 0.98 แต่มีค่าความครอบคลุมในระดับปานกลาง ส่งผลให้ค่าคะแนน F1 อยู่ที่ประมาณ 0.80 ขณะที่เทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรม (HE) และการเพิ่มคุณภาพภาพแบบลอการิทึม (LOG) มีค่าความครอบคลุมต่ำกว่า ส่งผลให้คะแนน F1 และความถูกต้องลดลงตามลำดับ แม้ว่าเทคนิคการปรับเชิงเส้นพร้อมการจัดการความอึมตัวของสี (LIN - SAT) จะให้ค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 0.99 แต่ค่าความครอบคลุมต่ำที่สุด ส่งผลให้คะแนน F1 ต่ำกว่ากลุ่มอื่น ๆ อย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม เทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) แสดงผลลัพธ์โดยรวมที่ดีที่สุด โดยให้คะแนน F1 สูงสุดที่ 0.87 และค่าความถูกต้องสูงสุดที่ 0.77



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบผลการประเมินด้วยตัวชี้วัดมาตรฐานของเทคนิคการปรับปรุงภาพ

5. สรุปและการอภิปรายผลการวิจัย

การปรับปรุงภาพด้วยการปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) แสดงผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการอื่นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านการเพิ่มความเปรียบต่างของภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้โมเดล YOLOv8 สามารถสกัดคุณลักษณะเชิงลึกจากวัตถุภายในภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในสภาพ

แวดล้อมที่มีแสงน้อยหรือมีความแปรปรวนของความสว่าง เช่น บริเวณที่ไม่มีแสงไฟหรือช่วงเวลาพลบค่ำ จากการเปรียบเทียบผลการตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล YOLOv8 พบว่า การปรับปรุงภาพด้วยการปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) ให้ค่าความแม่นยำ (Precision) = 98.74%, ความครอบคลุม (Recall) = 77.78%, คะแนน F1 (F1 Score) = 87.01%, ความถูกต้อง (Accuracy) = 77.01% และค่าความเชื่อมั่นเฉลี่ย (Average Confidence) = 0.6222 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น โดยเฉพาะค่าคะแนน F1 ซึ่งสะท้อนถึงความสมดุลระหว่างความแม่นยำ (Precision) และความครอบคลุม (Recall) ของการตรวจจับวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ว่าเทคนิคการปรับเชิงเส้นพร้อมการจัดการความอึมตัวของสี (LIN - SAT) จะให้ค่าความแม่นยำ (Precision) สูงสุดที่ 99.35% แต่กลับมีค่าความครอบคลุม (Recall) ต่ำที่สุดเพียง 60.71% แสดงถึงแนวโน้มของการพลาดการตรวจจับกรวยจรรยาที่ควรปรากฏในภาพ ขณะที่เทคนิค SRC และ LIN ให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างสมดุล แต่ค่าคะแนน F1 และ Accuracy ยังคงอยู่ในระดับปานกลางและต่ำกว่า CLAHE อย่างมีนัยสำคัญ

ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับจำนวนกรวยจรรยาที่ตรวจจับได้โดยเฉลี่ยต่อเฟรม ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญในการประเมินเชิงปริมาณ โดยจากภาพทั้งหมด 900 เฟรมพบว่า เทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความเปรียบต่าง (CLAHE) สามารถตรวจจับกรวยได้เฉลี่ยสูงสุดที่ 4.2 ขึ้นต่อเฟรม ขณะที่เทคนิคอื่นมีค่าเฉลี่ยการตรวจจับกรวยจรรยาต่ำกว่า

เพื่อยืนยันว่าเทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับวัตถุ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบทางสถิติแบบเพอร์มิวเทชัน โดยตารางที่ 2 ได้แสดงผลการวิเคราะห์เฉพาะคู่ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

(p-value < 0.05) จากตารางดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เทคนิค CLAHE แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ได้แก่ HE, LOG และ LIN - SAT ในทุกค่าชี้วัดหลัก ทั้ง Accuracy, Avg Confidence, F1 Score และ Recall โดยมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 ในทุกกรณี ซึ่งบ่งชี้อย่างชัดเจนว่าเทคนิค CLAHE มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคนิคอื่น ๆ ในสถานะแสงน้อย

นอกจากนี้ ยังพบว่าเทคนิค SRC และ LIN แสดงความแตกต่างกับเทคนิคอื่นในบางค่าชี้วัดเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การเปรียบเทียบระหว่าง SRC กับ LIN - SAT พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในค่า F1 Score และ Recall ขณะที่การเปรียบเทียบระหว่าง LIN กับ HE พบความแตกต่างในทุกค่าชี้วัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ค่า Avg Confidence ซึ่งมีค่า p-value เท่ากับ 0.048 ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันได้ว่า การเลือกใช้เทคนิคการเพิ่มคุณภาพของภาพส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับวัตถุอย่างมีนัยสำคัญ และเทคนิค CLAHE เป็นตัวเลือกที่ให้ผลลัพธ์โดยรวมดีที่สุด ในสถานการณ์ที่มีแสงน้อย เช่น ช่วงเวลาพลบค่ำ

อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพของภาพทำให้ระดับสัญญาณรบกวนในภาพเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำที่ได้กับสัญญาณรบกวนในภาพ ผู้วิจัยจึงสุ่มภาพจากข้อมูลแต่ละชุดออกมาจำนวน 5 ภาพ แล้วนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (Peak Signal-to-Noise Ratio: PSNR) ตามสมการที่ 6

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเพอร์มิวเทชัน (ค่า p-value < 0.05)

เทียบระหว่างเทคนิค	ความรอบคอบ	คะแนน F1	ความถูกต้อง	ความเชื่อมั่นเฉลี่ย
CLAHE vs HE	0.008	0.014	0.012	0.023
CLAHE vs LIN - SAT	0.005	0.007	0.007	0.013
CLAHE vs LOG	0.009	0.021	0.015	0.027
LIN vs HE	0.040	0.034	0.042	0.048
SRC vs LIN - SAT	0.011	0.007	0.025	0.036
SRC vs LOG	0.017	0.021	0.019	0.032

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (6)$$

โดยที่ MAX_I คือ ค่าความเข้มของพิกเซลสูงสุดที่เป็นไปได้

MSE คือ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการกับภาพชนิด 8 บิตต่อพิกเซล ดังนั้น จึงกำหนดค่า MAX_I ให้มีค่าเท่ากับ 255 และตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดของการปรับปรุงคุณภาพแต่ละแบบ

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดของแต่ละชุดข้อมูล

เฟรมที่	LIN	LIN - SAT	HE	CLAHE	LOG
2	30.37	10.82	9.03	9.49	7.09
96	28.50	9.63	9.06	9.60	7.07
301	29.17	12.18	9.43	9.87	7.01
682	25.62	13.20	12.48	12.26	7.27
784	24.04	14.63	13.34	12.68	7.37
เฉลี่ย	27.54	12.09	10.67	10.78	7.16

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดของชุดข้อมูล LIN นั้นมีค่าสูงสุด แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้มีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนในภาพน้อยกว่าเทคนิคอื่นมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดของชุดข้อมูล CLAHE ซึ่งแม้จะมีค่าต่ำกว่ากรณีของชุดข้อมูล LIN และ LIN - SAT แต่เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นที่เหลือนั้นพบว่าเทคนิค CLAHE นี้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดดีกว่าเทคนิค HE และ LOG

ดังนั้น ผลการทดลองทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าเทคนิคการปรับสมดุลฮิสโตแกรมโดยจำกัดความแปรปรวน (CLAHE) ไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพในเชิงความเปรียบต่างได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังสนับสนุนการทำงานของโมเดล YOLOv8 ให้มีความแม่นยำและความเสถียรสูงสุดในสภาพแสงน้อยหรือช่วงเวลาพลบค่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับการดำเนินงานในครั้งนี้ และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง

พร้อมทั้งสนับสนุนทุนการศึกษาอันมีคุณค่า และขอแสดงความขอบคุณต่อผู้พัฒนาโมเดลการตรวจจับกรวยจราจรโดยเฉพาะจาก GitHub repository: (https://github.com/EngrAwab/Safety_Cone_detection) ที่ได้เปิดเผยข้อมูลและโมเดล ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Wang *et al.*, “Ultra-high-definition low-light image enhancement: A benchmark and transformer-based method,” Dec. 2022, *arXiv:2212.11548*. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2212.11548>
- [2] Z. Wang, Z. Cai, and Y. Wu, “An improved YOLOX approach for low-light and small object detection: PPE on tunnel construction sites,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 1158-1175, Jun. 2023. doi: 10.1093/jcde/qwad042.
- [3] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. New York, NY, USA: Pearson, 2018.

- [4] S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, et al., "Adaptive histogram equalization and its variations," *Comput. Vis. Graph. Image Process.*, vol. 39, no. 3, pp. 355-368, Sep. 1987.
- [5] K. Zuiderveld, "Contrast limited adaptive histogram equalization," in *Graphics Gems IV*, P. S. Heckbert, Ed. San Diego, CA, USA: Academic Press Professional, 1994, pp. 474-485.
- [6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2016, pp. 779-788.
- [7] G. Jocher, A. Chaurasia, A. Qiu, and Y. Stoken, "YOLO by Ultralytics," *GitHub*, 2023. [Online]. Available: github.com. Accessed: Jan. 30, 2026.
- [8] Q. Su *et al.*, "Real-time traffic cone detection for autonomous driving based on YOLOv4," *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 10, pp. 1380-1390, Oct. 2022. doi: 10.1049/itr2.12212.
- [9] Z. Lin *et al.*, "YOLO-LLTS: Real-time low-light traffic sign detection via prior-guided enhancement and multi-branch feature interaction," Mar. 2025, *arXiv:2503.13883*. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2503.13883>.
- [10] T.-Y. Lin *et al.*, "Microsoft COCO: Common objects in context," in *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV)*, 2014, pp. 740-755.

การประยุกต์ใช้แขนกลบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อช่วยเหลือผู้ประสบอัคคีภัย

ประสงค์ศักดิ์ สองศรี¹ และ ธรรมราช อาษาสุวรรณ^{2*}

วันที่รับ 5 ธันวาคม 2567 วันที่แก้ไข 7 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 16 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาแขนกลสำหรับติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ประเภทมัลติโรเตอร์ โดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้งานในการช่วยเหลือผู้ประสบภัยจากเหตุอัคคีภัยในพื้นที่เข้าถึงยาก ระบบแขนกลที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกลไกมือจับขึ้นงานซึ่งผลิตจากวัสดุที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูง และระบบควบคุมที่สามารถสั่งงานให้จับและปล่อยวัตถุได้อย่างแม่นยำระหว่างที่อากาศยานไร้คนขับอยู่ในระหว่างการบิน จากการทดสอบภาคสนาม พบว่าแขนกลที่พัฒนาขึ้นสามารถรับน้ำหนักวัตถุได้สูงสุดถึง 10 กิโลกรัม โดยในการทดสอบครั้งนี้ได้เลือกใช้น้ำหนักวัตถุระหว่าง 1.3 - 3 กิโลกรัม เพื่อความปลอดภัยและความเสถียรในการบิน โดยสามารถหยิบจับวัตถุที่มีลักษณะแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ (1) ลูกบอลดับเพลิงน้ำหนัก 1.3 กิโลกรัม (2) กล่องปฐมพยาบาลน้ำหนัก 3 กิโลกรัม และ (3) เสื้อชูชีพน้ำหนัก 2 กิโลกรัม อากาศยานไร้คนขับสามารถทำการบินขึ้น-ลง ในแนวตั้งที่ระดับความสูง 10 เมตร ภายใต้สภาวะลมควบคุม 0-3 เมตร/วินาที (พัดจากทิศตะวันตกไปตะวันออก) และเคลื่อนที่ได้อย่างเสถียรในขณะที่ทำการจับวัตถุทั้งสามชนิด โดยไม่กระทบต่อความเสถียรการบินของอากาศยานไร้คนขับ อย่างมีนัยสำคัญ ($FSI \geq 0.9$) และใช้เวลา 5 นาที โดยแขนกลสามารถหยิบจับวัตถุได้สำเร็จในอัตราเฉลี่ยที่ 97% แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำระบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การติดตั้งแขนกลบนอากาศยานไร้คนขับสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการปฏิบัติงานกู้ภัยในพื้นที่เสี่ยงภัยอัคคีภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในแง่ของความเร็วในการเข้าถึง ความปลอดภัย และความแม่นยำในการส่งมอบอุปกรณ์ช่วยชีวิตไปยังผู้ประสบภัย

คำสำคัญ: การออกแบบทางกล, การหยิบจับทางอากาศ, ปลายแขนกล, หุ่นยนต์ทางอากาศ, โดรนแบบมัลติโรเตอร์

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

² สาขาวิชาวิศวกรรมซ่อมบำรุงอากาศยาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

* ผู้แต่ง, อีเมล: journal.thammarat@gmail.com

Application of a Robotic Arm on Unmanned Aerial Vehicles for Fire Disaster Victim Assistance

Prasongsuk Songsree¹ and Thammarat Arsasuwan^{2*}

Received 5 December 2024, Revised 7 May 2025, Accepted 16 July 2025

Abstract

This research aims to design and develop a robotic arm integrated with a multirotor unmanned aerial vehicle (UAV) for assisting victims in fire disaster scenarios, particularly in areas that are difficult to access. The proposed system includes a lightweight yet robust mechanical gripper and a precise control system, enabling the UAV to grasp and release objects effectively while in flight. Field experiments revealed that the developed robotic arm can lift objects weighing up to 10 kilograms. In the tests, object weights between 1.3-3 kilograms were selected to ensure flight safety and stability. The arm effectively grasped objects of different types, including (1) a fire-extinguishing ball (1.3 kg), (2) a first-aid kit (3 kg), and (3) a life jacket (2 kg). The unmanned aerial vehicle (UAV) was able to take off and land vertically at an altitude of 10 meters under controlled wind conditions of 0-3 m/s (blowing from west to east), maintaining stable flight while handling all three types of objects without significantly affecting flight stability ($FSI \geq 0.9$). The entire operation was completed within 5 minutes, and the robotic arm achieved an average grasping success rate of 97%, demonstrating the system's potential for effective application in real-world rescue operations. The results indicate that integrating a robotic arm with UAVs significantly enhances their operational capabilities in emergency response missions. This approach improves accessibility, operational efficiency, and precision in delivering life-saving equipment to victims in hazardous environments such as fire-affected areas.

Keywords: Mechanical Design, Aerial Manipulation, End Effector, Aerial Robotics, Multirotor Drone

¹ Technology Program in Electrical Technology and Automatic Control System, Engineering and Technology, Siam Technology College

² Department Aircraft Maintenance Engineering, Engineering and Technology, Siam Technology College

* Corresponding author, E-mail: journal.thammarat@gmail.com

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า “โดรน” ได้รับการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด และมีการนำมาใช้ในหลากหลายภารกิจ อาทิ การสำรวจ ภูมิศาสตร์ การเกษตร การขนส่ง ตลอดจนการกู้ภัย ในสถานการณ์ฉุกเฉิน ความสามารถในการบินขึ้นและลงในแนวตั้งของอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์ (Multirotor UAVs) คล้ายคลึงกับเฮลิคอปเตอร์ แต่มีขนาดเล็กและควบคุมทิศทางได้อย่างแม่นยำในพื้นที่จำกัด ส่งผลให้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในงานที่ต้องการความคล่องตัวสูง [1] แม้อากาศยานไร้คนขับจะมีความสามารถในการบินและเข้าถึงพื้นที่อันตรายหรือยากต่อการเข้าถึงของมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ความสามารถในการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมในเชิงกายภาพยังคงเป็นข้อจำกัดสำคัญ ดังนั้นการเพิ่มศักยภาพให้อากาศยานไร้คนขับสามารถหยิบจับและขนย้ายวัตถุได้ จึงเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการติดตั้งแขนกลหรือมือจับขึ้นงาน (Gripper) เพื่อให้สามารถจัดการวัตถุต่าง ๆ ได้ในภารกิจที่ต้องการการติดต่อเชิงกลไกร่วมกับสิ่งแวดล้อม [2]

แนวทางดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในภารกิจด้านการกู้ภัย เช่น การช่วยเหลือผู้ประสบภัยอศศภัยในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้โดยมนุษย์หรือยานพาหนะขนาดใหญ่ โดย UAV ที่ติดตั้งแขนกลสามารถนำส่งอุปกรณ์ช่วยชีวิต เช่น หน้ากากกันควัน อาหารหรือยา ไปยังตำแหน่งที่มีผู้ติดค้างได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ช่วยลดความเสี่ยงและเพิ่มโอกาสในการช่วยเหลือชีวิต [3] อย่างไรก็ตาม การออกแบบและพัฒนาแขนกลสำหรับอากาศยานไร้คนขับต้องเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ เช่น น้ำหนักของกลไกที่อาจกระทบต่อระยะเวลาในการบิน ความทนทานของวัสดุในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ความร้อนจากเปลวเพลิง หรือควันหนาทึบ และความแม่นยำของระบบควบคุมที่ต้องประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์แบบเรียลไทม์เพื่อให้การหยิบจับมีประสิทธิภาพสูงสุด [4]

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาด้านการออกแบบและประยุกต์ใช้แขนกลบนอากาศยานไร้คนขับจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มขีดความสามารถของระบบ UAV ให้สามารถปฏิบัติภารกิจที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะในบริบทของการกู้ภัยจากเหตุอศศภัยซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีความเร่งด่วน อันตรายสูง และต้องการเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ การพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวไม่เพียงแต่เพิ่มขีดความสามารถของ UAV เท่านั้น แต่ยังเป็นการสร้างแนวทางใหม่ในการช่วยเหลือชีวิตมนุษย์ในสถานการณ์วิกฤตอย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างแขนกลบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยอศศภัย

2.2 เพื่อการหยิบจับชิ้นงานลูกบอลดับเพลิง และสิ่งของลักษณะต่าง ๆ เพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยอศศภัยของแขนกลสำหรับอากาศยานไร้คนขับ

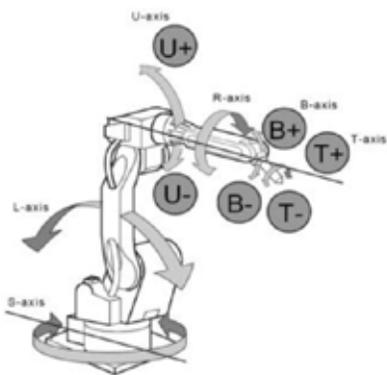
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีเกี่ยวข้องของแขนกล

หุ่นยนต์ที่เราพิจารณาในเรื่องการวางแผนการเคลื่อนที่นั้น ถูกจำกัดว่าเป็นวัตถุชิ้นเดียวเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์แต่ในความเป็นจริงโดยทั่วไปหุ่นยนต์ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนต่าง ๆ หลายชิ้นที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กัน นอกเหนือจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ยังมีหุ่นยนต์อีกประเภทที่พบเห็นได้ในโรงงานประกอบชิ้นส่วน นั่นคือ แขนกล ปัจจุบันแขนกลได้มีบทบาทขอบเขตของโรงงานเข้ามาในชีวิตของเราในแง่อื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

แขนกลคือหุ่นยนต์ที่ประกอบไปด้วยท่อนแขน (link) ที่นำมาประกอบกันด้วยข้อต่อ (joint) ข้อต่อมีหลายแบบ แต่ละแบบก็จะอนุญาตให้เกิดการเคลื่อนที่ของท่อนแขนที่แตกต่างกันไป ในการสร้างแขนกลโดยทั่วไป ข้อต่อที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ข้อต่อแบบหมุน (revolute joint) และข้อต่อแบบเลื่อน (prismatic joint) สำหรับข้อต่อแบบหมุน ท่อนแขนสองท่อนถูกยึดติดกันที่จุดหมุน ซึ่งอยู่บนท่อนแขน โดยแต่ละท่อน

สามารถหมุนได้รอบจุดหมุนนี้ เราสามารถบอกตำแหน่งของสองท่อนแขนที่สัมพันธ์กันด้วยมุมที่ท่อนแขนหมุนไป ส่วนข้อต่อแบบเลื่อนนั้น ท่อนแขนสองท่อนติดอยู่ด้วยกันในลักษณะเดียวกันกับเสาอากาศวิทยุรถยนต์ที่ยืดหดได้ โดยท่อนแขนแต่ละท่อนสามารถเลื่อนเข้าออกได้ในหนึ่งทิศทาง เราสามารถระบุตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของสองท่อนแขนได้จากระยะเลื่อนเข้าออกดังกล่าว จะเห็นได้ว่าข้อต่อแบบหมุนและข้อต่อแบบเลื่อนมีระดับเสรีของการเคลื่อนที่เป็นหนึ่ง เราเรียกตัวแปรที่กำหนดการเคลื่อนที่นี้ ซึ่งได้แก่ มุมหมุนของข้อต่อแบบหมุน และระยะเลื่อนของข้อต่อแบบเลื่อนว่าเป็นพารามิเตอร์ของข้อต่อ การมีระดับเสรีของการเคลื่อนที่เป็นหนึ่งทำให้ง่ายในการออกแบบแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะพื้นฐานของแขนกล [9]

3.2 ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับของอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับ หรือ โดรน เกิดจากแนวคิดของ Nikola Tesla ซึ่งเป็นวิศวกรเครื่องกลและไฟฟ้าเป็นผู้ริเริ่มแนวคิดเกี่ยวกับกองบินอากาศยานไร้คนขับขึ้นในปี พ.ศ. 2458 และในปี พ.ศ. 2459 ได้มีการสร้างอากาศยานไร้คนขับรุ่นแรก ซึ่งเป็นเป้าฝึกทางอากาศ (Aerial Target) โดย Archibald Montgomery Low (A. M. Low) ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์และเป็นนักวิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับเครื่องบิน หลังจากนั้นอากาศยานไร้คนขับก็มีการคิดค้นพัฒนานักอย่างแพร่หลายมากขึ้นรวมทั้งก่อให้เกิดเครื่องบินอัตโนมัติฮิวิตต์-สเปอร์รี่ (Hewitt-Sperry

Automatic Airplane) ขึ้นมาอีกด้วย ในปี พ.ศ. 2478 หลังสงครามโลกครั้งที่ 1 เรจินัลด์ เดนนี่ (Reginald Denny) มีการพัฒนาระบบควบคุมให้เป็นอากาศยานไร้คนขับที่ควบคุมได้จากระยะไกลหรืออาร์พีวี (Remote Piloted Vehicle: RPV) ขึ้นอีก และได้มีความพยายามคิดค้นและพัฒนาการสร้างอากาศยานไร้คนขับอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลที่ต้องการใช้เทคโนโลยีเพื่อการรักษาผลประโยชน์ของประเทศชาติ จนทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว

อากาศยานไร้คนขับ ตัวอย่างดังรูปที่ 2 โดยสามารถควบคุมได้จากอุปกรณ์ ภายใต้อุปกรณ์บินอัตโนมัติหรือจากระยะไกลควบคุม โดยทั่วไปแล้วอากาศยานไร้คนขับจะหมายถึงอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งในปัจจุบันมีการนำอากาศยานไร้คนขับ มาประยุกต์เข้าใช้กับงานที่หลากหลาย เช่น งานด้านการทหาร งานด้านภูมิศาสตร์ งานสำรวจพื้นที่ต่าง ๆ และการขนส่งพัสดุ เนื่องจากสามารถบินได้ในสามมิติ และมีความคล่องตัวในการบินสูง โดยลักษณะการใช้งานต่าง ๆ สามารถติดตั้งโปรแกรมเพื่อให้บินไปยังเส้นทางที่กำหนดได้ หรือวางแผนการบินเพื่อทำภารกิจบางอย่าง หรือใช้วิธีการบังคับจากอุปกรณ์สมาร์ทโฟน ซึ่งอากาศยานไร้คนขับก็มีหลากหลายประเภท ขึ้นอยู่กับการใช้งานและวัตถุประสงค์ โดยหลัก ๆ อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบปีกคงที่ เช่น เครื่องบิน และแบบปีกหมุน เช่น เฮลิคอปเตอร์ หรืออากาศยานไร้คนขับ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 (โดรน) หรือ อากาศยานไร้คนขับ

3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 1999 Nobuaki Nakazawa และคณะ ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการควบคุมแรงจذبขึ้นงาน

โดยออกแรงจับชิ้นงานน้อยที่สุดในการจับชิ้นงานขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งแขนกลที่ใช้ในการทดสอบนั้นเป็นแขนกลที่ติดตั้ง Strain gage ที่มีมือจับชิ้นงาน จากนั้นเมื่อแขนกลได้จับชิ้นงานและทำการยกในแนวตั้ง จะเกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ผิวสัมผัสของมือจับ ในการทดลองนั้นใช้กฎข้อ 2 ของนิวตัน กับระบบควบคุม PD Control ในการควบคุมมือจับชิ้นงานจากแรงที่เกิดขึ้นในการจับยกชิ้นงานขณะที่ยกขึ้น โดยในการทดลองได้ใช้เวลาสุ่มทั้งหมด 8 แบบ และได้ทำการทดลองกับผู้ร่วมการทดลองอายุระหว่าง 22 ถึง 27 ปี จำนวน 4 คน ซึ่งผลที่ได้คือมือจับชิ้นงานนั้นสามารถควบคุมแรงที่มากเกินไปได้ แต่ระบบยังไม่สามารถทำงานให้เกิดความราบเรียบได้อย่างมนุษย์ [6]

ปี 2000 Erika Ottaviano และคณะ ได้ทดลองการควบคุมแรงจับของมือจับชิ้นงานโดยใช้หลักการของนิวเมติกส์มาควบคุมการจับชิ้นงาน ซึ่งในมือจับชิ้นงานนั้นได้ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อเป็นตัวป้อนกลับของสัญญาณ และได้ใช้ระบบควบคุมแบบ PI Control ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการควบคุมการทำงานของมือจับชิ้นงาน หลังจากทำการทดลองเสร็จคณะผู้ทำงานทดลองจึงได้สรุปว่าระบบดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริง [7]

ปี 2000 Takashi Maeno และคณะ ได้ทำการทดลองการควบคุมมือจับชิ้นงาน โดยมือจับชิ้นงานนั้นสามารถยืดหยุ่นได้ หลักการมืออยู่ว่าที่มือจับนั้นได้ติดตั้งแผ่นทองแดงที่มี Strain gage ไว้ที่บนแผ่นทองแดงจำนวนมาก และถ้าหากวัตถุตรวจวัดแรงมีขนาดเล็กการกระจายแรงก็จะดีขึ้น และการค้นหาแรงที่เกิดจากการยกชิ้นงานก็จะดีขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งหากทำการยกวัตถุแล้ววัตถุเกิดการสั่นไถล แผ่นทองแดงนั้นก็เกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมแรงจับของมือจับชิ้นงานซึ่งงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อได้อีกมาก [8]

ปี 2015 Zhang และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยใยแก้ว (GFRP) ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยพบว่าวัสดุเริ่มสูญเสียสมบัติเชิงกลเมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 250 °C และมีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า

300 °C [10] ผลการวิจัยดังกล่าวสะท้อนให้เห็นข้อจำกัดของวัสดุไฟเบอร์ในงานที่เกี่ยวข้องกับอค์คีย์ซึ่งสอดคล้องกับข้อพิจารณาในการเลือกวัสดุสำหรับการสร้างแขนกลในงานวิจัยนี้

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ศึกษาการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้กับมือจับชิ้นงาน โดยการออกแบบและพัฒนามือจับชิ้นงาน และเปรียบเทียบน้ำหนักในการหยิบจับชิ้นงาน และการหาความแม่นยำในการปล่อยชิ้นงาน มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

4.1 ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของแขนกล (Robotic Arm) บนอากาศยานไร้คนขับ

เป็นส่วนหนึ่งของหุ่นยนต์ Robot สามารถควบคุมหรือสั่งการให้แขนกลเคลื่อนทำงานได้ตามต้องการ เช่น งานตัดเลเซอร์ งานเชื่อมโลหะ งานพ่นสี เป็นต้น หรือเพื่อการหยิบ-วางวัตถุ สิ่งของต่าง ๆ หลักพื้นฐานการเคลื่อนที่ของแขนกลสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

1) แขนกลแบบ Cartesian Robot มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นทั้ง 3 แกน เช่นระบบเครนในโรงงานอุตสาหกรรม มีข้อดี คือ สามารถออกแบบให้รับน้ำหนักได้สูง ควบคุมการทำงานได้ง่าย มีข้อเสีย คือ ต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง แสดงดังรูปที่ 3



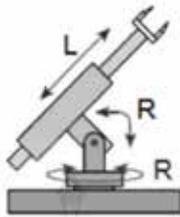
รูปที่ 3 ลักษณะแขนกลแบบ Cartesian Robot [9]

2) แขนกลแบบ Cylindrical Robot มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น 2 แกน และเชิงมุม 1 แกน เช่น เครนก่อสร้างอาคารสูง มีข้อดี คือ ออกแบบใช้งานง่าย ชิ้นส่วนไม่ซับซ้อน มีข้อเสีย คือ มีพื้นที่การทำงานที่จำกัด แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะแขนกลแบบ Cylindrical Robot [9]

3) แขนกลแบบ Spherical Robot มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น 1 แกน และเชิงมุม 2 แกน เช่น แขนกลงานเชื่อม มีข้อดี คือ สามารถหยิบ-วางได้ มีข้อเสีย คือ มีระบบการควบคุมที่ซับซ้อน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะแขนกลแบบ Spherical Robot [9]

4.2 การออกแบบมือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการออกแบบและพัฒนา มือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เริ่มออกแบบมือจับชิ้นงาน สำหรับประยุกต์ใช้บนอากาศยานไร้คนขับ โดยในการออกแบบในครั้งนี้ ได้ใช้โปรแกรมพื้นฐานในรูปแบบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 รูปแบบแขนกลในโปรแกรมเขียนแบบพื้นฐาน



รูปที่ 7 รูปแบบมือจับชิ้นงาน

4.3 พัฒนามือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับ

หลังจากที่ได้ใช้โปรแกรมในการออกแบบเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มจัดทำชิ้นงานตามรูปแบบที่วางแผนไว้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำแผ่นไฟเบอร์มาตัดชิ้นงานตามแบบที่ได้วางไว้ โดยใช้เครื่อง CNC กัดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 8, รูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 8 ส่วนประกอบมือจับชิ้นงาน



รูปที่ 9 ต่อสายวงจรควบคุมของมือจับชิ้นงาน



รูปที่ 10 รูปมือจับชิ้นงานที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

4.4 อากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์ สำหรับการเกษตร ขนาด 20 ลิตร ที่ทางผู้วิจัยได้ ประกอบขึ้นมาเอง โดยบินสูงสุดได้ถึง 90 เมตร และบินได้นานสูงสุด 30 นาที ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 มือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับ

5. ผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนามือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์ ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

5.1 การออกแบบและพัฒนามือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ทดลองบินได้จริง

โดยโครงสร้างหลักของแขนกลได้รับการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (CAD) โดยเน้นให้มีน้ำหนักเบาแต่ยังคงความแข็งแรงเชิงกล วัสดุหลักที่ใช้สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างของแขนกลคือ แผ่นไฟเบอร์ (Fiber Sheet)

ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้านน้ำหนักที่เบาและมีความแข็งแรงสูง (High Strength-to-Weight Ratio) โดยชิ้นส่วนทั้งหมดถูกผลิตขึ้นรูปจากการตัดด้วย เครื่องกัด CNC ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พื้นฐาน เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงตามที่กำหนด (ตามรูปที่ 8) กลไกมือจับอาศัยการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ Tower Pro MG996R มีแรงบิดสูงสุด 10 กิโลกรัม-เซนติเมตร (kg-cm) [11] ที่แรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์ ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno เพื่อสั่งการจับและปล่อยวัตถุ

5.2 การหยิบจับชิ้นงานลักษณะต่าง ๆ ของแขนกลสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้มือจับชิ้นงานทดลองจับชิ้นงานทั้งหมด 3 ลักษณะ ขณะที่อากาศยานไร้คนขับ กำลังบิน ได้แก่ หยิบจับ ลูกบอลดับเพลิงที่มีน้ำหนัก 1.3 กิโลกรัม กล้องปฐมพยาบาลมีน้ำหนัก 3 กิโลกรัม และเสื้อชูชีพมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14



รูปที่ 13 มือจับชิ้นงาน ขณะจับลูกบอลดับเพลิง



รูปที่ 14 น้ำหนักลูกบอลดับเพลิง

5.2.1 มือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์ ขณะจับลูกบอลดับเพลิง

5.2.2 มือจับชิ้นงาน ขณะจับกล่องปฐมพยาบาล แสดงดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16



รูปที่ 15 มือจับชิ้นงาน ขณะจับกล่องปฐมพยาบาล



รูปที่ 16 น้ำหนักกล่องปฐมพยาบาล

5.2.3 มือจับชิ้นงาน ขณะจับเสื้อชูชีพ แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 มือจับชิ้นงาน ขณะจับเสื้อชูชีพ

การทดสอบภาคสนามดำเนินการกลางแจ้ง โดยให้อากาศยานไร้คนขับบินขึ้น-ลงแนวตั้งที่ความสูง 10 เมตร ขณะหยิบจับวัตถุ ภายใต้สภาวะลมด้านข้าง 0-3 m/s ความเร็วลมวัดด้วย anemometer วัตถุแต่ละชนิดทดสอบ 10 ครั้ง พร้อมบันทึกแรงบีบของ gripper และสังเกตความเสถียรการบิน

5.3 ผลการทดสอบการหยิบจับวัตถุ

การทดลองทดสอบแขนกลที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ ดำเนินการโดยให้ อากาศยานไร้คนขับทำการหยิบจับวัตถุ 3 ประเภท ได้แก่ ลูกบอลดับเพลิง (1.3 กิโลกรัม), กล่องปฐมพยาบาล (3.0 กิโลกรัม), และเสื้อชูชีพ (2.0 กิโลกรัม) โดยทำการทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง ต่อวัตถุ ผลการทดสอบพบว่าแขนกลสามารถหยิบจับวัตถุได้ด้วยอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 97% โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Deviation) $\pm 3\%$ ขณะที่ค่าดัชนีเสถียรภาพการบิน (FSI) อยู่ในช่วง 0.90-0.95 แสดงถึงการรักษาสถิตการบินที่ดีและการทดสอบในสภาวะลม 0-3 เมตร/วินาที จัดว่าเป็นสภาพลมที่อ่อนมาก และยังไม่สะท้อนความท้าทายในสถานการณ์ไฟไหม้จริง ซึ่งอาจเกิดการปั่นป่วนของอากาศ (turbulence) หรือกระแสลมจากเปลวเพลิงที่รุนแรงมากกว่า ดังนั้นผลการวิจัยนี้จึงเป็นการแสดงศักยภาพในสภาวะควบคุมเบื้องต้นเท่านั้น

ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า แขนกลสามารถหยิบจับวัตถุได้สำเร็จในอัตราเฉลี่ยในช่วง 90-100% คิดเป็น 97% โดยค่า FSI ยังคงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.90 ซึ่งสะท้อนถึงความเสถียรของอากาศยานไร้คนขับ ขณะทำการหยิบจับ

6. สรุปผล

การทดลองนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนามือจับชิ้นงานสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบมัลติโรเตอร์ที่สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 10 กิโลกรัม โดยมือจับชิ้นงานที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้งานได้จริงในการหยิบจับวัตถุหลากหลายรูปแบบขณะที่อากาศยานไร้คนขับ กำลังบินที่ความสูงการบิน 10 เมตร ภายใต้สภาวะลม 0-3 เมตร/วินาที ในการทดสอบได้ใช้มือจับชิ้นงานหยิบจับวัตถุ 3 ชนิด ได้แก่

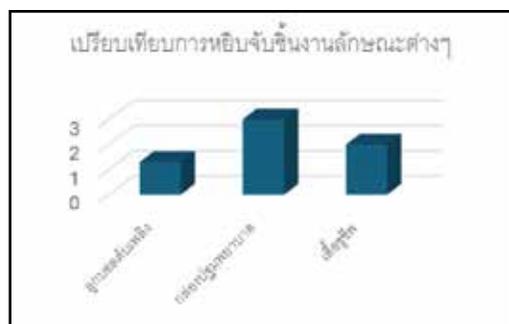
- 1) ลูกบอลดับเพลิงที่มีน้ำหนัก 1.3 กิโลกรัม
- 2) กล่องปฐมพยาบาลมีน้ำหนัก 3 กิโลกรัม
- 3) เสื้อชูชีพมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัม

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามือจับชิ้นงานแขนกลที่ออกแบบสามารถรองรับวัตถุหลากหลายขนาดโดยไม่กระทบต่อความเสถียรการบินของอากาศยานไร้คนขับ อย่างมีนัยสำคัญ (FSI ≥ 0.9) ซึ่งสอดคล้องกับ

แนวคิด aerial manipulation ในงานของ Ruggiero [3] สามารถหยิบจับวัตถุทั้ง 3 ชนิด ได้อย่างแม่นยำ โดยอากาศยานไร้คนขับสามารถบินขึ้นได้ขณะที่กำลังจับวัตถุทั้ง 3 ชนิด แสดงตาราง 1.1 และรูปที่ 18 และเคลื่อนที่ได้อย่างเสถียรในขณะที่ทำการจับวัตถุทั้งสามชนิด และใช้เวลา 5 นาที โดยแขนกลสามารถหยิบจับวัตถุได้สำเร็จในอัตราเฉลี่ยในช่วง 90-100% คิดเป็น 97% ซึ่งสะท้อนถึงความเสถียรของอากาศยานไร้คนขับขณะทำการหยิบจับ

ตารางที่ 1.1 แสดงเปรียบเทียบการหยิบจับชิ้นงาน ลักษณะต่าง ๆ

ขณะที่ อากาศยานไร้คนขับ กำลังบิน			
วัตถุ	น้ำหนัก (Kg)	เวลาที่ใช้งาน (นาที)	สถานะ โดรน
ลูกบอลดับเพลิง	1.30	5	บินขึ้น
กล่องปฐมพยาบาล	3	5	บินขึ้น
เสื้อชูชีพ	2	5	บินขึ้น



รูปที่ 18 กราฟแสดงเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการจับยกชิ้นงาน

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการนำอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้ในภารกิจที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การขนส่ง การกู้ภัย การเกษตร และการบำรุงรักษาสิ่งปลูกสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภารกิจที่ต้องารความคล่องตัวสูง และการเข้าถึงพื้นที่ที่ยากลำบาก

7. อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบแขนกลที่พัฒนาขึ้นสามารถหยิบจับวัตถุที่มีความหลากหลาย

ทั้งในด้านรูปร่าง น้ำหนัก และขนาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของการบินของอากาศยานไร้คนขับ ข้อค้นพบนี้สะท้อนถึงความสามารถในการปรับตัวและความยืดหยุ่นของกลไกมือจับ ซึ่งถือเป็นคุณลักษณะสำคัญในการนำไปใช้งานในภารกิจช่วยเหลือผู้ประสบภัย โดยเฉพาะในสถานการณ์อัคคีภัยที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและความปลอดภัยในการเข้าถึงพื้นที่เกิดเหตุ

อย่างไรก็ตาม การทดสอบในครั้งนี้อย่างดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม ซึ่งอาจไม่สะท้อนถึงความท้าทายที่เกิดขึ้นในสถานการณ์จริง เช่น สภาพอากาศแปรปรวน แรงลม คิววนหนาที่บ หรืออุณหภูมิที่สูงจากเปลวเพลิง ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของทั้งระบบควบคุมและกลไกการหยิบจับ ดังนั้น ในการศึกษาขั้นถัดไปควรมีการทดสอบระบบในสภาพแวดล้อมภาคสนามที่หลากหลายและใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เพื่อประเมินขีดความสามารถและความทนทานของระบบในบริบทของการใช้งานจริง

นอกจากนี้ การพัฒนาฟังก์ชันเพิ่มเติม เช่น ระบบหมุน (rotational mechanism) การควบคุมแรงจับ (force control) หรือการตรวจจับวัตถุแบบอัตโนมัติผ่านกล้องและเซนเซอร์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สามารถจัดการกับวัตถุที่มีลักษณะซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และสอดคล้องกับภารกิจที่มีความเสี่ยงสูงและต้องการความแม่นยำสูงในการดำเนินงาน

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบในด้านน้ำหนักวัตถุ, แรงที่กระทำ, แรงบีบจาก gripper, อัตราความสำเร็จ และค่าดัชนีเสถียรภาพการบิน (Flight Stability Index: FSI)

วัตถุ	มวล (กก.)	แรง (N)	Grip Force (N)	Success Rate (%)	FSI
ลูกบอลดับเพลิง	1.3	12.7	20	100	0.95
กล่องปฐมพยาบาล	3.0	29.4	25	90	0.90
เสื้อชูชีพ	2.0	19.6	22	100	0.93

โดยสรุป การพัฒนาระบบแขนกลสำหรับอากาศยานไร้คนขับในงานวิจัยนี้ถือเป็นก้าวสำคัญในการขยายขีดความสามารถของ UAV สำหรับการช่วยเหลือผู้ประสบภัยในสถานการณ์อัคคีภัย โดยสามารถช่วยลดระยะเวลาในการเข้าถึงพื้นที่เสี่ยง ลดความเสี่ยงต่อเจ้าหน้าที่ และเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานภาคสนามได้อย่างเป็นรูปธรรม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Kumar and N. Michael, "Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 31, no. 11, pp. 1279-1291, Sep. 2012. doi: 10.1177/0278364912456443.
- [2] A. Gawel, D. Kragić, and P. Fua, "Autonomous object grasping using a drone," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 33, no. 4, pp. 749-764, Aug. 2017. doi: 10.1109/TRO.2017.2674780.
- [3] F. Ruggiero, V. Lippiello, and B. Siciliano, "Aerial manipulation: A literature review," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 1957-1964, Jul. 2018. doi: 10.1109/LRA.2018.2808541.
- [4] F. Tognon, M. Elia, and B. Siciliano, "UAV-assisted search and rescue operations," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 119, pp. 1-14, Sep. 2019. doi: 10.1016/j.robot.2019.04.003.
- [5] J. Hedrick, J. Dorsey, and C. Sweeney, "Precision agriculture using drones: A review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 10035-10045, Jan. 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2893087.
- [6] N. Nakazawa, I. Kim, H. Inooka, and R. Ikeura, "Force control of a robot hand emulating human's grasping motion," in *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Syst., Man, and Cybern. (SMC)*, Tokyo, Japan, 1999, pp. 774-779.
- [7] E. Ottaviano, M. Toti, and M. Cecciano, "Grasp force control in two-finger grippers with pneumatic actuation," in *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, San Francisco, CA, USA, 2000, pp. 1976-1981.
- [8] T. Maeno, S. Hiromitsu, and T. Kawai, "Control of grasping force by detecting stick-slip distribution at the curved surface of an elastic finger," in *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, San Francisco, CA, USA, 2000, pp. 3895-3900.
- [9] W. Promjun, "Design and construction of a remote-controlled spraying robotic arm mounted on a drone for coconut crown borer control," M.S. thesis, Dept. Agric. Eng., Rajamangala Univ. Technol. Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, 2021.
- [10] Y. Zhang, X. Chen, B. Liu, and Q. Wang, "Thermal degradation behavior of glass fiber reinforced polymer composites," *Composites Part B: Eng.*, vol. 77, pp. 350-361, Aug. 2015. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.037.
- [11] Tower Pro, "MG996R high torque metal gear servo motor datasheet," Tower Pro, Taipei, Taiwan, n.d. [Online]. Available: www.electronicoscaldas.com. Accessed: Sep. 10, 2025.

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนนิเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธี ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าสำหรับการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

สุวิชา จันทน์กะพ้อ^{1*} วีระชาติ กุลศิริเกษม¹ และ อภิรัฐ โกสิตานนท์²

วันที่รับ 5 ธันวาคม 2567 วันที่แก้ไข 7 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 16 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีเมอร์โดยการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพเร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจน ทำการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชุบเคลือบระยะเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา การทดลองพบว่ามีอนุภาคนาโนขนาดเล็กของโคบอลต์และฟอสฟอรัสกระจายตัวเคลือบทับถมกันอยู่บนพื้นผิวรูพรุนของตัวรองรับ และพบว่าโคบอลต์ฟอสไฟด์ที่มีโครงสร้างอสัณฐานและมีพื้นผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการชุบเคลือบที่มากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที ปริมาณ 4.2 กรัม ใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 20 wt% อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ได้อัตราการผลิตไฮโดรเจน 2.25 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 0.5 บาร์ มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยการพอกพูนไม่ใช้ไฟฟ้า จึงมีความสามารถใช้เร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

คำสำคัญ: ตัวเร่งปฏิกิริยา, การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า, ไฮโดรไลซิสโซเดียมโบโรไฮไดรด์

¹ ส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชิวะ เคมี, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: suwicha.c@dti.or.th

Preparation of Electrodeposited Cobalt Phosphide on Nickel Foam for Sodium Borohydride Hydrolysis

Suwicha chankapoe^{1*} Weerachart kulsirikasem¹ and Apirath Gositanon²

Received 5 December 2024, Revised 7 May 2025, Accepted 16 July 2025

Abstract

This research studies the preparation of a cobalt phosphide catalyst on a nickel foam support via a one-step electrodeposition process. This method was aimed to reduce costs and enhance the catalytic efficiency for hydrogen production. The properties of the catalyst were studied with varying electrodeposition times of 5, 10, 15, and 20 minutes, as this factor affects its catalytic performance. The experimental results showed that small cobalt and phosphorus nanoparticles were dispersed and deposited on the porous surface of the support. The resulting amorphous cobalt phosphide catalyst exhibited an increased specific surface area with longer electrodeposition times. The catalyst prepared by electrodeposition for 15 minutes with a mass of 4.2 grams was used to catalyze the hydrolysis of a 20 wt% sodium borohydride solution with a flow rate of 10 mL/min. This catalyst achieved a hydrogen production rate of 2.25 L/min at a pressure of 0.5 bar, which was higher than that of a catalyst prepared by electroless deposition. The findings suggest that the electrodeposited catalyst is suitable for use in hydrogen production for fuel cell applications.

Keywords: Catalyst, Electrodeposition, Sodium Borohydride Hydrolysis

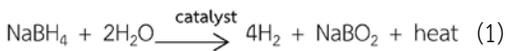
¹ NBC and Explosive Engineering Division, Defence Technology Institute

² Metallurgical and Material Engineering Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author: suwicha.c@dti.or.th

1. บทนำ

การผลิตไฮโดรเจนจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH₄) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ให้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความจุไฮโดรเจนสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งสามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่าย ทำให้มีความปลอดภัยมากกว่าไฮโดรเจนในสถานะแก๊สหรือของเหลว อีกทั้งสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันปรกติ เมื่อนำสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยกระตุ้นให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้นด้วย แสดงในสมการ 1



การวิจัยและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเตรียมได้จากการใช้โลหะมีค่า (Noble Metals) เช่น แพลทินัม (Pt) รูทีเนียม (Ru) หรือลดต้นทุนด้วยการใช้สารประกอบ เช่น โคบอลต์โบไรด์ (CoB) [1] โคบอลต์ฟอสไฟด์ (CoP) [2] นำมาเคลือบบนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น อะลูมินา (Al₂O₃) ด้วยเทคนิคการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) ใช้การตกตะกอนสะสมชั้นโลหะบนพื้นผิววัสดุด้วยปฏิกิริยาเคมีที่มีขั้นตอนมากและค่าใช้จ่ายสูง ควบคุมความหนาได้ยากจากสัดส่วนปริมาณสารเคมีที่ใช้ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในสภาวะปฏิกิริยาที่รุนแรงพบปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเนื่องจากการยึดเกาะของโลหะบนตัวรองรับมีน้อย จึงต้องนำตัวเร่งปฏิกิริยามาปรับปรุงโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เป็นต้น เพื่อให้มีแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น และลดการเกิดออกซิเดชันที่จะส่งผลทำให้พื้นที่ผิวลดลงได้ [3] ส่วนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

(Electrodeposition) อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันทำให้ออกซิเดชันที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนมาพอกพูนบนผิวหน้าของตัวรองรับที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าไว้ [4] ทำให้โลหะยึดติดกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่า สามารถใช้ในสภาวะปฏิกิริยาที่รุนแรงได้ อีกทั้งมีรูปแบบกระบวนการเคลือบที่ง่ายในขั้นตอนเดียวและจัดเตรียมอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนลดต้นทุนได้ [5] จึงพัฒนาตัวรองรับที่นำไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีวัสดุชนิดนิเกิลโฟม (Nickel foam) มีคุณสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง น้ำหนักเบา และมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาหาระยะเวลาการชุบเคลือบไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาให้ได้อัตราการผลิตไฮโดรเจนที่สามารถนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 บทความวิจัย

มีการศึกษาที่น่าสนใจ โดย Guode Li and Shulei Chou [6] รวบรวมการศึกษาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งผลิตไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้อง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับทองแดง นิเกิลโฟมและอะลูมินา มีประสิทธิภาพดี มีความคุ้มค่ามากกว่าโลหะชนิดอื่น และการเตรียมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าทำให้มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นด้วย Byeong Gyu Gang [7] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับอะลูมินาด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้านำไปทดสอบผลิตไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ Keun Woo Cho [8] และ Yueping Guo [9] เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับทองแดงด้วยการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า ได้รับความสัมพันธ์

ของระยะเวลาชุบเคลือบ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลาย ที่ส่งผลต่อโครงสร้างอสัณฐานกับความสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส Ningning Bai [10] ศึกษาวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบชั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิห้องในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์/โคบอลต์ฟอสไฟด์เคลือบบนตัวรองรับนิเกิลโฟม แล้วนำไปใช้เร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น เป็นผลมาจากการที่โลหะเคลือบบนพื้นที่ผิวของตัวรองรับนิเกิลโฟมได้แข็งแรงและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น สอดคล้องกับ Wei Youngsheng [11][12] พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนนิเกิลโฟมด้วยกระบวนการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า ทำให้โลหะยึดเกาะตัวรองรับได้อย่างแข็งแรงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้น จะเห็นได้ว่าการเตรียมโคบอลต์ฟอสไฟด์ให้สามารถเคลือบบนนิเกิลโฟมที่มีพื้นที่ผิวมากด้วยกระแสไฟฟ้า สามารถทำได้ด้วยการใช้ระบบ 2 ขั้วไฟฟ้าควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้จากองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้และปรับระยะเวลาในการชุบเคลือบที่จะส่งผลต่อโครงสร้างผลึกที่เกิดและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยึดติดกับตัวรองรับ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจจะศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยกระบวนการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า ด้วยการใช้ระยะเวลาในการชุบเคลือบ 5, 10, 15 และ 20 นาที นำผลวิเคราะห์พื้นผิว องค์ประกอบ โครงสร้างผลึก และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะเคลือบบนตัวรองรับมากที่สุด นำไปทดสอบใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ผลิตไฮโดรเจนเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยกระบวนการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ด้วยชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

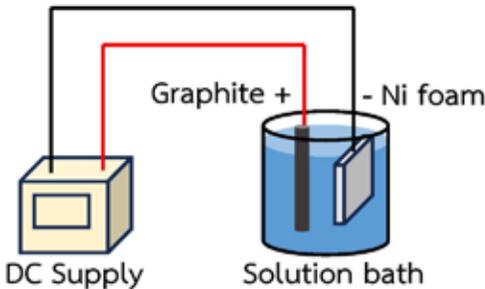
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยวิธีการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

เตรียมสารละลาย โคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซาไฮเดรต ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 98%, KemAus) 0.1 โมลต่อลิตร ไกลซีน ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, AR Grade, RCI Labscan) 0.6 โมลต่อลิตร โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์โมโนไฮเดรต ($\text{NaPH}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, AR Grade, KemAus) 0.8 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปรับความเป็นกรด-เบส ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , 99% AR Grade, QReC) ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 12 ในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายในการชุบเคลือบตัวรองรับโลหะนิเกิลโฟม (Nickel foam, 99%, MTI) จำนวนรูพรุน 110 PPI ขนาดความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4.5 เซนติเมตร และความหนา 0.1 เซนติเมตร ที่เตรียมผิวโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วล้างด้วยเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 99% AR Grade, MERCK) ในเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์นำมากัดผิวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl , 37%, QReC) 0.3 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากไอออน 1,000 มิลลิลิตร เตรียมผิวให้เป็นตัวเร่งด้วยทิน (II) คลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 98% AR Grade, Alfa Aesar) 0.3 กรัม และกรดไฮโดรคลอริก 0.3 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร และกระตุ้นผิวด้วยแพลเลเดียมไดคลอไรด์ (PdCl_2 , 99% AR Grade, ACROS) 0.003 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร ทำการแช่ตัวรองรับที่เตรียมไว้ในสารละลายที่ให้ความร้อนมีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกวนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ปล่อยทิ้งให้แห้งในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [13]

3.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

เตรียมตัวรองรับโลหะนิเกิลโพลีเมอร์ 110 PPI ขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร และความหนา 0.1 เซนติเมตร แช่ในเอทานอลและให้เครื่องอัลตราโซนิกส์ทำงานที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำมาแช่กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 30 นาที นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำมาต่อกับขั้วลบของชุดอุปกรณ์ชุบเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าและต่อขั้วบวกกับแท่งแกรไฟต์ แสดงในรูปที่ 1 จุ่มแผ่นนิเกิลโพลีเมอร์ในสารละลายโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซาไฮเดรต 0.1 โมลต่อลิตร ไกลซีน 0.6 โมลต่อลิตร โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์โมโนไฮเดรต 0.8 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออนที่ปรับความเป็นกรด-เบส ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 12 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าคงที่ 200 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ชุบเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้า

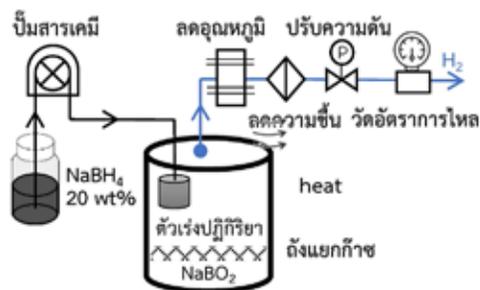
ของตัวรองรับนิเกิลโพลีเมอร์ ชุบเคลือบระยะเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชุบเคลือบไฟฟ้าเสร็จแล้วล้างด้วยเอทานอลและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง [14]

3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้นำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณ แสดงผลภาพถ่ายพื้นผิว สเปกตรัมและวิเคราะห์เชิงปริมาณ (SEM-EDS, Zeiss Sigma 500 VP, Germany) วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ (BET, Micromeritics ASAP 2460, USA) วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD, PANalytical X'Pert PRO, Netherlands) และคำนวณร้อยละของโลหะ (% metal loading)

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

อัตราการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Generation Rate, HGR) คือ ปริมาณของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาและมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา หาค่าได้จากการบันทึกผลอัตราการไหลพร้อมผลรวมของปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ทั้งหมดด้วยชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน แสดงในรูปที่ 2 ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 700 มิลลิลิตร ที่เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 wt% โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 20 wt% และน้ำปราศจากไอออนให้มีการควบคุมการไหลของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ด้วยปั๊มขนาด 10 มิลลิลิตรต่อนาที



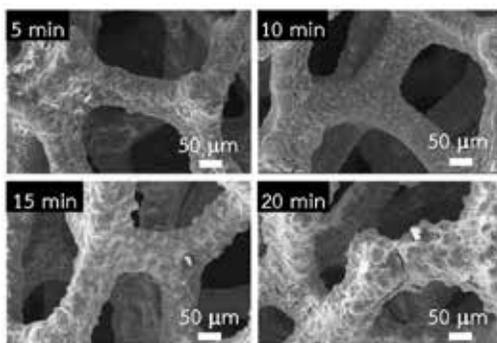
รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

ดูดสารละลายจากภาชนะบรรจุเข้าสู่ลูกที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับน้ำหนัก 4.2 กรัม อยู่ในถังแยกก๊าซที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่คายความร้อนไม่ให้มากกว่า 70 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและผลิตไฮโดรเจนได้อัตราคงที่ แยกโซเดียมเมตาบอเรต (NaBO_2) ออกมาอยู่ด้านล่างของถัง พร้อมกับน้ำไฮโดรเจนที่ผลิตได้ไปลดความร้อนด้วยน้ำ และลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล แล้วปรับแรงดันไฮโดรเจนขาออกให้คงที่ที่ 0.5 บาร์ เพื่อวัดและบันทึกปริมาณไฮโดรเจนด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (OMEGA FMA4000, USA) นำค่าเฉลี่ยของปริมาตรของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนตัวรองรับได้ ค่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่แสดงถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

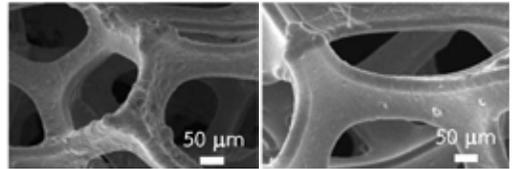
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณ

แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาถึงรายละเอียดของรูปร่างและขนาดของอนุภาคผลึกบนตัวรองรับในรูปที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวที่เคลือบบน



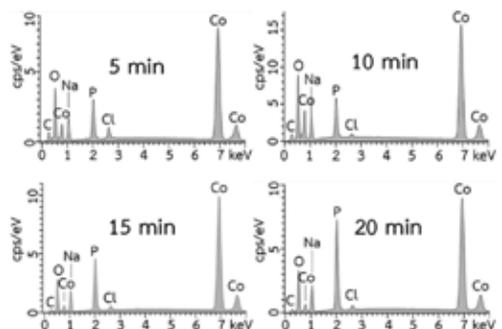
CoP/Ni foam Electrodeposition



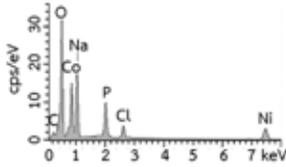
CoP/Ni foam Electroless plating Nickel foam

รูปที่ 3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง

ตัวรองรับที่เตรียมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า มีลักษณะเป็นผลึกทรงกลมและทับถมกันอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับทั้งด้านบนและด้านในรูพรุน มีการทับถมมากขึ้นตามระยะเวลาในการชุบเคลือบที่เพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะของผลึกที่เคลือบบนตัวรองรับด้วยวิธีการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าพบมีการกระจายอยู่ภายนอกรูพรุนของตัวรองรับในรูปที่ 4 และตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีระบุปริมาณของธาตุและองค์ประกอบอื่นบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค EDS พบที่โคบอลต์และฟอสฟอรัสที่พื้นผิวของตัวรองรับซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของโคบอลต์ฟอสไฟด์ โดยองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้วิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโคบอลต์มากที่สุดและมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้าส่งผลต่อการมีอยู่ของโคบอลต์และฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของตัวรองรับ



CoP/Ni foam Electrodeposition



CoP/Ni foam Electroless plating

รูปที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค EDS

4.2 การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

พิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของโลหะโคบอลต์มากที่สุดได้จากวิธีการชุบเคลือบด้วย

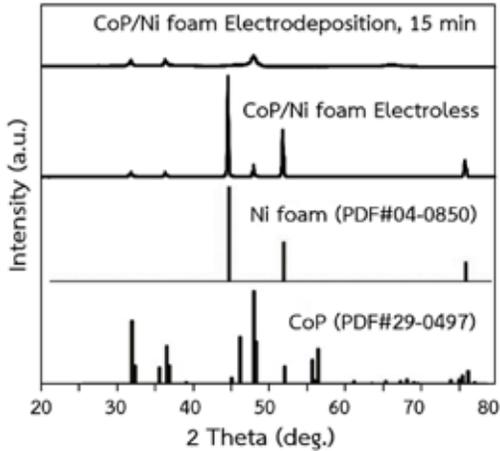
ไฟฟ้าที่ใช้ระยะเวลา 15 นาที นำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ แสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเกิดการสะสมของอนุภาคโลหะบนพื้นผิวของตัวรองรับทำให้เกิดการเติบโตแบบสามมิติ (3D) ได้มากกว่า สอดคล้องกับการคำนวณร้อยละน้ำหนักของ CoP จากการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามีมากกว่าด้วย

ตารางที่ 1 ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

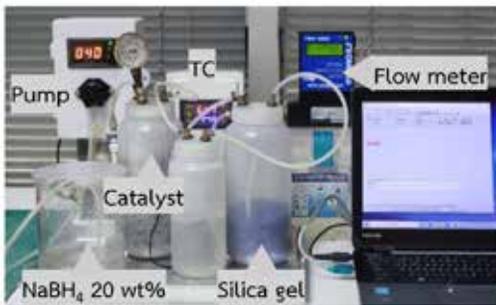
CoP/Ni foam	องค์ประกอบธาตุ (wt%)						
	Co	C	O	P	Na	Cl	Ni
Electrodeposition							
5 min	60.8	9.7	13.6	5.2	7.2	1.5	2.0
10 min	63.4	7.5	15.1	5.5	8.1	0.4	-
15 min	70.1	3.8	8.6	8.3	8.6	0.6	-
20 min	62.9	4.1	10.5	12.6	9.3	0.6	-
Electroless	47.3	14.4	14.9	6.8	5.2	0.9	10.5

ตารางที่ 2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การโหลดของตัวเร่งปฏิกิริยา

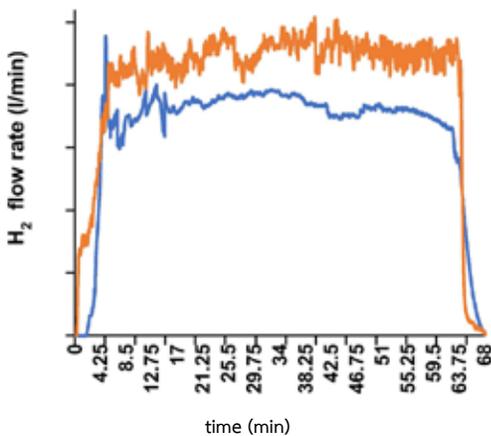
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ย (m ² /g)	องค์ประกอบธาตุ (wt%)		
		ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย (cm ³ /g)	ร้อยละของ CoP (wt%)
Ni Foam	0.3187	20.95945	0.002041	
CoP/Ni foam Electrodeposition*				
	1.7836	7.94002	0.003626	50.3
CoP/Ni foam Electroless				
	0.3422	8.81539	0.000876	27.1



รูปที่ 5 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 6 ชุดอุปกรณ์ทดสอบเร่งปฏิกิริยา
การผลิตไฮโดรเจน



รูปที่ 7 อัตราการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก

ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที พบพีคหลักของโคบอลต์ฟอสไฟด์ที่มีมุม 2θ ประมาณ 31.6° (111), 36.2° (200) และ 48.1° (211) ตาม PDF#29-0497 แสดงในรูปแบบที่ 5 สอดคล้องกับ Ningning Bai [10] ที่พบพีคมีความเข้มต่ำและฐานกว้าง บ่งบอกถึงการมีปริมาณโคบอลต์ฟอสไฟด์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) ไม่มีระเบียบผลึกที่ชัดเจนเคลือบอยู่บนตัวรองรับเป็นพื้นผิวที่ไม่สมมาตร และมีตำแหน่งว่างสำหรับการเกิดจุดเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้มีจำนวนตำแหน่งที่ออกฤทธิ์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemically active sites) มากกว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา [15]

4.4 การทดสอบอัตราการผลิตไฮโดรเจน

รูปที่ 6 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนนิเกิลโพลีที่เตรียมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที ในรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบอัตราการผลิตไฮโดรเจนเฉลี่ย 2.25 ลิตรต่อนาที (SD = 0.1) ที่แรงดัน 0.5 บาร์ อัตราการผลิตไฮโดรเจน 2.58 ลิตรต่อนาทีกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าและหาเปอร์เซ็นต์การแปรสภาพ (% conversion) จากอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากกว่า 2 ลิตรต่อนาทีอยู่ที่ 45% มีระยะเริ่มต้น (Initial Stage) 5 นาที

5. สรุปและอภิปรายผล

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าทำให้มีการกระจายตัวและมีการเคลือบทับถมของอนุภาคโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีมีพื้นที่ผิวมากขึ้น เกิดโครงสร้างอสัณฐานและมีแรงยึดเกาะมากขึ้น ทำให้สามารถนำไปใช้ในสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงส่งผลให้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ

โซเดียมโบโรไฮไดรด์ผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า อีกทั้งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำได้ในกระบวนการขั้นตอนเดียวสามารถลดต้นทุนได้ด้วย ใช้เร่งผลิตไฮโดรเจนได้อย่างต่อเนื่องมากกว่า 2 ลิตรต่ออนาที เพียงพอสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง UL-200W ขนาด 200 วัตต์ ผลิตกระแสไฟฟ้า 8 แอมป์ แรงดัน 25 โวลต์ สำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก [16][17] อย่างไรก็ตามพบว่า การเกิดปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนในช่วงแรกใช้ระยะเวลาอย่างมาก นำมาพิจารณาศึกษานำตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีระยะเริ่มต้นน้อยกว่ามาใช้ร่วมด้วยในสัดส่วนที่เหมาะสม เป็นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยการสนับสนุนทุนการวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และพื้นที่ในการทำวิจัย รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ จากโครงการวิจัยพื้นฐานวิจัยและพัฒนาระบบเก็บแก๊สไฮโดรเจนในรูปสารเคมีของส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชิวะ เคมี ฝ่ายวิจัยและพัฒนา การสนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องจนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] V. I. Simagina *et al.*, “Recent advances in applications of Co-B catalysts in NaBH₄-based portable hydrogen generators,” *Catalysts*, vol. 11, no. 2, Feb. 2021, Art. no. 268. doi: 10.3390/catal11020268.

[2] H. M. Youssef *et al.*, “Fabrication of CoP@P, N-CNTs-deposited nickel foam for energy-efficient hydrogen generation via electrocatalytic urea oxidation,” *Catalysts*, vol. 15, no. 7, Jul. 2025, Art. no. 652. doi: 10.3390/catal15070652.

[3] T. H. Oh and S. Kwon, “Performance evaluation of hydrogen generation system with electroless-deposited Co-P/Ni foam catalyst for NaBH₄ hydrolysis,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 15, pp. 6425-6435, May 2013.

[4] H. N. Abdelhamid, “A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, no. 38, pp. 19317-19333, Aug. 2020.

[5] H. Dai, Y. Liang, P. Yao, C. Chen, and X. Wang, “Amorphous cobalt-boron/nickel foam as an effective catalyst for hydrogen generation from alkaline sodium borohydride solution,” *J. Power Sources*, vol. 177, no. 1, pp. 174-180, Feb. 2008.

[6] G. Li *et al.*, “Non-noble metal-based catalysts applied to hydrogen evolution from hydrolysis of boron hydrides,” *Small Struct.*, vol. 2, no. 7, Jul. 2021, Art. no. 2100013.

[7] B. G. Gang, J. M. Kim, S. W. Choi, and J. H. Lee, “Transient behavior of proton exchange membrane fuel cells over a cobalt-phosphorous/nickel foam catalyst with sodium borohydride,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 524-533, Jan. 2016.

- [8] K. W. Cho and H. S. Kwon, "Effects of electrodeposited Co and Co-P catalysts on the hydrogen generation properties from hydrolysis of alkaline sodium borohydride solution," *Catal. Today*, vol. 120, no. 3-4, pp. 298–304, Feb. 2007. doi: 10.1016/j.cattod.2006.09.012.
- [9] Y. Guo *et al.*, "Electrodeposited amorphous Co-P catalyst for hydrogen generation from hydrolysis of alkaline sodium borohydride solution," *J. Mol. Catal. A: Chem.*, vol. 378, pp. 273-278, Nov. 2013. doi: 10.1016/j.molcata.2013.06.019.
- [10] N. Bai *et al.*, "One-step electrodeposition of Co/CoP film on Ni foam for efficient hydrogen evolution in alkaline solution," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 43, pp. 29419-29426, Nov. 2016. doi: 10.1021/acsami.6b09338.
- [11] Y. Wei *et al.*, "Preparation of three-dimensional nickel foam supported cobalt catalyst by electrodeposition and its process optimization," *Mater. Rep.*, vol. 32, no. 19, pp. 3304-3308, Oct. 2018. doi: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.19.006.
- [12] Y. Wei *et al.*, "Highly efficient and reactivated electrocatalyst of ruthenium electrodeposited on nickel foam for hydrogen evolution from NaBH₄ alkaline solution," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, no. 2, pp. 592-600, Jan. 2018. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.111.
- [13] H. Kim, T. H. Oh, and S. Kwon, "Simple catalyst bed sizing of a NaBH₄ hydrogen generator with fast startup for small unmanned aerial vehicles," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 2, pp. 1018-1026, Jan. 2016. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.026.
- [14] B. G. Gang, "The selective zero emission power systems between NaBH₄-based fuel cells and solar cells for UAVs," *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 1017-1027, Dec. 2020. doi: 10.1007/s42405-020-00266-9.
- [15] C. Yao *et al.*, "Porous CoP@N/P co-doped carbon/CNTs nanocubes: In-situ autocatalytic synthesis and excellent performance as the anode for lithium-ion batteries," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 512, May 2020, Art. no. 145690. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145690.
- [16] T. H. Oh *et al.*, "Sodium borohydride hydrogen generator using CoP/Ni foam catalysts for 200 W proton exchange membrane fuel cell system," *Energy*, vol. 90, part 1, pp. 1163-1170, Oct. 2015. doi: 10.1016/j.energy.2015.06.072.
- [17] *UL-200W Fuel Cell Stack User Manual*, Horizon Fuel Cell Korea, Mar. 2017.

ระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมและนักดำน้ำ ผ่านทุ่นสัญญาณเพื่อเพิ่มความปลอดภัยใต้น้ำ

พรเทพ บุญรักษา^{1*}

วันที่รับ 16 มิถุนายน 2568 วันที่แก้ไข 25 พฤศจิกายน 2568 วันที่ตอบรับ 17 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิด การออกแบบ และผลการทดสอบต้นแบบระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมบนผิวน้ำและนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณแบบลอยน้ำ โดยมุ่งเน้นการส่งข้อความและวิดีโอแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติงานใต้น้ำ ระบบต้นแบบประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ 1. หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Surface Control Unit) 2. ทุ่นสัญญาณกลางน้ำ (Floating Relay Buoy) และ 3. ชุดนักดำน้ำ (Diver Unit) โดยใช้การสื่อสารไร้สายย่านความถี่มาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz / 5 GHz ร่วมกับสาย Ethernet กันน้ำ (Tether) และใช้โปรโตคอล ZMQ (ZeroMQ) สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบ Publish-Subscribe เพื่อให้สามารถส่งข้อความ สถานะระบบ และวิดีโอแบบสตรีมมิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบระบบในสภาวะจำลองภาคสนามใช้ TP-Link EAP225 เป็นอุปกรณ์ Wireless Access Point / Bridge เชื่อมโยงการสื่อสารระหว่างหน่วยควบคุมบนผิวน้ำและชุดนักดำน้ำผ่านสาย Ethernet Tether โดยใช้ Raspberry Pi 4 และกล่อง USB เป็นหน่วยประมวลผลและส่งภาพ ผลการทดสอบพบว่าสามารถส่งข้อความจากผิวน้ำลงใต้น้ำและส่งวิดีโอจากนักดำน้ำขึ้นมาบนผิวน้ำได้แบบเรียลไทม์ โดยมีค่าความหน่วงเฉลี่ยต่ำกว่า 300 มิลลิวินาทีและไม่พบการสูญเสียแพ็กเกจในช่วงเวลา 10 นาที อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดด้านระยะทางของสัญญาณไร้สาย ความยาวสาย Tether และยังไม่ได้ทดสอบในสภาวะใต้น้ำลึกหรือกระแสน้ำแรง รวมถึงยังไม่มี การเข้ารหัสข้อมูลและจัดการ QoS สำหรับผู้ใช้หลายคน ผลการทดลองยืนยันว่าระบบสามารถทำงานได้จริงในภาคสนามและมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นเครือข่ายสื่อสารใต้น้ำแบบ Hybrid LAN/WLAN เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการดำน้ำในอนาคต

คำสำคัญ: การสื่อสารใต้น้ำ, ความปลอดภัยของนักดำน้ำ, ทุ่นสัญญาณ, การส่งสัญญาณไร้สาย, การตรวจสอบแบบเรียลไทม์

¹ ส่วนงานวิศวกรรมระบบจำลองยุทธศาสตร์และเครื่องช่วยฝึกเสมือนจริง, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: pontep.b@dti.or.th

Two-Way Communication System between Surface Controller and Diver via Signal Buoy for Enhanced Underwater Safety

Porntep Bunraksa ^{1*}

Received 16 June 2025, Revised 25 November 2025, Accepted 17 December 2025

Abstract

This paper presents the concept, design, preliminary and experimental results of a prototype two-way communication system between a surface operator and a diver through a floating relay buoy. The system aims to provide real-time text and video transmission to enhance safety during underwater operations. The prototype consists of three main components: (1) Surface Control Unit, (2) Floating Relay Buoy, and (3) Diver Unit. Communication is established through standard IEEE 802.11 2.4 GHz/5 GHz wireless links combined with a waterproof Ethernet tether, utilizing the ZMQ (ZeroMQ) protocol in a publish – subscribe architecture for efficient data exchange. A field-like test was conducted using a TP-Link EAP225 device configured as a Wireless Access Point / Bridge to connect the surface control system with the diver unit through the Ethernet tether. The diver unit employed a Raspberry Pi 4 and a USB camera for processing and transmitting live video. The results show that the system successfully transmitted text messages from the surface to the diver and streamed live video from the diver to the surface in real time, with an average latency below 300 ms and no packet loss over a continuous 10-minute test period. Limitations include wireless range constraints, tether-induced mobility restrictions, and the absence of testing in deep or high-current underwater environments, as well as the lack of encryption and QoS management for multi-user applications. Experimental outcomes confirm that the proposed prototype operates effectively in field conditions and demonstrates the feasibility of a Hybrid LAN/WLAN underwater communication system for future diving operations.

Keywords: underwater communication, diver safety, signal buoy, wireless transmission, real-time monitoring

¹ Simulation Systems and Virtual Training Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: porntep.b@dti.or.th

1. บทนำ

ในการฝึกอบรมนักดำน้ำ เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการฝึกแบบเดี่ยว (SOLO) ซึ่งนักเรียนดำน้ำจะได้รับอนุญาตให้ดำเนินการดำน้ำด้วยตนเอง ผู้ควบคุมการดำ (Dive Supervisor) บนผิวน้ำจะสามารถเฝ้าติดตามตำแหน่งของนักดำน้ำได้เพียงผ่านทุ่นสัญญาณ (Safety Buoy) ที่นักเรียนลากติดตัวไปเท่านั้น หากเกิดเหตุฉุกเฉิน นักดำน้ำจะใช้วิธีการกระตุกเชือกเพื่อแจ้งเตือน อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่สามารถติดต่อสื่อสารจากผิวน้ำไปยังนักดำน้ำได้โดยตรง ทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถส่งคำเตือนหรือคำแนะนำใด ๆ ไปยังนักดำน้ำในระหว่างการปฏิบัติงานใต้น้ำได้

ข้อจำกัดนี้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของนักดำน้ำ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยง เช่น เมื่อนักดำน้ำออกนอกพื้นที่ปฏิบัติงาน หรือมีอันตรายจากสิ่งแวดล้อมใต้น้ำ เช่น กระแสน้ำแรง หรือสัตว์น้ำอันตรายเข้าใกล้พื้นที่ปฏิบัติงาน การที่ผู้ควบคุมไม่สามารถสื่อสารหรือแจ้งเตือนนักดำน้ำได้ทันทั่วทั้งย่อมเพิ่มความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สิน

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว บทความนี้นำเสนอแนวคิดและต้นแบบระบบสื่อสารสองทางระหว่าง

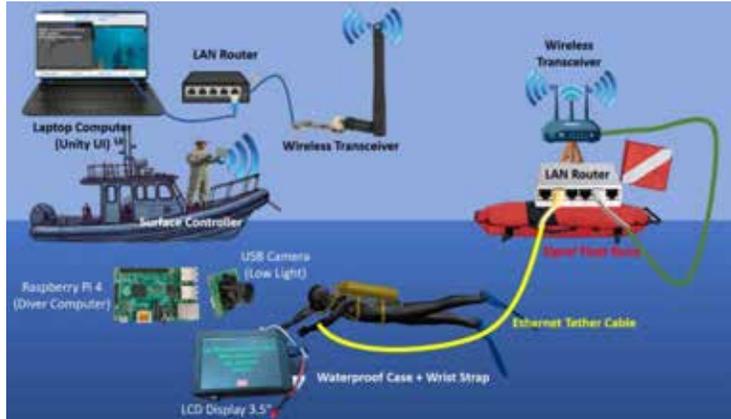
ผู้ควบคุมบนผิวน้ำกับนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณแบบลอยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถส่งข้อความจากผิวน้ำลงไปยังนักดำน้ำ และรับส่งวิดีโอแบบเรียลไทม์จากกล้องของนักดำน้ำขึ้นมายังผู้ควบคุมบนผิวน้ำ โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ความถี่มาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz/ 5 GHz และสายสัญญาณ Ethernet แบบกันน้ำ (Tether) พร้อมใช้โปรโตคอล ZMQ ในการรับส่งข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและความปลอดภัยของการดำน้ำในทุกสถานการณ์

ระบบที่นำเสนอช่วยให้สามารถ:

- ส่งข้อความจากผิวน้ำไปยังนักดำน้ำผ่านจอแสดงผล LCD เมื่อมีข้อความเข้าจะมีไฟจาก LED กระพริบ และข้อความจะกระพริบ เพื่อดึงดูดความสนใจและแจ้งเตือนนักดำน้ำว่ามีข้อความเข้า
- สตรีมวิดีโอจากนักดำน้ำไปยังผิวน้ำผ่านกล้องแสงน้อย
- การตรวจสอบแบบเรียลไทม์โดยใช้สัญญาณไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz/5GHz และระบบ Ethernet แบบมีสาย



รูปที่ 1 แนวความคิดในการออกแบบระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมและนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยใต้น้ำ โดยผู้ควบคุมสามารถส่งข้อความไปแสดงบนจอที่ติดอยู่ที่ข้อมือนักดำน้ำ และที่นักดำน้ำจะส่งภาพแบบ Real Time กลับมายังผู้ควบคุมที่อยู่บนผิวน้ำ



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพโครงสร้างระบบสื่อสารสองทาง โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Surface Controller) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม Unity UI ในการส่งข้อความ และรับภาพแบบ Real-Time เชื่อมต่อผ่านระบบ ไร้สาย ไปยัง ทวนสัญญาณ (Signal Float Buoy) ซึ่งติดตั้ง อุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi (TP-Link EAP225 Outdoor) ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ทวนนี้เชื่อมต่อผ่านสาย Ethernet กันน้ำไปยังชุดนักดำน้ำ

ระบบสื่อสารสองทางที่นำมาเสนอนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2 ได้แก่

1.1 หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Surface Controller) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม Unity UI ในการส่งข้อความ และรับภาพแบบ Real-Time เชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย

1.2 ทวนสัญญาณ (Signal Float Buoy) ทวนสัญญาณ ถูกออกแบบให้ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างหน่วยควบคุมบนผิวน้ำและนักดำน้ำ โดยติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณ TP-Link EAP225 Outdoor ซึ่งรองรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz เพื่อสร้างเครือข่ายไร้สายเหนือผิวน้ำ ทวนเชื่อมต่อกับชุดนักดำน้ำผ่านสาย Ethernet กันน้ำ (Tether) เพื่อส่งข้อมูลและวิดีโอแบบเรียลไทม์ ในเชิงการออกแบบระยะเวลาการสื่อสารที่หวังผล (design/expected) ถูกตั้งไว้เป็นค่ารวมสำหรับการใช้งานจริงคือ 2.4 GHz: 50 - 150 เมตร และ 5 GHz: 15 - 80 เมตร (ค่าที่ออกแบบแบบอนุรักษ์ เพื่อเน้นเพื่อความยืดหยุ่น การบังสัญญาณ และ

อุปกรณ์รับที่ต่างกัน) ขณะที่ ระยะที่ใช้จริงจากการทดสอบภาคสนาม (measured/operational) พบว่าทวนสามารถให้การเชื่อมต่อที่เสถียรได้ประมาณ 40 - 60 เมตร ได้สภาวะทะเลปกติ (line-of-sight, ความสูงทวนมาตรฐาน, ลูกคลื่นไม่แรง) ทั้งนี้ค่าที่ได้ขึ้นกับปัจจัย เช่น ความสูงของทวนและเสาอากาศ กำลังส่งและเกณฑ์ของอุปกรณ์ รับสัญญาณของปลายทาง สภาพคลื่น และความยาวของ Tether จึงแนะนำให้วางแผนออกแบบโดยใช้ค่าหวังผลเป็นเกณฑ์สูงสุด และใช้ค่าที่ใช้จริงสำหรับการปฏิบัติการเชิงสนาม

1.3 ชุดนักดำน้ำประกอบด้วย หน้าจอแสดงข้อความ ขนาด 3.5 นิ้ว ความสว่าง ≥ 800 nits เพื่อให้มองเห็นข้อความได้ชัดเจนใต้น้ำ แม้ในสภาพแสงน้อยหรือสะท้อนจากผิวน้ำ กล้อง Low-Light HD USB Camera มีความละเอียด 1080p (Full HD) รองรับการบันทึกและส่งภาพวิดีโอแบบเรียลไทม์ในสภาพแวดล้อมแสงต่ำ ส่วน Companion Computer (Raspberry Pi 4 Model B) ทำหน้าที่ประมวลผลภาพจากกล้องและส่งข้อมูลผ่านสาย Ethernet กันน้ำไปยังทวนสัญญาณ

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Related Works)

ระบบสื่อสารใต้น้ำที่มีความคล้ายคลึงกับแนวทางที่นำเสนอ มักใช้เทคโนโลยี acoustic modem, optical communication, หรือ long-range wireless relay ซึ่งแต่ละระบบมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

2.1 ระบบของ EvoLogics (S2C Acoustic Modem) ระบบของ EvoLogics (S2C Acoustic Modem) ทำงานโดยใช้หลักการสื่อสารผ่าน คลื่นเสียงใต้น้ำ (underwater acoustic communication) โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่เรียกว่า Sweep Spread Carrier (S2C) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นในการส่งข้อมูลระยะไกลในสภาพแวดล้อมใต้น้ำที่มีสัญญาณรบกวนสูง เช่น ทะเลลึก หรือบริเวณที่แสงและคลื่นวิทยุไม่สามารถใช้งานได้

หลักการทำงาน:

1. ส่งข้อมูลด้วยคลื่นเสียง (Acoustic Signal Transmission)

- โมเด็ม S2C จะแปลงข้อมูลดิจิทัล (เช่น พิกัด GPS หรือข้อความ) เป็นสัญญาณเสียงในย่านความถี่ 18-34 kHz

- ส่งสัญญาณผ่านน้ำไปยังโมเด็มอีกตัวที่อยู่ในระบบ เช่น นักดำน้ำ หรือทุ่นใต้น้ำ

2. รองรับการสื่อสารแบบ Full-Duplex

- สามารถส่งและรับข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน (เช่น ส่งคำสั่งจากผู้ควบคุม และรับข้อมูลตอบกลับจากนักดำน้ำ)

3. การนำทางด้วยเสียง (Diver Navigation)

- โมเด็มใต้น้ำสามารถรับสัญญาณจากทุ่นหรือหน่วยควบคุม เพื่อระบุตำแหน่งและทิศทาง

- ข้อมูลตำแหน่งจะแสดงผลบนอุปกรณ์ของนักดำน้ำ เช่น จอแสดงผล หรือแจ้งเตือนด้วยเสียง

4. การเชื่อมโยงกับหน่วยควบคุมบนผิวน้ำ

- ทุ่น (signal buoy) ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำจะเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลระหว่างนักดำน้ำกับศูนย์ควบคุมบนผิวน้ำ

- ทุ่นอาจเชื่อมต่อกับระบบ GPS หรือระบบเครือข่ายเพื่อระบุตำแหน่งและควบคุมการสื่อสาร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงโครงสร้างระบบนำทางนักดำน้ำแบบใช้เสียง (Acoustic-Based Diver Navigation System) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยอุปกรณ์ใต้น้ำ (Underwater Unit) ที่เชื่อมต่อกับโมเด็มอะคูสติก (Acoustic Modem) ส่งสัญญาณไปยังทุ่นสัญญาณ (Signal Buoy) ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ทุ่นทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลระหว่างนักดำน้ำกับหน่วยควบคุมบนผิวน้ำ ข้อมูลตำแหน่งและเส้นทางจะแสดงผลบนหน้าจอของนักดำน้ำ (Diver Display) เพื่อสนับสนุนการนำทางและการสื่อสารใต้น้ำแบบเรียลไทม์ (ภาพนี้สร้างขึ้นโดยใช้ AI [1])

2.2 ระบบ OceanNet ของ MIT Media Lab

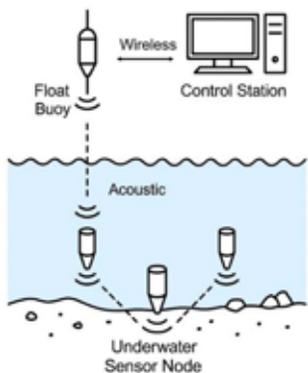
MIT พัฒนา OceanNet ซึ่งใช้โครงข่ายใต้น้ำเป็นสถานีฐานไร้สายลอยอยู่เหนือผิวน้ำ โดยใช้ Wi-Fi repeater และเชื่อมต่อกับใต้น้ำผ่านสายเคเบิลหรือ acoustic modem เพื่อถ่ายทอดข้อมูลจากใต้น้ำขึ้นไปยังผิวน้ำ [2] ระบบนี้เน้นการประหยัดพลังงาน และใช้งานในพื้นที่ห่างไกล

หลักการการทำงานของ OceanNet ดังแสดงในรูปที่ 4:

1. เซนเซอร์ใต้น้ำ

(Underwater Sensor Nodes)

- o ติดตั้งไว้ที่พื้นทะเลหรือวัตถุใต้น้ำ เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ, ความดัน, สภาพน้ำ
- o บางระบบสามารถเชื่อมต่อกับ acoustic modem เพื่อสื่อสารแบบเสียง หรือใช้สายสัญญาณ (tethered cable) ขึ้นสู่ผิวน้ำ



รูปที่ 4 แผนภาพระบบสื่อสารสองทางระหว่างหน่วยควบคุมบนผิวน้ำ ฟันลอย และเซนเซอร์ใต้น้ำ โดยแสดงการสื่อสารแบบไร้สายและเสียง

2. สายเคเบิลหรืออะคูสติกโมเด็ม

(Wired/Acoustic Communication)

- o เชื่อมข้อมูลจากเซนเซอร์ไปยังอุปกรณ์บนผิวน้ำ
- o กรณีไม่มีสาย จะใช้ acoustic modem เพื่อส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านน้ำ

3. ฟันหรือโดรนลอยน้ำ

(Surface Floating Drone/Buoy)

- o ทำหน้าที่เป็น เกตเวย์ไร้สาย (Wireless Gateway)
- o ภายในติดตั้ง Wi-Fi repeater หรือ Wi-Fi router เพื่อกระจายข้อมูลสู่ระบบบนผิวน้ำ
- o ใช้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ (ในบางรุ่น)

4. การสื่อสารแบบสองทาง

(Two-Way Communication)

- o สามารถรับคำสั่งจากศูนย์ควบคุมและส่งลงไปยังเซนเซอร์ หรือส่งข้อมูลจากใต้น้ำขึ้นมาวิเคราะห์
- o เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการ เครือข่ายเซนเซอร์ทะเล เช่น ocean monitoring หรือ marine research

2.3 ระบบที่นำเสนอในบทความนี้

แตกต่างจากระบบข้างต้น ระบบนี้ใช้โครงข่าย Wi-Fi แบบ Local Area Network (LAN) ที่ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต โดยใช้ TP-Link EAP225 ทำงานในโหมด Access Point บนฟัน แล้วเชื่อมต่อไปยัง Raspberry Pi ด้วยสาย Ethernet เพื่อส่งข้อมูลภาพจาก USB Camera และรับคำสั่งควบคุมจากผู้ใช้ผ่านโปรโตคอล ZMQ (ZeroMQ) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลความเร็วสูงแบบเรียลไทม์ได้บนเครือข่ายภายใน (LAN) เปรียบเทียบ การสื่อสารใต้น้ำของระบบที่นำเสนอ กับระบบ EvoLogics (S2C Modem) และระบบ OceanNet (MIT) รายละเอียดตามตารางที่ 1 และข้อเด่นในการใช้งาน รายละเอียดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระบบสื่อสารใต้น้ำ ทั้ง 3 ระบบ

รายการเปรียบเทียบ	ระบบที่เสนอ (Proposed System)	EvoLogics (S2C Modem)	OceanNet (MIT)
แนวคิดหลัก	สื่อสารผ่านเครือข่าย Wi-Fi ภายใน (LAN) โดยไม่พึ่งอินเทอร์เน็ตและระบบ Ethernet	ใช้คลื่นเสียงใต้น้ำ (acoustic modem) สื่อสารแบบ full duplex	ใช้ Wi-Fi repeater และ sensor ใต้น้ำ เชื่อมกับ drone หรือ buoy

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระบบสื่อสารใต้น้ำ ทั้ง 3 ระบบ

วิธีส่งข้อความจากผู้ควบคุม	พิมพ์บน UI ของคอมพิวเตอร์ (Unity) แล้วส่งโดย ZMQ Protocol ไปยัง Raspberry Pi ผ่าน wifi และ Ethernet	ใช้ซอฟต์แวร์พิเศษบนคอมพิวเตอร์ ส่งข้อมูลเสียง (encoded) ไปยังนักดำน้ำ	ส่งข้อมูลผ่าน repeater หรือ gateway เชื่อม sensor node
การแจ้งเตือนนักดำน้ำ	LED บนข้อมือกะพริบ 5 ครั้ง + จอ 3.5" แสดงข้อความ	มีหน้าจอ (optional) หรือสัญญาณเสียงบีบแฉิ่งเตือน	ไม่เน้น UI บน diver unit (ขึ้นอยู่กับ การประยุกต์ใช้งาน)
การส่งข้อความจากนักดำน้ำ	ใช้กระดาษเขียนใต้น้ำ หรือสัญญาณมือ (low-cost approach)	สามารถส่งข้อความกลับ (full duplex)	ใช้ sensor node สำหรับข้อมูล เช่น อุณหภูมิ ความดัน
การส่งวิดีโอ	✅ ส่งภาพจากกล้อง Low-Light HD USB Camera: ความละเอียด 1920x1080 (Full HD) ส่งภาพ real-time video แบบ 30 fps	❌ ไม่สามารถส่งวิดีโอ (bandwidth ต่ำ)	✅ ส่งวิดีโอ ความละเอียดต่ำผ่าน gateway
ระยะทางใช้งานโดยทั่วไป	ขึ้นอยู่กับความแรง Wi-Fi (30-100 เมตร จาก AP)	ได้ถึง ~1500 เมตร (ในน้ำเปิด)	100-500 เมตร (Wi-Fi + tethered node)
ข้อดี	ราคาถูก, ใช้อุปกรณ์ทั่วไป, แสดงผลชัดเจน, ไม่พึ่งเน็ต	ใช้ได้ใต้น้ำลึกและระยะไกล, มาตรฐานสูง	ใช้งานได้นาน, ประหยัดพลังงาน, ใช้ sensor network ได้
ข้อจำกัด	Wi-Fi ใช้ได้เฉพาะบนผิวน้ำระยะการสื่อสารที่หวังผล (design/expected) อยู่ที่ 2.4 GHz: 50-150 เมตร และ 5 GHz: 15-80 เมตร ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ขณะที่ ระยะที่ใช้จริงจากการทดสอบภาคสนาม (measured/operational) พบว่าสามารถให้การเชื่อมต่อเสถียรได้ประมาณ 40-60 เมตร ภายใต้อุปกรณ์ทะเลปกติ, สาย Ethernet ระยะที่เหมาะสมอยู่ที่ 50-70 เมตรต่องันน้ำ	แพงมาก, ส่งวิดีโอไม่ได้, ตั้งค่าซับซ้อน	ไม่เหมาะกับงาน real-time UI หรือ human interaction โดยตรง
เหมาะกับใคร	ฝึกดำน้ำ, การเฝ้าระวังนักดำน้ำ, งานภาคสนามต้นทุนต่ำ	งานวิจัย, การนำทางใต้น้ำ, การสำรวจลึก	เครือข่ายตรวจสอบสภาพแวดล้อมทะเล, งานติดตั้งถาวร
ราคาโดยประมาณ	ต่ำ (5,000-15,000 บาท ทั้งระบบต่อชุด)	สูงมาก (หลักแสน-ล้านบาท/ชุด)	กลางถึงสูง (ขึ้นกับ sensor และ repeater)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระบบสื่อสารใต้น้ำ ทั้ง 3 ระบบ (ต่อ)

รายการเปรียบเทียบ	ระบบที่เสนอ (Proposed System)	EvoLogics (S2C Modem)	OceanNet (MIT)
ใช้ในพื้นที่ไร้สัญญาณอินเทอร์เน็ตได้หรือไม่	✓ ได้ (LAN ภายใน)	✓ ได้	✓ ได้

ตารางที่ 2 สรุป ข้อดีข้อด้อยของแต่ละระบบ เพื่อประโยชน์ในการเลือกใช้งาน

ระบบ	จุดเด่น	จุดด้อย
ระบบที่เสนอ	ประหยัด, ใช้อุปกรณ์ทั่วไป, ส่งวิดีโอ, UI ชัดเจน, ง่ายต่อการนำไปใช้ฝึกดำน้ำ	พึ่งพาลากสาย LAN และการทำงานบนผิวน้ำ
EvoLogics	ระยะทางไกล, มาตรฐานสูง, ใช้ในงานระดับอุตสาหกรรม	ราคาสูง, ส่งวิดีโอไม่ได้ ไม่เหมาะกับการสื่อสารแบบมี UI ทันที
OceanNet (MIT)	ใช้ sensor network, ขยายระบบได้, พลังงานต่ำ	ระหว่างมนุษย์

3. การออกแบบระบบ

3.1 โครงสร้างระบบ

ระบบประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่:

3.1.1 หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ

(Surface Controller Unit)

- Laptop พร้อมโปรแกรม Unity UI: ใช้แสดงภาพวิดีโอจากนักดำน้ำ และส่งข้อความควบคุม

- ZMQ Protocol: ใช้สำหรับส่งและรับข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่าน IP Network [4]

3.1.2 ทวนสัญญาณ (Signal Buoy)

- อุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi (TP-Link EAP225 Outdoor) 2.4GHz/5 GHz ทำงานในโหมด Access Point (AP Mode)

- Ethernet Cable กันน้ำ: เชื่อมต่อจากอุปกรณ์ Wi-Fi ไปยัง Raspberry Pi ใต้น้ำ

3.1.3 หน่วยนักดำน้ำ (Diver Unit)

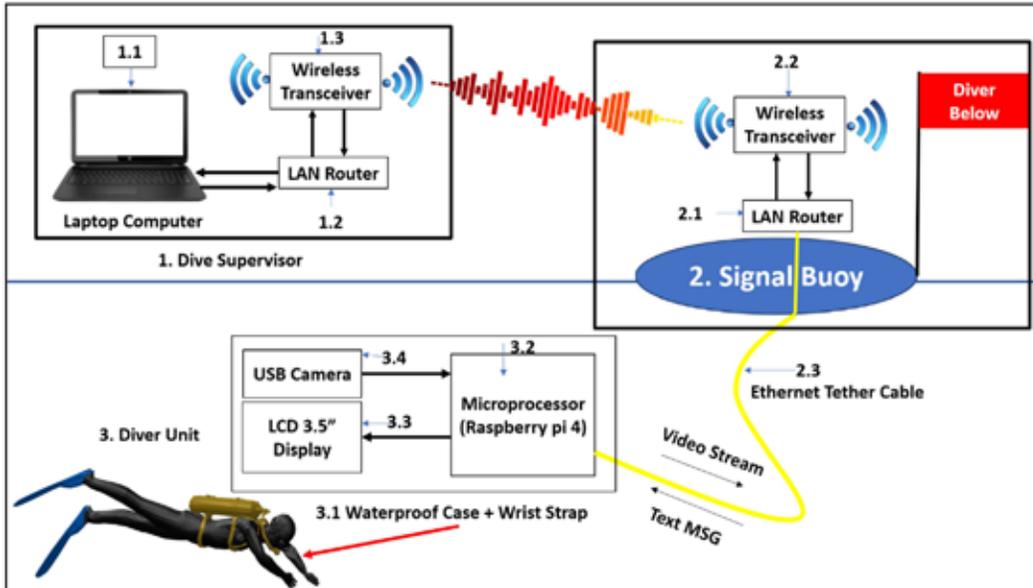
- Raspberry Pi 4: หน่วยประมวลผล [5] รับข้อความจากผิวน้ำและส่งวิดีโอจากกล้อง USB

- USB Camera: บันทึกภาพวิดีโอแบบเรียลไทม์
- Python Script (ZMQ PUB/SUB):

ใช้สถาปัตยกรรม Publisher/Subscriber ผ่านโปรโตคอล ZeroMQ เพื่อส่งภาพและรับคำสั่งจากหน่วยควบคุม [6]

3.2 หลักการทำงานของระบบ

ระบบต้นแบบที่นำเสนอประกอบด้วย 3 หน่วยหลัก ได้แก่ หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Dive Supervisor), ทวนสัญญาณ (Signal Buoy), และหน่วยนักดำน้ำ (Diver Unit) ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อให้เกิดการสื่อสารสองทางในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต โดยมีรายละเอียดการทำงานแสดงในรูปที่ 5 ดังนี้:



รูปที่ 5 แสดง โครงสร้างระบบสื่อสารระหว่างผู้ควบคุมบนผิวน้ำ (Dive Supervisor) และนักดำน้ำ (Diver Unit) ผ่านทุ่นสัญญาณ (Signal Buoy) โดยใช้เทคโนโลยีไร้สายและสาย Ethernet

3.2.1 หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Dive Supervisor) คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป: ติดตั้งโปรแกรมอินเทอร์เฟซ ซึ่งพัฒนาจาก โปรแกรม Unity Engine ดังแสดง ในรูปที่ 6 เพื่อ



รูปที่ 6 หน้าจอสำหรับผู้ใช้ออกแบบจากโปรแกรม Unity Engine

- แสดงภาพวิดีโอจากกล้องของนักดำน้ำแบบเรียลไทม์ Real-time underwater โดย USB camera 640x480 @30 fps latency ประมาณ 30-100 ms
- ส่งข้อความตัวอักษรไปยังนักดำน้ำ

คอมพิวเตอร์แล็ปท็อปจะรับส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ที่ส่งมาจาก TP-Link EAP225 ที่อยู่บน ทุ่นสัญญาณ ส่งสัญญาณความถี่ย่าน 2.4GHz หรือ 5GHz เพื่อ

- ส่งข้อความจากผู้ควบคุม
- รับภาพวิดีโอจากนักดำน้ำผ่านทุ่น

3.2.2 ทุ่นสัญญาณ (Signal Buoy) ตัวรับ-ส่งสัญญาณไร้สายเราเตอร์ LAN (โหมด Access Point): TP-Link EAP225 ทำงานเป็น Access Point (AP) เพื่อให้ Laptop เชื่อมต่อผ่าน Wi-Fi ภายในระบบโดยไม่ต้องพึ่งอินเทอร์เน็ตภายนอก สร้างเครือข่าย LAN แบบไร้สายเฉพาะกิจสำหรับอุปกรณ์ทั้งหมด และเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi ที่อยู่ใต้น้ำผ่านสาย Ethernet รับสัญญาณข้อความจากผู้ควบคุมบนผิวน้ำและส่งต่อไปยัง Raspberry Pi ที่ผูกไว้ที่ข้อมือนักดำน้ำ ระบบ Tp-link EAP225 มี Auto Band Steering โดยระบบจะเลือกคลื่นที่ดีที่สุดให้เอง ตามสัญญาณ, ความหนาแน่น, หรือความเร็ว ผู้ใช้ไม่ต้องเลือกเอง ตัว AP จะสลับ 2.4G ↔ 5G ให้อัตโนมัติ[3]

ตัวอย่างบนโน้ตบุ๊ก:

ถ้าเปิด Auto Band Steering บน AP และอุปกรณ์ Surface เชื่อมต่อ SSID เดียวกัน

Surface อาจใช้ 5 GHz เมื่ออยู่ใกล้ AP → เปลี่ยนไป 2.4 GHz อัตโนมัติเมื่อเดินออกไปไกล

สาย Ethernet แบบกันน้ำ: เชื่อมต่อท่อกับ Raspberry Pi โดยตรงเพื่อให้การรับ-ส่งข้อมูลมีความเสถียรและความเร็วสูง ประกอบด้วย

- ส่งภาพวิดีโอจากนักดำน้ำขึ้นสู่ผิวน้ำ
- ส่งข้อความจากผิวน้ำลงสู่นักดำน้ำ



รูปที่ 7 แบบจำลอง (Mockup) ชุดนักดำน้ำ

(Diver Unit) ส่งภาพ จาก USB Camera

และรับข้อความแสดงบนจอการกำหนด IP แบบ Static

ตารางที่ 3 สรุปทิศทางการส่งข้อมูล

ทิศทาง	เส้นทางการสื่อสาร	เทคโนโลยีที่ใช้
นักดำน้ำ → ผิวน้ำ	กล้อง USB → Raspberry Pi → Ethernet → ท่อก → Wi-Fi → แล็บที่ออฟ	สตรีมวิดีโอ (ZMQ ผ่าน LAN)
ผิวน้ำ → นักดำน้ำ	UI (แล็บที่ออฟ) → Wi-Fi → ท่อก → Ethernet → Raspberry Pi → จอแสดงผล	ข้อความ (ZMQ)

3.3 การเลือกใช้สายสัญญาณ

การรับ-ส่งข้อมูล ระหว่าง นักดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำ ขึ้นไปยังตัวส่งสัญญาณ wifi Tp-link EAP225 จะใช้สาย ซึ่งมีให้เลือก 3 แบบด้วยกันได้แก่

UTP = Unshielded Twisted Pair

(สายคู่บิดเกลียวแบบไม่มีชีลด์)

STP (Shielded Twisted Pair)

(คู่บิดเกลียวที่มีชีลด์)

3.2.3 หน่วยนักดำน้ำ (Diver Unit) กล้องกันน้ำ +

สายรัดข้อมือ: ป้องกัน Raspberry Pi และจอแสดงผลจากน้ำทะเล ติดตั้งบริเวณท่อนแขนเพื่อให้สามารถมองเห็นและใช้งานได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 7

ไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi 4): ทำหน้าที่

เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ได้แก่

- รับภาพจากกล้อง USB
- เข้ารหัสและส่งวิดีโอผ่านสาย Ethernet ไปยังท่อก
- รับข้อความจากผู้ควบคุมและแสดงผลบนหน้าจอ

หน้าจอ LCD ขนาด 3.5 นิ้ว: แสดงข้อความที่ได้รับ

อย่างชัดเจน รวมถึงสามารถแสดงภาพตัวอย่างวิดีโอหรือสัญญาณแจ้งเตือนได้ตามการตั้งค่า

กล้อง Low-Light HD USB Camera : ทำหน้าที่

บันทึกภาพวิดีโอใต้น้ำตลอดเวลา และส่งไปยังผู้ควบคุมผ่าน Raspberry Pi และระบบ Wi-Fi

o ทั้งอุปกรณ์ในระบบกำหนด IP ภายใน เช่น:

- Laptop: 192.168.1.10
- TP-Link EAP225: 192.168.1.1
- Raspberry Pi 4: 192.168.1.100

o Subnet: 255.255.255.0

สรุป ทิศทางการสื่อสารสองทาง แสดงดังตารางที่ 3

Fiber Optic Cable (แกนแก้ว/พลาสติกนำแสง)

โดยได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายสัญญาณ

แบบ UTP vs STP vs Fiber สำหรับงานใต้น้ำ แสดงดังตารางที่ 4 สรุปได้ดังนี้

- UTP (Fathom ROV Tether) → เหมาะสมต่อการใช้งานระยะสั้น ประมาณ 25 เมตร สำหรับการส่งข้อมูลทั้งข้อความและวิดีโอความละเอียดสูง (HD) โดยมีค่าใช้จ่ายในระดับประหยัดที่สุด

■ STP → เหมาะสมในกรณีที่มี ROV มีมอเตอร์ไฟฟ้ากำลังสูง หรือไฟส่องสว่างใต้น้ำ (floodlight) ซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ส่งผลกระทบต่อความเสถียรของสัญญาณ Ethernet

■ Fiber Optic → เหมาะกับงาน ROV เชิงวิจัยหรือเชิงพาณิชย์ ที่ต้องการสตรีมหลายกล้อง, 4K/VR, หรือใช้ระยะหลายร้อยเมตร-กิโลเมตร แต่ต้องลงทุนเพิ่ม (Media Converter + สาย + คอนเน็กเตอร์กันน้ำ)

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบ UTP vs STP vs Fiber (สำหรับงานใต้น้ำ)

คุณสมบัติ	UTP (Unshielded Twisted Pair)	STP (Shielded Twisted Pair)	Fiber Optic Cable
โครงสร้าง	สายทองแดงบิดเกลียว ไม่มีชีลด์	สายทองแดงบิดเกลียว + พอยล์/ตาข่ายโลหะหุ้ม	แกนแก้ว/พลาสติก ส่งข้อมูล ด้วยแสง
ทนสัญญาณรบกวน (EMI/Noise)	ต่ำ	สูง (ดีกว่า UTP)	สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี
Bandwidth (ทฤษฎี)	100 Mbps – 1 Gbps (Cat5e/Cat6)	1 – 10 Gbps (Cat6a/Cat7)	หลาย Gbps – Tbps
Latency (25 m)	~1–2 ms	~1 ms	<1 ms
ระยะใช้งานสูงสุด	~100 m	~100 m	หลาย km
ความแข็งแรง (ใต้น้ำ)	แข็งแรง, ทนงอ	หนักกว่า UTP, ซีลยากกว่า	เปราะกว่า, ต้องระวังการงอ/แตก
ต้นทุนสาย	ต่ำ (~30–50 บาท/เมตร)	กลาง (~50–100 บาท/เมตร)	สูง (200–500+ บาท/เมตร)
อุปกรณ์เสริม	ไม่ต้องมีเพิ่ม	ไม่ต้องมีเพิ่ม	ต้องใช้ Media Converter / SFP Module
เหมาะกับงาน	ระบบใต้น้ำระยะสั้น (≤100 m), วิดีโอ HD, ข้อความ	งานใต้น้ำที่มี noise เยอะ เช่น ROV มีมอเตอร์, ไฟแรงสูง	งานวิจัย/ROV ระยะไกล, ต้องการภาพหลายช่อง/4K+, ต้องการความเสถียรสูงสุด
ข้อดีเด่น	ถูก, ง่าย, ติดตั้งง่าย	กันรบกวนดีกว่า, ยังใช้คอนเน็กเตอร์ Ethernet ปกติได้	Bandwidth สูงสุด, ระยะไกล, ไม่ถูกรบกวน
ข้อจำกัด	รบกวนง่าย, ระยะไม่เกิน 100 m	หนักขึ้น, แพงกว่า UTP	ราคาแพง, ต้องใช้ converter, สายเปราะ

4. การนำไปใช้ (Application)

ระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมบนผิวน้ำและนักดำน้ำผ่านหุ่นสัญญาณ ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับภารกิจใต้น้ำที่ต้องการความปลอดภัยและประสิทธิภาพ

ในการสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการฝึกและภารกิจเชิงยุทธวิธี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในสถานการณ์ต่อไปนี้:

- การฝึกดำน้ำเบื้องต้น (SOLO Dive Training): ระบบนี้สามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการฝึกนักดำน้ำใหม่ที่ยังไม่มีประสบการณ์ ด้วยการอนุญาตให้ผู้ควบคุมบนผิวน้ำสามารถสื่อสาร ส่งคำแนะนำ และรับภาพจากกล้องของนักดำน้ำได้แบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถเฝ้าสังเกตพฤติกรรมและตอบสนองเหตุการณ์ฉุกเฉินได้ทันทีโดยไม่ต้องมีนักดำน้ำผู้ช่วยลงไปใต้น้ำร่วมฝึก

- การสำรวจใต้น้ำระยะไกล (Remote Underwater Inspection): เช่น การตรวจสอบท่อส่งน้ำ ฟัน หรือโครงสร้างใต้น้ำ ระบบสามารถส่งภาพจากกล้องที่นักดำน้ำถืออยู่กลับมายังศูนย์ควบคุมผ่านสัญญาณไร้สาย เพื่อให้วิศวกรหรือผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ข้อมูลได้ทันที

- การวิจัยทางทะเล (Marine Research): นักวิจัยสามารถใช้ระบบนี้ในการบันทึกภาพสิ่งมีชีวิตใต้ทะเลในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ และยังสามารถสื่อสารกับนักดำน้ำภาคสนามเพื่อเปลี่ยนแปลงแผนการสำรวจหรือจุดเก็บตัวอย่างได้ทันที

5. คุณสมบัติเด่นของระบบ

- ไม่ต้องใช้อินเทอร์เน็ต: ระบบทำงานได้อย่างอิสระภายในเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) ที่กำหนด IP อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (เช่น 192.168.1.x)

- การตอบสนองแบบเรียลไทม์: ผู้ควบคุมสามารถเฝ้าติดตามภาพจากนักดำน้ำได้ทันที

- การส่งข้อความแบบสองทาง: ส่งคำสั่ง คำเตือน หรือข้อความตรวจสอบสถานะ

- ต้นทุนต่ำ: ใช้อุปกรณ์ทั่วไปที่หาได้ในท้องตลาด
- สามารถขยายเพิ่มเติม: รองรับการจัดตั้งเซนเซอร์อื่น ๆ เช่น เซนเซอร์วัดความลึก
- อุ่นหฤมิ หรือการรื้อซ่อม

6. ศักยภาพในการผลักดันเป็นอุปกรณ์มาตรฐานความปลอดภัย

จากศักยภาพที่กล่าวมา ระบบนี้สามารถต่อยอดเป็น “อุปกรณ์มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการฝึกนักดำน้ำใหม่” ได้ในอนาคต ด้วยเหตุผลดังนี้:

- ช่วยเพิ่มความมั่นใจให้กับครูฝึกและนักดำน้ำในการเฝ้าสังเกตและสื่อสารแบบสองทางได้ตลอดเวลา

- ลดความเสี่ยงจากการสื่อสารไม่เข้าใจหรือเหตุฉุกเฉินที่ตอบสนองล่าช้า

- ส่งเสริมการพัฒนาหลักสูตรฝึกดำน้ำที่เน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง (self-directed learning) ในขณะที่ยังคงมาตรฐานความปลอดภัยที่เข้มงวด

- เหมาะกับการใช้ในศูนย์ฝึกดำน้ำทั้งทางทหารและพลเรือน ศูนย์วิจัยทางทะเล หรือสถานฝึกดำน้ำภาคสนามของมหาวิทยาลัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] EvoLogics GmbH, “Underwater acoustic communication systems,” 2024. [Online]. Available: <https://evologics.de>. Accessed: Jan. 30, 2026.

[2] MIT Media Lab, “OceanNet: Underwater wireless sensor network,” 2023. [Online]. Available: www.media.mit.edu. Accessed: Jan. 30, 2026.

[3] TP-Link, “EAP225-outdoor access point,” 2024. [Online]. Available: <https://www.tp-link.com/th/>. Accessed: Jan. 30, 2026.

[4] “ZeroMQ-Messaging library,” ZeroMQ, 2025. [Online]. Available: <https://zeromq.org/>. Accessed: Jun. 15, 2025.

[5] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 4 Model B,” 2025. [Online]. Available: www.raspberrypi.org. Accessed: Jun. 15, 2025.

[6] S. Vinoski, “Advanced message queuing protocol,” *IEEE Internet Comput.*, vol. 10, no. 6, pp. 87-89, Nov.-Dec. 2006. doi: 10.1109/MIC.2006.116.

[7] OpenAI, “DALL-E 3,” AI image generation tool, Oct. 2025. [Online]. Available: openai.com. Accessed: Jan. 30, 2026.

คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็นวารสารของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สำหรับการบริหารจัดการส่งเสริม
แบ่งปัน และแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ และบทวิเคราะห์จากการศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนา
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งจัดพิมพ์เป็นราย 6 เดือน

ผู้สนใจเขียนบทความเพื่อส่งเข้ามาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศสามารถติดต่อขอข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่
โทร. 02 980 6688 ต่อ 2123 หรือ 2124 หรือ e-mail: admin-dtaj@dti.or.th



■ หลักเกณฑ์การพิจารณาถ่วงดุลบทความ

บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ต้องเป็นบทความ
ที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพทางวิชาการ และมีประโยชน์
ในเชิงทฤษฎีหรือเชิงปฏิบัติ โดยผ่านการพิจารณาและ
ให้ความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) ซึ่ง
ต้องมีคุณสมบัติอย่างต่ำตามเกณฑ์มาตรฐานคือ เป็น
ผู้เชี่ยวชาญในสาขานั้นๆ ทำงานวิจัยและมีผลงานวิจัย
อย่างต่อเนื่อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่านขึ้นไปต่อบทความ
และ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็น
รายการนี้



■ คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์

บทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์จะต้องไม่เคย
เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อนและไม่อยู่ในระหว่าง
การพิจารณาของวารสารอื่น หากมีเนื้อหาข้อมูลวิจัย
บางส่วนเคยพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการจะต้องมี
ส่วนที่เพิ่มเติมหรือขยายจากส่วนที่เคยตีพิมพ์และต้องมี
คุณค่าทางวิชาการที่เด่นชัด โดยได้รับการถ่วงดุลจาก
ผู้ทรงคุณวุฒิและได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ



■ บทความที่รับพิจารณาลงพิมพ์

บทความวิจัย

มีความยาวไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย
Microsoft Word for Windows หรือไม่น้อยกว่า 2,500 คำ
โดยการใช้คำสั่ง Word count ใน MS Word เพื่อนับคำ (แต่ไม่เกิน
10 หน้ากระดาษ A4) ประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน (Title)
สถานที่ทำงาน (Work place of author & co-authors) การติดต่อ
ผู้เขียน (Contact address of correspondence) บทคัดย่อ
(Abstract) และคำสำคัญ (Keywords ไม่เกิน 3-5 คำ) โดย
เนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษา
อังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสาร
อ้างอิง ภาคผนวก (ถ้ามี)

เนื้อเรื่องจะประกอบด้วย บทนำ (Introduction)
ขอบเขตการวิจัย/วัตถุประสงค์ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย/ทดลอง (Materials
and Methods) ผลการวิจัย/ทดลอง (Results) วิจารณ์ อภิปราย
ผล (Discussion) บทสรุป (Conclusions) กิตติกรรมประกาศ
(Acknowledgement ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง (References)

บทความวิชาการ

มีความยาวไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย
Microsoft Word for Windows หรือไม่น้อยกว่า 2,500 คำ
โดยการใช้คำสั่ง Word count ใน MS Word เพื่อนับคำ
(แต่ไม่ควรเกิน 10 หน้ากระดาษ A4) เป็นบทความที่รวบรวม
หรือเรียบเรียงจากหนังสือ เอกสาร ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล
เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็น
ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ

บทความวิชาการต้องประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน
สถานที่ทำงาน วิธีการติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ (Abstract)
และคำสำคัญ (Keywords ไม่เกิน 5 คำ) ทั้งภาษาไทยและ
ภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง ซึ่งลักษณะองค์ประกอบของ
เนื้อเรื่องอาจจะคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของ
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง ผลการวิจัยหรือผลการทดลอง
เป็นต้น

CALL for PAPERS 2026



วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ Defence Technology Academic Journal (DTAJ)

เปิดรับบทความวิจัย/วิชาการ ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

กำหนดการตีพิมพ์
มกราคม - มิถุนายน
กรกฎาคม - ธันวาคม
ของทุกปี

จำนวนผู้ทรงคุณวุฒิ
ประเมินบทความ 3 ท่าน
ต่อบทความ

นำไปยื่นขอตำแหน่ง
ทางวิชาการ หรือ
ขอจบการศึกษาได้
ตามเกณฑ์ ก.พ.อ.

ไม่มีค่าธรรมเนียม
ในการตีพิมพ์

ขอบเขต (Scope)

วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี นวัตกรรม
นวัตกรรมบริการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
การจัดการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ
การออกแบบ การผลิต การประกอบรวม การปรับปรุง
การซ่อมสร้าง การเปลี่ยนลักษณะ การแปรสภาพ
หรือการให้บริการซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการป้องกันประเทศ



สแกนเพื่อส่งบทความที่นี่



วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

โทรศัพท์ 0 2980 6688 ต่อ 2123, 2124 E-mail: admin-dtaj@dti.or.th

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ www.dti.or.th

กระบวนการพิจารณากลับรองบทความ (Review Process)

▶ บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ) จะต้องดำเนินการทุกขั้นตอนผ่านระบบออนไลน์ โดยขั้นตอนการพิจารณากลับบทความมีทั้งสิ้น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอน
01



ผู้เขียนส่งบทความเพื่อขอรับการพิจารณาผ่านระบบออนไลน์

ขั้นตอน
02



กองบรรณาธิการตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาและรูปแบบของบทความเบื้องต้นโดยอาจตอบรับหรือปฏิเสธการตีพิมพ์

ขั้นตอน
03



จัดส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาและประเมินบทความอย่างน้อย 2 ท่านต่อ 1 บทความ

ขั้นตอน
04



กองบรรณาธิการพิจารณาผลการประเมินในเบื้องต้นและส่งบทความให้ผู้เขียนแก้ไขหรือปฏิเสธการตีพิมพ์

ขั้นตอน
05



ผู้เขียนแก้ไขบทความและส่งบทความฉบับแก้ไขพร้อมคำชี้แจงการแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ประเมิน

ขั้นตอน
06



กองบรรณาธิการตรวจสอบความถูกต้องของบทความภายหลังการแก้ไขก่อนทำหนังสือตอบรับการตีพิมพ์

ขั้นตอน
07



จัดทำรูปเล่มและเผยแพร่ลงในวารสารรูปแบบออนไลน์ผ่านระบบ ThaiJO



สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ)
47/433 หมู่ที่ 3 ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปากเกร็ด
จังหวัดนนทบุรี 11120

โทรศัพท์ : 0 2980 6688, โทรสาร : 0 2980 6199

www.dti.or.th



สแกนเพื่อส่งบทความ