



ISSN 2651-0669 (Print)

ISSN 2822-1206 (Online)

DTAJ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

Defence Technology Academic Journal

Volume 7 Issue 15 / January - June 2025

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- แนวทางการใช้โดรนติดอาวุธภายใต้กรอบกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ
- การออกแบบและจำลองอากาศยานไร้คนขับด้วย MATLAB-Simulink

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและความไม่แน่นอนของปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในระยะเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2568 - 2583)

บทความวิจัย (Research Articles)

- การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับชิปนวัตินภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม.
- การประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนด้วยเทคนิคอากาศยานไร้คนขับ
- An Investigation of YOLO-Based Helmet Detection for Workers on GPU and CPU Platforms
- การออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีควบคุมแบบโหมดเลื่อน
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ LRT และ YOLO สำหรับการแบ่งส่วนพื้นที่น้ำท่วมจากภาพกล้องวงจรปิด: กรณีศึกษาจังหวัดน่าน ประเทศไทย
- การศึกษาสมรรถนะหลังคาต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมผลิทยาแผนปัจจุบัน

รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

คณะที่ปรึกษา

พลเอก ดร.ชรัติ อุ่มสัมฤทธิ์
นาวาอากาศเอก คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์
พันเอก จิรศักดิ์ จิวไม้แดง
พลตรี พีรพงศ์ โพธิ์เหมือน
นาวาอากาศโท ดร.เพิ่มศักดิ์ ศิริพละ

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

กองบรรณาธิการ

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

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ฝ่ายจัดการ

นางสาวอินทิรา จุลชาติ
นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชชาติ
นางสาวสาวิตรี ระงับพิษ
ว่าที่ร้อยตรีหญิง ดร.ลำยอง แสนทวี
นางสาวธนิสตา ประภาสิทธิ

สารบัญ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
ปีที่ 7 ฉบับที่ 15 มกราคม – มิถุนายน 2568

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- แนวทางการใช้โดรนติดอาวุธภายใต้กรอบกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ
พิศาล อมรรัตนานภาพ และ วิลาสินี นฤปกรณ์ A1 - A12
- การออกแบบและจำลองอากาศยานไร้คนขับด้วย MATLAB-Simulink
จาตุรนต์ จันทะมาตย์, จิรศักดิ์ คำโสภา, ศิวะโรจน์ บำเพ็ญทาน และ ณัฐพล ใจสำรวม A13 - A26

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและความไม่แน่นอนของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ
อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในระยะเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2568 - 2583)
กนก บุณนาค และ ปิณฑยา บุณนาค D1 - D16

บทความวิจัย (Research Articles)

- การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับชิปนวิธิภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม.
สุรสิทธิ์ ปาลสาร R1 - R10
- การประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชน
ด้วยเทคนิคอากาศยานไร้คนขับ
ทินกร อังคะฮาด, วุฒิศาสตร์ โชคเกื้อ, สาธิต แสงประดิษฐ์, ญาณวุฒิ อุทรรักษ์,
กิตติการ วิริยะศาสตร์ และ ชีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ R11 - R28
- An Investigation of YOLO-Based Helmet Detection for Workers on
GPU and CPU Platforms R29 - R38
Kittakorn Viriyasatr, Warakorn Luangluewut, Phunsak Thiennviboon,
Achitpon Charoensuk, Piyarose Maleecharoen, Siraphob Santironnarong,
Ubon Thongsatapornwatana and Pantape Kaewmongkol
- การออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีควบคุมแบบโหมดเลื่อน R39 - R48
ปณตดา โตชัยภูมิ, จิรศักดิ์ คำโสภา, ศิวะโรจน์ บำเพ็ญทาน และ ณัฐพล ใจสำรวม
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ LRT และ YOLO สำหรับการแบ่งส่วนพื้นที่น้ำท่วม R49 - R62
จากภาพกล้องวงจรปิด: กรณีศึกษาจังหวัดน่าน ประเทศไทย
วรกร เลื่องลือวุฒิ, พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์, กิตติการ วิริยะศาสตร์, ชยชัย เสรีจิตติมา
และ ปิยะรส มาลีเจริญ
- การศึกษาสมรรถนะหลังคาต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมผลิตยาแผนปัจจุบัน R63 - R74
ศุภชัย วรเลิศ, ดุสิต งามรุ่งโรจน์ และ ปรีดา จันทวงษ์

บทบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Technology Academic Journal) หรือ DTAJ ได้ส่งข้อมูลให้ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (ศูนย์ TCI) พิจารณาคุณภาพวารสารเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูล TCI และได้รับการจัดกลุ่มคุณภาพวารสารประจำปี พ.ศ.2567 ให้เป็นวารสารกลุ่มที่ 2 โดยศูนย์ TCI ให้การรับรองคุณภาพวารสารตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2568 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2572 โดย DTAJ ได้เป็นหลักฐานสำคัญให้สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ได้รับการรับรองการบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 ขอบข่ายการเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มีส่วนช่วยให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมในภาคการศึกษาภายในประเทศด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานใน DTAJ สามารถนำไปเป็นหลักฐานการแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งทางวิชาการสำหรับอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา ตามประกาศ ก.พ.อ. เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ พ.ศ. 2564 นำไปเป็นส่วนหนึ่งของหลักฐานสำหรับเกณฑ์การสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอกและปริญญาโท ตามประกาศคณะกรรมการมาตรฐานการอุดมศึกษา เรื่อง เกณฑ์มาตรฐานหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษา พ.ศ. 2565 นอกจากนี้ สทป. ยังนำไปเป็นหลักฐานการปรับปรุงฐานข้อมูลด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เพื่อสนับสนุนข้อมูลในรูปแบบบทความทางวิชาการให้ผู้ให้บริการ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง หรือประชาชนทั่วไป สามารถใช้ประโยชน์ได้

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

บรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

แนวทางการใช้โดรนติดอาวุธภายใต้กรอบกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ

พิศาล อมรรัตนานภาพ^{1*} และ วิลาสินี นฤปกรณ²

วันที่รับ 25 ธันวาคม 2567 วันที่แก้ไข 5 มีนาคม 2568 วันที่ตอบรับ 21 มีนาคม 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้โดรนติดอาวุธในการปฏิบัติการต่อต้านการก่อการร้ายนอกอาณาเขต ภายใต้กรอบของกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (International Humanitarian Law) หรือ IHL โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลักการ *Jus in Bello* ซึ่งมุ่งเน้นไปที่กฎเกณฑ์ในการทำสงคราม ทั้งนี้ ได้วิเคราะห์ความชอบธรรมและความถูกต้องตามกฎหมายของการใช้โดรนในลักษณะนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการเคารพสิทธิมนุษยชน และหลักการของความจำเป็นและความสมควรแก่เหตุ นอกจากนี้ ผู้เขียนยังได้ทำการวิเคราะห์กรณีศึกษาต่าง ๆ รวมถึง การปฏิบัติการของสหรัฐอเมริกาในการใช้โดรนในประเทศปากีสถาน อิรัก และโซมาเลีย โดยพบว่าแม้การใช้โดรนจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดผู้ก่อการร้าย แต่ในการดำเนินการที่ผ่านมาก่อให้เกิดข้อกังวลทางกฎหมายและจริยธรรมหลายประการ เช่น การละเมิดอธิปไตยของประเทศอื่น การสูญเสียชีวิตของพลเรือนและทรัพย์สิน และความโปร่งใสในการตัดสินใจโจมตี เป็นต้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้โดรนติดอาวุธในการต่อต้านการก่อการร้ายนั้น มีความซับซ้อนและต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นกฎหมายระหว่างประเทศ หลักการทางจริยธรรม และความมั่นคงแห่งชาติ การนำโดรนมาใช้จึงควรกระทำอย่างรอบคอบและโปร่งใส เพื่อให้สอดคล้องกับหลักการของกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ และเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ต่อพลเรือนและประเทศอื่น ๆ

คำสำคัญ: โดรนติดอาวุธ, กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ, *Jus in Bello*, การต่อต้านการก่อการร้าย, สิทธิมนุษยชน

¹ ศูนย์รักษาความปลอดภัย, กองบัญชาการกองทัพไทย

² บริษัท ดับบลิวเอ็ม ซิมูเลเตอร์ จำกัด

* ผู้แต่ง, อีเมล: pisanextra@gmail.com

Guidelines for the Use of Armed Drones under International Humanitarian Law

Pisan Amornratananuparp ^{1*} and Wilasinee Narupakorn ²

Received 25 December 2024, Revised 5 March 2025, Accepted 21 March 2025

Abstract

This article examines the use of armed drones in extraterritorial counterterrorism operations within the framework of International Humanitarian Law (IHL), particularly the principle of *Jus in Bello*, which focuses on the conduct of hostilities. The objective is to analyze the legality and legitimacy of using drones in such a manner, especially regarding respecting human rights and the principles of necessity and proportionality. The article analyzed various case studies, including the United States' use of drones in Pakistan, Iraq, and Somalia. It was found that while drones were effective in eliminating terrorists, they also raised several legal and ethical concerns such as violations of other states' sovereignty, civilian casualties, and transparency in decision-making regarding strikes. The findings suggest that using armed drones in counterterrorism is complex and must consider multiple factors, including international law, ethical principles, and national security. Armed drone use should therefore be conducted cautiously and transparently, in compliance with the principles of International Humanitarian Law, and to avoid unintended consequences for civilians and other countries.

Keywords: Armed drone, International Humanitarian Law, *Jus in Bello*, Counterterrorism, Human rights

¹ Armed Forces Security Center, Royal Thai Armed Forces Headquarters

² WM Simulator Company Limited

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

1. บทนำ

ท่ามกลางกระแสเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ อิทธิพลของเทคโนโลยีได้ส่งผลให้โลกเกิดความพลิกผันและพึ่งพาเทคโนโลยีในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ ทั้งส่วนตนเองและส่วนที่เกี่ยวข้องกับสังคมโลก ไม่ว่าจะเป็นด้านธุรกิจ การค้า การศึกษา การเมือง การทหาร หรืองานด้านอื่น ๆ ล้วนแล้วแต่ใช้เทคโนโลยีด้วยกันทั้งสิ้น หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีบทบาทและความสามารถในการดำเนินกิจกรรมที่มุ่งให้เกิดผลลัพธ์ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงอย่างหนึ่ง คือ อากาศยานไร้คนขับ หรือที่เรียกว่า Unmanned Aerial Vehicles (UAV) หรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า โดรน (Drone) ซึ่งในบทความนี้จะมีขอบเขตของการใช้โดรนในมิติของความมั่นคงของชาติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้โดรนติดอาวุธ (Armed Drones) ในภารกิจการป้องกันการก่อการร้ายนอกอาณาเขตอธิปไตยภายใต้ 2 หลักการและกฎเกณฑ์หลัก กล่าวคือ 1) หลักอันชอบธรรม (legitimate purpose) และ 2) อนุสัญญาเจนีวา ค.ศ. 1949 (Geneva Conventions 1949) ซึ่งเกี่ยวข้องและมีหลักการที่ชัดเจนในเรื่องการให้ความคุ้มครอง “ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสู้รบ” และ “จำกัด” ผลกระทบจากสงคราม รวมไปถึงการควบคุมการใช้อาวุธ เครื่องมือ วิธีการรบ เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายหรือสร้างความทุกข์ทรมานที่เกินกว่าขอบเขต ภายใต้หลักการ *Jus in Bello* หรือกฎหมายมนุษยธรรมใน [1] ซึ่งหลักการดังกล่าวสามารถนำมาเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์และนำมาใช้เพื่อสร้างบรรทัดฐาน รวมถึงนำมาใช้ปรับปรุงการใช้บังคับกิจการด้านความมั่นคงในประเทศไทยให้เหมาะสมต่อ “Compliance with the Rules of *Jus in Bello*” เพื่อให้สอดคล้องกับกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ ซึ่งนับว่าเป็นกฎหมายที่ถูกออกแบบไว้เพื่อใช้เมื่อมีสถานการณ์สงคราม โดยกล่าวถึงวิธีการทำสงคราม และการปฏิบัติต่อกำลังพลและพลเรือนอย่างมีมนุษยธรรมในระหว่างการทำสงคราม ซึ่งบทความนี้จะทำการศึกษาเรื่องการนำโดรน

ติดอาวุธมาใช้เพื่อปฏิบัติการทำลายเป้าหมายที่เป็นกลุ่มผู้ก่อการร้ายในพื้นที่นอกอาณาเขตอธิปไตยผ่านการควบคุมจากประเทศอื่น เพื่อป้องกันและปราบปรามการก่อการร้ายที่นำไปสู่การสังหารแบบเลือกเป้าหมายและการให้ความร่วมมือกับประเทศพันธมิตร รวมถึงการเกิดเหตุรุนแรง โดยคำนึงถึงผลกระทบทางด้านกฎหมายว่ามีประเด็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นอย่างไร โดยจะนำหลักการและเหตุผลเรื่องกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (International Humanitarian Law: IHL) ในเรื่อง กฎหมายมนุษยธรรมกฎเกณฑ์ที่ว่าด้วยการที่รัฐใช้กำลังอาวุธ (*Jus in Bello*) ในการกำหนดความจำเป็นในการใช้กำลังทหาร (โดรน) โจมตีเป็นพื้นฐานหลัก [2]

การใช้โดรนภายใต้กรอบกฎหมายมนุษยธรรม “Drones and Jus in Bello”

จากหลักการใน [1] และผลการศึกษาผลงานวิชาการของ [3] - [4] ต่างเห็นพ้องว่านับตั้งแต่เหตุการณ์ 9/11 กองทัพสหรัฐฯ และหน่วยข่าวกรอง (CIA) (รวมถึงกองกำลังพันธมิตร ได้แก่ สหราชอาณาจักรและอิสราเอล ภายใต้ภารกิจต่อต้านการก่อการร้าย (Counterterrorism) ได้มีการใช้โดรนในลักษณะการสังหารแบบเลือกเป้าหมาย (Targeted killings) ที่เป็นสมาชิกกลุ่มผู้ก่อการร้ายอัลกออิดะฮ์ (Al Qaeda) และกลุ่มผู้ก่อการร้ายตอลิบาน (Taliban) ใน 3 ประเทศหลัก ได้แก่ ปากีสถาน อิรัก และโซมาเลีย ซึ่งฝ่ายความมั่นคงสหรัฐฯ ถือว่าเป็นความชอบธรรมทางด้านกฎหมายในมิติที่เป็นการเตรียมการป้องกันภัยจากการเกิดเหตุการณ์การก่อการร้าย (Preventive strike) ว่าด้วยกฎหมาย War Powers Resolution (1973) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วมีความเหมาะสม 2 มิติหลัก กล่าวคือ 1) มิติด้านความปลอดภัยของกำลังพลในการดำเนินกลยุทธ์ในพื้นที่เสี่ยงภัยและอันตราย 2) มิติด้านการป้องกันเหตุรุนแรงเนื่องจากโดรนรุ่นใหม่ได้มีการพัฒนาไปสู่การวิเคราะห์ติดตามพฤติกรรมของเป้าหมาย (Behavioral patterns) ด้วยเทคโนโลยี

ปัญญาประดิษฐ์ (AI) [5] ผนวกกับการติดตามหลักฐานด้านดิจิทัล (Digital footprints) ผ่านระบบ Social Network Analysis (SNA) และการใช้ข้อมูลข่าวกรองจากสายลับ (HUMINT) ในการยืนยันเป้าหมายที่นำไปสู่การทำลายภัยคุกคาม ซึ่งในมิติที่กล่าวถึงนี้ คือประเด็นที่บทความนี้ต้องการศึกษาถึงการละเมิดกฎหมายระหว่างประเทศทั้งในแง่ของมนุษยธรรม (Humanitarian) และการละเมิดอธิปไตย (Sovereignty) ดังตัวอย่างกล่าวคือ การที่รัฐบาลสหรัฐฯ ใช้กฎหมาย War Powers Resolution (1973) ในการส่งโดรนบินผ่านและเข้าโจมตีเป้าหมายบนประเทศอื่น ๆ โดยยังมิได้รับอนุญาต

กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศเน้นย้ำเรื่องความชอบด้วยกฎหมายของการใช้กำลังทางทหารภายใต้กรอบ *Jus in Bello* [6] ซึ่งมีสาระสำคัญสองประการ คือ

ประการที่ 1 การแยกแยะความแตกต่าง (Discrimination) ผู้ที่ดำเนินการทำสงครามในการรบต้องแยกแยะระหว่างประชาชนที่บริสุทธิ์กับทหารของฝ่ายตรงข้าม หลีกเลี่ยงความรุนแรงที่โหดร้ายป่าเถื่อนและไม่เป็นธรรม รวมถึงการปฏิบัติต่อเชลยศึกอย่างดีและมีเกียรติ และทรัพย์สินของคู่สงครามต้องไม่ถูกทำลายให้ได้รับความเสียหายมากเกินไปจนความจำเป็น

ประการที่ 2 ความเป็นสัดส่วน/สมควรแก่เหตุ (Proportionality) หรือความพอเหมาะพอดีในการใช้กำลังในสงคราม ควรจะใช้กำลังที่พอสมควรในการบรรลุถึงเป้าหมาย รวมถึงการตระหนักถึงเงื่อนไขในการใช้กำลังอาวุธเพียงเพื่อให้สงครามยุติลงเท่านั้น หากมีการใช้อาวุธร้ายแรงซึ่งมีอำนาจทำลายล้างสูงถือเป็นการใช้กำลังที่ไม่ได้สัดส่วน

จะเห็นได้ว่าด้วยเหตุผลและการดำเนินการที่สามารถดำเนินการได้ในการสงคราม รวมถึงเหตุผลและการดำเนินการ ที่ไม่สามารถกระทำต่อเป้าหมาย (ศัตรู) โดยเมื่อพิจารณาถึงสถานะของกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศแล้วนั้น ถือเป็นส่วนหนึ่งของกฎหมายระหว่างประเทศ ที่ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างรัฐ มีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องบุคคลที่ไม่ได้มี

ส่วนร่วมในการสู้รบ ผู้ป่วยและผู้บาดเจ็บ นักโทษและพลเรือน [4] ปัจจุบันหลักการดังกล่าวได้นำมาพิจารณาประกอบกับหลักการป้องกันตัวเอง (The right to self-defense) เมื่อพิจารณาการใช้โดรนของสหรัฐฯ ในภารกิจการต่อต้านการก่อการร้ายนั้นนับว่าเป็นการดำเนินการเพื่อป้องกันภัยจากการเกิดเหตุ (Preventive strike) และจัดว่าเป็นปฏิบัติการเชิงรุกในการโจมตีก่อน (Preemptive strike) ด้วยใช้กำลังบังคับผ่านปฏิบัติการทางทหาร (Coercion) ที่เป็นการจัดการกับข้าศึกก่อนที่ฝ่ายตน (สหรัฐฯ) จะถูกโจมตี [7] ซึ่งสอดคล้องกับหลักสิทธิที่จะก่อสงคราม หรือที่เรียกว่า “*Jus ad Bellum*” ซึ่งเป็นกฎแฉเงื่อนโซ่ที่รัฐใด ๆ อาจตัดสินใจก่อสงครามหรือใช้กองกำลังติดอาวุธเพื่อการป้องกันตนเองและการอนุญาตให้ใช้กำลังโดยสหประชาชาติ ซึ่งบรรจุอยู่ในกฎบัตรสหประชาชาติ ค.ศ. 1945 อันเป็นองค์ประกอบหลักของกฎหมายว่าด้วยการใช้กำลังทางทหารโดยการใช้โดรนในลักษณะ “การสังหารแบบเลือกเป้าหมาย (Targeted killings)” ซึ่งในการจัดการกับปัญหาการก่อการร้ายนั้น แม้ว่าจะมีความชอบธรรมตามหลักเกณฑ์ของ *Jus ad Bellum* แต่ยังคงมีปัญหาค้างคั่งอยู่ โดยอาจารย์ด้านกฎหมาย Michael Arthur Moncrieff จากมหาวิทยาลัยเจนีวา (Université de Genève Faculté de droit) ได้มีมุมมองว่าการทำลายเป้าหมายกลุ่มก่อการร้ายมีความไม่โปร่งใส ซึ่งอาจขัดต่อกฎหมายระหว่างประเทศ โดยเฉพาะการโจมตีก่อน ซึ่งเป็นวิธีการพิจารณาความผิดโดยความผิดฐานก่อการร้ายนั้นยังมิได้ถูกดำเนินคดี จึงอาจนับว่าเป็นการขัดต่อกฎหมายมนุษยธรรมหรือ *Jus in Bello* ดังนั้น หลักการ *Jus in Bello* จึงมีบทบาทสำคัญในการรักษาศักดิ์ศรีความเป็นมนุษย์แม้ในช่วงสงคราม โดยการปกป้องผู้ที่ไม่ได้มีส่วนร่วมในความขัดแย้ง และจำกัดความโหดร้ายที่เกิดจากการต่อสู้ หลักการนี้ยังช่วยสร้างความรับผิดชอบให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องในสงครามและช่วยลดผลกระทบที่ร้ายแรงต่อสังคมในระยะยาวอีกด้วย

กรณีประเทศไทย: ประเด็นที่ฝ่ายความมั่นคงไทย ควรพิจารณาหลักการและเหตุผลอย่างถี่ถ้วน กล่าวคือ 1) หากได้รับการร้องขอจากพันธมิตร (สหรัฐฯ) ในการใช้โดรนเหนือน่านฟ้า เพื่อการสังหารกลุ่มก่อการร้ายแบบเลือกเป้าหมาย ซึ่งตามหลักการจะต้องได้รับความยินยอม (Consent) จากรัฐบาล โดยที่ฝ่ายความมั่นคงจะต้องสามารถตอบคำถามต่อสาธารณะได้ ดังนั้น เมื่อปรากฏเหตุผลที่เพียงพอ การดำเนินการนั้นจะต้องดำเนินการภายใต้กรอบของกฎหมายมนุษยธรรม (*Jus in Bello*) อย่างเคร่งครัด ภายใต้เงื่อนไขของหลักความพอสมควรแก่เหตุ (proportionality principle) ที่มีลักษณะที่เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างมาตรการกับวัตถุประสงค์ (Mean-ends test) ใน [8] และ 2) หากเกิดปฏิบัติการการใช้โดรนและ SNA หรือการวิเคราะห์เครือข่ายทางสังคม ในการวิเคราะห์พฤติกรรมและลงมือปฏิบัติ ปฏิบัติการนั้นจึงจะสามารถเป็นที่ยอมรับได้หากมีความโปร่งใสในการเปิดเผยข้อมูล พฤติกรรมบุคคลอื่นเป็นที่น่าเชื่อถือเป็นภัยคุกคามต่อสาธารณะและประชาชนผู้บริสุทธิ์

การใช้โดรนติดอาวุธภายใต้กรอบกฎหมาย ด้านมนุษยธรรมระหว่างประเทศ

จากการศึกษาเอกสารและตำราที่เกี่ยวข้องกับการทำสงครามระหว่างประเทศ พบว่า ปัญหาหลักทางด้านกฎหมายของการใช้โดรนติดอาวุธคือ “ความคลุมเครือ” ซึ่งภายใต้กฎหมายด้านมนุษยธรรมระหว่างประเทศ อาทิ การอนุญาตให้ผู้บัญชาการในสนามและ/หรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถพิจารณาความจำเป็นต่อความสูญเสียแบบจำกัดตามความเหมาะสมได้ด้วยตนเอง (Proportionality) เพื่อการป้องกันตนเองจากการก่อการร้าย [1], [4], [9] - [10] นับตั้งแต่เหตุการณ์ 9/11 สหรัฐฯ และชาติพันธมิตรได้ร่วมประกาศสงครามต่อต้านการก่อการร้าย (Global War on Terrorism: GWOT) และในคราวเดียวกันกองกำลังพันธมิตรได้เริ่ม

มีการใช้โดรนติดอาวุธในการกิจจำนวนกว่า 15,000 ครั้ง นอกพื้นที่สู้รบในหลายประเทศ อาทิ อิหร่าน ตุรกี เยเมน และปากีสถาน [11] โดยการนั้นอาศัยภายใต้หลักการ/กฎเกณฑ์ ว่าด้วยการป้องกันตนเอง (self-defense) ในกรอบ United Nations: UN Security Council Resolution 1373 (ปี 2001) โดยเนื้อหาที่สำคัญของการบังคับใช้ในมาตรานั้นจะต้องประกอบด้วย 1) การดำเนินการภายใต้กรอบความร่วมมือจากนานาชาติ (Framework for global cooperation) ตั้งแต่การแลกเปลี่ยนข่าวสาร/ข่าวกรองและการไม่ให้อนุญาตใช้พื้นที่ในการตั้งฐานที่ตั้งของกลุ่มก่อการร้าย 2) การบังคับใช้กฎหมายด้านมนุษยธรรมเพื่อลดปัญหาการดำเนินการภายใต้อคติและการละเมิดสิทธิต่อประชาชนผู้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง 3) การได้รับความยินยอม (Consent) จากรัฐบาลของประเทศอาณาเขต (International Bar Association 2017) ใน [12] ทั้งนี้ การป้องกันตนเองที่เหมาะสมนั้นจะต้องคำนึงถึงหลักการสำคัญได้ของกฎหมายด้านมนุษยธรรมระหว่างประเทศ โดยหลักการพื้นฐานที่สำคัญ 5 องค์ประกอบ กล่าวคือ 1) หลักความจำเป็น การใช้กำลังทหาร/อาวุธตามความจำเป็น (military necessity) 2) หลักการดำรงไว้ซึ่งหลักมนุษยธรรม (humanity) 3) การแบ่งแยกระหว่างกองกำลังติดอาวุธและประชาชนผู้บริสุทธิ์ (Distinction) 4) หลักการดำเนินการแบบสมควรแก่เหตุ (Proportionality) 5) หลักการเตือนภัยก่อนการโจมตี (Precaution) (กรมสนธิสัญญาและกฎหมาย 2023; International Bar Association 2017) ซึ่งผู้เขียนได้วิเคราะห์เปรียบเทียบหลักการ Proportionality ระหว่างกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (International Humanitarian Law: IHL) และ กฎหมายสิทธิมนุษยชน (Human Right Law) โดยเน้นถึงจุดประสงค์ หลักการ และการบังคับใช้ในบริบทของสงครามและการคุ้มครองมนุษยชน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิเคราะห์หลักการความสมควรแก่เหตุของกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ
 (International Humanitarian Law: IHL)

ประเด็นวิเคราะห์	หลักการดำเนินการแบบสมควรแก่เหตุ (Proportionality) ภายใต้กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (IHL)
ความหมายของความสมควรแก่เหตุ (Proportionality)	การใช้กำลังต้องไม่เกินความจำเป็นต่อเป้าหมายทางทหาร และต้องหลีกเลี่ยงการก่อความเสียหายที่ไม่เหมาะสมต่อพลเรือน
ความสมดุล	ความเสียหายต่อพลเรือนต้องสมเหตุสมผลเทียบกับข้อได้เปรียบทางทหารที่ได้รับ
ผู้บังคับใช้	กองกำลังทหาร ผู้บัญชาการทหาร และผู้มีบทบาทในความขัดแย้งทางอาวุธ
มาตรฐานทางกฎหมาย	อนุสัญญาเจนีวา (Geneva Conventions) และกฎหมายจารีตประเพณีในสงคราม
ความท้าทายในการบังคับใช้	การประเมินผลกระทบในสถานการณ์ฉุกเฉินของสงครามอาจขาดข้อมูลที่ครบถ้วนทันเวลา
การละเมิดและผลที่ตามมา	อาจถูกดำเนินคดีในฐานะอาชญากรรมสงคราม เช่น การโจมตีที่ไม่แยกแยะเป้าหมาย
การประยุกต์ใช้	การโจมตีที่มีความเสี่ยงต่อพลเรือน เช่น การโจมตีทางอากาศ ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อชีวิตมนุษย์เทียบกับผลลัพธ์ทางทหาร

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบหลักการความสมควรแก่เหตุ (Proportionality) ระหว่างกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (IHL) และกฎหมายสิทธิมนุษยชน (Human Rights Law)

ประเด็นวิเคราะห์	กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (IHL)	กฎหมายสิทธิมนุษยชน (Human Rights Law)
จุดประสงค์	จำกัดผลกระทบของความขัดแย้งทางอาวุธ ปกป้องบุคคลที่ไม่ได้มีส่วนร่วมในการสู้รบ	ปกป้องสิทธิและเสรีภาพของบุคคลในทุกสถานการณ์
หลักการ	การโจมตีต้องไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพลเรือนที่เกินกว่าประโยชน์ทางทหารที่คาดหวัง	การจำกัดสิทธิต้องมีเหตุผลที่สมเหตุสมผลและไม่เกินความจำเป็น
การบังคับใช้	ใช้ในช่วงเวลาของความขัดแย้งทางอาวุธเท่านั้น คุ้มครองบุคคลที่ไม่ได้มีส่วนร่วม	ใช้ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นช่วงเวลาของความสงบสุขหรือความขัดแย้ง
การคุ้มครองบุคคล	ในการสู้รบ เช่น พลเรือน นักโทษสงคราม และบุคลากรทางการแพทย์	คุ้มครองสิทธิและเสรีภาพของบุคคลทุกคนในทุกสถานการณ์

จากตารางที่ 1 และ 2 ข้างต้น วิเคราะห์ได้ว่าการปฏิบัติการใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องมือในการดำเนินสงครามระหว่างชาติ จำเป็นต้องใช้หลักในการพิจารณา ได้แก่ หลักการดำเนินการแบบสมควรแก่เหตุ (Proportionality) ภายใต้กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากฎหมายนี้มีบทบาทสำคัญในการปกป้องบุคคลที่ไม่ได้มีส่วนร่วมในการสู้รบ และกำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับวิธีการและวิธีการทำสงคราม หากมีการละเมิดเกิดขึ้น ผลที่ตามมาจะเกิดความเสียหายต่อบุคคลที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องจากการทำศึกสงคราม ซึ่งหมายถึงประชาชนของประเทศคู่สงคราม นอกจากนี้ จากบทความ [4], [9], [13] และการตีความกฎหมายของ [1] ต่างเห็นพ้องว่าการดำเนินการภายใต้การป้องกันตนเองนั้นยังมีปัญหาที่ส่งผลกระทบและขัดต่อกฎหมายด้านมนุษยธรรม อีกทั้งยังขัดต่อหลักการของ *Jus in Bello* และ *Jus ad Bellum* โดยเฉพาะการใช้กำลังตามเหตุอันควร (military necessity) และการดำเนินการแบบจำกัดพื้นที่ (Proportionality) ทั้งนี้ นักวิชาการด้านกฎหมายเหล่านี้มองว่า แม้ว่าการใช้โดรนติดอาวุธซึ่งมีประโยชน์ต่อการดำเนินกลยุทธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อภารกิจการต่อต้านการก่อการร้ายว่าด้วยการดำเนินโจมตีอันชอบธรรมเพื่อป้องกันการก่อเหตุ (ก่อการร้าย) ซึ่งเรียกว่า “pre-emptive strike” และที่เป็นไปในลักษณะการโจมตีแบบจำกัด “proportionate” แต่ยังมีข้อหวั่นไหวที่จะต้องนำมาพิจารณาศึกษาในเรื่องที่ขัดแย้งกับกฎหมายด้านมนุษยธรรมระหว่างประเทศ ซึ่งนับว่าเป็นกฎหมายสูงสุดในการทำสงคราม “The International law of Armed Conflict in part of International Humanitarian Law ...” ซึ่งเมื่อได้ศึกษานโยบายการใช้โดรนของกองทัพสหรัฐฯ สหราชอาณาจักร และอิสราเอล ภายใต้ยุทธการ “การสังหารโดยเจาะจง” (Targeted killing) ที่ดำเนินการโดยใช้โดรนติดอาวุธนอกอาณาเขต (Sovereignty) นั้นมีความกระอักกระอ่วนว่าเป็นความคลุมเครือที่ขัดแย้งด้านจริยธรรม (unethical) และประเด็นที่ก่อให้เกิดข้อกังวลเกี่ยวกับกระบวนการ

ยุติธรรมโดยเฉพาะการสังหารนอกเหนือจากพื้นที่สงคราม ซึ่งนับว่าหลักการของ *Jus in Bello* และ *Jus ad Bellum* ซึ่ง *Jus ad Bellum* ช่วยสร้างกรอบการตัดสินใจสำหรับผู้นำประเทศและประชาคมระหว่างประเทศ เพื่อลดโอกาสเกิดสงครามที่ไม่ยุติธรรมและความรุนแรงที่ไม่จำเป็น ขณะเดียวกันก็สร้างความชอบธรรมให้กับการใช้กำลังในสถานการณ์ที่จำเป็น เช่น การป้องกันตนเองหรือการคุ้มครองสิทธิมนุษยชน ซึ่งแนวคิดนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นจากแนวคิดทางศาสนา ปรัชญา และกฎหมายในหลากหลายยุคสมัย โดยเริ่มจากปรัชญาของ Cicero และพัฒนาต่อโดยนักคิดทางศาสนา เช่น St. Augustine และ Thomas Aquinas ก่อนที่จะกลายเป็นส่วนหนึ่งของกฎหมายระหว่างประเทศโดย Hugo Grotius และการพัฒนาและนำมาใช้ในยุคปัจจุบันโดยองค์กรระหว่างประเทศพัฒนาแนวคิด *Jus in Bello* และ *Jus ad Bellum* เพิ่มเติมในกรอบของกฎหมายระหว่างประเทศ อนุสัญญาประชาชาติ (UN Charter) อนุสัญญาเจนีวา (Geneva Conventions) และความพยายามของศาลอาญาระหว่างประเทศ (ICC) และศาลยุติธรรมระหว่างประเทศ (ICJ) โดยเป็นหลักการที่ใช้กำหนดว่าการเข้าสู่สงครามนั้นมีความชอบธรรมหรือไม่ โดยจะเห็นได้ว่าเป็นกรอบแนวคิดทางกฎหมายและจริยธรรมที่มุ่งเน้นให้การใช้กำลังทางทหารเป็นไปอย่างเหมาะสมและยุติธรรม ป้องกันสงครามที่ไม่จำเป็นหรือเกิดจากแรงจูงใจที่ไม่ถูกต้อง เช่น ความทะเยอทะยานทางการเมือง หรือการรุกรานเพื่อผลประโยชน์ส่วนตัว

จากหลักการ *Jus in Bello* ที่กล่าวข้างต้น จะเห็นได้จากตัวอย่างเหตุการณ์เมื่อ 1 พ.ย. 2556 ภายใต้กรอบความร่วมมือ สหรัฐฯ - ปากีสถาน ในการกิจสังหารนาย Hakimullah Mehsud แกนนำกลุ่มก่อการร้ายตอลิบาน ซึ่งรัฐบาลปากีสถานได้ปฏิเสธการมีส่วนร่วมรู้เห็น แต่ไม่ได้ปฏิเสธหรือคัดค้านต่อต้านในการอนุญาตการนำโดรนมาใช้เพื่อทำลายเป้าหมาย [14] โดยนับตั้งแต่เหตุการณ์ประกาศสงครามต่อต้านการก่อการร้าย (GWOT) สหรัฐฯ (CIA) ได้ทำการสังหารผู้ก่อการร้าย

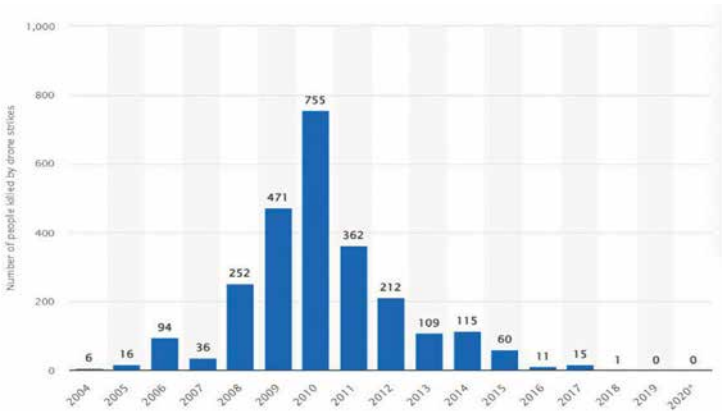
และเครือข่ายจำนวนประมาณ 2,515 ราย (ตามรูปที่ 1) ซึ่งตามหลักการการใช้อาวุธนอกอาณาเขตของสหรัฐฯ นั้น ย่อมจะต้องได้รับความยินยอม (Consent) จากรัฐบาลปากีสถาน ซึ่งเป็นไปตามหลักการด้านกฎหมาย *Jus ad Bellum* ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศนั้นว่ามีความคลุมเครือที่สำคัญหลายประการที่เกิดจากการนำโดรนมาใช้

ในการกิจ อาทิ การโจมตีนอกเขตสู้รบ ซึ่งขัดต่อความเหมาะสมของเป้าหมาย ผลกระทบต่อพลเรือน/ประชาชนที่ไม่เกี่ยวข้อง และสิทธิในการมีชีวิตของเป้าหมาย

และเพื่อให้เกิดความกระจ่างในประเด็นต่าง ๆ ระหว่าง *Jus in Bello* และ *Jus ad Bellum* ผู้เขียนได้สรุปประเด็นวิเคราะห์หลักการดังกล่าวที่ 3

ตารางที่ 3 วิเคราะห์เปรียบเทียบหลักการ *Jus in Bello* และ *Jus ad Bellum*

ประเด็นวิเคราะห์	<i>Jus in Bello</i>	<i>Jus ad Bellum</i>
ความหมาย	หลักการที่ใช้กำหนดวิธีการและพฤติกรรมในสงคราม	หลักการที่ใช้กำหนดเหตุผลและเงื่อนไขในการเริ่มต้นสงคราม
จุดมุ่งหมาย	เพื่อจำกัดความโหดร้ายและลดผลกระทบต่อพลเรือนและคู่สงคราม	เพื่อประเมินว่าสงครามนั้นชอบธรรมและจำเป็นหรือไม่
ช่วงเวลา	ใช้บังคับระหว่างที่สงครามกำลังดำเนินอยู่	ใช้บังคับก่อนที่จะมีการเริ่มสงคราม
หลักการสำคัญ	- ความแตกต่างระหว่างนักรบและพลเรือน - การใช้กำลังต้องสอดคล้องกับความจำเป็น - ห้ามใช้วิธีการที่ก่อให้เกิดความทุกข์ทรมานเกินจำเป็น	- เหตุผลในการเข้าสู่สงครามต้องมีความชอบธรรม - การใช้กำลังต้องเป็นทางเลือกสุดท้าย - ต้องมีโอกาสสำเร็จอย่างสมเหตุผล
กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ เช่น อนุสัญญาเจนีวา	กฎบัตรสหประชาชาติ มาตรา 51 (สิทธิป้องกันตัวเอง)



The minimum number of people killed by U.S. drone strikes carried out under CIA command in Pakistan from 2004 to April 2020

รูปที่ 1 กราฟแสดงจำนวน CIA ใช้โดรนติดอาวุธในการสังหารกลุ่มก่อการร้ายและผู้ที่เกี่ยวข้องในปากีสถาน [15]

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การออกกฎหมายระหว่างประเทศแต่ละฉบับนั้น ใช้เวลายาวนาน เนื่องจากต้องพิจารณาจากหลากหลาย องค์ประกอบและการยอมรับแบบฉันทามติจากประเทศ สมาชิก ดังนั้น การออกกฎหมายเพื่อการใช้โดรน ตีดาวยุในภารกิจต่อต้านการก่อการร้ายย่อมยาก ที่จะมีการออกกฎบังคับใช้ในระยะเวลาอันใกล้ ดังนั้น หากกองทัพไทยมีความสนใจในการเพิ่มขีดความสามารถ ด้านอากาศยานภาพจากโดรนตีดาวยุและ/หรือ การเสริมสร้างความร่วมมือกับชาติพันธมิตร (สหรัฐฯ) ในสงครามต่อต้านการก่อการร้าย --- สหรัฐฯ เป็น พันมิตรหลักที่สำคัญต่อความมั่นคงและการป้องกัน ประเทศ --- ในกรณีเร่งด่วนเพื่อให้การปฏิบัติการกิจ สอดคล้องต่อหลักการ/กฎเกณฑ์สากล นักยุทธศาสตร์ ควรจะต้องสร้างความเข้าใจถึงความท้าทายใหม่ ๆ ที่เทคโนโลยีจากโดรนซึ่งเป็นเรื่องใหม่และยังไม่มี กฎหมาย ฎระเบียบที่ชัดเจน โดยสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง ประการแรก คือ การละเว้นการดำเนินการที่เป็นการ ขัดกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ ประการต่อมา คือ จะต้องมีการร่วมประกาศ consent ระหว่างไทย -พันธมิตร หากมีความจำเป็นภายใต้กรอบความร่วมมือ เพื่อดำเนินการใช้โดรนตีดาวยุในปฏิบัติการกำจัด กลุ่มก่อการร้ายและเครือข่ายในพื้นที่ราชอาณาจักรไทย แบบมีเงื่อนไข อาทิ

1) กฎหมายระหว่างประเทศต้องอาศัย ความเข้าใจร่วมกัน กฎหมายระหว่างประเทศจะทำงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อประเทศต่าง ๆ มีความ เข้าใจร่วมกันในความหมายของคำศัพท์และแนวคิด ทางกฎหมายที่สำคัญ

2) ความรับผิดชอบ (Accountability/ Responsibility) กล่าวคือ ใครจะเป็นผู้รับผิดชอบ ต่อความเสียหายที่เกิดจากการใช้โดรนทั้งค่าเสียหายต่อ ทรัพย์สินและการตอบคำถามต่อสาธารณะ ซึ่งท้ายที่สุด รัฐและ/หรือผู้บัญชาการย่อมต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

3) ความโปร่งใส (Transparency) กล่าวคือ การแบ่งปันข่าวสาร/ข่าวกรองในขั้นตอนของกระบวนการ

ตัดสินใจในการโจมตีด้วยโดรนมีความโปร่งใสเพียงใด และหน่วยงานใดจะเป็นผู้ตรวจสอบความถูกต้อง

4) การลดความสูญเสีย/การคุ้มครองพลเรือน (Zero collateral damage) กล่าวคือ การออกมาตรการ เพื่อป้องกันมิให้พลเรือนและบุคคลที่ไม่เกี่ยวข้อง ได้รับอันตรายจากการโจมตีด้วยโดรน ซึ่งหมายถึงงาน ด้านการข่าวจะต้องแม่นยำและเชื่อถือได้

2. บทสรุป

การพัฒนาเทคโนโลยีโดรนตีดาวยุได้ปฏิวัติ แนวทางการทำสงคราม ซึ่งได้กลายเป็นส่วนสำคัญใน การพัฒนาขีดความสามารถในการทำสงคราม อย่างไร ก็ตาม การนำโดรนมาใช้ได้ก่อให้เกิดคำถามและความ ท้าทายทางกฎหมายและจริยธรรมที่ซับซ้อน โดยเฉพาะ อย่างยิ่งภายใต้กรอบของกฎหมายมนุษยธรรมระหว่าง ประเทศ (International Humanitarian Law: IHL)

การใช้โดรนตีดาวยุก่อให้เกิดความท้าทาย ทางกฎหมายและจริยธรรมอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (IHL) *Jus ad Bellum* ซึ่งเป็นหลักการที่กำหนดว่าการใช้กำลัง ของรัฐนั้นมีความชอบธรรมหรือไม่ ก่อให้เกิดคำถาม ว่าการโจมตีด้วยโดรนเป็นทางเลือกสุดท้ายที่แท้จริง หรือไม่ และสัดส่วนของการโจมตีนั้นเหมาะสมกับ ภัยคุกคามหรือไม่ *Jus in Bello* ซึ่งเป็นหลักการที่ควบคุม การดำเนินการทางทหาร ก่อให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับ ความสามารถในการแยกแยะระหว่างทหารและพลเรือน สัดส่วนของการโจมตี และศักยภาพในการเกิดอันตราย ต่อพลเรือน ความกังวลเหล่านี้เน้นย้ำถึงความจำเป็น ในการพิจารณาอย่างรอบคอบและการอภิปรายอย่าง ต่อเนื่องเกี่ยวกับผลกระทบทางกฎหมายและจริยธรรม ของเทคโนโลยีโดรนตีดาวยุ นอกจากนี้ ยังมีอีกมุมมอง ที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบอย่างรอบคอบในประเด็น หลักการ *Jus ad Bellum* ซึ่งการใช้โดรนตีดาวยุ เพื่อปฏิบัติการต่อต้านการก่อการร้ายก่อให้เกิดคำถามว่า มีภัยคุกคามร้ายแรงเพียงพอที่จะเป็นเหตุผลในการใช้ กำลังหรือไม่ และจะต้องได้ใช้มาตรการทางสันติวิธีทั้งหมด

เพื่อแก้ไขความขัดแย้งก่อนที่จะหันไปพึ่งพากำลัง การใช้โดรนติดอาวุธอาจถูกมองว่าเป็นการป้องกันล่วงหน้ามากกว่าทางเลือกสุดท้าย

ในภาพรวมภายใต้กรอบเรื่องกฎหมายมนุษยธรรม กฎเกณฑ์ที่ว่าด้วยการที่รัฐใช้กำลังอาวุธ (*Jus in Bello*) การใช้โดรนติดอาวุธนั้นมีประเด็นสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในเรื่องของการละเมิดสิทธิในชีวิตและร่างกายของบุคคล พลเรือน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสู้รบ ซึ่งการปฏิบัติการก็จะต้องเคารพสิทธิบุคคลอื่น โดยจะต้องไม่ทำให้ผู้บริสุทธิ์ต้องกลายมาเป็นเป้าหมายหรือเหยื่อของการสู้รบ การใช้โดรนติดอาวุธจึงต้องใช้้อย่างเหมาะสมและเคร่งครัด อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงหลักการเรื่องการละเมิดอธิปไตยที่จะส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์ของประเทศว่าเหตุผลใดจึงยินยอมให้เกิดการสังหารในเขตอธิปไตยของตน ซึ่งสามารถกลายเป็นประเด็นที่สร้างผลกระทบในเวทีสาธารณะอย่างเป็นวงกว้าง ทั้งนี้ ในขณะที่การปฏิบัติการต่อต้านการก่อการร้ายด้วยโดรนติดอาวุธยังคงจะต้องดำเนินต่อไป ฝ่ายความมั่นคงไทยจะต้องมีการควบคุมการดำเนินการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขของหลักการได้สัดส่วน/การดำเนินการแบบสมควรแก่เหตุ (*proportionality principle*) โดยปฏิบัติการนั้นจะดำเนินการไปได้เพียงเพื่อตามความจำเป็นเท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องต่อหลักการด้านมนุษยธรรมต่อไป

การใช้โดรนติดอาวุธภายใต้กรอบกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงระหว่างประเทศ สิทธิมนุษยชน และกฎหมายนานาชาติในหลายมิติ เพื่อให้การใช้โดรนเป็นไปอย่างถูกต้องตามกฎหมายและจริยธรรม จำเป็นต้องมีการพัฒนารอบกฎหมายและนโยบายที่ชัดเจนและมีประสิทธิภาพ แนวทางในข้อเสนอแนะบางประการได้แก่

ประการที่ 1 การพัฒนากฎหมายระหว่างประเทศ จำเป็นต้องมีการพัฒนากฎหมายระหว่างประเทศที่ชัดเจนและครอบคลุมเกี่ยวกับการใช้โดรนเพื่อกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขในการใช้

ประการที่ 2 การสร้างความโปร่งใส การดำเนินการเกี่ยวกับการใช้โดรนควรมีความโปร่งใสเพื่อให้สังคมได้ตรวจสอบและติดตาม

ประการที่ 3 การสร้างกลไกการรับผิดชอบ รัฐต้องมีกลไกที่ชัดเจนในการสอบสวนและดำเนินคดีกับผู้ที่ทำให้เกิดกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ

ประการที่ 4 การเสริมสร้างความร่วมมือระหว่างประเทศ ประเทศต่าง ๆ ควรร่วมมือกันในการพัฒนามาตรฐานและแนวปฏิบัติที่ดีที่สุดในการใช้โดรน ดังนั้น แนวทางการใช้โดรนติดอาวุธภายใต้กรอบกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศควรต้องตระหนักถึงประเด็นต่อไปนี้

1. การแยกแยะระหว่างเป้าหมายทางทหารและพลเรือน หลักการนี้เป็นหัวใจสำคัญของกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ (IHL) โดยกำหนดให้การโจมตีต้องมุ่งเป้าไปที่เป้าหมายทางทหารเท่านั้น และต้องหลีกเลี่ยงการโจมตีที่อาจส่งผลกระทบต่อพลเรือนหรือทรัพย์สินของพลเรือน การแยกแยะนี้ช่วยลดความเสี่ยงในการทำร้ายผู้บริสุทธิ์

2. การใช้กำลังอย่างได้สัดส่วน หลักการนี้หมายความว่า การใช้กำลังต้องไม่เกินความจำเป็นในการบรรลุเป้าหมายทางทหาร การโจมตีต้องไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพลเรือนหรือทรัพย์สินของพลเรือนเกินกว่าที่จำเป็น การใช้กำลังอย่างได้สัดส่วนช่วยลดความเสียหายที่ไม่จำเป็นและรักษาความสมดุลระหว่างความจำเป็นทางทหารและการคุ้มครองพลเรือน

3. การป้องกันความเสียหายต่อพลเรือน การป้องกันนี้รวมถึงการเลือกเวลาและวิธีการโจมตีที่ลดความเสียหายต่อพลเรือน เช่น การโจมตีในเวลาที่มีพลเรือนน้อยที่สุด หรือการใช้เทคโนโลยีที่มีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ยังต้องมีมาตรการป้องกันอื่น ๆ เช่น การแจ้งเตือนล่วงหน้าให้พลเรือนหลบภัย

4. การตรวจสอบและรายงาน การใช้โดรนติดอาวุธต้องมีการตรวจสอบและรายงานผลการปฏิบัติการอย่างโปร่งใส เพื่อให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการเป็นไปตามกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ

การตรวจสอบนี้อาจรวมถึงการบันทึกภาพและเสียงของการปฏิบัติการ และการรายงานผลให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

5. การฝึกอบรมและการควบคุม ผู้ควบคุมโดรนต้องได้รับการฝึกอบรมอย่างเหมาะสมและมีความเข้าใจในกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ รวมถึงมีการควบคุมการใช้โดรนอย่างเข้มงวด การฝึกอบรมนี้ช่วยให้ผู้ควบคุมมีความรู้และทักษะในการปฏิบัติการอย่างมีความรับผิดชอบและลดความเสี่ยงต่อพลเรือน

3. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. D. Evans, *International Law*. Oxford, NY, USA: Oxford University Press, 2010. Oxford University Press, 2010, pp. 316 - 317, 822 - 824.
- [2] Department of Treaties and Legal Affairs. "International Humanitarian Law." TREATIES. mfa.go.th. <https://treaties.mfa.go.th/th/content/กฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศ> (accessed Dec. 21, 2024). (in Thai)
- [3] P. Amornratananunparp, "The U.S. President and the Counter-Terrorism Mission: 'Mission (not) Accomplished'," *Lakmuang J.*, vol. 31, no. 372, pp. 48 - 51, Mar. 2022. (in Thai)
- [4] J. Kaag and S. Kreps, *Drone Warfare*. Cambridge, UK: Polity Press, 2014.
- [5] Swiss National Science Foundation. "Preventive Drone Attacks Based on Digital Traces are a Grey Area under International Law." SNF.ch. <https://www.snf.ch/en/oU4DAR5dVuHtbQ1y/news/preventive-drone-attacks-based-on-digital-traces-are-a-grey-area-under-international-law> (accessed Oct. 1, 2024).
- [6] B. Orend, *The Morality of War*. Peterborough, Ontario, Canada: Broadview Press, 2006.
- [7] B. Strauss. "Preemptive Strikes and Preventive Wars: A Historian's Perspective." HOOVER.org. <https://www.hoover.org/research/preemptive-strikes-and-preventive-wars-historians-perspective> (accessed Dec. 19, 2024).
- [8] K. Charoenraj, "The Concept of Proportionality: A Study of Development of Legal Principle and Applications by U.S. Supreme Court and German Constitutional Court," M.S. thesis, Dept. Public Law, Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2017.
- [9] P. Gray, *Air Warfare: History, Theory and Practice*. NY, USA: Bloomsbury Academic, 2016.
- [10] United Nations Human Rights (UNHR). "Security Council Unanimously Adopts Wide-ranging Anti-Terrorism Resolution; Calls for Suppressing Financing, Improving International Cooperation." OHCHR.org. [https://www.ohchr.org/en/press-releases/2009/10/security-council-unanimously-adopts-wide-ranging-anti-terrorism-resolution#:~:text=By resolution 1373 \(2001\) the, on all States to report](https://www.ohchr.org/en/press-releases/2009/10/security-council-unanimously-adopts-wide-ranging-anti-terrorism-resolution#:~:text=By resolution 1373 (2001) the, on all States to report) (accessed Dec. 19, 2024).
- [11] J. A. Schwartz and M. Fuhrmann. "Do Armed Drones Reduce Terrorism? Here's the Data." WASHINGTONPOST.com. <https://www.washingtonpost.com/politics/2022/08/18/drone-alqaeda-terrorist-attack/> (accessed Dec. 21, 2024).

- [12] International Bar Association. "The Legality of Armed Drones under International Law." IBANET.org. <https://shorturl.asia/CncgB> (accessed Dec. 19, 2024).
- [13] R. Brooks, "Drones and the International Rule of Law," *Ethics Int. Aff.*, vol. 28, no. 1, pp. 83 - 103, 2014, doi: 10.1017/S0892679414000070.
- [14] B. Riedel. "Drone Strikes and the U.S. - Pakistan Relationship." BROOKINGS.edu. <https://www.brookings.edu/articles/drone-strikes-and-the-u-s-pakistan-relationship/> (accessed Dec. 19, 2024).
- [15] Statista. "Minimum Number of People Killed by U.S. Drone Strikes Carried Out under CIA Command in Pakistan from 2004 to April 2020." STATISTA.com. <https://www.statista.com/statistics/428663/casualties-from-us-drone-strikes-in-pakistan/> (accessed Apr. 30, 2025).
- [16] CNN. "US Drone Strike Ordered by Trump Kills Top Iranian Commander in Baghdad." CNN.com. <https://edition.cnn.com/2020/01/02/middleeast/baghdad-airport-rockets/index.html> (accessed Apr. 30, 2025).

การออกแบบและจำลองอากาศยานไร้คนขับด้วย MATLAB-Simulink

จาตุรนต์ จันทะมาตร¹ จิรศักดิ์ คำโสภา² ศิวะโรจน์ บำเพ็ญทาน² และ ณัฐพล ใจสำรวม^{1,2*}

วันที่รับ 22 มีนาคม 2568 วันที่แก้ไข 6 พฤษภาคม 2568 วันที่ตอบรับ 21 พฤษภาคม 2568

บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับมีบทบาทสำคัญในหลากหลายด้าน เช่น การทำแผนที่ทางอากาศ การติดตามทางทหาร การลาดตระเวน และการขนส่ง อย่างไรก็ตาม การพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับยังคงเป็นความท้าทาย เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองพลศาสตร์และความเสี่ยงจากการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง วิธีการแบบดั้งเดิมมักต้องอาศัยการทดสอบภาคสนามที่ใช้ทรัพยากรมาก และมีความเสี่ยงสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมควบคุมการบินของอากาศยานแบบควอดโรเตอร์ โดยใช้แนวทางการออกแบบตามแบบจำลอง (Model-Based Design) ใน MATLAB-Simulink ร่วมกับเฟิร์มแวร์ PX4 ซึ่งเป็นระบบควบคุมการบินแบบเปิดเผยแพร่โค้ด เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความเสี่ยงก่อนใช้งานจริง ได้มีการนำเทคนิค Hardware-in-the-Loop (HITL) มาใช้ในการจำลองการทำงานของระบบในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง วิธีการที่นำเสนอในงานนี้ช่วยให้สามารถเชื่อมต่อระหว่างการจำลองกับการใช้งานจริงได้อย่างราบรื่น รองรับฟังก์ชันการนำทางแบบกำหนดจุด (Waypoint Navigation) การปรับแต่งพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ และการวางแผนภารกิจผ่าน QGroundControl ซึ่งช่วยยกระดับความปลอดภัยและประสิทธิภาพของระบบ และสามารถเป็นรากฐานสำหรับการวิจัยต่อยอดในระบบอากาศยานไร้คนขับแบบอัตโนมัติในอนาคต

คำสำคัญ: MATLAB-Simulink PX4, โปรแกรมควบคุมตำแหน่งการบิน, การจำลองการบิน, การออกแบบควบคุมการบิน, การจำลองระบบนำทางอัตโนมัติ, การจำลองฮาร์ดแวร์ในห่วงโซ่ (HITL)

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² หน่วยวิจัยด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืนแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมล: nattaponj89@gmail.com, nattaponj@tu.ac.th

The UAV Design and Simulation using MATLAB-Simulink

Chaturon Chantamat¹ Jirasak Kamsopa² Siwaroj Bumpenthan² and Nattapon Jaisumroum^{1,2*}

Received 22 March 2025, Revised 6 May 2025, Accepted 21 May 2025

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have played a vital role in a wide range of applications such as aerial mapping, agricultural monitoring, surveillance, and logistics. However, the development and testing of UAV flight control systems remain challenging due to the complexity of dynamic modeling and the risks associated with real-world testing. Traditional methods often require extensive field trials, which can be costly, time-consuming, and potentially hazardous. This study aims to develop a reliable and efficient flight control system for quadrotor UAVs by utilizing a Model-Based Design (MBD) approach in MATLAB-Simulink, integrated with the PX4 open-source autopilot firmware. To ensure accuracy and reduce deployment risks, the Hardware-in-the-Loop (HITL) simulation technique was employed, allowing for the real-time validation of control algorithms in a simulated yet realistic environment. The proposed method facilitates a seamless transition from simulation to hardware implementation, supporting features such as waypoint navigation, real-time parameter tuning, and mission planning via QGroundControl. This integrated framework enhances both the safety and effectiveness of UAV development and serves as a foundation for further research in autonomous aerial systems.

Keywords: MATLAB-Simulink PX4, QGroundControl, UAV flight control, UAV flight simulations, Model-based design, Autonomous navigation, Hardware-in-the-loop (HITL)

¹ Department of Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University.

² Thammasat University Research Unit in Application of Technology and Automation Systems in Industrial for Sustainability

* Corresponding author, E-mail: nattaponj89@gmail.com, nattaponj@tu.ac.th

1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) และระบบอัตโนมัติก้าวหน้าอย่างรวดเร็วได้กลายเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่มีบทบาทสำคัญทั้งในภาคอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และงานด้านวิศวกรรมระบบควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานภายในอาคารซึ่งจำเป็นต้องอาศัยระบบนำทางที่แม่นยำและความสามารถในการปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อมแบบไร้สัญญาณ GPS งานวิจัยของ Bagher Oskooei Fereshte เรื่อง “Programming of an Indoor Autonomous Drone and Metrological Characterization” มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินผลระบบควบคุมของโดรนอัตโนมัติภายในอาคาร โดยใช้แนวทางการเขียนโปรแกรมร่วมกับการวิเคราะห์เชิงมาตรวิทยา (Metrological Characterization) เพื่อวัดประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบ

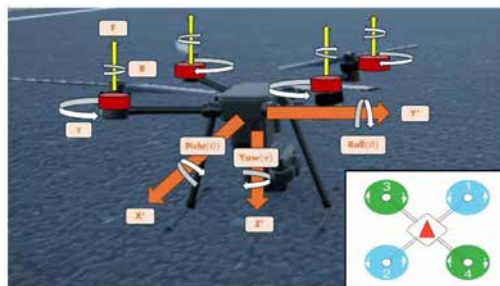
วิทยานิพนธ์ดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโดรนในบริบทของการบินในพื้นที่จำกัด โดยใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์และการคำนวณแบบเรียลไทม์ในการรักษาท่าทาง (Attitude) และตำแหน่งของโดรนได้อย่างเสถียรจุดเด่นอยู่ที่การบูรณาการระหว่างด้านวิศวกรรมซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ควบคุม ซึ่งช่วยเปิดทางให้กับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบภายในโรงงาน การเก็บข้อมูลในพื้นที่เสี่ยง หรือการสนับสนุนระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม 4.0 [1]

ปัญหาหลักที่พบในการพัฒนาระบบควบคุม UAV คือ ความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง การทดสอบภาคสนามมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความเสี่ยงต่ออุปกรณ์ รวมถึงกระบวนการพัฒนาที่ขาดความยืดหยุ่นในการปรับแต่งและตรวจสอบอัลกอริทึมควบคุม

เพื่อลดปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมการบินของ UAV โดยใช้แนวทางการออกแบบตามแบบจำลอง (Model-Based Design) บนแพลตฟอร์ม MATLAB-Simulink ซึ่งทำงานร่วมกับเฟิร์มแวร์ PX4 และระบบ Hardware-in-the-Loop (HITL) ที่ช่วยให้สามารถจำลองการบินในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงได้อย่างแม่นยำ โดยการพัฒนาอัลกอริทึมควบคุมที่สามารถนำไปใช้ได้จริง มีเสถียรภาพ รองรับ

การนำทางแบบอัตโนมัติ และสามารถปรับแต่งได้อย่างยืดหยุ่นผ่าน QGroundControl ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการทดสอบ เพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนา และปูทางสู่ระบบ UAV ที่มีความอัตโนมัติสูงขึ้น [2]

สมการคณิตศาสตร์พลวัตของอากาศยานไร้คนขับจะเป็นสมการ 6 องศาอิสระ (6DoF) เป็นหนึ่งในแนวคิดสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของ UAV สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในอากาศ และสามารถปรับทิศทางได้อย่างแม่นยำ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบินและการควบคุมให้เหมาะสมกับภารกิจต่าง ๆ ตามรูปที่ 1 แสดงการเคลื่อนที่และมุมของควอดโรเตอร์ [3]



รูปที่ 1 6 Degrees of Freedom

การเปลี่ยนพิกัดระหว่าง Earth Frame (inertial frame) และ Body Frame (body-fixed frame) เป็นสิ่งสำคัญในการควบคุม UAV โดยทั่วไปจะถูกควบคุมใน Body Frame แต่ต้องเปลี่ยนพิกัดไปยัง Earth Frame เพื่อทำงานในสภาพแวดล้อมจริง ดังสมการ (1) - (4)

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R(\psi)R(\theta)R(\phi) * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 1 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.1 เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrices)

เมทริกซ์การหมุนใช้สำหรับการแปลงค่าระหว่างพิกัด Body Frame และ Earth Frame สมการ (5) แสดงเมทริกซ์ความเฉื่อยของควอดโรเตอร์ ซึ่งจะใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมทัศนคติ เมทริกซ์ความเฉื่อยใช้เพื่อกำหนดแรงบิดที่จำเป็นสำหรับความเร่งเชิงมุมที่ต้องการเกี่ยวกับแกนหมุน

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยใช้กฎของนิวตัน-ออยเลอร์ สามารถกำหนดสูตรแรงและแรงบิดได้ใน สมการที่ (6) และ (7)

ในสมการเหล่านี้ F แทนแรง τ แทนแรงบิด และ m แทนมวล u, v และ w คือความเร็ว ในขณะที่ p, q และ r แทนอัตราเชิงมุม

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} qw - rv \\ ru - pw \\ pv - qu \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pJ_x \\ qJ_y \\ rJ_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} qr(J_z - J_y) \\ pr(J_x - J_z) \\ pq(J_y - J_x) \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.2 เมทริกซ์แปลงอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุม (Transformation Matrix)

เพื่อเปลี่ยนค่าการหมุนของ UAV ให้อยู่ในพิกัด Earth Frame ต้องใช้ Transformation Matrix สมการ (8) และ (9) จะแสดงการแปลงเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (9)$$

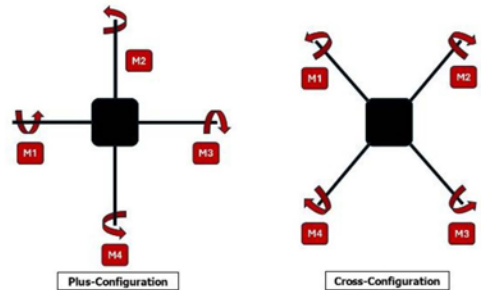
1.3 รูปแบบการจัดเรียงของควอดโรเตอร์ (Types of Configuration)

ใน UAV ประเภทควอดโรเตอร์ มีการจัดเรียงใบพัดอยู่ 2 รูปแบบหลัก ได้แก่

1.3.1 Plus-Configuration ใบพัดถูกจัดเรียงเป็นรูปเครื่องหมายบวก (+) มอเตอร์สองตัวทำงานตรงข้ามกันเพื่อควบคุมการหมุนรอบแกน Roll อีกสองตัวใช้สำหรับ

ควบคุมการหมุนรอบแกน Pitch ทุกมอเตอร์ทำงานร่วมกันเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ Altitude และ Yaw

1.3.2 Cross-Configuration ใบพัดถูกจัดเรียงเป็นรูปตัว X ทุกมอเตอร์ต้องทำงานพร้อมกันเพื่อควบคุมทั้ง Roll และ Pitch มีความมั่นคงมากกว่า + Configuration ทำให้เหมาะกับ UAV ที่ใช้กล้องถ่ายภาพเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการการทรงตัวสูงดังรูปที่ 2 [4] - [5]



รูปที่ 2 รูปแบบของควอดโรเตอร์

1.4 สมการพลศาสตร์ของควอดโรเตอร์

1.4.1 พลศาสตร์การเคลื่อนที่เชิงเส้น (Translational Dynamics)

พลศาสตร์การเคลื่อนที่เชิงเส้น เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบและควบคุมโดรน (UAV) เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโดรนในแนวเส้นตรง (แกน x, y, z) และการตอบสนองต่อแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อโดรน เช่น แรงขับจากใบพัด แรงต้านอากาศ และแรงโน้มถ่วง ดังสมการ (10)

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -\frac{1}{m}[(\sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi)(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + K_1 \cdot x' \mid x' \mid] \\ \ddot{y} &= -\frac{1}{m}[(-\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi)(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + K_1 \cdot y' \mid y' \mid] \\ \ddot{z} &= -\frac{1}{m}[(\cos\phi\cos\theta)(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + K_1 \cdot z' \mid z' \mid] \end{aligned} \quad (10)$$

1.4.2 พลศาสตร์การหมุน (Rotational Dynamics)

พลศาสตร์การหมุนมีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบและควบคุมโดรน เนื่องจากการควบคุมการหมุนรอบแกน Roll, Pitch, และ Yaw ซึ่งจำเป็นสำหรับการเคลื่อนที่และรักษาสถิตของโดรน ดังสมการ (11)

$$\begin{cases} \dot{p} = \frac{1}{J_x} \left[\frac{\sqrt{2}}{2} I(T_2 + T_3 - T_1 - T_4) - q r (J_z - J_y) - K_2 p |p| \right] \\ \dot{q} = \frac{1}{J_y} \left[\frac{\sqrt{2}}{2} I(T_1 + T_3 - T_2 - T_4) - p r (J_x - J_z) - K_2 q |q| \right] \\ \dot{r} = \frac{1}{J_z} [(Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4) - p q (J_y - J_x) - K_2 r |r|] \end{cases} \quad (11)$$

การแปลงความเร็วเชิงมุมไปเป็นมุมออยเลอร์ สมการเหล่านี้ใช้เพื่อแปลงความเร็วเชิงมุมของโดรนไปเป็นค่ามุมออยเลอร์ ดังสมการ (12)

$$\begin{cases} \phi = p + q \cdot \tan\theta \sin\phi + r \cdot \tan\theta \cos\phi \\ \theta = q \cdot \cos\phi - r \cdot \sin\phi \\ \psi = q \frac{\sin\phi}{\cos\phi} + r \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{cases} \quad (12)$$

แรงต้านจะทำงานตรงกันข้ามกับทิศทางของความเร็วของวัตถุ ซึ่งทำให้มีเครื่องหมายลบอยู่ในสมการ (13) เช่นเดียวกับกรณีของการเคลื่อนที่เชิงเส้น แรงต้านในการหมุนจะต้านทานการหมุนของวัตถุ ซึ่งทำให้มีเครื่องหมายลบในสมการ (14)

$$F_{\text{drag}} = -k_1 \cdot v \cdot |v| \quad (13)$$

$$M_{\text{drag}} = -k_2 \cdot \omega \cdot |\omega| \quad (14)$$

1.4.3 ความสัมพันธ์ของแรงขับและแรงบิดของใบพัด

$$\begin{aligned} T_{1-4} &= T_{\text{max}} \cdot v_{1-4} \\ Q_{1-4} &= Q_{\text{max}} \cdot v_{1-4} \end{aligned} \quad (15)$$

โดย v_{1-4} เป็นสัญญาณอินพุตของมอเตอร์

$$t_T = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4T_{\text{max}}} \quad (16)$$

$$\begin{cases} t_R = \frac{T_2 + T_3 - T_1 - T_4}{4T_{\text{max}}} \\ t_P = \frac{T_1 + T_3 - T_2 - T_4}{4T_{\text{max}}} \\ t_Y = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4}{4Q_{\text{max}}} \end{cases} \quad (17)$$

โดยใช้แรงขับ T_{1-4} และแรงบิดด้าน Q_{1-4} เราสามารถกำหนดสัญญาณควบคุมมาตรฐาน t_T , t_P , t_R และ t_Y ที่ส่งผลต่อแรงขับ การเคลื่อนที่แบบพิทช์ การเคลื่อนที่แบบม้วน และการเคลื่อนที่แบบหันเหของ UAV ตามลำดับ ดังสมการ (15), (16) และ (17)

1.4.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งที่มี 6 องศาอิสระ (6 Degrees of Freedom Quaternion) โดยใช้ควอเทอร์เนียนแทนการหมุน

กรรมวิธีนี้ให้สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงทิศทางของวัตถุได้อย่างราบรื่นและไม่มีปัญหา Gimbal Lock ในการจำลองระบบประกอบไปด้วย 1. อินพุต (Inputs) $F_{xyz}(N)$ เป็นแรงที่กระทำกับวัตถุ และ $M_{xyz}(N \cdot m)$ เป็นโมเมนต์ (แรงบิด) ที่กระทำกับวัตถุในพิกัดตัววัตถุ 2. เอาต์พุต (Outputs) มุมออยเลอร์ Euler Angles ϕ, θ, ψ (rad) (Roll, Pitch, Yaw) ซึ่งสามารถคำนวณจากควอเทอร์เนียน, Direction Cosine Matrix (DCM) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แปลงจากพิกัดตัววัตถุ (Body Frame) ไปยังพิกัดเฉื่อย (Inertial Frame) สามารถสร้างได้จากควอเทอร์เนียน, อัตราการหมุนของวัตถุในพิกัดตัววัตถุ ω_b (rad/s), อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุม (Angular Acceleration) $d\omega_b/dt$ (rad/s²) และความเร็วของวัตถุในพิกัดตัววัตถุ v_b (m/s) ควอเทอร์เนียนเป็นวิธีการแทนการหมุนในสามมิติที่ช่วยแก้ปัญหาซิงกูลาริตี (Singularity) ของมุมออยเลอร์ (Euler Angles) และสามารถใช้คำนวณการหมุนของวัตถุได้เร็วและมีเสถียรภาพสูงกว่าการใช้เมทริกซ์หมุน [6]

2. การประยุกต์ใช้ MATLAB-Simulink

2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของควอดคอปเตอร์

2.1.1 ระบบพิกัด (Coordinate System) และแกนการหมุน (Rotation Axes) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการควบคุมและจำลองการบินของโดรน แกน X แทนแกนตามยาวของโดรน เกี่ยวข้องกับการโยนโดรนไปข้างหน้าหรือข้างหลัง แกน Y แทนแกนตามขวางของโดรน เกี่ยวข้องกับการกลิ้งโดรนไปทางซ้ายหรือขวา แกน Z แทนแกนแนวตั้งของโดรน โดยปฏิบัติตามกฎมือขวา การเคลื่อนที่ตามแกน Z เกี่ยวข้องกับการขึ้นหรือลง รวมถึงการหันโดรนเพื่อเปลี่ยนทิศทาง โดยทั่วไปมี 2 ระบบพิกัดหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของควอดคอปเตอร์ คือ 1) ระบบพิกัดโลก (Inertial Frame หรือ Earth Frame) เป็นระบบพิกัดอ้างอิงที่ไม่เปลี่ยนแปลง การใช้พิกัดนี้ช่วยให้เราทราบว่าโดรนอยู่ที่ตำแหน่งไหนในอวกาศ และ 2) ระบบพิกัดของตัวควอดคอปเตอร์ (Body Frame หรือ Vehicle-Frame) เป็นระบบพิกัดที่ติดอยู่กับ

ตัวโดรนและหมุนไปตามการเคลื่อนที่ของมัน พิกัดนี้ใช้ในการคำนวณแรงขับของมอเตอร์และโมเมนต์การหมุนของโดรน ซึ่งหมุนรอบ 3 แกนหลัก ซึ่งเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบ 6DoF (Degrees of Freedom, องศาอิสระ 6 มิติ)

2.1.2 มวลและความเฉื่อย เป็นปัจจัยสำคัญในระบบควบคุมการบินของโดรน มวลส่งผลต่อแรงขับ พลังงาน และความเร่งของโดรน ในขณะที่ความเฉื่อยส่งผลต่อการตอบสนองต่อแรงบิดและการควบคุมการหมุนรอบแกน มวลจะส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Translational Motion) และการตอบสนองต่อแรงต่าง ๆ ที่กระทำ เช่น แรงขับจากใบพัด แรงต้านอากาศ และแรงโน้มถ่วง เพื่อที่จะต้องสร้างแรงขับจากใบพัดให้มากพอเพื่อเอาชนะแรงโน้มถ่วง $F_{thrust} \geq mg$

ในระบบควบคุมการบินความเฉื่อย (Inertia) เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่เชิงมุม (Rotational Motion) ของโดรน ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมการหมุนรอบแกน Roll ϕ , Pitch θ และ Yaw φ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia), I คือ ความต้านทานของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงการหมุน $\tau = I\alpha$ หากโมเมนต์ความเฉื่อยสูง โดรนจะตอบสนองต่อแรงบิดช้าและต้องการแรงบิดมากขึ้นเพื่อเปลี่ยนการหมุน

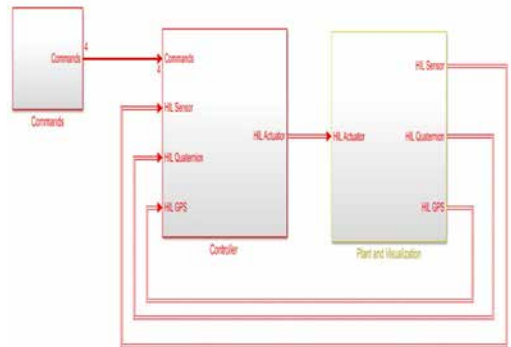
2.2 การตรวจสอบและปรับแต่งตัวควบคุมการบิน

แสดงการจำลองและทดสอบระบบควบคุมโดยใช้ Simulink กับ PX4 Autopilot โดยใช้ PX4 Host Target เพื่อจำลองพฤติกรรมของยานพาหนะใน PX4 Simulator ทำให้สามารถทดสอบระบบควบคุมได้โดยไม่ต้องใช้ฮาร์ดแวร์จริง

2.2.1 หลักการออกแบบของระบบ HITL (Hardware-in-the-loop) เป็นวิธีการทดสอบที่ช่วยให้สามารถใช้งาน Software เพื่อควบคุม Hardware (PX4 Autopilot) จริงได้ ขณะที่โมเดลฟิสิกส์ของยานพาหนะจะถูกจำลองใน MATLAB-Simulink โมเดลควรจำลองพฤติกรรมของยานพาหนะให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด เช่น อากาศพลศาสตร์ มอเตอร์ และการควบคุมการเคลื่อนที่ และระบบต้องรองรับการเปลี่ยนพารามิเตอร์ เช่น PID Controller โมเดลสภาพแวดล้อม และตัวแปรระบบควบคุม เป็นต้น [7] - [8]

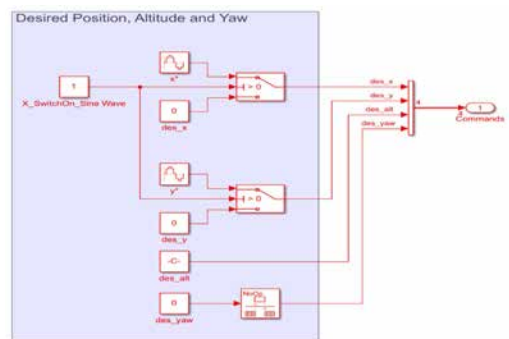
องค์ประกอบของการใช้งานเพื่อตรวจสอบและปรับแต่งตัวควบคุมการบิน ประกอบด้วย 1) Commands

เป็นส่วนที่กำหนดค่าเริ่มต้น 2) Controller เป็นส่วนที่กำหนดค่าการควบคุมควอดโรเตอร์ และ 3) Plant and Visualization เป็นส่วนที่เสมือนและจำลองการบินจริง การตั้งค่า set point จะถูกกำหนดค่าใน commands block ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Commands, Controller และ Plant and Visualization

X_SwitchOn_Sine Wave เป็นตัวเปิดสวิตซ์การทำงานของการทำงานของสัญญาณตำแหน่ง x^* และ y^* ส่งไปยัง comparator ใช้เปรียบเทียบกับ input ที่มาจาก x^* และ y^* นั้นมากกว่า 0 หรือไม่ ถ้ามากกว่า 0 จะเลือกใช้ x^* หรือ y^* เป็นตำแหน่งที่ต้องการ ถ้าไม่มากกว่า 0 จะใช้ค่าคงที่จาก des_x และ des_y แทน ซึ่งในที่นี้คือค่า 0 ดังรูปที่ 4

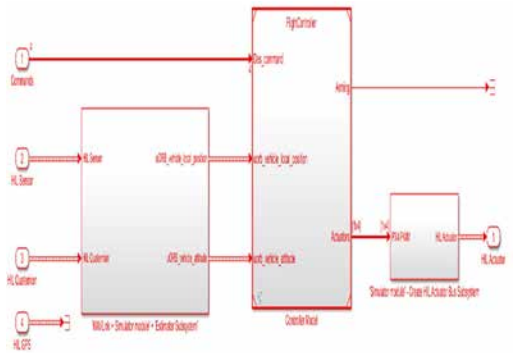


รูปที่ 4 Commands Block

Controller block ประกอบไปด้วย 1) Commands (port 1) เป็นอินพุตขนาดเวกเตอร์ 4 ตัว (เช่น des_x , des_y , des_alt , des_yaw จากภาพก่อนหน้า) เข้าสู่พอร์ต Des_command ในบล็อก FlightController

ส่วนประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ ข้อมูลนำเข้าจากเซนเซอร์, 2) HIL Sensor (port 2) ข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ใช้ใน HIL เช่น accelerometer และ gyroscope เป็นต้น, 3) HIL- Quaternion (port 3) ค่าควอเทอร์เนียนแทนค่า (orientation) ของอากาศยาน และ 4) HIL GPS (port 4) ข้อมูลตำแหน่งจาก GPS (latitude, longitude, altitude)

'MAVLink + Simulator module' + 'Estimator Subsystem' ใช้สำหรับการแปลงข้อมูลเซนเซอร์ให้กลายเป็นข้อมูลภายในของระบบในส่วนของ Actuator (HIL Actuator Output) พอร์ต PX4 PWM แปลงค่า [1x4] จาก FlightController ให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมกับ HIL actuator แล้วส่งผลลัพธ์ออกจาก HIL Actuator เพื่อควบคุมระบบภายนอก เช่น การหมุนของมอเตอร์ในโดรน ดังรูปที่ 5

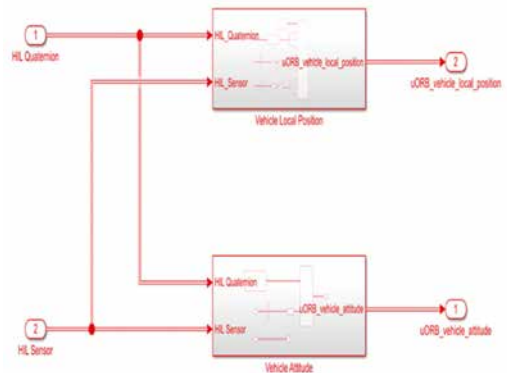


รูปที่ 5 Controller Block

ภายในบล็อก MAVLink + Simulator module + Estimator subsystem block เป็นค่าจำลองเซนเซอร์ที่วัดจากหน่วยจำลองโดรน โดยในบล็อกจะประกอบด้วย

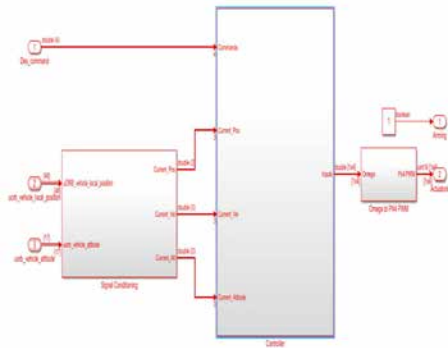
1) Vehicle Local Position block ส่วนนี้มีหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์และข้อมูลควอเทอร์เนียน เพื่อประมาณค่าตำแหน่งของยานพาหนะในระบบพิกัดให้ค่าจำลองเซนเซอร์ที่นำมาใช้ ได้แก่ x, y, z, vx, vy, vz, ax, ay และ az

2) Vehicle Attitude Block ส่วนนี้มีหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์และข้อมูลควอเทอร์เนียน เพื่อประมาณค่าความเอียงของยานพาหนะ ซึ่งมักจะแสดงในรูปของ Quaternion หรือ Euler Angles ตามรูปที่ 6



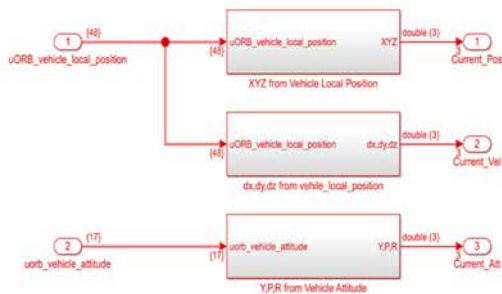
รูปที่ 6 MAVLink + Simulator module + Estimator subsystem

Controller Model ประกอบไปด้วย 1) Desired Command (Des_command) อินพุต ค่าความเร็วที่ต้องการในแนวแกน X, Y, Z และ Yaw Rate, 2) uORB_vehicle_local_position เป็นข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์เกี่ยวกับตำแหน่งของยานพาหนะในพิกัดท้องถิ่น ข้อมูลนี้อาจประกอบด้วยพิกัด North, East, Down (NED) และอาจมีข้อมูลความเร็วและอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง 3) uORB_vehicle_attitude เป็นข้อมูลมุมของยานพาหนะ (ท่าทางของยาน) มีการแยกค่า Yaw, Pitch, Roll ออกมาเพื่อใช้เป็น Current_Att (มุมปัจจุบันของยาน) เป็นข้อมูลเกี่ยวกับมุมของยานพาหนะ (ท่าทางของยาน) มีการแยกค่า Yaw, Pitch, Roll ออกมาเพื่อใช้เป็น Current_Att (มุมปัจจุบันของยาน) 4) Signal Conditioning ทำหน้าที่ปรับสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ มีการแยกข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน Current_Pos เป็นข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของยานพาหนะ, Current_Vel เป็นข้อมูลความเร็วปัจจุบันของยานพาหนะ และ Current_Attitude เป็นข้อมูลความเอียงปัจจุบันของยานพาหนะ และ 5) Controller ทำหน้าที่เปรียบเทียบสถานะปัจจุบันของยานพาหนะกับคำสั่งที่ต้องการ จากนั้นจะคำนวณเอาต์พุตที่เหมาะสมเพื่อส่งการไปยัง Actuators เพื่อให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปตามเป้าหมายดังรูปที่ 7



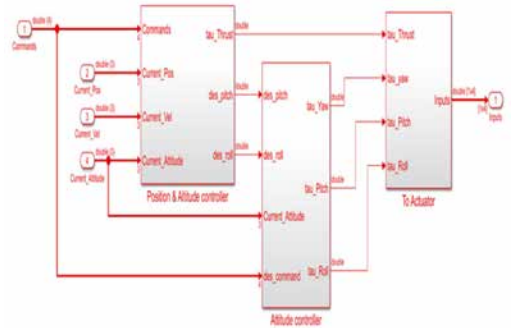
รูปที่ 7 Controller Model

Signal Conditioning Block ทำหน้าที่แปลงข้อมูลจากเซนเซอร์หรือ estimator ให้อยู่ในรูปที่สะดวกต่อการใช้งานในระบบควบคุม เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว และมุมท่าทาง อินพุตประกอบไปด้วย uORB_vehicle_local_position เป็นข้อมูลสถานะของตำแหน่งจากระบบ PX4 ที่ได้จากการประเมินของ Estimator ประกอบด้วยข้อมูลตำแหน่งในแกน x, y, z และความเร็ว dx, dy, dz และ uORB_vehicle_attitude คือ ข้อมูลท่าทางของยานพาหนะในรูปควอเทอร์เนียนหรือ Euler angles (Yaw, Pitch, Roll) ดังรูปที่ 8



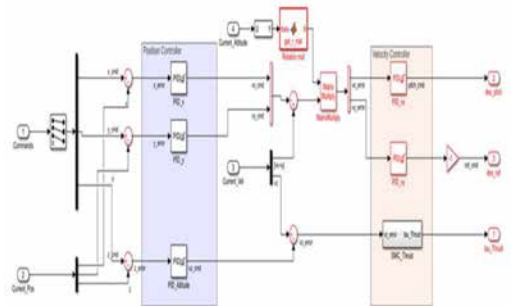
รูปที่ 8 Signal Conditioning Block

ControllerBlock ใน Flight Control ประกอบไปด้วย อินพุต Commands ตำแหน่งที่ต้องการ (เช่น x, y, z) Current_Pos, Current_Vel และ Current_Attitude Position & Attitude Controller Block บล็อกนี้ทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งของยานพาหนะโดยการสร้างคำสั่งสำหรับ attitude ที่ต้องการ (desired attitude) และแรงขับที่ต้องการ (desired thrust) To Actuator Block ทำหน้าที่แปลง Torque และ Thrust ที่ต้องการเหล่านี้ไปเป็นสัญญาณควบคุมสำหรับ Actuators ของยานพาหนะดังรูปที่ 9



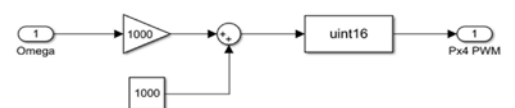
รูปที่ 9 Controller Block ใน Flight Control

Position & Altitude Controller Commands จะมีอินพุต (4 ค่า เช่น x, y, z, yaw) Current_Pos ตำแหน่งปัจจุบัน (x, y, z), Current_Vel ความเร็วปัจจุบัน และ Current_Attitude มุมเอียงปัจจุบัน (Roll, Pitch, Yaw) จะทำการเปรียบเทียบค่าที่ต้องการ (Commands) กับค่าปัจจุบัน tau_Thrust, des_pitch และ des_roll จะส่งค่าไปยัง Attitude Controller เมื่อได้รับค่ามาแล้วจะคำนวณเปรียบเทียบค่า Attitude กับค่าปัจจุบันเพื่อคำนวณ torque ที่ต้องใช้ในแต่ละแกนและส่งค่าที่ได้ไปยัง To Actuator เพื่อแปลง torque แต่ละแกนเป็นค่า angular velocity (Omega) หรือค่า PWM สำหรับแต่ละมอเตอร์ดังรูปที่ 10



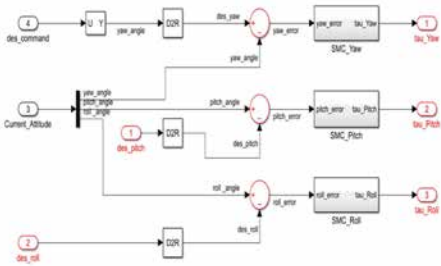
รูปที่ 10 Position & Altitude Controller

Omega to PX4 PWM block แปลงค่าสัญญาณเป็น PWM 1000-2000 us ดังรูปที่ 11



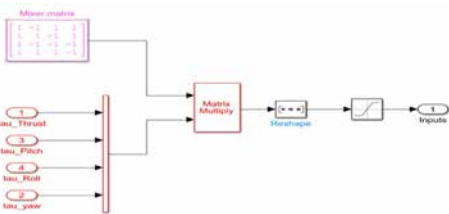
รูปที่ 11 Omega to PX4 PWM Block

Attitude Controller จะแบ่งการทำงานเป็น 3 ส่วน คือ 1) การควบคุมแกน Yaw โดย des_command คำสั่งมุม yaw ถูกแยกค่ามาเฉพาะ yaw_angle ผ่านกล่อง D2R (Degree to Radian) แปลงเป็นเรเดียน des_yaw เทียบกับค่าปัจจุบันจาก Current_Attitude เป็น yaw_angle แล้วคำนวณค่า yaw_error จาก des_yaw-yaw_angle ส่งเข้าไปยัง SMC_Yaw เพื่อคำนวณแรงบิด 2) การควบคุมแกน Pitch โดย Current_Attitude ให้ค่า pitch_angle (มุมปัจจุบันของ pitch) des_pitch มาจาก Position Controller ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการแปลง des_pitch เป็นเรเดียน เทียบกับ pitch_angle แล้วคำนวณ pitch_error แล้วส่งไปยัง SMC_Pitch และ 3) การควบคุมแกน Roll des_roll แปลงเป็นเรเดียนเทียบกับ roll_angle จาก Current_Attitude จากนั้นคำนวณ error แล้วส่งไปยัง SMC_Roll ดังรูปที่ 12



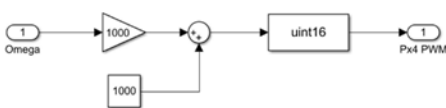
รูปที่ 12 Attitude Controller

To Actuator Block จะแปลงค่า control actuators ไปเป็นค่าเพื่อส่งมอเตอร์ชุดขับเคลื่อนดังรูปที่ 13



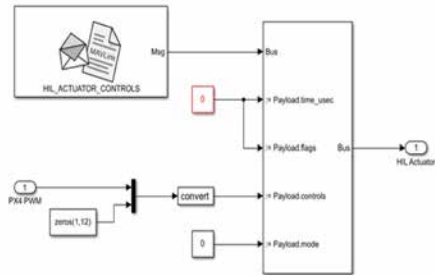
รูปที่ 13 To Actuator Block

Omega to PX4 PWM Block แปลงคำสั่งมอเตอร์เป็น PWM 1000-2000 us ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 Omega to PX4 PWM Block

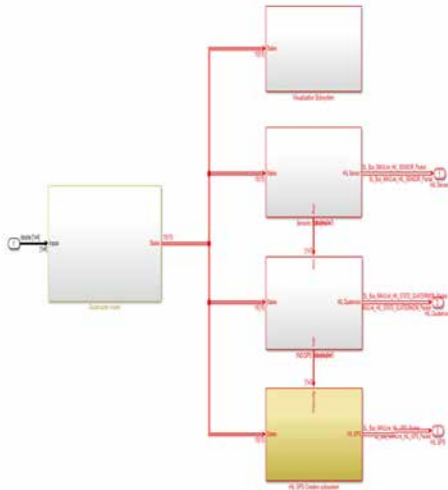
Simulator module-Create HIL Actuator Bus Subsystem เป็นการแปลงค่า PWM ไปเป็นค่าจำลองส่วนขับเคลื่อน ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 Simulator module - Create HIL Actuator Bus Subsystem

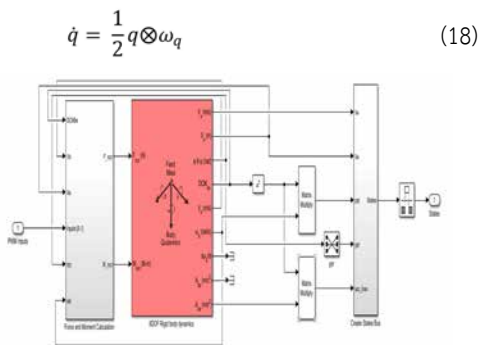
ในส่วนของ Plant and Visualization จะประกอบไปด้วย 1) Quadcopter model รับอินพุต: PWM (จาก PX4 เป็นคำสั่งควบคุมมอเตอร์) เอาต์พุต states ถูกส่งต่อไปยัง Subsystems เพื่อแปลงเป็น sensor data 2) Visualization Subsystem แปลงเป็นภาพเคลื่อนไหวของโดรน 3) Sensors Subsystem รับ States แปลงข้อมูลเป็นความเร่ง (accelerometer), ความเร็วเชิงมุม (gyroscope), สนามแม่เหล็ก (magnetometer) และความดันบรรยากาศ (barometer) ส่งไปยัง PX4 ผ่าน MAVLink, 4) IMU/Quaternion Subsystem ส่งออก HIL Quaternion ใช้ quaternion จาก States เพื่อสร้างข้อมูล orientation สร้าง MAVLink HIL_ATTITUDE_QUATERNION message เอาต์พุตเป็น HIL Quaternion แล้วส่งให้ PX4 ใช้แทน IMU attitude sensing และ 5) HIL GPS Creation Subsystem ส่งออก HIL GPS ใช้ตำแหน่ง (x, y, z) จาก States แปลงเป็นพิกัด GPS เอาต์พุต HIL GPS เป็นข้อมูล GPS จำลองที่ส่งเข้า PX4 ผ่าน MAVLink

กระบวนการทำงานโดยรวม คือ PX4 ส่ง PWM ไปยัง Quadcopter model แล้วจะทำการคำนวณ States จากนั้น States จะส่งค่าไปยัง Subsystem ต่าง ๆ แต่ละ Subsystem สร้างข้อมูล Sensor จำลอง และส่งกลับไปยัง PX4 โดย PX4 ทำงานเหมือนอยู่ในสถานการณ์จริง (Real Hardware) ทั้งที่อยู่ในการจำลอง (HIL) ดังรูปที่ 16



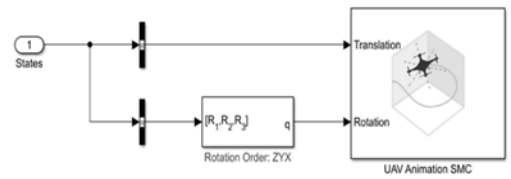
รูปที่ 16 Plant and Visualization

Quadcopter model ประกอบไปด้วย Force and Moment Calculation ซึ่งคำนวณให้ค่าแรงและโมเมนต์ เพื่อส่งไปยังแบบจำลองไดนามิกของโดรน (6DoF Rigid body dynamics) แบบจำลองจะคำนวณหาค่าควอเตอร์เนียนเพื่อเข้าสู่ Altitude > 0 Constraint and Create State Bus Blocks เพื่อสร้างเวกเตอร์ข้อมูลแบบจำลองขึ้นดังรูปที่ 17 การอัปเดตควอเตอร์เนียนสามารถคำนวณได้จากอัตราการหมุน $\otimes$ หมายถึงการคูณควอเตอร์เนียน $\omega_q = [0, \omega_x, \omega_y, \omega_z]$ คือควอเตอร์เนียนที่ได้จากอัตราการหมุน (18)



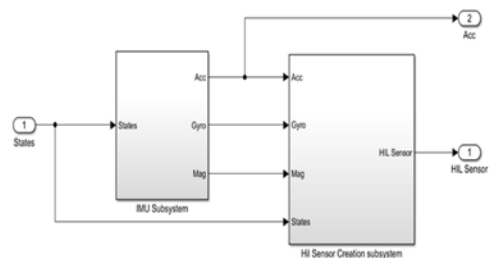
รูปที่ 17 Quadcopter model

Visualization Subsystem นำค่า state จาก Quadcopter model มาเพื่อสร้างแบบจำลองเส้นทางการบินในรูปแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 18



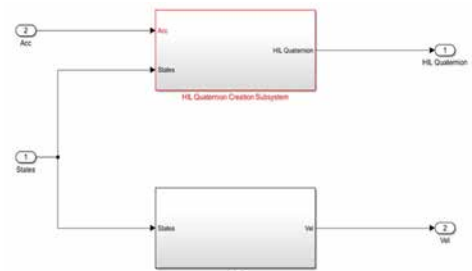
รูปที่ 18 Visualization Subsystem

Sensors Subsystem ทำหน้าที่จำลองค่าเซนเซอร์ เช่น Accelerometer, Gyroscope และ Magnetometer เพื่อประมวลผลของระบบนำทางและควบคุมการบิน ดังรูปที่ 19



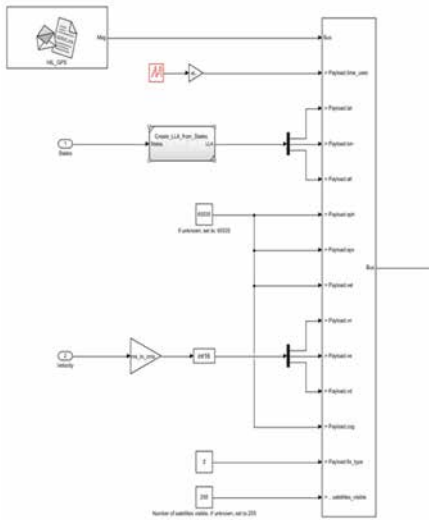
รูปที่ 19 Sensors Subsystem

INS/GPS Subsystem ทำหน้าที่จำลองค่าที่ได้จาก Instrument (INS: Inertial Navigation System) และค่าความเร็วจาก GPS เพื่อคำนวณตำแหน่งและทิศทางโดยใช้ข้อมูลจาก IMU (Inertial Measurement Unit) ดังรูปที่ 20



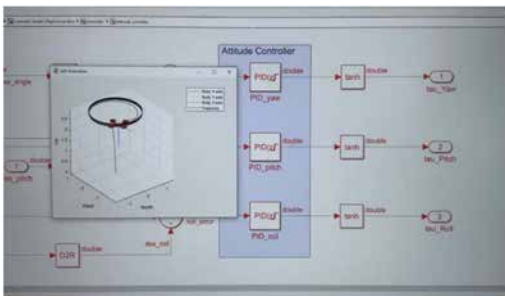
รูปที่ 20 INS/GPS Subsystem

HIL GPS Creation Subsystem ทำหน้าที่จำลองค่าตำแหน่ง GPS และความสูงของยานพาหนะ ข้อมูล GPS และความสูงถูกสร้างขึ้นจาก Quadcopter Model เพื่อให้ตรงกับพฤติกรรมของยานพาหนะจริง ข้อมูลนี้ใช้ในการทดสอบระบบนำทางและการควบคุมของ PX4 Autopilot ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 HIL GPS Creation Subsystem

Subsystem ใน HITL Simulink Plant Model มีหน้าที่ในการสร้างข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองและทดสอบระบบการบิน โดยใช้ข้อมูลจาก Quadcopter Model เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากที่สุด ดังรูปที่ 22



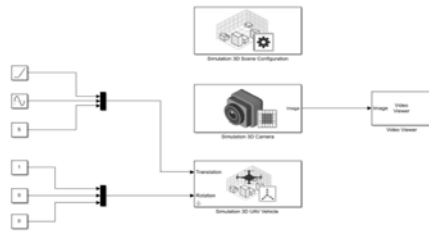
รูปที่ 22 ผลลัพธ์การจำลอง Simulink

3. การจำลอง 3 มิติโดยใช้ MATLAB-Simulink

MATLAB-Simulink เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูงในการจำลองระบบไดนามิกและการควบคุม ซึ่งสามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองโดรนในรูปแบบ 3 มิติ ได้อย่างแม่นยำ โดย Simulink ช่วยให้สามารถออกแบบทดสอบ และปรับแต่งตัวควบคุม (Controller) สำหรับโดรนได้อย่างสะดวก ไม่ว่าจะเป็นระบบควบคุมเสถียรภาพ (Stabilization), ระบบนำทาง (Navigation) หรือระบบหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง (Obstacle Avoidance)

3.1 กำหนดอุปกรณ์ที่ใช้งานในการจำลอง

อุปกรณ์หลักสำหรับการจำลองการบิน ประกอบด้วย Simulation 3D Scene Configuration, Simulation 3D Camera, Simulation 3D UAV Vehicle และ Video Viewer โดยอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์จะทำหน้าที่ กำหนดลักษณะของฉาก, กำหนดการเคลื่อนที่ของ UAV ในพิกัด X, Y, Z รองรับการหมุนรอบแกน (Roll, Pitch, Yaw) และโดยการเชื่อมต่อของบล็อกจะเป็นไปตามรูปที่ 23



รูปที่ 23 Quadcopter 3D simulation

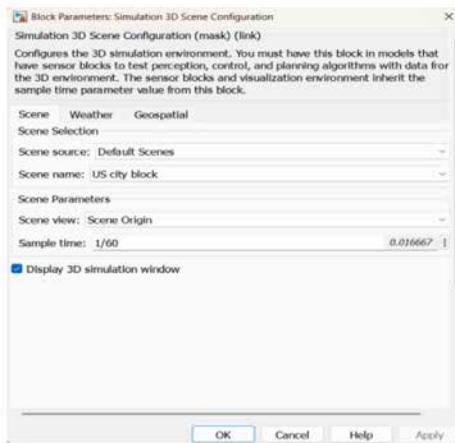
Simulation 3D UAV Vehicle ใช้สำหรับจำลองและแสดงผล อากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) ในสภาพแวดล้อม 3 มิติของ Simulink 3D Simulation Environment โดยรองรับการตั้งค่าต่าง ๆ เช่น ประเภท UAV, สี, พิกัด เป็นต้น

ค่า Translation input เป็นเวกเตอร์ 3 มิติ ซึ่งกำหนดตำแหน่ง UAV ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (หน่วยเป็นเมตร) ค่า Rotation input เป็นเวกเตอร์ 3 มิติ [yaw, pitch, roll] (หน่วยเป็นเรเดียน) [8] ซึ่งใช้กำหนดการหมุนของ UAV ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 Simulation 3D UAV Vehicle

บล็อกสำหรับตั้งค่าสภาพแวดล้อมการจำลอง 3D เพื่อใช้ทดสอบระบบที่มีเซนเซอร์ เช่น การรับรู้ (perception) การควบคุม (control) และอัลกอริทึมวางแผน (planning algorithms) เป็นต้น โดยอาศัยข้อมูลจากสภาพแวดล้อม 3D Scene source เลือกใช้ฉากจาก Default Scenes และ Scene name เลือกฉากเป็น US city block ตามรูปที่ 25



รูปที่ 25 Simulation 3D Scene Configuration

3.2 การจำลองแบบติดตามวงโคจรและการนำทางตามจุดอ้างอิง (Orbit follower and Waypoint follower navigation)

หนึ่งในแนวทางหลักในการควบคุมเส้นทางของ UAV คือ การติดตามวงโคจร (Orbit Following) เป็นเทคนิคเคลื่อนที่รอบจุดศูนย์กลางในลักษณะของวงกลมหรือวงรี โดยคงระยะห่างจากจุดศูนย์กลางให้คงที่ เทคนิคนี้มักใช้ในงานเฝ้าระวัง ตรวจสอบพื้นที่ และการบินลาดตระเวน และการนำทางตามจุดอ้างอิง (Waypoint Following) เป็นแนวทางที่ UAV จะเคลื่อนที่ไปยังชุดของจุดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า จะปรับทิศทางและความเร็วเพื่อไปถึงแต่ละจุดตามลำดับ เทคนิคนี้เหมาะสำหรับภารกิจที่ต้องมีการกำหนดเส้นทางที่แน่นอน เช่น การขนส่งอัตโนมัติ การตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน และการลาดตระเวนพื้นที่ สามารถดำเนินการผ่านแพลตฟอร์ม เช่น MATLAB-Simulink ซึ่งมีเครื่องมือที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ

3.2.1 หลักการทำงาน Orbit Following

ต้องรักษาระยะห่างจากศูนย์กลางของวงโคจรให้คงที่ ใช้ Lookahead Point เพื่อช่วยกำหนดเส้นทางและปรับมุมหัน

การปรับค่าทิศทาง (Desired Course) และมุมส่าย (Desired Yaw) เพื่อช่วยให้อยู่ในวงโคจร

อินพุตหลัก ประกอบด้วย ตำแหน่งของ UAV (Pose) $[x, y, z]$ และ course], ตำแหน่งศูนย์กลางวงโคจร (Center) $[x, y, z]$, รัศมีของวงโคจร (Radius) และทิศทางการหมุน (Turn Direction)

เอาต์พุตหลัก ประกอบด้วย จุดอ้างอิงเป้าหมาย (Lookahead Point) ทิศทางที่ต้องการ (Desired Course) มุมที่ต้องปรับ (Desired Yaw) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งปัจจุบันกับเส้นทาง (Cross-Track Error)

3.2.2 หลักการทำงาน Waypoint Follower

การนำทางตามจุดอ้างอิงเป็นกระบวนการที่บินผ่านชุดของพิกัดที่กำหนดไว้ ซึ่งใช้ในการกิจที่ต้องมีการกำหนดเส้นทางล่วงหน้า เช่น การส่งของหรือการลาดตระเวน เป็นต้น

อินพุตหลัก ประกอบด้วย ตำแหน่งของ UAV (Pose) $[x, y, z]$ และ course], Waypoints เมตริกซ์ $[x, y, z]$, ระยะมองล่วงหน้าเพื่อช่วยกำหนดเป้าหมาย (Lookahead Distance), Close Loop ระบุว่า UAV จะวนกลับไปยังจุดเริ่มต้นหรือไม่

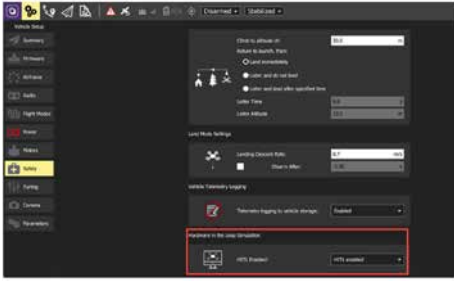
เอาต์พุตหลัก ประกอบด้วย จุดอ้างอิงเป้าหมาย (Lookahead Point), ทิศทางที่ต้องการ (Desired Course), มุมที่ต้องปรับ (Desired Yaw) และ Waypoint Index แสดงจุดอ้างอิงที่ UAV กำลังมุ่งหน้าไป

4. QGroundControl

QGroundControl (QGC) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมและตรวจสอบอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ใช้ PX4 หรือ ArduPilot เป็น Flight Controller ใช้ MATLAB ร่วมกับ QGroundControl เพื่อควบคุมหรือวิเคราะห์ข้อมูลจาก UAV รองรับ MAVLink ซึ่งเป็นโปรโตคอลสำหรับสื่อสารกับ UAV MATLAB ก็สามารถรับ-ส่งข้อมูลผ่าน MAVLink ได้ โดยใช้ UAV Toolbox หรือ Robotics System Toolbox [9]

การตั้งค่า PX4 Autopilot ในโหมด Hardware-in-the-Loop (HITL) ผ่าน QGroundControl (QGC)

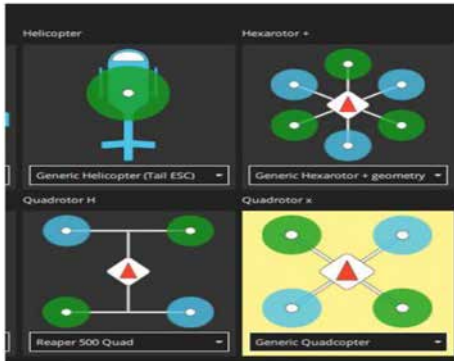
เริ่มต้นโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ Autopilot เข้ากับ QGC ผ่านสาย USB ไปที่เมนู 'Setup' แล้วเลือก 'Safety' ในตัวเลือก 'HITL Enabled' ให้เลือก 'Enabled' เพื่อเปิดการใช้งานโหมด (HITL) ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 การเปิดใช้งานโหมด

Hardware-in-the-Loop

ไปที่เมนู 'Setup' แล้วเลือก 'Airframes' เลือก 'Generic Quadcopter' คลิก 'Apply and Restart' ที่มุมขวาบนของหน้าต่าง Airframe Setup ดังรูปที่ 27



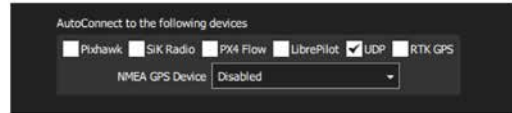
รูปที่ 27 ตั้งค่า Airframes

กำหนดค่ามอเตอร์ผ่าน PWM MAIN ตัวเลือกในการกำหนดค่ามอเตอร์สี่ตัวจะปรากฏขึ้น สามารถกำหนดค่ามอเตอร์สี่ตัวโดยใช้ช่องสัญญาณหลัก 1-4 PWM จำนวนช่องสัญญาณหลักที่ใช้ควรตรงกับจำนวนมอเตอร์ที่ต้องการใช้เฉพาะช่องสัญญาณหลัก PWM สำหรับมอเตอร์ที่เชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เฟซ PWM ดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 การกำหนดค่า Actuator

ตั้งค่า AutoConnect ไปที่แท็บ General ในเมนูการตั้งค่า เลือกใช้ UDP การตั้งค่านี้จะหยุดการสื่อสารระหว่าง QGC และ PX4 Autopilot ผ่าน USB และทำให้สื่อสารผ่าน UDP แทน ดังรูปที่ 29

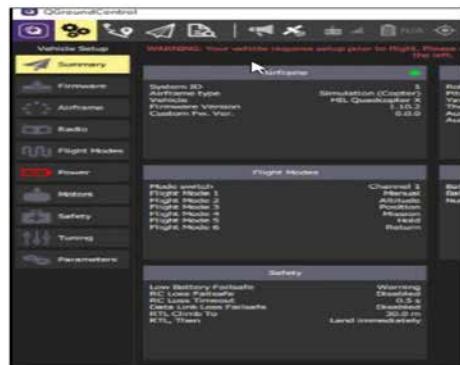


รูปที่ 29 ตั้งค่า AutoConnect

เปิดใช้งาน Virtual Joystick ในแท็บ General ของเมนูการตั้งค่า ไปที่ส่วน Fly View เลือกตัวเลือก Virtual Joystick เพื่อใช้จอยสติคเสมือนแทนรีโมตคอนโทรล ตั้งค่าจอยสติคและ Failsafe

ตั้งค่าพารามิเตอร์ COM_RC_IN_MODE เป็น Joystick only เพื่ออนุญาตให้ใช้จอยสติคและปิดการตรวจสอบ RC ตั้งค่าพารามิเตอร์ COM_DISARM_LAND เป็น -1 เพื่อปิดการทำงานอัตโนมัติของการปลดอาวุธเมื่อ QGC ตรวจพบการลงจอด ตั้งค่าพารามิเตอร์ NAV_ACC_RAD เป็น 10

ตรวจสอบการตั้งค่าใน QGC ตรวจสอบว่าไม่มีการแจ้งเตือนในแท็บ Vehicle Settings ของ QGC ยกเว้นแท็บ Power ที่อาจมีการแจ้งเตือนได้หากมีการแจ้งเตือนในแท็บ Flight Modes ให้ตั้งค่าโหมดการบินสำหรับแต่ละช่องสัญญาณ ตรวจสอบว่ามีการใส่ SD card ในอุปกรณ์เพื่อให้สามารถอัปโหลดภารกิจจาก QGC ได้ ตามรูปที่ 30



รูปที่ 30 ตรวจสอบการตั้งค่าใน QGC

ตรวจสอบการตั้งค่า MAVLink วางแผนที่จะใช้ฟังก์ชัน Monitor & Tune ผ่านพอร์ต TELEM1, TELEM2 หรือ TELEM3 ของฮาร์ดแวร์ Pixhawk ให้ตรวจสอบว่าพอร์ตเหล่านี้

ไม่ได้เปิดใช้งาน MAVLink ตรวจสอบได้โดยดูค่าของพารามิเตอร์ MAV_0_CONFIG และ MAV_1_CONFIG ซึ่งควรถูกตั้งค่าเป็น Disabled เมื่อใช้งาน Monitor & Tune หลังจากตั้งค่าทั้งหมดเสร็จสิ้น ให้ปิดโปรแกรม QGC เพื่อให้การตั้งค่ามีผล

5. บทสรุป

ระบบควบคุมการบินอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยใช้แนวคิด Model-Based Design ผ่าน Simulink ร่วมกับเฟิร์มแวร์ PX4 และการทดสอบด้วย Hardware-in-the-Loop (HITL) ที่พัฒนาขึ้นและอธิบายได้อย่างละเอียดในบทความวิจัยฉบับนี้ เพื่อก่อให้เกิดความมั่นใจถึงความเสถียรและประสิทธิภาพของระบบควบคุมก่อนนำไปใช้งานจริง

กระบวนการพัฒนาเริ่มจากการออกแบบอัลกอริทึมควบคุมใน Simulink และทำการจำลองการบินโดยใช้ HITL ซึ่งช่วยให้สามารถทดสอบการตอบสนองของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง อัลกอริทึมที่ผ่านการตรวจสอบจะถูกติดตั้งบนชุดควบคุมการบินที่ใช้ PX4 Autopilot โดยใช้ QGroundControl (QGC) เป็นเครื่องมือในการกำหนดค่ารับส่งพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ และวางแผนภารกิจ

ระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการนำทางอัตโนมัติผ่านจุดนำทาง (Waypoint-Based Navigation) จึงทำให้ UAV สามารถปฏิบัติการได้อย่างแม่นยำ และสามารถควบคุมเส้นทางบินผ่านแผนที่ดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการสำรวจทางอากาศ การตรวจการณ์ และภารกิจทางยุทธวิธีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ได้ให้การสนับสนุนทุนตามสัญญาที่ 670201 รวมถึงคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ได้อำนวยความสะดวกทั้งในเรื่องสถานที่และสิ่งสนับสนุนต่างๆ และสาขาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนที่ได้ช่วยสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. O. Fereshte, "Programming of an Indoor Autonomous Drone and Metrological Characterization," M.Sc. thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10589/166702>
- [2] A. A. Elgohary, A. M. Ashry, A. M. Kaoud, M. M. Gomaa, M. H. Darwish, and H. E. Taha, "Hardware-in-the-Loop Simulation of UAV Altitude Hold Autopilot," in *2022 AIAA SciTech Forum*, p. 1520, doi: 10.2514/6.2022-1520.
- [3] J. Iqbal, R. ul Islam, and H. Khan, "Modeling and Analysis of a 6 DOF Robotic Arm Manipulator," *Canadian J. Elect. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 6, pp. 300 - 306, Jul. 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280643085_Modeling_and_analysis_of_a_6_DOF_robotic_arm_manipulator
- [4] C. Cömert and C. Kasnakoglu, "Comparing and Developing PID and Sliding Mode Controllers for Quadrotor," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 194-199, 2017, doi: 10.18178/ijmerr.6.3.194-199.
- [5] J. Ackermann, *Robust Control: Systems with Uncertain Physical Parameters*, London, UK: Springer-Verlag, 1993.
- [6] R. Isermann, *Mechatronic Systems: Fundamentals*. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [7] MathWorks. "HITL Simulink Plant Example." MATHWORKS.com. <https://www.mathworks.com/help/uav/px4/ref/hitl-simulink-plant-example.html> (accessed Mar. 19, 2025).
- [8] MathWorks. "Simulator Plant Model Example." MATHWORKS.com. <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021b/supportpkg/px4/ref/simulator-plant-model-example.html> (accessed Mar. 19, 2025).
- [9] MathWorks. "Configure Actuators Using QGround Control." MATHWORKS.cn. <https://www.mathworks.com/help/uav/px4/ug/configure-actuator-qgc.html> (accessed: Mar. 20, 2025).

การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและความไม่แน่นอนของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในระยะเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2568 - 2583)

กนก บุณาค ^{1*} และ ปิณฑยา บุณาค ²

วันที่รับ 4 กุมภาพันธ์ 2568 วันที่แก้ไข 10 เมษายน 2568 วันตอบรับ 17 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มที่มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในระยะเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2568 - 2583) 2) ประเมินความไม่แน่นอนที่สำคัญซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อทิศทางการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย และ 3) สังเคราะห์ข้อเสนอแนะแนวทางการกำหนดยุทธศาสตร์สำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยศึกษารวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลเปิดทั้งที่เป็นเอกสารวิชาการ เอกสารนโยบายด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และข้อมูลข่าวสารจากเว็บไซต์ที่มีแหล่งอ้างอิงเชื่อถือได้ รวมถึงการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและยุทธศาสตร์ความมั่นคงและใช้กรอบการวิเคราะห์ PMESII Framework ในการระบุปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มสำคัญ ประกอบกับการประเมินความไม่แน่นอน (Uncertainties) ด้วยเครื่องมือตารางผลกระทบ/ความไม่แน่นอน (Impact/Uncertainty Grid) และได้วิเคราะห์ความไม่แน่นอนที่สำคัญ (Critical Uncertainties) สองประการ ได้แก่ ความไม่แน่นอนในการดำเนินนโยบายที่เกี่ยวข้องของสหรัฐอเมริกาภายใต้รัฐบาลโดนัลด์ ทรัมป์ และลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจที่ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานและการค้าระหว่างประเทศ อีกทั้งได้เสนอแนะแนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยใน 6 ประเด็นหลัก ได้แก่ 1) การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและระบบนิเวศในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เช่น การจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ 2) การเสริมสร้างความร่วมมือระหว่างประเทศและการดึงดูดการลงทุนจากต่างประเทศ 3) การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และการสร้างนวัตกรรมทางเทคโนโลยี 4) การสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาในประเทศ 5) การจัดการความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ และ 6) การวางแผนยุทธศาสตร์ระยะยาวโดยใช้เครื่องมือ Scenario Planning เพื่อเตรียมความพร้อมรับมือกับความไม่แน่นอนในอนาคต

คำสำคัญ: ปัจจัยขับเคลื่อน, แนวโน้มที่มีผลกระทบ, ความไม่แน่นอน, อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² กองนโยบายและแผน, กรมกิจการพลเรือนทหาร, กองบัญชาการกองทัพบกไทย

* ผู้แต่ง, อีเมล: kanok.b@dti.or.th

An Analysis of the Environment and Uncertainties Affecting Thailand's Defence Industry over a 15 - Year Period (2025 - 2040)

Kanok Bunnag ^{1*} and Pinthaya Bunnag ²

Received 4 February 2025, Revised 10 April 2025, Accepted 17 April 2025

Abstract

This article aims to 1) study and analyze the driving forces and trends impacting Thailand's defence industry over a 15 - year period (2025 - 2040), 2) to evaluate critical uncertainties that may influence the future direction of Thailand's defence industry, and 3) to synthesize recommendations for formulating strategic guidelines for the development of Thailand's defence industry. In the study, we gathered data from open sources, including academic documents, defence industry policy papers, and reliable news outlets, along with interviews with experts in the defence industry and national security strategy. The PMESII Framework (Political, Military, Economic, Social, Information, and Infrastructure) was utilized to identify key driving forces and trends complemented by the Impact/Uncertainty Grid to evaluate uncertainties. In the analysis, we identified two critical uncertainties due to US Policies under Trump's administration, and economic nationalism and protectionism that impact global supply chains and international trade. The article also proposes six strategic recommendations for the development of Thailand's defence industry: 1) developing infrastructure and ecosystems for the defence industry, such as establishing dedicated defence industrial zones; 2) enhancing international collaboration and attracting foreign direct investment; 3) strengthening human resource development and fostering technological innovation; 4) supporting domestic research and development; 5) improving cybersecurity management; and 6) implementing long - term strategic planning using tools such as Scenario Planning to prepare for future uncertainties.

Keywords: Driving forces, Trends, Uncertainties, Thailand's defence industry

¹ Defence Technology Analysis Department, Defence Technology Institute

² Policy and Plans Division, Directorate of Joint Civil Affairs, Royal Thai Armed Forces Headquarters

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

1. บทนำ

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศนับได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมเกิดใหม่ในประเทศไทย ซึ่งมีความมุ่งหมายหลักในการสร้างขีดความสามารถด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศให้เกิดขึ้นภายในประเทศไทย ลดการพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ และสร้างเสริมขีดความสามารถทางเศรษฐกิจของประเทศไทยในระยะยาวภายใต้พลวัตด้านความมั่นคงที่เปลี่ยนแปลงไป อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเริ่มได้รับความสนใจและมีความสำคัญในระดับนโยบายและยุทธศาสตร์มากยิ่งขึ้นในช่วงประมาณครึ่งทศวรรษที่ผ่านมา และได้ถูกกำหนดให้เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมเป้าหมายเชิงกลยุทธ์ของประเทศไทย (อุตสาหกรรมเป้าหมายที่ 11 หรือ S - Curve 11) ซึ่งสอดคล้องและสนับสนุนนโยบายประเทศไทย 4.0 (Thailand 4.0) ในการเปลี่ยนผ่านประเทศไปสู่เศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม องค์ความรู้และเทคโนโลยีขั้นสูงในการที่ประเทศไทยจะกำหนดนโยบายและดำเนินการด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศนั้น จำเป็นต้องมีการสำรวจและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องประกอบกับต้องมีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนต่าง ๆ เพื่อให้สามารถเตรียมการรับมือพลวัตด้านความมั่นคงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทย และประเมินความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มที่ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศในกรอบระยะเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2568 - 2583) เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการสร้างภาคีสนธิสัญญาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทยต่อไป รวมทั้งนำเสนอข้อเสนอแนะเบื้องต้นในการกำหนดยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทย เพื่อรองรับพลวัตการเปลี่ยนแปลงและความไม่แน่นอนของอนาคต

2. การสำรวจและวิเคราะห์สภาพแวดล้อม

บทวิเคราะห์ฉบับนี้ได้ทำการสำรวจและวิเคราะห์สภาพแวดล้อม (Horizon Scanning Analysis) ที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้นและมีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทย ในกรอบระยะเวลา 15 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2568 ถึงปี พ.ศ. 2583 ผ่านเครื่องมือวิเคราะห์สภาพแวดล้อมในเชิงระบบคือ PMESII Framework ในด้านต่าง ๆ อันได้แก่ ด้านการเมือง (Political) ด้านการทหาร (Military) ด้านเศรษฐกิจ (Economic) ด้านสังคม (Social) ด้านข้อมูล (Information) และด้านโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยกองทัพสหรัฐอเมริกาและมีการนำไปประยุกต์ใช้ในองค์การสนธิสัญญาแอตแลนติกเหนือ (North Atlantic Treaty Organization: NATO) สำหรับการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมเชิงอิทธิพล [1] โดยศึกษารวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลเปิด ทั้งที่เป็นเอกสารวิชาการ เอกสารนโยบายด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และข้อมูลข่าวสารจากเว็บไซต์ที่มีแหล่งอ้างอิงเชื่อถือได้ รวมถึงการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและยุทธศาสตร์ความมั่นคง เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในกรอบห้วงเวลาดังกล่าว โดยพบว่า ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทยที่สำคัญมีดังนี้

2.1 ด้านการเมือง (Political)

P1 การดำเนินนโยบายที่เกี่ยวข้องของสหรัฐอเมริกาภายใต้รัฐบาลโดนัลด์ ทรัมป์

การดำเนินนโยบายที่เกี่ยวข้องของสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะนโยบายการต่างประเทศ การเศรษฐกิจ และการทหาร ภายใต้รัฐบาลโดนัลด์ ทรัมป์ สมัยที่สอง เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อทิศทางการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทยในระยะยาว โดยสหรัฐอเมริกามีแนวโน้มที่จะมุ่งเน้น

ผลประโยชน์ภายในประเทศภายใต้นโยบาย “America First” และดำเนินนโยบายต่างประเทศในรูปแบบ “Transactional” หรือการมุ่งดำเนินธุรกรรมที่ให้ความสำคัญกับผลตอบแทนทางเศรษฐกิจเป็นหลัก [2] อีกทั้งมีแนวโน้มที่จะมุ่งเน้นการดำเนินนโยบายแบบทวิภาคีมากกว่าการสนับสนุนความร่วมมือในระดับพหุภาคี ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการดำเนินงานด้านความมั่นคงที่กระทำผ่านความร่วมมือในระดับภูมิภาค เช่น ASEAN Regional Forum (ARF) หรือ East Asia Summit (EAS) และอาจส่งผลต่อการยกระดับความตึงเครียดในภูมิภาค โดยเฉพาะจากความขัดแย้งในทะเลจีนใต้และผลกระทบจากการแข่งขันระหว่างชาติมหาอำนาจ

ทั้งนี้ สหรัฐอเมริกายังคงให้ความสำคัญกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้และผลประโยชน์มหาศาลให้แก่รัฐ [3] และไทยมีแนวโน้มที่จะสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีทางการทหารขั้นสูงจากสหรัฐอเมริกามากยิ่งขึ้นจากนโยบายส่งเสริมการค้าของสหรัฐ [4] อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาเทคโนโลยีจากสหรัฐอเมริกาอาจสร้างความเสี่ยงในระยะยาวหากถูกใช้เป็นเครื่องมือในการต่อรองทางการเมือง หรือมีการกำหนดเงื่อนไขที่ไม่เอื้อประโยชน์แก่ไทย อาทิ การยกระดับการสนับสนุนในกรณีความขัดแย้งในภูมิภาค ซึ่งก่อให้เกิดความท้าทายในการวางยุทธศาสตร์และพัฒนาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศให้สามารถรับมือกับพลวัตที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และลดความเสี่ยงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงนโยบายระดับโลก

2.2 ด้านการทหาร (Military)

M1 ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและรูปแบบการปฏิบัติการทางทหารที่เปลี่ยนแปลงไป

การพัฒนาเทคโนโลยีที่รวดเร็วในด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ระบบอัตโนมัติ (Autonomous Systems) ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ (Cyber Security) รวมถึงเทคโนโลยีควอนตัม

(Quantum Technology) จะเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสงครามในยุคที่เทคโนโลยีดิจิทัลและฐานข้อมูลขนาดใหญ่เป็นศูนย์กลางของการปฏิบัติการ โดยการประมวลผลข้อมูล การตัดสินใจที่แม่นยำและรวดเร็วในเสี้ยววินาที รวมถึงการดำเนินการที่มีความแม่นยำสูงได้กลายมาเป็นองค์ประกอบสำคัญ ตัวอย่างเช่น การใช้ AI ในการประมวลผลข้อมูลข่าวกรองและการควบคุมอาวุธจะเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจและการดำเนินการทางทหาร [5] เทคโนโลยีหุ่นยนต์หรือระบบอัตโนมัติจะถูกนำมาใช้มากขึ้นในรูปแบบใหม่ของสงคราม เช่น การต่อสู้ในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ความปลอดภัยทางไซเบอร์จะกลายเป็นเรื่องที่สำคัญยิ่งขึ้นจากการพึ่งพาระบบดิจิทัลในกองทัพ [6] นอกจากนี้ เทคโนโลยีควอนตัมจะเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในด้านการประมวลผลข้อมูล การติดต่อสื่อสาร และการข่าวกรอง [7] การลงทุนในเทคโนโลยีเหล่านี้จะเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับไทยในการเสริมสร้างศักยภาพทางทหาร รวมถึงโอกาสของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในอนาคต

M2 การก่อการร้ายและความไม่สงบในภูมิภาค

การก่อการร้ายและความไม่สงบยังคงเป็นภัยคุกคามต่อความมั่นคงในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะในประเทศ เช่น ไทยและฟิลิปปินส์ ที่ยังคงมีกลุ่มก่อการร้ายและกลุ่มหัวรุนแรงเคลื่อนไหวอยู่ ตัวอย่างเช่น วิกฤติความไม่สงบในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ของไทย [8] และปัญหาของกลุ่มกบฏคอมมิวนิสต์ในฟิลิปปินส์ ความพยายามในการรับมือภัยคุกคามจากการก่อการร้ายและความไม่สงบเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยเฉพาะการพัฒนาขีดความสามารถของเทคโนโลยีให้เพียงพอต่อการดำเนินการที่เกี่ยวข้องและโอกาสของตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในภูมิภาค

2.3 ด้านเศรษฐกิจ (Economic)

E1 ลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจและการปกป้องการค้า

ลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจ (Economic Nationalism) และการปกป้องการค้า (Protectionism) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องภายหลังจากการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) รวมถึงการเกิดสงครามและความขัดแย้งขึ้นในพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก อาทิ ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน อาจแทรกแซงการค้าและการลงทุนในภูมิภาค โดยชาติต่าง ๆ ได้ตระหนักถึงผลกระทบจากการพึ่งพิงระบบการผลิตจากต่างประเทศมากเกินไป จนทำให้ขีดความสามารถภายในประเทศไม่เพียงพอต่อการรับมือสถานการณ์ฉุกเฉินได้ด้วยตัวเอง จึงหันกลับมาให้ความสำคัญกับการสร้างขีดความสามารถภายในประเทศ เพื่อการพึ่งพาตนเองและการรักษาผลประโยชน์ของชาติเป็นลำดับแรก [9] ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2563 อินโดนีเซียได้ออกกฎหมายห้ามการส่งออกสินค้าที่ยังไม่ได้ผ่านการถลุง เช่น นิกเกิล เพื่อกระตุ้นการลงทุนในอุตสาหกรรมการแปรรูปโลหะภายในประเทศ ส่งผลให้บริษัทต่างชาติต้องลงทุนตั้งโรงงานผลิตแบตเตอรี่ในอินโดนีเซีย เนื่องจากอินโดนีเซียถือเป็นผู้ผลิตนิกเกิลรายใหญ่ที่สุดในโลก [10] ลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจและการปกป้องการค้านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งแม้ว่าจะเป็นการส่งเสริมการเติบโตของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในท้องถิ่น แต่ก็อาจสร้างความยากลำบากในการจัดหาเทคโนโลยีและส่วนประกอบขั้นสูงจากตลาดต่างประเทศได้เช่นกัน อีกทั้งอาจส่งผลกระทบต่อความร่วมมือระหว่างชาติในการบูรณาการด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอีกด้วย เช่น สิทธิในการเข้าถึงเทคโนโลยีขั้นสูงของชาติตะวันตกกับของจีนหรือรัสเซีย

E2 การขยายตัวของตลาดและการกระจายตัวของผู้เล่นในตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

ตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศทั่วโลกมีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความต้องการทางด้านยุทธโประกรณ์และเทคโนโลยีทางการทหารที่เพิ่มขึ้นทั้งในระดับโลกและภูมิภาค บริษัท The Business Research Company คาดการณ์ว่ามูลค่าตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศทั่วโลกจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 772.49 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี พ.ศ. 2571 และมีอัตราการเติบโตต่อปีแบบทบต้น หรือ Compound Annual Growth Rate (CAGR) ประมาณร้อยละ 5.8 [11] โดยในภูมิภาคอินโด-แปซิฟิกมีประเทศที่มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่โดดเด่นขึ้นมา (นอกเหนือจากจีนที่มีระดับของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในลำดับต้นของโลกอยู่แล้ว) อาทิ เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และอินเดีย โดยในปี พ.ศ. 2566 เกาหลีใต้มีรายได้จากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพิ่มขึ้นร้อยละ 39 ญี่ปุ่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 35 และอินเดียเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.8 [12] ซึ่งเป็นที่น่าจับตามองเกี่ยวกับขีดความสามารถในการแข่งขันด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศเหล่านี้ โดยเฉพาะในตลาดเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนรองลงมาและมีราคาไม่สูงมาก

E3 ความจำกัดของทรัพยากรและขีดความสามารถในการผลิต

ด้วยความต้องการทางด้านยุทธโประกรณ์และเทคโนโลยีทางการทหารที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะสภาพการณ์ที่มีสงครามและความขัดแย้งเกิดขึ้นในหลายพื้นที่ของโลก ประกอบกับหลายประเทศมีความพยายามในการยกระดับและปรับปรุงขีดความสามารถกำลังรบของประเทศ ส่งผลให้บริษัทในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศไม่สามารถผลิตอาวุธ

และยุทธโศภรณ์ได้ทันต่อความต้องการ อีกทั้งเกิด
สภาวะการขาดแคลนทรัพยากรในการผลิต ตัวอย่างเช่น
บริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของสหภาพ
ยุโรปประสบปัญหาการผลิตกระสุนปืนใหญ่ขนาด
155 มิลลิเมตร ไม่ทันกับความต้องการ เนื่องจาก
การขาดแคลนวัตถุดิบหลัก เช่น ผงดินระเบิดและโลหะ
สำหรับการผลิตกระสุน [13] ความล่าช้าในการผลิตและ
ความจำกัดของทรัพยากรนี้ส่งผลกระทบต่อความมั่นคง
ทางยุทธศาสตร์และห่วงโซ่อุปทานในระดับโลกและ
ภูมิภาค ดังนั้น การกระจายห่วงโซ่อุปทานและการลงทุน
ในความสามารถการผลิตในประเทศจึงเป็นสิ่งจำเป็น
สำหรับการรักษาความยืดหยุ่นทางเศรษฐกิจ

2.4 ด้านสังคม (Social)

S1 การเปลี่ยนแปลงทางประชากร

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรไทย
จะส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงในการขาดแคลนแรงงาน
ทักษะสูงในระดับที่รุนแรง โดยศูนย์วิจัยกสิกรไทย
คาดการณ์ว่า ไทยจะเป็นประเทศกำลังพัฒนาชาติแรก
ในภูมิภาคเอเชียที่เปลี่ยนผ่านการเป็นสังคมสูงวัย
ขั้นสมบูรณ์ (Aged society) สู่การเป็นสังคมสูงวัย
ขั้นสุดยอด (Super-aged society) ในประมาณ
ปี พ.ศ. 2572 ซึ่งทำให้สัดส่วนกำลังแรงงานของไทย
ลดลงอย่างต่อเนื่องจากร้อยละ 62 ในปี พ.ศ. 2566
เหลือเพียงประมาณร้อยละ 54 ในปี พ.ศ. 2583 อีกทั้ง
สัดส่วนแรงงานที่มีทักษะสูงยังคงมีไม่เพียงพอ โดยมี
เพียงประมาณร้อยละ 1.5 ของสัดส่วนแรงงานทั้งหมด
[14] นอกเหนือไปจากนั้น รายงานการจัดอันดับ
ขีดความสามารถในการแข่งขันด้านดิจิทัล ปี พ.ศ. 2567
ของ International Institute for Management
Development (IMD) ยังได้สะท้อนถึงจุดอ่อนด้าน
ทรัพยากรบุคคลของไทย ซึ่งมีระดับขีดความสามารถ
ด้านกำลังคน (Talent) อยู่ในลำดับที่ 39 จาก 67 ประเทศ/
เขตเศรษฐกิจ [15] สิ่งเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความท้าทาย
ของตลาดแรงงานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่ต้องการ
ทักษะแรงงานขั้นสูง โดยอาจนำไปสู่การนำเข้าแรงงาน
ต่างชาติที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต

S2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้
ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกเป็นภูมิภาคที่ได้รับผลกระทบ
จากภัยพิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากอุทกภัยและพายุ
มากที่สุดในโลกในปี พ.ศ. 2566 [16] ซึ่งภัยธรรมชาติ
ไม่ว่าจะเป็นภัยน้ำท่วม พายุไซโคลน หรือภัยแล้ง
มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นบ่อยครั้งและทวีความรุนแรง
ยิ่งขึ้น ภัยพิบัติเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความท้าทาย
ในการรักษาความมั่นคงและเสถียรภาพของประเทศ
ตัวอย่างเช่น กรณีน้ำท่วมภาคเหนือ รวมถึงภาคใต้
ของไทยในปี พ.ศ. 2567 ที่ผ่านมา ได้ทำให้เกิด
ความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน รวมถึง
การหยุดชะงักของโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ
ซึ่งกองทัพต้องเข้ามามีบทบาทในการช่วยเหลือ
และฟื้นฟู การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจึงเป็น
ทั้งอุปสรรคและโอกาสของอุตสาหกรรมป้องกัน
ประเทศ โดยภัยพิบัติทางธรรมชาติอาจส่งผลให้
ห่วงโซ่อุปทานหรือขีดความสามารถในการผลิตด้าน
อุตสาหกรรมป้องกันประเทศหยุดชะงัก แต่ก็อาจเป็น
โอกาสทางการตลาดของเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
ที่สามารถนำมาใช้ในการช่วยเหลือและบรรเทา
สาธารณภัยได้เช่นกัน โดยที่ความร่วมมือในการ
ช่วยเหลือและบรรเทาสาธารณภัยในระดับภูมิภาค
ทั้งในอาเซียน [17] และภูมิภาคอินโดแปซิฟิกมีแนวโน้ม
เพิ่มมากขึ้น [18]

2.5 ด้านข้อมูล (Information)

I1 ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์

ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ (Cyber
Security) ถือเป็นสิ่งสำคัญในยุคของสงครามสมัยใหม่
ที่มีเทคโนโลยีดิจิทัลเป็นศูนย์กลาง โดยภัยคุกคาม
ทางไซเบอร์จะมีความซับซ้อนและหลากหลายยิ่งขึ้น
ซึ่งเป็นการแปรผันตามการพัฒนาเทคโนโลยีดิจิทัล
ที่มีพลวัตการเปลี่ยนแปลงสูง ขีดความสามารถในการ
รักษาความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์จึงมีความสำคัญ
อย่างยิ่งยวด ทั้งในการเฝ้าระวัง ตรวจจับ รับมือ รวมถึง
การบริหารจัดการความเสี่ยงต่าง ๆ ทางไซเบอร์

มาตรการและมาตรฐานทางไซเบอร์จะถูกนำมาใช้ ในการควบคุมการวิจัยพัฒนา และการผลิต ในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศมากยิ่งขึ้น อาทิ มาตรฐาน Cybersecurity Maturity Model Certification (CMMC) ของสหรัฐอเมริกาที่ใช้ควบคุมให้ผู้ประกอบการ ด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศดำเนินการเพื่อยืนยัน ความปลอดภัยทางไซเบอร์ตลอดระยะเวลาของสัญญา การจัดซื้อจัดจ้างที่ผูกพัน [19] ดังนั้น อุตสาหกรรม ป้องกันประเทศจึงต้องติดตามและก้าวให้ทันการพลวัต ด้านความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์

2.6 ด้านโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure)

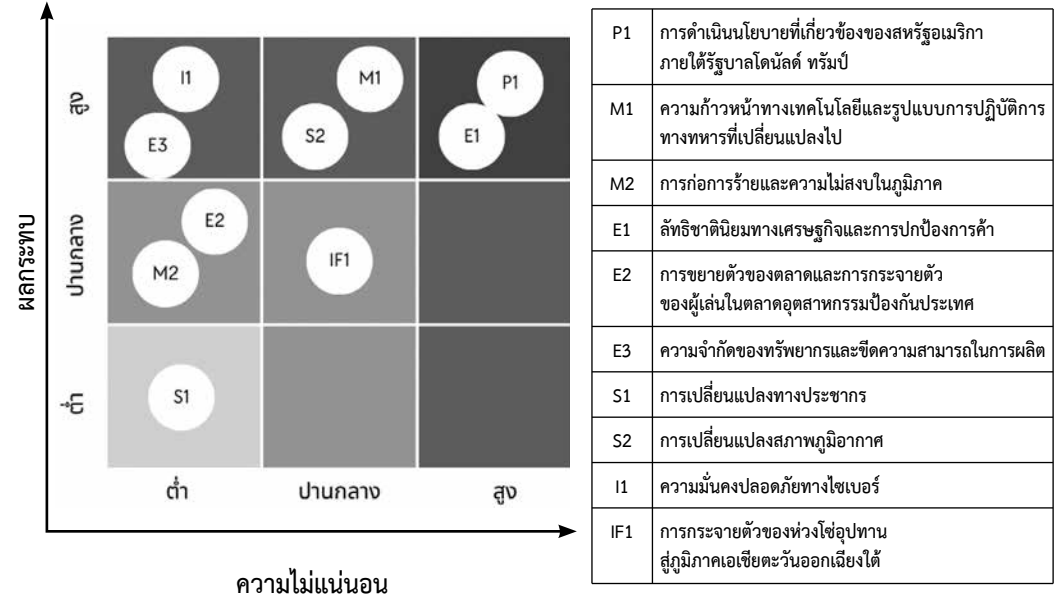
IF1 การกระจายตัวของห่วงโซ่อุปทาน
สู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

การกระจายตัวของห่วงโซ่อุปทานระดับโลก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากความได้เปรียบด้านเศรษฐกิจ แรงงาน และ ภูมิรัฐศาสตร์ ประเทศในอาเซียน เช่น เวียดนาม อินโดนีเซีย ไทย และมาเลเซีย ต่างได้รับประโยชน์ จากการเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้ภูมิภาคนีกลายเป็น

ศูนย์กลางการผลิตที่สำคัญในหลายอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในเวียดนาม อุตสาหกรรม ยานยนต์ในอินโดนีเซียและไทย อุตสาหกรรม เหมืองแร่และอิเล็กทรอนิกส์ในมาเลเซีย [20] รวมถึงอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยที่ประเทศไทย กำลังศึกษาและเตรียมความพร้อมในการจัดตั้ง นิคมอุตสาหกรรมดิจิทัล เพื่อเป็นพื้นที่รองรับอุตสาหกรรม ความมั่นคงของประเทศในอนาคต [21]

3. การประเมินความไม่แน่นอน
(Uncertainties)

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยขับเคลื่อน และแนวโน้มด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่สำคัญ ที่มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย แล้วนั้น บทวิเคราะห์ได้ประเมินความไม่แน่นอนจาก การสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรม ป้องกันประเทศและยุทธศาสตร์ความมั่นคง และแสดง ผลผ่านตารางผลกระทบ/ความไม่แน่นอน (Impact/ Uncertainty Grid) [22] ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตารางผลกระทบ/ความไม่แน่นอน

3.1 ความไม่แน่นอนที่สำคัญ (Critical Uncertainties)

การประเมินดังกล่าวทำให้สามารถระบุความไม่แน่นอนที่สำคัญ (Critical uncertainties) 2 ประการ ที่มีทั้งผลกระทบและความไม่แน่นอนสูงที่สุดได้แก่

3.1.1 การดำเนินนโยบายที่เกี่ยวข้องของสหรัฐอเมริกาภายใต้รัฐบาลโดนัลด์ ทรัมป์

ความไม่แน่นอนในการดำเนินนโยบายที่เกี่ยวข้องของสหรัฐอเมริกาภายใต้รัฐบาลโดนัลด์ ทรัมป์ สมัยที่สองก่อให้เกิดผลกระทบทั้งในเชิงบวกและเชิงลบต่อประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ในด้านบวก การส่งเสริมความร่วมมือแบบทวิภาคีกับประเทศในภูมิภาค เช่น ไทย เวียดนาม และฟิลิปปินส์ อาจช่วยเพิ่มการเข้าถึงเทคโนโลยีขั้นสูงและการสนับสนุนด้านการป้องกันประเทศ ตัวอย่างเช่น การเร่งส่งออกอาวุธและยุทธโธปกรณ์จากผู้ผลิตในสหรัฐอเมริกาเพื่อเสริมสร้างความสัมพันธ์เชิงกลยุทธ์ อย่างไรก็ตาม ลักษณะของความร่วมมือดังกล่าวขึ้นอยู่กับข้อเสนองานตอบแทนที่แต่ละประเทศสามารถให้สหรัฐอเมริกาได้ เช่น การสั่งซื้ออาวุธจากสหรัฐอเมริกา ซึ่งอาจสร้างความไม่สมดุลในด้านผลประโยชน์ระยะยาว

ในด้านลบ ความไม่แน่นอนของนโยบายอาจนำไปสู่การลดบทบาทของสหรัฐอเมริกาในองค์กรพหุภาคี เช่น อาเซียน และเวทีความร่วมมือด้านความมั่นคง เช่น ASEAN Regional Forum (ARF) และ East Asia Summit (EAS) ซึ่งอาจลดโอกาสในการสร้างเสถียรภาพในภูมิภาค ความไม่ต่อเนื่องในการดำเนินนโยบายยังอาจสร้างความตึงเครียดในภูมิรัฐศาสตร์ โดยเฉพาะในกรณีที่สหรัฐอเมริกาเพิ่มความกดดันต่อจีนในทะเลจีนใต้และกระตุ้นให้ประเทศในอาเซียนเลือกข้างในความขัดแย้งระหว่างสองมหาอำนาจนี้

สำหรับประเทศไทย ความไม่แน่นอนของนโยบายดังกล่าวก่อให้เกิดความท้าทายในการวางยุทธศาสตร์และพัฒนาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรม

ป้องกันประเทศ ไทยจำเป็นต้องพิจารณาวางแผนเพื่อรับมือกับพลวัตที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น การสร้างความยืดหยุ่นในด้านการพึ่งพิงเทคโนโลยีจากสหรัฐอเมริกา การเพิ่มความร่วมมือกับพันธมิตรทางเลือก เช่น เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น หรืออินเดีย รวมถึงการส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศเพื่อลดความเสี่ยงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงนโยบายระดับโลกในระยะยาว อีกทั้งต้องมีการวางแผนเพื่อรักษาสมดุลในความสัมพันธ์ระหว่างมหาอำนาจที่มีการแข่งขันในภูมิภาคอย่างเข้มข้น

3.1.2 ลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจและการปกป้องการค้า

การเพิ่มขึ้นของลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจและการปกป้องทางการค้า เช่น ภาษีศุลกากร การห้ามส่งออก และการห้ามใช้เทคโนโลยี ล้วนถูกขับเคลื่อนโดยการพิจารณาทางการเมืองมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่จุดมุ่งเน้นได้เปลี่ยนไปสู่ความเชี่ยวชาญในส่วนของเทคโนโลยียุทธศาสตร์ ซึ่งมักจะเป็นเทคโนโลยีสองทาง (Dual-use technology) ทำให้การค้ามีความซับซ้อนเนื่องจากความกังวลด้านความปลอดภัย ส่งผลให้รัฐบาลเข้ามาแทรกแซงมากขึ้นและมีนโยบายส่งเสริมการพึ่งพาตนเองมากขึ้น เช่น พระราชบัญญัติ CHIPS ของสหรัฐอเมริกา พระราชบัญญัติ Net Zero Industry ของยุโรป และโครงการ “Make in India” ของอินเดีย องค์การการค้าโลก (World Trade Organization: WTO) ได้แสดงความกังวลเกี่ยวกับแนวโน้มนี้ โดยเตือนว่าลัทธิคุ้มครองทางการค้าที่เพิ่มขึ้นอาจขัดขวางการฟื้นตัวของการค้าโลก [23] เช่นเดียวกับในอาเซียน ลัทธิชาตินิยมด้านทรัพยากรกำลังแพร่หลายมากขึ้น ตัวอย่างที่ชัดเจน ได้แก่ อินโดนีเซียขยายการห้ามส่งออกนิกเกิลที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป รวมถึงแร่บอกไซต์ และมาเลเซียประกาศห้ามส่งออกวัตถุดิบแร่ธาตุหายาก (Rare earth materials) [24]

การตัดสินใจทางการเมือง ซึ่งมักขับเคลื่อนด้วยเป้าหมายระยะสั้นหรือการเปลี่ยนแปลงผู้นำ สร้างความไม่แน่นอนสูงเกี่ยวกับลัทธิชาตินิยมทางเศรษฐกิจและ

นโยบายการปกป้องการค้า นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงจากโลกาภิวัตน์แบบสุดโต่งไปสู่นโยบายการปกป้องทางการค้ายังเกิดจากปัจจัยระดับโลกที่คาดเดาไม่ได้หลายประการ เช่น โรคระบาด การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความขัดแย้ง และภาวะเศรษฐกิจตกต่ำ องค์ประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางเศรษฐกิจระดับโลกได้อย่างรวดเร็วและคาดไม่ถึง ทำให้การคาดการณ์ในระยะยาวเป็นเรื่องท้าทาย ความไม่แน่นอนนี้สามารถขัดขวางการค้าและการลงทุนในภูมิภาค และทำให้การแสวงหาการบูรณาการทางเศรษฐกิจของอาเซียนมีความซับซ้อน มาตรการคุ้มครองทางการค้าสามารถขัดขวางการร่วมทุนและการจัดซื้อจัดจ้างด้านการป้องกันประเทศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความร่วมมือที่จำเป็นสำหรับเทคโนโลยีป้องกันประเทศขั้นสูง แม้ว่านโยบายการปกป้องการค้า

อาจส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศให้เกิดการยกระดับขีดความสามารถขึ้นภายในประเทศ แต่ก็อาจจำกัดการเข้าถึงเทคโนโลยีและส่วนประกอบที่ล้ำสมัยจากตลาดต่างประเทศเช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการพัฒนานวัตกรรมและการปรับปรุงเทคโนโลยีให้ทันสมัย ประเทศไทยจึงต้องหาจุดสมดุลระหว่างการมุ่งมั่นเพื่อการพึ่งตนเองทางเศรษฐกิจกับการเปิดรับความร่วมมือและการค้าระหว่างประเทศ ในการรักษาความสามารถของการพัฒนาและการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

3.2 ความไม่แน่นอนในลำดับรองลงมา

การประเมินได้มีการวิเคราะห์ผลกระทบและความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มในลำดับรองลงมา สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มในลำดับรองลงมา

ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้ม	ผลกระทบ	ความไม่แน่นอน	การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน
ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและรูปแบบการปฏิบัติทางทหารที่เปลี่ยนแปลงไป	สูง	ปานกลาง	การนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้และบูรณาการ อาทิ เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ระบบอัตโนมัติอย่างเช่น โดรน และเทคโนโลยีควอนตัม ได้ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการปฏิบัติการทางทหารสมัยใหม่แล้วอย่างมีนัยสำคัญ ความก้าวหน้าเหล่านี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีศักยภาพในการปฏิวัติสนามรบด้วยการนำเสนอหนทางต่อสู้ที่มีประสิทธิภาพและสร้างสรรค์ และเมื่อพิจารณาจากผลกระทบที่ชัดเจนจากแนวโน้มนี้ในปัจจุบัน จึงมีความสมเหตุสมผลที่จะสันนิษฐานได้ว่า ความเจริญก้าวหน้าเหล่านี้จะยังคงเป็นศูนย์กลางของกลยุทธ์การป้องกันประเทศและการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในอนาคต

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มในลำดับรองลงมา (ต่อ)

ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้ม	ผลกระทบ	ความไม่แน่นอน	การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน
การก่อการร้ายและความไม่สงบในภูมิภาค	ปานกลาง	ต่ำ	การก่อการร้ายและความไม่สงบเป็นปัญหาที่ยังคงดำเนินอยู่และได้รับการติดตามอย่างใกล้ชิด จึงทำให้มีความไม่แน่นอนในระดับต่ำ การเกิดขึ้นที่คาดเดาได้ของภัยคุกคามเหล่านี้ทำให้มั่นใจได้ว่าการลงทุนในเทคโนโลยีข่าวกรอง การเฝ้าระวัง และการลาดตระเวน (Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance: ISR) และความสามารถในการต่อต้านการก่อการร้ายจะยังคงมีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมการป้องกันประเทศ
การขยายตัวของตลาดและการกระจายตัวของผู้เล่นในตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ	ปานกลาง	ต่ำ	ตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศทั่วโลกจะยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยมีแรงขับเคลื่อนจากความต้องการยุทโธปกรณ์และเทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถูกกระตุ้นจากความตึงเครียดในภูมิภาคต่าง ๆ เช่น อินโดแปซิฟิก และตะวันออกกลาง การแข่งขันระหว่างประเทศมหาอำนาจ เช่น สหรัฐอเมริกา จีน และรัสเซีย จะกระตุ้นการลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนา และสร้างความหลากหลายของผู้เล่นในตลาด เช่น เกาหลีใต้ และอินเดีย ให้มีบทบาทมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผู้เล่นที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้จะยังคงอยู่ในกลุ่มประเทศที่มีขีดความสามารถในการรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูงจากชาติมหาอำนาจ รวมถึงประเทศที่มีฐานอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงอยู่แล้วในระดับหนึ่ง ดังนั้น ความไม่แน่นอนของการขยายตัวของตลาดและการกระจายตัวของผู้เล่นในตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในอนาคตจึงอยู่ในระดับต่ำ
ความจำกัดของทรัพยากรและขีดความสามารถในการผลิต	สูง	ต่ำ	ขีดความสามารถในการผลิตของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยด้านทรัพยากร เช่น วัตถุดิบ (แร่ธาตุหายาก) และแรงงานที่มีทักษะ ความต้องการที่สูงขึ้นอาจนำไปสู่การขาดแคลนและความล่าช้าในห่วงโซ่อุปทานดังที่ได้เริ่มมีตัวอย่างให้เห็นได้อย่างชัดเจนแล้วในปัจจุบัน ทำให้หลายประเทศต้องเร่งลงทุนในเทคโนโลยีการผลิตและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต การขาดแคลนทรัพยากรนี้จะมีผลกระทบที่รุนแรงมากขึ้นเรื่อย ๆ ในอนาคต ซึ่งเป็นแนวโน้มที่มีความเห็นพ้องในวงกว้างว่าจะดำรงอยู่ต่อไป จึงมีความไม่แน่นอนในระดับต่ำ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มในลำดับรองลงมา (ต่อ)

ปัจจัยขับเคลื่อน และแนวโน้ม	ผลกระทบ	ความไม่ แน่นอน	การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน
การเปลี่ยนแปลง ทางประชากร	ต่ำ	ต่ำ	การเปลี่ยนแปลงทางประชากรเข้าสู่สังคมสูงวัยจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อแรงงานทักษะสูงในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ อย่างไรก็ตาม ภาครัฐรับทราบมีการติดตาม และมีความพยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวในภาพรวม ประกอบกับการมีแนวโน้มในการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการผลิตที่มากขึ้น ทำให้ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศและความไม่แน่นอนในอนาคตจะยังคงอยู่ในระดับต่ำ
การเปลี่ยนแปลง สภาพภูมิอากาศ	สูง	ปานกลาง	ความถี่และความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นของภัยพิบัติทางธรรมชาติอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศก่อให้เกิดความท้าทายที่มีผลกระทบสูง และจำเป็นต้องมีการบูรณาการความร่วมมือ โดยเฉพาะจากภาคการทหารในการให้ความช่วยเหลือด้านมนุษยธรรมและบรรเทาสาธารณภัย ซึ่งการดำเนินการดังกล่าวต้องการการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกองทัพในการรับมือ ผลกระทบที่ชัดเจนและเพิ่มมากขึ้นของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศบ่งชี้ว่าแนวโน้มนี้จะคงอยู่ต่อไป และจะมีผลต่อการผลักดันให้เกิดนวัตกรรม รวมถึงการปรับตัวอย่างต่อเนื่องภายในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ อย่างไรก็ตาม การคาดการณ์การเกิดภัยพิบัติในพื้นที่ต่าง ๆ ยังมีความไม่แน่นอน และอาจส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่การผลิตและห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศได้ ดังนั้น ความไม่แน่นอนจึงอยู่ในระดับปานกลาง
ความมั่นคงปลอดภัย ทางไซเบอร์	สูง	ต่ำ	ความสำคัญของความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในยุคที่การปฏิบัติการทางทหารพึ่งพาระบบดิจิทัลมากขึ้น ความเกี่ยวโยงอย่างต่อเนื่องของความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ประกอบกับผลกระทบที่สูง ทำให้คาดการณ์ได้ค่อนข้างชัดเจน (ความไม่แน่นอนน้อย) ว่าจะยังคงได้รับการจัดลำดับความสำคัญในระดับสูงมากสำหรับภาคการทหารและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มในลำดับรองลงมา (ต่อ)

ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้ม	ผลกระทบ	ความไม่แน่นอน	การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน
การกระจายตัวของห่วงโซ่อุปทานสู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้	ปานกลาง	ปานกลาง	การกระจายตัวของห่วงโซ่อุปทานจากประเทศและชาติที่มีขีดความสามารถด้านเทคโนโลยีระดับสูงมายังภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต อย่างไรก็ตาม ขีดความสามารถในการรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีและการสร้างขีดความสามารถในการผลิตขึ้นภายในประเทศ ยังคงเป็นสิ่งสำคัญและความไม่แน่นอนจากปัจจัยหลายอย่าง อาทิ ความมั่นคงทางการเมือง หรือโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ท่าเรือ ระบบโลจิสติกส์ และระบบไฟฟ้า ที่อาจยังมีความจำกัดและไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ลงทุนได้

จากการประเมินความไม่แน่นอนในบริบทของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของความไม่แน่นอนที่สำคัญซึ่งมีผลกระทบสูงต่อการตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์และความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ อีกทั้งบ่งชี้ถึงความไม่แน่นอนในปัจจัยลำดับรองลงมา โดยข้อมูลความไม่แน่นอนแห่งอนาคตเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการสร้างฉากทัศน์อนาคตอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยต่อไปตามแนวทางการกำหนดกลยุทธ์บนความไม่แน่นอนของ B. Schwenker และ T. Wulf [22] แต่ด้วยกระบวนการในการจัดทำฉากทัศน์ดังกล่าวมีรายละเอียดที่มากและไม่สามารถนำเสนอข้อมูลทั้งหมดได้ภายในบทความนี้ ผู้เขียนจึงได้เสนอให้มีการใช้ประโยชน์จากการวิเคราะห์ในบทความนี้เพื่อจัดทำฉากทัศน์ดังกล่าวต่อไปในอนาคต

4. ข้อเสนอแนะเบื้องต้นในการกำหนด

ยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย

การพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยจำเป็นต้องคำนึงถึงพลวัตของความไม่แน่นอนและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของอนาคต บทความนี้จึงได้สังเคราะห์ข้อเสนอแนะเบื้องต้นสำหรับการกำหนด

ยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย เพื่อสร้างความยั่งยืนและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในระดับภูมิภาคและระดับโลก ดังนี้

4.1 การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและระบบนิเวศของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

การจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นแนวทางสำคัญที่จะช่วยสนับสนุนการลงทุนในประเทศและเพิ่มขีดความสามารถของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย นิคมดังกล่าวควรรองรับผู้ผลิตทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยมีโครงสร้างพื้นฐานที่เหมาะสม เช่น ระบบโลจิสติกส์และคลังวัตถุดิบที่สามารถลดความผันผวนจากห่วงโซ่อุปทานโลก นอกจากนี้ การพัฒนาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานในประเทศยังช่วยเสริมความมั่นคงทางเศรษฐกิจ และลดการพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศที่อาจได้รับผลกระทบจากความตึงเครียดทางภูมิรัฐศาสตร์หรือการปกป้องการค้าในอนาคต

4.2 การสร้างความร่วมมือระหว่างประเทศและการดึงดูดการลงทุนจากต่างประเทศ

การสร้างความร่วมมือกับพันธมิตร เช่น ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ และออสเตรเลีย เป็นกุญแจสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถด้านเทคโนโลยีและการวิจัยในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทย โดยรัฐบาลควร

ปรับปรุงกฎหมายเพื่ออำนวยความสะดวกแก่การลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศ (Foreign Direct Investment: FDI) เช่น การปรับสัดส่วนการถือหุ้นของนักลงทุน และการจัดมาตรการจูงใจทางภาษี การส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศไม่เพียงแต่ช่วยพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศ แต่ยังสร้างความมั่นใจแก่ผู้ลงทุนในบริบทของความไม่แน่นอนทางภูมิรัฐศาสตร์และการค้าโลก

4.3 การเสริมสร้างทรัพยากรมนุษย์และการพัฒนาเทคโนโลยี

การพัฒนาบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเป็นปัจจัยสำคัญต่อความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ การจัดตั้งศูนย์พัฒนาทักษะที่เน้นด้านเทคโนโลยี เช่น AI โดรน และระบบอัตโนมัติ จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของบุคลากรในประเทศไทย ควรสร้างความร่วมมือกับสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาหลักสูตรที่สอดคล้องกับความต้องการของตลาด การลงทุนในทรัพยากรมนุษย์เช่นนี้จะช่วยลดการพึ่งพาแรงงานต่างชาติและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในระดับโลก

4.4 การสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรมในประเทศ

การสนับสนุนผู้ประกอบการไทยในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เช่น สตาร์ทอัพและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ผ่านกองทุนสนับสนุนนวัตกรรม จะช่วยเพิ่มการสร้างสรรค์เทคโนโลยีใหม่และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การสร้างแพลตฟอร์มสำหรับการทดลองผลิตภัณฑ์ใหม่จะช่วยกระตุ้นการวิจัยในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ การสนับสนุนนี้ยังเพิ่มความสามารถของอุตสาหกรรมไทยในการตอบสนองต่อข้อจำกัดจากการปกป้องการค้าของประเทศคู่ค้าและสร้างนวัตกรรมที่เหมาะสมกับตลาดภูมิภาค

4.5 การจัดการความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์

ในยุคดิจิทัลที่ภัยคุกคามทางไซเบอร์มีความซับซ้อนมากขึ้น การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยทางไซเบอร์สำหรับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นสิ่งจำเป็น ไทยควรพัฒนาความร่วมมือด้านความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์กับพันธมิตร เช่น สหรัฐอเมริกาและยุโรป เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้และเทคโนโลยีที่จำเป็น การเสริมสร้างระบบป้องกันทางไซเบอร์ยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผู้ลงทุนในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในประเทศไทยและลดความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการโจมตีไซเบอร์ในอนาคต

4.6 การวางแผนยุทธศาสตร์ระยะยาว

การใช้เครื่องมือ Scenario Planning ในการวางแผนยุทธศาสตร์ช่วยให้ไทยสามารถเตรียมพร้อมรับมือกับความไม่แน่นอนในอนาคต โดยการเฝ้าระวังและวิเคราะห์แนวโน้มต่าง ๆ จะช่วยให้ยุทธศาสตร์ของไทยมีความยืดหยุ่นและตอบสนองต่อสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับการจัดทำฐานข้อมูลกลางสำหรับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศจะช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์และการกำหนดนโยบายในระยะยาว

5. บทสรุป

บทความนี้ได้วิเคราะห์ปัจจัยขับเคลื่อนและแนวโน้มที่สำคัญ รวมถึงความไม่แน่นอนที่อาจส่งผลกระทบต่อพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในช่วง 15 ปี ข้างหน้า (พ.ศ. 2568 - 2583) โดยใช้กรอบการวิเคราะห์ PMESII (Political, Military, Economic, Social, Information, Infrastructure) เพื่อระบุโอกาสและความท้าทายที่อาจเกิดขึ้นในบริบทของภูมิรัฐศาสตร์ เศรษฐกิจ และเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สะท้อนถึงความจำเป็นในการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ของไทยเพื่อตอบสนองต่อพลวัตเหล่านี้

บทความได้นำเสนอข้อเสนอแนะเบื้องต้น ในการกำหนดยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมป้องกัน ประเทศ โดยเน้นการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน การสร้าง ความร่วมมือระหว่างประเทศ การเสริมสร้าง ทรัพยากรมนุษย์ การสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรม ในประเทศ การจัดการความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ และการวางแผนยุทธศาสตร์ระยะยาว โดยข้อเสนอแนะ เหล่านี้ได้พิจารณาความเชื่อมโยงกับปัจจัยขับเคลื่อน และความไม่แน่นอนที่สำคัญ เพื่อให้ไทยสามารถรับมือ กับความท้าทายและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ในระดับภูมิภาคและระดับโลก โดยผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะที่นำเสนอในบทความนี้สามารถใช้ เป็นแนวทางในการพัฒนานโยบายและยุทธศาสตร์ เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงและยั่งยืนของอุตสาหกรรม ป้องกันประเทศของไทยในระยะยาว อีกทั้งยังเปิดโอกาส ให้มีการศึกษาและพัฒนาต่อยอด เช่น การจัดทำฉากทัศน์ ในเชิงลึกเพิ่มเติม เพื่อตอบสนองต่อความไม่แน่นอน ในอนาคตอย่างรอบด้านและมีประสิทธิภาพสูงสุด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. A. Angelelli, F. Maymir-Ducharme, and D. W. Stapleton. "Improving Decision Making by Reducing Uncertainty in Complex Systems of Systems." STO.nato.int. https://www.sto.nato.int/publications/STO_Meeting_Proceedings/STO_Meeting_Proceedings-MSG-143/MP-MSG-143-15.pdf (accessed Apr. 10, 2025).
- [2] A. Anwer. "Trump's Inaugural Speech Suggests He Will Adopt a 'Transactional' Foreign Policy, Experts Say." TVPWORLD.com. <https://tvpworld.com/84620570/trumps-inaugural-speech-suggests-he-will-adopt-a-transactional-foreign-policy-experts-say> (accessed Jan. 23, 2025).
- [3] W. Hartung. "Will A Trump Presidency Supercharge U.S. Arms Trading?." FORBES.com. <https://www.forbes.com/sites/williamhartung/2024/11/06/will-a-trump-presidency-supercharge-us-arms-trading> (accessed Jan. 23, 2025).
- [4] The White House, "America First Trade Policy." WHITEHOUSE.gov. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/01/america-first-trade-policy> (accessed Jan. 23, 2025).
- [5] K. Bunnag, "Generative Artificial Intelligence and Its Military Application," *Def. Technol. Acad. J.*, vol. 6, no. 13, pp. 28 - 41, 2024.
- [6] J. A. Nagl and K. Crombe, *A Call to Action: Lessons from Ukraine for the Future Force*. Carlisle, Pennsylvania, USA: USAWC Press, 2024.
- [7] A. Blair. "How is Quantum Technology Used in the Military?." ARMY-TECHNOLOGY.com. <https://www.army-technology.com/news/how-is-quantum-technology-used-in-the-military/?cf-view> (accessed Dec. 12, 2024).
- [8] S. Bamrungasuk, "Southern Border Crisis! 20 Years of Insurgency" Matichon Weekly, Jan. 19 - 25, 2024. (in Thai)
- [9] Division of International Security, Office of the National Security Council. "The International Security Situation After the COVID-19 Outbreak." NSC.go.th. <https://www.nsc.go.th/wp-content/uploads/Journal/article-00405.pdf> (accessed Dec. 16, 2024). (in Thai)
- [10] R. B. Santoso, W. Dermawan, and D. F. Moenardy, "Indonesia's Rational Choice in the Nickel Ore Export Ban Policy," *Cogent Soc. Sci.*, vol. 10, no. 1, 2024, doi: 10.1080/23311886.2024.2400222.

- [11] The Business Research Company. "Defense Global Market Report 2024." THEBUSINESSRESEARCHCOMPANY.com. <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/defense-global-market-report> (accessed Dec. 16, 2024).
- [12] SIPRI. "World's Top arms Producers See Revenues Rise on the Back of Wars and Regional Tensions." SIPRI.org. <https://www.sipri.org/media/press-release/2024/worlds-top-arms-producers-see-revenues-rise-back-wars-and-regional-tensions> (accessed Dec. 16, 2024).
- [13] A. Myroniuk and V. Yegoshyna. "EU Shell Production Capacity, Supplies to Ukraine Fall Far Short of Promises." RFERL.org. <https://www.rferl.org/a/ukraine-weapons-shells-european-union-eu-war-russia-investigation/33025300.html> (accessed Dec. 17, 2024).
- [14] I. Hema. "Thailand Has Entered the Ultimate Aging Society... Businesses That Rely Heavily on Labor Are at Risk of Labor Shortages." *Kasikornthai Econ. Anal.* vol. 30, no. 3453, Feb. 5, 2024. (in Thai)
- [15] IMD World Competitiveness Center, "IMD World Digital Competitiveness Ranking 2024," IMD, Lausanne, Switzerland, 2024.
- [16] World Meteorological Organization. "Climate Change and Extreme Weather Impacts Hit Asia Hard." WMO.int. <https://wmo.int/news/media-centre/climate-change-and-extreme-weather-impacts-hit-asia-hard> (accessed Jan. 3, 2024).
- [17] ASEAN Secretariat, ASEAN Disaster Resilience Outlook - Preparing for a Future Beyond 2025. ASEAN Secretariat, Jakarta, Indonesia: ASEAN Secretariat, 2021.
- [18] K. P. C. Landicho, "From Vision to Action: Envisioning Quad-ASEAN Partnership for Regional Resilience," RSIS, Singapore, Rep. 078/2023, 2024.
- [19] N. Lampton. "Six Cybersecurity Trends for Defense Contractors as 2024 Concludes." FORBES.com. <https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2024/10/14/six-cybersecurity-trends-for-defense-contractors-as-2024-concludes> (accessed Jan. 3, 2024).
- [20] Source of Asia. "Manufacturing Industry in Southeast Asia in 2024 - 2025." SOURCEOFASIA.com. <https://www.sourceofasia.com/manufacturing-industry-in-southeast-asia-2024-2025> (accessed Jan. 3, 2024).
- [21] Manager Online. "Kanchanaburi Holds Public Hearing in Preparation for DTI Industrial Estate Project." MGRONLINE.com. <https://mgronline.com/local/detail/9670000104442> (accessed Jan. 3, 2024). (in Thai)
- [22] B. Schwenker and T. Wulf, Scenario-based Strategic Planning: Developing Strategies in an Uncertain World, Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, pp. 96 - 100.

- [23] V. B. Sharma. "Global Trade in the Age of Protectionism and Rising Economic Nationalism." THEWIRE.in. https://thewire.in/world/global-trade-in-the-age-of-protectionism-and-rising-economic-nationalism/?mid_related_new (accessed Jan. 6, 2024).
- [24] X. Li. "ASEAN's Trade-Off between Economic Nationalism and Development." EASTASIAFORUM.org. <https://eastasiaforum.org/2024/02/24/aseans-trade-off-between-economic-nationalism-and-development> (accessed Jan. 6, 2024).

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับซีปนวิธีภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม.

สุรสิทธิ์ ปาลสาร^{1*}

วันที่รับ 15 กรกฎาคม 2567 วันที่แก้ไข 14 มีนาคม 2568 วันที่ตอบรับ 21 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ซีปนวิธีภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม. โดยหลักการแล้วคือ การคำนวณความดันภายในลำกล้องปืนและการเคลื่อนที่ของกระสุนปืน โดยอาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ของก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิงดินปืน และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบที่ละขั้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อคำนวณความดันรังเพลิง ความเร็วต้นของกระสุน และประสิทธิภาพของปืน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงว่าความดันก๊าซขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ หลายประการ ได้แก่ คุณสมบัติของดินปืน ปริมาณและขนาดของดินปืน รูปร่างดินปืน รวมถึงขนาดของลำกล้องปืนและกระสุน ผลการคำนวณความเร็วต้นแสดงให้เห็นว่า ถ้าเราใช้ปริมาณดินปืนมากกว่าและกระสุนที่เบากว่า กระสุนจะมีความเร็วต้นมากกว่า สำหรับการเปรียบเทียบความยาวปืน ปืนที่มีลำกล้องสั้นจะมีความเร็วต้นต่ำกว่าปืนลำกล้องยาวอยู่เล็กน้อย ประสิทธิภาพเชิงซีปนวิธีแปรผันตามค่าอัตราส่วนมวลกระสุนต่อมวลดินปืน ถ้าอัตราส่วนมวลกระสุนต่อมวลดินปืนมีค่ามากขึ้น ปืนก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการคำนวณทำให้เราสามารถประเมินความเร็วต้นของปืน ความดันรังเพลิง และประสิทธิภาพของปืน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบหรือปรับปรุงประสิทธิภาพของปืนให้ดีขึ้นได้ตามจุดประสงค์และความต้องการของผู้ออกแบบ

คำสำคัญ: ซีปนวิธีภายในอาวุธปืน, ดินปืน, ความดันรังเพลิง, ความเร็วปากกระบอกปืน

¹ ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: surasith.p@dti.or.th

The Numerical Analysis of the Interior Ballistic of a 5.56 mm Gun

Surasith Palasarn ^{1*}

Received 15 July 2024, Revised 14 March 2025, Accepted 21 April 2025

Abstract

The analysis of the interior ballistics of 5.56 mm firearms was based on the principle of calculating the pressure inside the barrel and the movement of the bullet. We used the thermodynamic principle of gas combustion of gunpowder, and the step-by-step numerical calculation method to calculate the breech pressure, the muzzle velocity of the bullet, and the efficiency of the gun. The results showed that the breech pressure depended on many variables, including the properties of gunpowder, the weight and shape of the gunpowder, the size of the barrel, and the weight of bullet. The muzzle velocity calculation results showed that if we used more gunpowder and a lighter bullet, the bullet would have a higher muzzle velocity. For the comparison of gun length, guns with short barrels would have a slightly lower muzzle velocity than long-barreled ones. Ballistic efficiency varied with the ratio of weight of bullet to gunpowder. If the ratio of bullet weight to gunpowder was higher, the gun would be more efficient. The calculation results allowed us to evaluate the muzzle velocity of the gun, the breech pressure, and the efficiency of the gun. Ultimately, they can be used to design or improve the efficiency of the gun to better match the purposes and needs of designer.

Keywords: Interior ballistic of gun, Gun propellant, Breech pressure, Muzzle velocity

¹ Propulsion Systems Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: surasith.p@dti.or.th

1. บทนำ

จากความต้องการของกระทรวงกลาโหม ในการพัฒนาอาวุธปืนเล็กยาว ขนาด 5.56x45 มม. โดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้ร่วมกับภาคเอกชน ทำการศึกษาและพัฒนาปืนเล็กยาวจู่โจม โดยอาศัยปืนตระกูล Colt AR-15 ของสหรัฐอเมริกา เป็นต้นแบบ เนื่องจากปืนตระกูลนี้ มีประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา และคล่องตัว เป็นที่นิยมในหน่วยผู้ใช้งาน

ส่วนหนึ่งของแผนการพัฒนาระบบอาวุธปืนเล็กยาว ขนาด 5.56x45 มม. ประกอบด้วย การวิเคราะห์หลักการทางอุณหพลศาสตร์การเผาไหม้ดินปืน ทำให้เกิดแรงดันภายในรังเพลิง ทำให้กระสุนปืนเคลื่อนไปข้างหน้า ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่มีการใช้งานปืนคาบศิลาในยุคแรก ๆ แต่หลักการการคำนวณทางคณิตศาสตร์ มีการศึกษากันหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันไป ในงานวิจัยของต่างประเทศ เช่น งานวิจัยของ Z. Xiao และคณะ [1] รายงานผลการประเมินชิปนวิธิภายใน โดยการอาศัยผลการทดสอบอัตราการเผาไหม้ภายใน ภาชนะปิด งานวิจัยของ M. S. Pir Tavana และคณะ [2] ได้แสดงการจำลองกระสุนขนาด 9 มม. ซึ่งโมเดลการคำนวณแบบการไหลปั่นป่วน Spalart-Allmars ซึ่งได้ผลเป็นความดันก๊าซ ความเร็วก๊าซ รวมถึงความเร็วเสียงของก๊าซที่กระสุนผ่าน การศึกษาเชิงลึกทางทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ เช่น การวิจัยทฤษฎีชิปนวิธิภายในอาวุธปืนของ J. Corner [3] และของ P. G. Baer และ J. M. Frankle [4] เป็นต้น แสดงข้อมูลผลการทดสอบหลักการที่สำคัญ

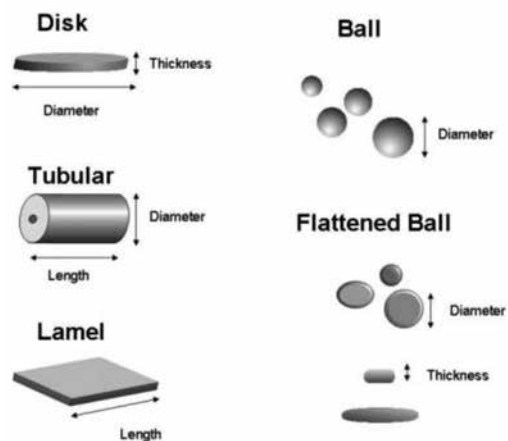
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจำลองการทำงานภายในลำกล้องปืน การคำนวณตามหลักทฤษฎี โดยอ้างอิงงานวิจัยของ J. Corner ที่แสดงถึงการคำนวณความดันของก๊าซในลำกล้องปืน และการคำนวณการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนแบบต่าง ๆ ได้แก่ Ball M193, Ball M855, Tracer M196, Tracer M856 ที่ใช้กับปืนขนาดลำกล้อง 5.56 มม. ที่ใช้กันภายในประเทศ โดยดินปืนเป็นแบบทรงกลม มีค่าน้ำหนักดินปืน

และน้ำหนักกระสุนแตกต่างกันระหว่างกระสุนแต่ละแบบ การคำนวณสามารถแสดงประสิทธิภาพของกระสุนแต่ละแบบที่เป็นประโยชน์กับผู้ใช้งาน

2. หลักการทางทฤษฎี

2.1 ดินปืน (Gun propellant)

ดินปืนในปัจจุบันมีส่วนผสมของไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose) เป็นส่วนประกอบหลัก รวมกับสารอื่น ๆ [5] ซึ่งผลิตจากการใช้ในเตาที่ผ่านการเคลือบในกรด เชื้อเพลิงจะถูกกดเป็นแท่งแล้วกดให้ผ่านแม่พิมพ์เพื่อให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ จากนั้นตัวทาละลายจะระเหยออกไป แห้งและแข็งตัว ดินปืนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ ดินปืนฐานเดี่ยว (Single base propellant) และดินปืนฐานคู่ (Double base propellant) ทั้งสองประเภทถูกผลิตออกมาในหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ทรงกลม แบบแผ่น แบบเม็ด หรือเป็นทรงกระบอก ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะดินปืนแบบต่าง ๆ [6]

เชื้อเพลิงแบบทรงกระบอกมีหลายขนาด ขึ้นอยู่กับขนาดของปืน เช่น ขนาดแท่งดินปืนของปืน .30 คาลิเบอร์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.032 นิ้ว และยาวเท่ากับ 0.085 นิ้ว เป็นต้น รูที่ดินปืนรูปทรง

กระบอกทำหน้าที่ควบคุมการเกิดแก๊ส เช่นเดียวกับเวลาเผาไหม้ ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ [7]

1) ขนาดและรูปร่างของดินปืน รวมถึงจำนวนของรูในแท่งดินปืน

2) ขนาดความหนาแท่งดิน (Web) หรือระยะของเชื้อเพลิงระหว่างพื้นที่เผาไหม้ ถ้าความหนามาก เวลาเผาไหม้ยิ่งมาก

3) ความเร็วของการเผาไหม้หรืออัตราเผาไหม้เชื้อเพลิง (Burn rate)

4) เปอร์เซ็นต์ของสารระเบิดได้ สารเฉื่อย และความชื้น การเปลี่ยนแปลงสารระเบิดเพียง 1% ในดินปืนที่มีสารระเบิดต่ำสามารถเปลี่ยนอัตราเผาไหม้มากกว่า 10%

2.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid propellant combustion)

เมื่อแท่งเชื้อเพลิงเริ่มต้นเผาไหม้ วัสดุแข็งจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ การวิเคราะห์ที่ซับซ้อนภายในของระบบปืนจำเป็นต้องทราบว่าแก๊สเกิดขึ้นเท่าใดและเชื้อเพลิงแข็งเหลืออยู่เท่าใด จำนวนของเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่หาได้จากค่า Web fraction f ซึ่งก็คือสัดส่วนของเว็บที่เหลืออยู่ตลอดเวลาหนึ่ง เรียกว่า จำนวนเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ (Propellant remaining)

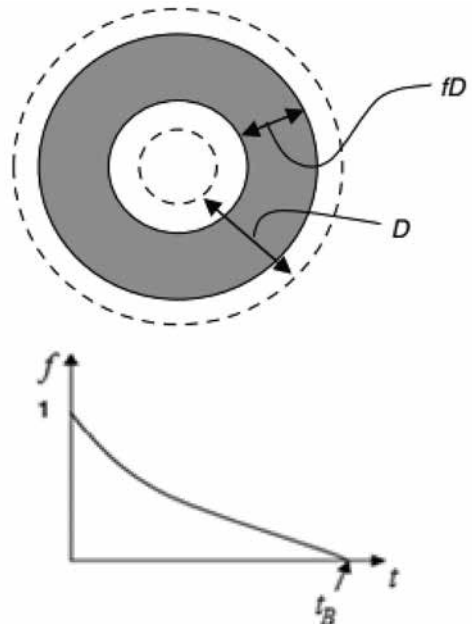
$$d(t) = fD \quad (1)$$

$d(t)$ คือ เชื้อเพลิงที่เหลือ

f คือ สัดส่วนการเผาไหม้ (Web fraction)

D คือ ความหนาเว็บ (Web thickness)

ตามรูปที่ 2 เราเห็นว่า D คือ รัศมีภายนอกลบด้วยรัศมีภายใน



รูปที่ 2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบทรงกระบอก [8]

ตัวแปรหนึ่งคือสัดส่วนของการเผาไหม้เชื้อเพลิง หรือ Propellant burn, ϕ สำหรับดินปืนแบบทรงกระบอก หาได้จากสมการ

$$\phi = 1 - \left(\frac{fD}{D} \right)^2 = 1 - f^2 = (1+f)(1-\theta f) \quad (2)$$

ในที่นี้

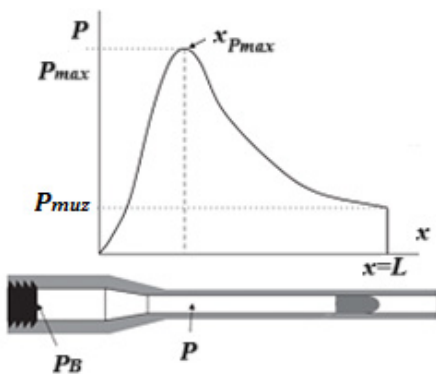
θ คือ ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ (Form factor)

เพื่ออธิบายอุณหภูมิของก๊าซ เราต้องการนิยามตัวแปรใหม่ที่ใช้บ่อยในขีปนาวุธภายใน นั่นคือ ค่ากำลังเชื้อเพลิง (Propellant force, λ) หมายถึงค่าพลังงานที่ปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิง กระบวนการเผาไหม้เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ค่าพลังงานเชื้อเพลิงแสดงโดย

$$\lambda = RT_o \quad (3)$$

R คือ ค่าคงที่จำเพาะของก๊าซ

T_o คือ อุณหภูมิก๊าซ (Flame temperature)



รูปที่ 3 ความดัน-ระยะทางในกระบอกปืน [8]

เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของกระสุน เราอธิบายโดยใช้สมการสถานะก๊าซ โดยให้ระยะทางจากท้ายกระสุนตามรูปที่ 3 แทนด้วย x ที่ว่างสำหรับก๊าซด้านหลังกระสุนที่เวลา t คือ

$$U + Ax - c \frac{1-\phi}{\delta} \quad (4)$$

สมการสถานะก๊าซ ได้แก่

$$P \left(U + Ax - c \frac{1-\phi}{\delta} - c\phi\eta \right) = \lambda c\phi \quad (5)$$

โดยที่

P คือ ความดันเฉลี่ยด้านหลังกระสุน

U คือ ปริมาตรของกระบอกปืน

A คือ พื้นที่หน้าตัดลำกล้องปืน

x คือ ระยะเคลื่อนที่ของกระสุน

c คือ มวลประจุดินปืน

δ คือ ความหนาแน่นของดินปืน

η คือ โคโวลุ่ม

สมการอัตราการเผาไหม้แสดงไว้ดังนี้

$$D \frac{df}{dt} = -\beta P^\alpha \quad (6)$$

โดยที่

$\frac{df}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนสัดส่วนการเผาไหม้

β คือ สัมประสิทธิ์อัตราการเผาไหม้

α คือ ค่ากำลังอัตราเผาไหม้

โดยการพิจารณาผลของการหมุนของกระสุนหนึ่งรอบเป็นจำนวน n คาบลิเบอร์ ค่ารัศมีการหมุน (Radius of gyration) ของกระสุนคือ k แรงขับเคลื่อนของกระสุนส่วนหนึ่งเสียไปกับการหมุนของกระสุนเสมือนทำให้มวลกระสุนเพิ่มขึ้นเป็น w_1 มีค่าเท่ากับ

$$w_1 = w \left(1 + \frac{2\pi k}{nd} \right)^2 \quad (7)$$

โดยที่

w_1 คือ มวลกระสุนเทียบเท่า
(Effective shot weight)

w คือ มวลกระสุน (Shot weight)

n คือ จำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Calibers)

k คือ ค่ารัศมีการหมุน (Radius of gyration)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกระสุน

สมการความเร็วลูกกระสุนแสดงดังสมการด้านล่าง ได้แก่

$$V = \frac{AD}{\beta(w_1 + \frac{1}{2}c)}(1-f) \quad (8)$$

โดยที่

V คือ ความเร็วลูกกระสุน

ตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ นั่นคือ ค่าชีพินวิถีกลาง (Central ballistic parameter) M เป็นฟังก์ชันของปืน เชื้อเพลิงและกระสุน นั่นคือ

$$M = \frac{A^2 D^2}{w_1 c \lambda \beta^2} \left[\frac{1 + \frac{c}{2w_1}}{\left(1 + \frac{c}{3w_1}\right)^2} \right] \quad (9)$$

โดยสมการลากรองจ์ สำหรับการออกแบบปืนที่ใช้ดินปืนแบบทรงกลม สมการสัดส่วนการเผาไหม้ $\phi(t)$

$$\phi(t) = 1 - f^3(t) \quad (10)$$

โดยนิยาม อัตราส่วนลากรองจ์ R_L

$$R_L = \frac{1 + \frac{c}{2w_1}}{1 + \frac{c}{3w_1}} \quad (11)$$

โดยอาศัยกลศาสตร์แบบลากรองจ์ สมการความดันรังเพลิง P_B สำหรับดินปืนทรงกลมกลายเป็น

$$P_B = \frac{\lambda c R_L}{V} (1-f^3) \left\{ \exp \left[\frac{2M}{\sqrt{3}} \left(\tan^{-1} \left(\frac{1+2f}{\sqrt{3}} \right) - \left(\frac{\pi}{3} \right) \right) \right] \right\} \quad (12)$$

สมการ (12) สามารถใช้ในการคำนวณความดันภายในกระบอกปืนขนาดต่าง ๆ

สมการภายหลังการเผาไหม้ (After burn equation) โดยการกำหนด

$$r = \frac{x+l}{x_c+l} \quad (13)$$

โดยที่

$$x_c + l = l(1+\theta)^{\frac{M}{\theta}} \quad (\theta \neq 0) \quad (14)$$

$$= l e^M \quad (\theta = 0) \quad (15)$$

โดยนิยาม

$$\Phi = \frac{2}{(1-\gamma)} [r^{1-\gamma} - 1] \quad (16)$$

โดยที่

γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ

x คือ ระยะเคลื่อนที่ของกระสุน

x_c คือ ระยะดินปืนหมด

l คือ ระยะความยาวรังเพลิง

โดยการกำหนดนี้ ที่จุด x มากกว่า x_c และความดันรังเพลิงสูงสุด P_c ค่าความดันรังเพลิงหลังการเผาไหม้ คือ

$$P_B = P_c r^{-\gamma} \quad (17)$$

สมการที่ (17) แสดงให้เห็นว่า หลังจากที่ดินปืนเผาไหม้จนหมด ความดันรังเพลิงจะลดลงในรูปแบบเอ็กซีโพเนนเชียล

ประสิทธิภาพเชิงชีพินวิถี (Ballistic efficiency) โดยนิยามแล้ว หมายถึง อัตราส่วนของพลังงานการเคลื่อนที่ของกระสุนต่อพลังงานของดินปืน นั่นคือ

$$Ballistic\ Efficiency = \frac{(\gamma - 1)wV_m^2}{2\lambda c} \tag{18}$$

โดยที่

w คือ มวลกระสุน

V_m คือ ความเร็วปากลำกล้องปืน

3. การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีตามสมการ (1) ถึง (18) การคำนวณค่าต่าง ๆ โดยใช้การสร้างคำนวณต่อเนื่อง สำหรับในงานวิจัยนี้ สมมติฐาน คือ ดินปืนเป็นทรงกลม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติดินปืน (Propellant properties)

Parameters	Value	Reference
Propellant force	992,362 J/kg	อ้างอิง [8]
ความหนาแน่น	1.55 g/cm ³	อ้างอิง [8]
ความหนาเวป	2.4 mm	การวัดค่า
อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ	1.26	อ้างอิง [8]
Burn rate coefficient	22.867 mm/s/Mpa ^α	อ้างอิง [8]
Burn rate exponent	0.9145	อ้างอิง [8]
Form factor	1.4	อ้างอิง [8]



รูปที่ 4 ดินปืนแบบทรงกลม (Ball powder propellant)



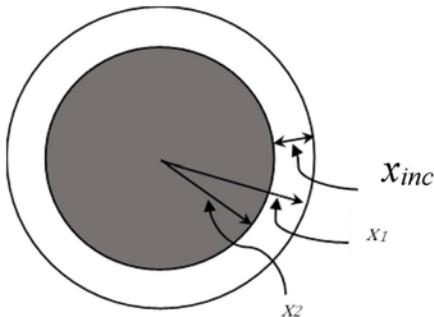
รูปที่ 5 กระสุนปืนขนาด 5.56 × 45 มม. แบบต่าง ๆ [10]

สมบูรณ์ ข้อสมมติฐานนี้สามารถใช้ได้ดี แม้ว่าดินปืนจริง อาจไม่ได้เป็นทรงกลมสมบูรณ์แบบตามรูปที่ 4 ขนาด ที่ใช้ในการคำนวณถือเป็นค่าเฉลี่ยของเม็ดดินปืนทั้งหมด ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินปืน แสดงไว้ตามตารางที่ 1

รูปแบบปืนเล็กยาว MZ-4P ใช้กระสุนแบบ 5.56 × 45 มม. แบบต่าง ๆ ตามที่แสดงดังรูปที่ 5 กระสุน ปืนในที่นี้ทำการคำนวณกระสุน Ball M193, Ball M855, Tracer M196 และ Tracer M856 แต่ละแบบใช้ปริมาณ ดินปืนแตกต่างกันไปโดยอ้างอิงปริมาณดินปืนจาก Army ammunition data sheet, TM 43-0001-27 [9] คุณลักษณะของปืน MZ-4P แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติปืน (Gun characteristic)

Parameters	Value	Reference
Chamber diameter	5.69 mm	อ้างอิง [11]
Chamber length	112 mm	อ้างอิง [11]
Projectile weight	54-63.7 gr	อ้างอิง [9]
Gun tube length 11.5"	292 mm	อ้างอิง [11]
Gun tube length 14.5"	368 mm	อ้างอิง [11]
Caliber per twist	32	อ้างอิง [11]
Radius of gyration	1.90 mm	อ้างอิง [4]

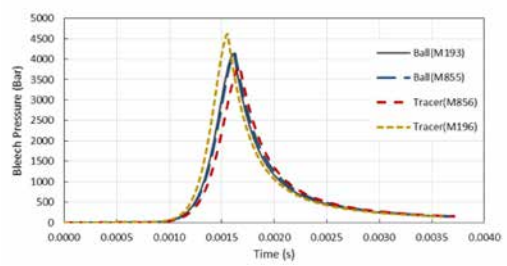


รูปที่ 6 การเผาไหม้ดินปืนแบบทรงกลม

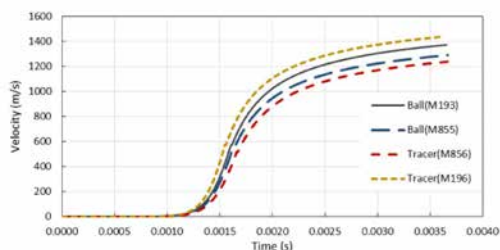
ในการวิจัยนี้เราพิจารณาให้ดินปืนเป็นแบบทรงกลม การคำนวณเริ่มด้วยการกำหนด ค่า x_{inc} ตามรูปที่ 6 ในที่นี้ให้ x_{inc} เท่ากับ 0.0024 mm จากขั้นที่ 1 ไปขั้นที่ 2 ดินปืนเผาไหม้ไปเป็นระยะทาง x_{inc} ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเท่ากับปริมาตรทรงกลมที่หายไปคูณด้วยจำนวนของเม็ดดิน ดังนั้น เราสามารถหาสมการสัดส่วนการเผาไหม้ $\phi(t)$ ได้ และหาสัดส่วนการเผาไหม้ f จากสมการที่ (10) ค่าตัวแปรต่าง ๆ จากตารางที่ 1 และ 2 สามารถคำนวณค่าความเร็วของกระสุนจากสมการที่ (8) และค่าต่าง ๆ ตามสมการ (7), (9) และ (11) ความดันรังเพลิงจาก สมการที่ (12) คำนวณเวลา t_2 จาก $t_2 = x_{inc}/r_b + t_1$ คำนวณซ้ำจนถึงขั้นสุดท้ายที่ $x = 0$ จากนั้นสมการเปลี่ยนไปเป็นสมการหลังการเผาไหม้ (13) ถึง (17) จะได้ผลลัพธ์ของการดำเนินงานเป็นกราฟความดันรังเพลิง ณ เวลาใด ๆ และความเร็วลูกกระสุน ณ เวลาใด ๆ

4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Result of Analysis)

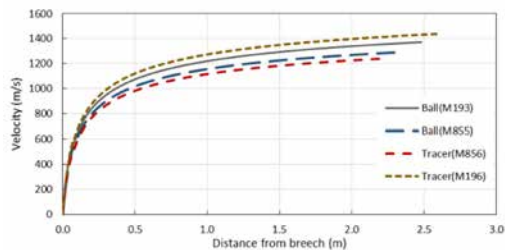
ผลการคำนวณความดันรังเพลิงตามเวลาที่ผ่านไปตั้งแต่เริ่มต้นการจุดชนวน ตามสมการที่ (12) และ (17) แสดงดังรูปที่ 7 ผลการคำนวณความเร็วกระสุนตามสมการที่ (8) และผลการประเมินความเร็วปากกระบอกปืน (Muzzle velocity) ของปืนขนาดลำกล้อง 11.5 นิ้ว และ 14.5 นิ้ว ความดันสูงสุด แสดงไว้ตามรูปที่ 8 - 9 และตารางที่ 3



รูปที่ 7 ผลการคำนวณความดันรังเพลิงตามเวลาของกระสุนแบบต่าง ๆ



รูปที่ 8 ผลการคำนวณความเร็วกระสุน
ตามเวลาของกระสุนแบบต่าง ๆ



รูปที่ 9 ผลการคำนวณความเร็วกระสุน
ตามระยะทางจากรีฟเพลิงของกระสุนแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณกระสุนแต่ละแบบ

Parameters	5.56x45 Cartridge			
	Ball (M193)	Ball (M855)	Tracer (M856)	Tracer (M196)
Projectile Weight, gr	56	62	63.7	54
Charge Weight, gr	26.5	26.1	24.7	28.5
Muz Velocity, 11.5" m/s(ft/s)	941(3,132)	890(2,963)	864(2,878)	983(3,274)
Muz Velocity, 14.5" m/s(ft/s)	1,001(3,334)	945(3,146)	915(3,048)	1,041(3,466)
Max Breech Pressure, Bar	4,128	4,158	3,833	4,615
Burn Time, sec	0.0016	0.0016	0.0017	0.0016
Ballistic Efficiency	0.243	0.245	0.250	0.240

5. บทวิเคราะห์ผลการคำนวณ

การวิเคราะห์ผลการคำนวณ ตามรูปที่ 7 - 9 การคำนวณค่าต่าง ๆ ให้ผลแตกต่างกันเล็กน้อย นั่นคือการเปรียบเทียบผลระหว่างกระสุน M193 กับ M855 จะเห็นว่า ความเร็วกระสุนของ M193 เท่ากับ 941 m/s มากกว่า M855 เล็กน้อย ทั้งนี้ M193 ใช้ดินขับมากกว่า และน้ำหนักกระสุนต่ำกว่า M855 เช่นเดียวกันกับผลเปรียบเทียบระหว่างกระสุน Tracer M196 และ M856 ความเร็วต้นของกระสุน M196 เท่ากับ 983 m/s มากกว่า M856 ที่ 864 m/s ทั้งนี้ M196 ใช้ดินขับมากกว่า และกระสุนเบากว่า M856

ความดันรังเพลิงของกระสุน M193 และ M855 ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ M196 ความดันรังเพลิงสูงสุด 4,615 Bar มากกว่า M856 ทั้งนี้ กระสุน M196

ใช้ดินขับมากกว่า M856 อยู่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 3 เปรียบเทียบความเร็วต้นของปืน ความยาวกระบอกปืน 11.5 นิ้ว และ 14.5 นิ้ว พบว่าความยาวที่น้อยกว่าทำให้ปืนมีความเร็วต่ำกว่า ลักษณะเช่นเดียวกันในกระสุนทุกแบบ โดยเฉลี่ยแล้ว ความเร็วต่ำกว่าประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 3 ค่าประสิทธิภาพเชิงซีปนวิีกระสุนทั้งสี่ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าถ้าค่าอัตราส่วน w/c มีค่ามาก ค่าประสิทธิภาพจะมากตามไปด้วย จากข้อมูลพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดคือ กระสุน M856 ค่า w/c เท่ากับ 2.58 ค่าประสิทธิภาพเชิงซีปนวิีเท่ากับ 0.250

6. บทสรุป

การคำนวณความดันรังเพลิงและความเร็วต้นของกระสุนอาศัยหลักการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ความดันก๊าซขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ หลายประการ เช่น คุณสมบัติของดินปืน ปริมาณและขนาดของดินปืน รูปร่างดินปืน รวมถึงขนาดของลำกล้องปืนและกระสุน เป็นต้น ผลการคำนวณความเร็วต้นแสดงว่า ถ้าเราใช้ปริมาณดินปืนมากกว่าและกระสุนที่เบากว่า กระสุนจะมีความเร็วต้นมากกว่า สำหรับการเปรียบเทียบความยาวปืน ปืนที่มีลำกล้องสั้นจะมีความเร็วต้นต่ำกว่าปืนลำกล้องยาวอยู่เล็กน้อย ค่าประสิทธิภาพเชิงซีปนวิธีแปรผันตามค่าอัตราส่วนมวลกระสุนต่อมวลดินปืน ถ้าอัตราส่วนมวลกระสุนต่อมวลดินปืนมีค่ามาก ปืนก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้เป็นการคำนวณดินปืนแบบทรงกลม ไม่ได้ครอบคลุมถึงดินปืนรูปแบบอื่น ๆ แนวทางการวิจัยต่อไปอาจจะพิจารณาถึงดินปืนแบบอื่น ๆ เช่น ทรงกระบอก (Tubular) หรือแบบทรงกระบอกหลายรู (Multi perforated grain) เป็นต้น

ผลการคำนวณทำให้เราสามารถประเมินความเร็วต้นของกระสุนปืน ความดันรังเพลิง และประสิทธิภาพของปืนได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบหรือปรับปรุงประสิทธิภาพของปืนให้ดีขึ้นได้ตามจุดประสงค์และความต้องการของผู้ออกแบบ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Xiao, S. Ying, W. He, and F. Xu, "Interior Ballistic Prediction of Gun Propellants Based on Experimental Pressure-Apparent Burning Rate Model in Closed Vessel," *Sci. Technol. Energ. Mater.*, vol. 76, no. 1, pp. 1 - 7, 2015.
- [2] M. S. Pir Tavana, S. A. Alavi, S. Rahmati, and H. Fazeli, "Interior Ballistics Simulation for 9 mm Gun for Bullet and Blank Shot Applying Spalart-Allmars Turbulence Model," *RJAV*, vol. 19, no. 2, pp. 75 - 85, 2022.
- [3] J. Corner, *Theory of the Interior Ballistics of Guns*. NY, USA: Wiley, 1950.
- [4] P. G. Baer and J. M. Frankle, "The Simulation of Interior Ballistics Performance of Guns by Digital Computer Program," Interior Ballistic Laboratory, Arberdeen Proving Ground, MD, USA, Rep. 1183, 1962.
- [5] *Engineering Design Handbook: Interior Ballistic of Guns*, US Army Materiel Command, Huntsville, AL, USA, 1965.
- [6] National Center for Forensic Science. "Smokeless Powders Database." NCFs.ucf.edu. https://ncfs.ucf.edu/powders/popups/help.php?help_id=16
- [7] *Engineering Design Handbook: Recoilless Rifle Weapon Systems*, US Army Materiel Command, Alexandria, VA, USA, 1976.
- [8] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [9] *Army Ammunition Data Sheets: Small Caliber Ammunition (FSC 1305)*, Dept. of the Army, Washington, D.C., USA, TM-43-001-27, 1996.
- [10] *Infantry Unit Weapons Manual*, Infantry Battalion Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, Thailand. (in Thai)
- [11] EMTAN. "M2-4P 11.5": Caliber 5.56 MM NATO Automatic Rifle with PISTON Operation System." EMTAN. co.il. <https://emtan.co.il/products/MZ-4p-11-5/>

การประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนด้วยเทคนิคอากาศยานไร้คนขับ

ทินกร อังคะฮาด¹ วุฒิสาสตร์ โชคเกื้อ¹ สาธิต แสงประดิษฐ์^{2,5}
ญาณวุฒิ อุทรักษ์^{3,5} กิตติการ วิริยะศาสตร์⁴ และ อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ^{1,5*}

วันที่รับ 22 กุมภาพันธ์ 2568 วันที่แก้ไข 17 มีนาคม 2568 วันตอบรับ 21 มีนาคม 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ในพื้นที่ป่าชุมชน ตั้งอยู่ที่ตำบลท่าสองคอน อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับร่วมกับการสำรวจภาคสนาม การดำเนินการแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ การเก็บข้อมูลภาคสนาม และการสร้างแบบจำลองเรือนยอดต้นไม้ พื้นที่ศึกษาคอบคลุม 66 ไร่ หรือ 10.66 เฮกตาร์ และใช้ Agisoft PhotoScan ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ จากการสำรวจภาคสนามในแปลงตัวอย่างขนาด 40x40 เมตร² จำนวน 10 แปลง ผลการดำเนินการพบว่า มีพรรณไม้ทั้งสิ้น 22 วงศ์ 39 ชนิด รวมทั้งหมด 1,241 ต้น การประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนจากโมเดลการเรียนรู้ด้วยเครื่องจากอากาศยานไร้คนขับพบว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ 213.53 tCO₂e, 2.022026 kg CO₂e/m² และ 0.002022 tCO₂e/ha ในขณะที่ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเรือนยอดต้นไม้ เฉลี่ยอยู่ที่ 212.51 tCO₂e, 2.012442 kg CO₂e/m² และ 0.00201 tCO₂e/ha การประเมินความแม่นยำของแบบจำลองพบว่า มีค่า Precision = 0.902, Recall = 0.638, Accuracy = 0.597, F1-Score = 0.747 และ Percent = 74.737% ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองนี้มีความสามารถในการวิเคราะห์การตรวจจับต้นไม้และความแม่นยำในการจำแนกรูปทรงพุ่มที่ถูกต้อง สอดคล้องกับการวิเคราะห์มวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนครั้งนี้

คำสำคัญ: มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน, การกักเก็บคาร์บอน, แบบจำลองเรือนยอดต้นไม้, อากาศยานไร้คนขับ

¹ ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ภาควิชาภูมิสารสนเทศ, คณะวิทยาการสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

⁴ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

⁵ ศูนย์วิจัยและปฏิบัติการก๊าซกระจก, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้แต่ง, อีเมล: teerawong@msu.ac.th

The Assessment of above Ground Biomass and Carbon Sequestration in Community Forests using UAV Technology

Thinnakon Angkahad¹ Wutthisat Chokkuea¹ Satith Sangpradid^{2,5}
Yannawut Uttarak^{3,5} Kittakorn Viriyasatr⁴ and Teerawong Laosuwan^{1,5}

Received 22 February 2025, Revised 17 March 2025, Accepted 21 March 2025

Abstract

The objective of this research is to evaluate the biomass and carbon sequestration of trees in a community forest area located in Tha Song Khon Subdistrict, Mueang Maha Sarakham District, Maha Sarakham Province, using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology combined with field surveys. The operation was divided into three main parts: UAV surveys, field data collection, and the creation of a Canopy Model. The study area covered 66 rai or 10.66 hectares. Agisoft PhotoScan was used for processing aerial photographs. From field surveys in sample plots of 40x40 meters², totaling 10 plots, the results showed a total of 22 families and 39 species of trees, amounting to 1,241 trees. The most common species found included 457 trees of *Dipterocarpus alatus*, 224 trees of *Shorea obtusa*, and 56 trees of *Lagerstroemia tomentosa*. The evaluation of carbon sequestration using machine learning models from UAVs showed an average of approximately 213.53 tCO₂e, 2.022026 kg CO₂e/m², and 0.002022 tCO₂e/ha. In contrast, the averaged results from the Canopy Model analysis were 212.51 tCO₂e, 2.012442 kg CO₂e/m², and 0.000201 tCO₂e/ha. The accuracy assessment of the model was found at a Precision of 0.902, Recall of 0.638, Accuracy of 0.597, F1-Score of 0.747, and Percent of 74.737%, indicating that the model has the capability to analyze trees and to accurately classify canopy shapes.

Keywords: Above ground biomass, Carbon sequestration, Canopy model, UAV

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

² Department of Geoinformatics, Faculty of Informatics, Mahasarakham University

³ Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University

⁴ Defence Technology Institute

⁵ Greenhouse Gas Research and Operations Center, Mahasarakham University

* Corresponding author: teerawong@msu.ac.th

1. บทนำ

ภาวะโลกร้อน หมายถึง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งอากาศ โกลีฟโลกและน้ำในมหาสมุทร ปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุหลักมาจากก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำอุตสาหกรรม การเกษตร และการตัดไม้ทำลายป่า โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซที่มีการปล่อยออกมามากที่สุด ข้อมูลจากรายงานของ Revised 1996 IPCC แสดงให้เห็นว่าแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถแบ่งออกเป็น 6 แหล่งหลัก ได้แก่ (1) ภาคพลังงาน (2) ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม (3) สารละลายและการใช้ผลิตภัณฑ์ (4) ภาคเกษตรกรรม (5) การใช้ที่ดินจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและป่าไม้ และ (6) ภาคการจัดการของเสีย ทั้งหมดนี้มีความสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ [1] - [4] โดยจากการประเมินของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ในปี พ.ศ. 2557 พบว่าในสามทศวรรษที่ผ่านมา พื้นผิวโลกอุ่นขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงปี ค.ศ. 1983 ถึง 2012 เป็นช่วง 30 ปี ที่อุ่นที่สุดในช่วง 1,400 ปีที่ผ่านมาในซีกโลกเหนือ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากที่สุดถึงประมาณ 67% ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการใช้พลังงานฟอสซิล อีกทั้งการตัดไม้ทำลายป่ายังทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 20% จากการสูญเสียคาร์บอนที่เก็บในรูปของเนื้อไม้ [5] - [6]

ต้นไม้มีบทบาทสำคัญในการกักเก็บและดูดซับคาร์บอนจากบรรยากาศโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งคาร์บอนที่ถูกดูดซับจะเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพของต้นไม้ การลดจำนวนป่าไม้มีผลกระทบโดยทำให้แหล่งกักเก็บคาร์บอนลดลงและคาร์บอนถูกปลดปล่อยกลับสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ การปลดปล่อยคาร์บอนจากการลดจำนวนป่าไม้ยังส่งผลสำคัญต่อการเพิ่มปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณคาร์บอนที่ถูกกักเก็บในป่าไม้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศโลก [7] - [10]

โดยทั่วไป ปริมาณคาร์บอนที่สะสมในต้นไม้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่ามวลชีวภาพ ซึ่งหมายถึงมวลรวมของทุกส่วนประกอบของต้นไม้ อันได้แก่ ลำต้น กิ่ง ใบ และราก ดังนั้น ข้อมูลทางกายวิภาคของต้นไม้ เช่น ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และความกว้างของทรงพุ่ม เป็นต้น สามารถใช้ในการประเมินปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในต้นไม้ได้โดยใช้สมการแอลโลเมตริก สมการนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพกับลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาการสะสมคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้ [11] - [15] สำหรับการศึกษาลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ ข้อมูลสามารถเก็บได้จากการสำรวจภาคสนาม ซึ่งแม้ว่าจะให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำสูงเกี่ยวกับโครงสร้างและรูปร่างของต้นไม้ แต่กระบวนการนี้ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน และต้องใช้เวลาและเงินทุนค่อนข้างมาก [16] - [18]

ปัจจุบัน เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing Technology) ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในด้านของภาพถ่ายจากดาวเทียม (Satellite Imagery) และภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial Imagery) ที่มีความละเอียดสูง เทคโนโลยีเหล่านี้สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาโครงสร้างและความหนาแน่นของพืชพรรณธรรมชาติในพื้นที่ป่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บอยู่ในพื้นที่ป่าได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้นอีกด้วย [19] - [21] อนึ่ง การใช้ข้อมูลช่วงคลื่นสีแดงเขียวน้ำเงิน (Red Green Blue หรือ RGB) จาก UAV ในการศึกษาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในป่าชุมชนเป็นวิธีการที่น่าสนใจ โดยคณะผู้วิจัยตั้งเป้าหมายในการนำข้อมูลจาก UAV มาใช้เพื่อประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ที่มีชีวภาคและโครงสร้างของพืชพรรณที่ไม่ซับซ้อนมากนัก

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาที่มีศักยภาพสูงในการกักเก็บคาร์บอนและศึกษาผลกระทบของภาวะโลกร้อน เนื่องจากอาจมีป่าไม้หรือพืชพรรณที่สามารถ

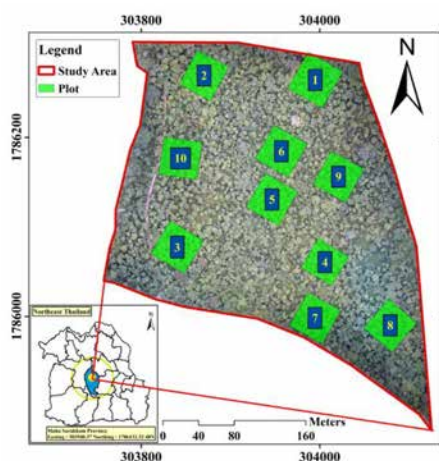
ดูดซับคาร์บอนได้ดี พื้นที่นี้อาจเป็นป่าชุมชน ซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ถูกตัดไม้ทำลายป่าหรือมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การศึกษาในพื้นที่นี้ช่วยให้เข้าใจว่ากิจกรรมของมนุษย์ส่งผลต่อการปล่อยและกักเก็บคาร์บอนอย่างไร นอกจากนี้ พื้นที่ยังเอื้อต่อการใช้เทคโนโลยี เช่น UAV และการสำรวจระยะไกล ทำให้สามารถวัดปริมาณคาร์บอนได้อย่างแม่นยำ และใช้สมการทางวิทยาศาสตร์คำนวณมวลชีวภาพของต้นไม้ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งอาจอยู่ภายใต้โครงการอนุรักษ์หรือมีการบริหารโดยชุมชนที่ต้องการข้อมูลวิทยาศาสตร์มาสนับสนุนนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ งานวิจัยก่อนหน้านี้ยังช่วยเป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนในพื้นที่นี้

นอกจากนี้ การศึกษานี้จะสร้างข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่มีความซับซ้อนของพืชพรรณที่สูงขึ้น และอาจช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการกักเก็บคาร์บอนในระบบนิเวศต่าง ๆ เช่น ป่าดิบชื้นและป่าผสมผลัดใบ เป็นต้น

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา ได้แก่ ป่าชุมชน ตั้งอยู่ในเขตป่าตาม พ.ร.บ.ป่าไม้ พ.ศ. 2484 ในตำบลท่าสองคอน อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม (รูปที่ 1)

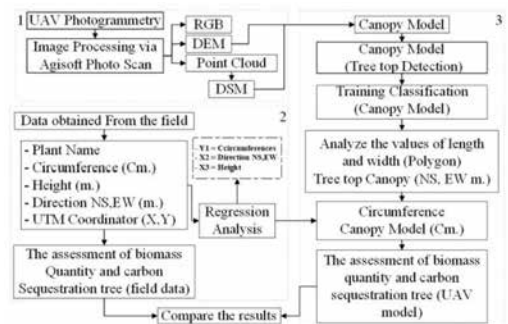


รูปที่ 1 ป่าชุมชนบ้านหินลาด และบ้านหินลาดพัฒนา

โดยป่าชุมชนแห่งนี้เป็นพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ด้วยทรัพยากรป่าไม้ เช่น ไม้แดง ไม้เต็ง ไม้รัง และพืชพันธุ์ป่าอื่น ๆ ซึ่งมีมูลค่าทางเศรษฐกิจและเป็นแหล่งอาหารของชุมชน พื้นที่ป่าแบ่งออกเป็น 2 ชุมชนหลัก ได้แก่ บ้านหินลาด 32 ไร่ และบ้านหินลาดพัฒนา 34 ไร่ รวมประมาณ 66 ไร่ หรือ 10.66 เฮกตาร์ ชุมชนใช้ประโยชน์จากป่าในการเก็บเห็ด พืชผัก สมุนไพร รวมถึงไม้ฟืน ภูมิประเทศเป็นที่ราบสูง อากาศไม่ร้อนอบอ้าวในฤดูร้อน และค่อนข้างเย็นในฤดูหนาว อุณหภูมิเฉลี่ย 27.4°C โดยรวมพื้นที่ป่าแห่งนี้มีความสำคัญทั้งทางชีวภาพและเศรษฐกิจต่อชุมชนท้องถิ่น

2.2 วิธีการดำเนินการ

สำหรับวิธีการดำเนินการแสดงได้ดังรูปที่ 2 และสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนในการดำเนินการ

จากรูปที่ 2 เป็นขั้นตอนในการดำเนินการ ซึ่งแสดงกระบวนการวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้โดยใช้ข้อมูลจาก UAV และการสำรวจภาคสนาม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

การวิจัยนี้ใช้ UAV DJI Phantom 4 PRO ซึ่งมีกล้องความละเอียด 20 ล้านพิกเซล ในการสำรวจพื้นที่ครั้งนี้ได้วางแผนแนวนบินที่ความสูง 100 เมตรจากพื้นดิน (รูปที่ 3) การบินสำรวจนี้มีการตั้งค่าให้มีการซ้อนทับของภาพ (overlap) ร้อยละ 85 และการซ้อนทับด้านข้าง (side lap) ร้อยละ 70 โดยความแม่นยำของกล้องอยู่ที่ 10 เมตร มุมเอียงของกล้องมีความแม่นยำ

2 องศา ใช้เส้นทางการบินแบบตาราง (Grid) สำหรับสร้างแผนที่สองมิติ นอกจากนี้ ข้อมูลที่บันทึกได้จากการสำรวจมีนามสกุลไฟล์ .JPG และขนาด 5,472 x 3,648 Pixel รวมพื้นที่ที่ทำการบันทึกทั้งสิ้น 321 ภาพการประมวลผลภาพจาก UAV ดำเนินการด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (Point cloud) ที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ในพิกัด X, Y, Z ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้าง Digital Surface Model (DSM), Digital Elevation Model (DEM) และ Orthophoto ต่อไป

2. การสำรวจภาคสนาม

เป็นการเก็บข้อมูลของต้นไม้แต่ละต้นโดยตรง ซึ่งรวมถึง ชื่อพันธุ์ไม้ เส้นรอบวงของต้นไม้ (Circumference, เซนติเมตร) ความสูงของต้นไม้ (Height, เมตร) ทิศทางการวัด (North-South, East-West, เมตร) พิกัดตำแหน่งของต้นไม้ (UTM Coordinate, X, Y) ของต้นไม้ทุกต้นในแปลงตัวอย่าง รวมถึงการใช้กล้องวัดระยะในการเก็บข้อมูลความสูงของต้นไม้และไม้วางแปลงตัวอย่าง ในพื้นที่แปลงตัวอย่างมีขนาด 40x40 เมตร จำนวน 10 แปลง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของพื้นที่ศึกษา โดยเลือกตำแหน่งของแปลงตัวอย่างด้วยวิธีสุ่ม (Random sampling) แต่เนื่องจากไม่สามารถทราบเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับอกที่อยู่นอกแปลงตัวอย่างได้ ผู้วิจัยจึงทำการสร้างพารามิเตอร์การวิเคราะห์โมเดลด้วยวิธีการวิเคราะห์ผล Regression analysis ดังสมการ (1) ผู้วิจัยใช้สมการความสัมพันธ์แบบ linear regression การศึกษานี้อ้างอิงจากสมการใน [5] ดังสมการที่ 1

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ

y คือ การประมาณการ DBH (เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก)

β คือ Coefficients ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการประมาณการ

x_1 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นไม้ตามแกนทิศเหนือ-ใต้ (NS)

x_2 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นไม้ตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (EW)

x_3 คือ ค่า High tree ขนาดความสูงทรงพุ่มต้นไม้ (Canopy)

ε คือ ค่าคงที่

*หมายเหตุ สูตรการคำนวณ $y = (-16.292) + (6.633 * x_1) + (5.915 * x_2) + (2.038 * x_3)$

โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกใช้ในการประเมินปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้จากข้อมูลภาคสนาม จากนั้นจะมีการใช้ regression analysis การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจาก UAV และข้อมูลสำรวจภาคสนาม

3. การสร้างแบบจำลองเรือนยอดต้นไม้ (Canopy Modeling) จากข้อมูลจาก UAV

ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดของต้นไม้ และการหาความสูงในพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลจาก UAV การตรวจจบบนยอดไม้ (Tree top detection) ซึ่งสามารถหาได้โดย ค่าความแตกต่างของความสูงระหว่างข้อมูลจาก DSM และ DEM ผลการวิเคราะห์ทราบถึงความสูงของวัตถุที่อยู่บนพื้นผิวโลก จากสมการที่ 2 จากโมเดลเพื่อจำแนกข้อมูลเรือนยอด (Training classification - Canopy model) และการวิเคราะห์ค่าความยาวและความกว้างของเรือนยอด

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

เมื่อ

CHM = แบบจำลองความสูงเรือนยอด

DSM = แบบจำลองความสูงปกคลุมพื้นผิว

DEM = แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ

วิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์ทรงพุ่มของเรือนยอดด้วยวิธีการ Classification เป็นกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ที่พบเรือนยอดของพรรณไม้ในพื้นที่ศึกษา ด้วยวิธีการจำแนก

ของเทคนิคการ Classification ที่สามารถช่วยในการระบุและประเมินทรงพุ่มของต้นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักของทรงพุ่ม ได้แก่ 1) ทรงพุ่มของเรือนยอดที่สามารถแปลด้วยสายตาได้ เป็นทรงพุ่มที่มีลักษณะเด่นชัดสามารถระบุได้ง่ายด้วยการสังเกตด้วยสายตา 2) ทรงพุ่มของเรือนยอดที่มีความหนาแน่นน้อย เห็นช่องว่างระหว่างกิ่งก้านชัดเจน และ 3) พื้นที่ถนนหรือพื้นที่โล่ง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่มีการปกคลุมด้วยทรงพุ่มของต้นไม้ จากการสร้างตัวอย่างฝึก Training sample ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องระบุคุณลักษณะที่ชัดเจนของแต่ละประเภท เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์โมเดล โดยเฉพาะการใช้เทคนิค Train Support Vector Machine (SVM) classifier ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อน ขั้นตอนต่อมาคือการวิเคราะห์ค่าสถิติของการจำแนกประเภท โดยใช้เทคนิค SVM classifier เพื่อสร้างไฟล์ผลโมเดลของการจำแนก ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์ใช้ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ Classify raster ของ Canopy model และการวิเคราะห์รูปทรงใช้เครื่องมือ Minimum bounding geometry เพื่อสร้างรูปหลายเหลี่ยมที่แสดงถึงรูปทรงของเรขาคณิตขอบเขต ในรูปแบบของ Polygon นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาค่าความกว้างและความยาวของจุดกึ่งกลางของ Polygons ได้ ผลการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองรูปทรงพุ่มในทิศทางต่าง ๆ เช่น ทิศเหนือ-ตะวันตก (NS) และทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการศึกษารูปทรงพุ่มของเรือนยอดต้นไม้ในพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด รวมถึงข้อมูลความสูงของแต่ละ Polygons ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร และสามารถวิเคราะห์คำนวณหาค่าเส้นรอบวงของเรือนยอดต้นไม้ของ Canopy model รวมถึงประเมินปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้จากแบบจำลอง UAV ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในพื้นที่ศึกษา

2.3 การวิเคราะห์คาร์บอนเหนือพื้นดิน

การประมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ ซึ่งสามารถแปลงเป็นปริมาณคาร์บอนที่ต้นไม้สามารถกักเก็บได้ เทคนิคการวิเคราะห์มวลชีวภาพ คือเทคนิคสมการแอลโลเมตรี (Allometry equation) ซึ่งเป็นสมการที่ช่วยในการคำนวณมวลชีวภาพของต้นไม้ โดยสมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับอก (Diameter at breast height หรือ DBH) และความสูงของต้นไม้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินมวลชีวภาพ ทั้งหมด 10 แปลง (ดังรูปที่ 1) รวมถึงการใช้โมเดลแบบจำลองทรงพุ่มหรือ Canopy Elevation Model (CHM) ในการประเมินพื้นที่ป่าชุมชน เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของเรือนยอดของต้นไม้ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคำนวณการกักเก็บคาร์บอน การศึกษารุ่นนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้สมการของป่าเต็งรัง ซึ่งเป็นประเภทของป่าที่มีลักษณะเฉพาะ การศึกษานี้อ้างอิงจากสมการของ Ogawa ใน [22] ที่เป็นการยอมรับว่าเป็นสมการที่มีประสิทธิภาพในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและลักษณะทางกายภาพของต้นไม้ ดังรูปแบบ ตามสมการที่ (4) - (7)

$$W_s = 0.0396 DBH^2 H_t^{0.9326} \quad (3)$$

$$W_b = 0.0348 DBH^2 H_t^{1.0270} \quad (4)$$

$$W_t = \left(\frac{28.0}{W_s + W_b} \right) 0.025^{-1} \quad (5)$$

โดยมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ ประกอบด้วยมวลชีวภาพของลำต้น กิ่ง และใบของต้นไม้ ดังนี้

$$W_{\text{total}} = W_s + W_b + W_t \quad (6)$$

เมื่อ

w_s คือ มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)

w_b คือ มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (กิโลกรัม)

w_l คือ มวลชีวภาพส่วนของใบ (กิโลกรัม)

ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นไม้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณมวลชีวภาพ (Biomass) ซึ่งเป็นค่ามวลรวมขององค์ประกอบทางโครงสร้างของพืชทั้งส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ดังนี้

$$C_j = W_{ct} * FC \quad (7)$$

เมื่อ

C_j คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ (กิโลกรัม)

W_{ct} คือ ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ (กิโลกรัม)

FC คือ สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวลชีวภาพของต้นไม้ (กำหนดให้เท่ากับ 0.47) [23]

2.4 การวิเคราะห์ความแม่นยำ

ผลลัพธ์สำหรับข้อมูลการประเมินผลในแต่ละช่วงของค่า Histogram เกณฑ์ความน่าจะเป็นของโมเดลอธิบายถึงความแม่นยำโดยรวม โดยพิจารณาจากทั้งความแม่นยำและคะแนนการเรียกคืน เมตริกทั้งสามนี้คำนวณจากผลบวกที่แท้จริง (TP เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบได้อย่างถูกต้อง) ผลบวกเท็จ (FP เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบโดยผิดพลาด) และผลลบเท็จ (FN เรือนยอดต้นไม้ถูกละเว้น) สมการของความแม่นยำ คะแนนการเรียกคืน และคะแนน F1 ผู้วิจัยวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ผลทรงพุ่มข้อมูลภาคสนาม และการเรียนรู้ด้วยเครื่องของโมเดล [24] - [27]

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (8)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (9)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP}{TP+FN+FP} \quad (10)$$

$$\text{F1_Score} = \frac{2PR}{P+R} \quad (11)$$

เมื่อ

TP (True Positive) คือ เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบได้อย่างถูกต้อง

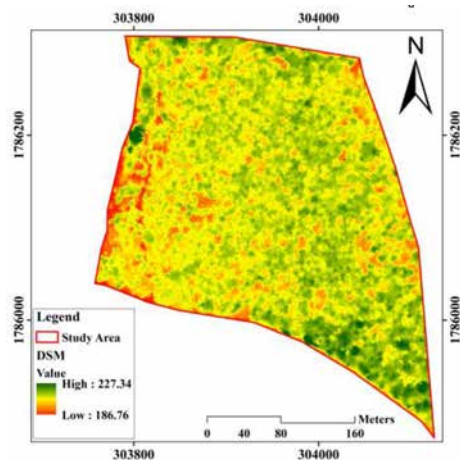
FP (False Positive) คือ เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบโดยผิดพลาด

FN (False Negative) คือ เรือนยอดต้นไม้ถูกละเว้น

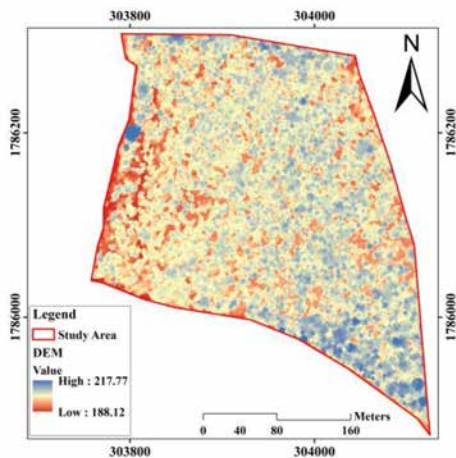
3. ผลและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจาก UAV

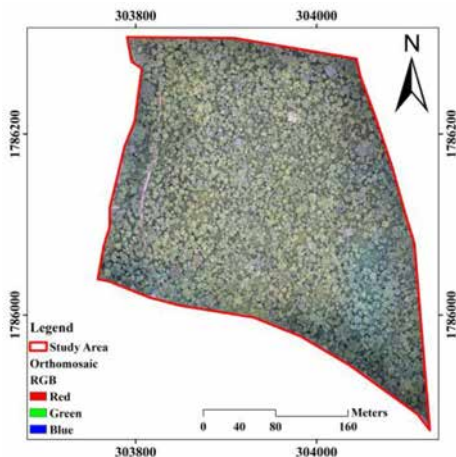
ผลการศึกษาการวิเคราะห์ของข้อมูลในพื้นที่ป่าชุมชนนี้ ผู้วิจัยใช้เทคโนโลยี UAV เพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากพื้นที่ป่าชุมชนบ้านหินลาดและบ้านหินลาดพัฒนา โดยนำข้อมูลมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่ถูกกักเก็บในพื้นที่ป่า ช่วยให้การศึกษามีความแม่นยำและสามารถประเมินได้อย่างละเอียดโดยไม่ต้องลงพื้นที่เก็บข้อมูลด้วยมือทุกจุด ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3 - 6 ดังนี้



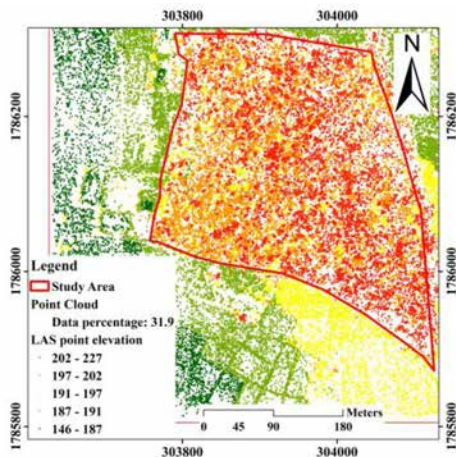
รูปที่ 3 DSM



รูปที่ 4 DEM



รูปที่ 5 ผลภาพออร์โธ (Orthophoto)



รูปที่ 6 ผลข้อมูล Point Cloud

รูปที่ 3 ผลแบบจำลองความสูงปกคลุมพื้นผิว Digital Surface Model (DSM) เป็นแบบจำลองที่แสดงระดับความสูงขององค์ประกอบต่าง ๆ บนพื้นดิน เช่น ต้นไม้และสิ่งก่อสร้าง ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีความสูงมากที่สุดอยู่ที่ 227.34 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง โดยเป็นบริเวณที่มีเรือนยอดของต้นไม้สูง พื้นที่ที่มีความหนาแน่นของพรรณไม้มากมีความสูงเฉลี่ย 204.26 เมตร แสดงเป็นสีน้ำตาล ส่วนพื้นที่ที่มีต้นไม้ขนาดเล็กหรือพืชพรรณเตี้ย มีความสูงประมาณ 1 - 2 เมตร แสดงเป็นสีส้ม ขณะที่พื้นที่ต่ำที่สุดมีความสูง 181.19 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง แสดงเป็นสีเขียว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นดินหรือมีพืชพรรณระดับต่ำ

รูปที่ 4 ผลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ผลการวิเคราะห์ DEM ในพื้นที่ศึกษาพบว่า ความสูงอยู่ระหว่าง 183.47 - 217.77 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง โดยสามารถจำแนกลักษณะภูมิประเทศออกเป็น 3 พื้นที่หลักได้แก่ พื้นที่สีเทา 217.77 เมตร เป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของพรรณไม้สูงและป่าอุดมสมบูรณ์ อีกทั้งเกิดกระบวนการสะสมอินทรีย์สารตามธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายของใบไม้โดยปลวก พื้นที่สีน้ำตาล 198.18 เมตร เป็นพื้นที่ที่มีการทับถมของพรรณไม้และอินทรีย์วัตถุมาเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมของหน้าดินทั่วไป พื้นที่สีเขียว 183.47 เมตร เป็นพื้นที่ต่ำสุดมีการทับถมน้อยและมีลักษณะของการไหลของน้ำ เช่น เส้นทางน้ำที่เกิดจากฝนหรือกิจกรรมของมนุษย์และสัตว์ ทั้งกระบวนการทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศในพื้นที่ดังกล่าว

รูปที่ 5 ผลภาพออร์โธ (Orthophoto) หรือภาพ RGB เป็นภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ผ่านกระบวนการปรับแก้ความผิดเพี้ยน (Orthorectification) โดยอ้างอิงข้อมูลความสูงต่ำของภูมิประเทศและระบบพิกัด UTM ทำให้ภาพมีความถูกต้องทั้งตำแหน่ง ขนาด และรูปร่างของวัตถุ ภาพ RGB ประกอบด้วย 3 สีหลัก ได้แก่ แดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ซึ่งช่วยให้มองเห็นภาพ

ที่ชัดเจนขึ้น ข้อมูลภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงและแม่นยำนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และพัฒนาโมเดลการเรียนรู้ด้วยเครื่องได้หลากหลายรูปแบบ และรูปที่ 6 ผลข้อมูล Point Cloud เป็นข้อมูลจุด 3 มิติ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภูมิประเทศและโครงสร้างพื้นผิว ในพื้นที่ศึกษามี 106,360 จุด หรือเฉลี่ย 66 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองภูมิประเทศที่มีความละเอียดสูงและแม่นยำมากขึ้น

3.2 ผลการวิเคราะห์และสำรวจข้อมูลภาคสนาม

จากการสำรวจภาคสนามในแปลงตัวอย่าง พบพรรณไม้ทั้งหมด 22 วงศ์ 39 ชนิด รวม 1,241 ต้น หรือเฉลี่ย 124 ต้นต่อแปลง วงศ์ที่พบมากที่สุด ได้แก่ FABACEAE 475 ต้น DIPTEROCARPACEAE 291 ต้น และ RUBIACEAE 117 ต้น วงศ์ที่พบน้อยที่สุด อย่างละ

1 ต้น ได้แก่ BIGNONIACEAE, CELASTRACEAE และ LEGUMINOSAE โดยมีการจัดอันดับ 10 ชนิดที่พบมากที่สุดตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 1

เนื่องจากไม่สามารถระบุจำนวนต้นไม้ที่อยู่นอกแปลงตัวอย่างได้ ผู้วิจัยจึงใช้ Regression Analysis เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล 3 ส่วน ได้แก่ เส้นรอบวงระดับอกของต้นไม้ (DBH, เซนติเมตร) ความสูงต้นไม้ (H, เมตร) และขนาดทรงพุ่ม (NS, EW, เมตร) การวิเคราะห์นี้ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างลักษณะทางกายภาพของต้นไม้ และสามารถใช้คาดการณ์ลักษณะของพรรณไม้ในพื้นที่ที่ไม่ได้สำรวจได้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ภาคสนามแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลพรรณไม้ในแปลงสำรวจ

ลำดับ	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวน
1	ต้นแดง	<i>Xylia xylocarpa</i> var. <i>kerrii</i> .	457
2	ต้นเต็ง	<i>Shorea obtusa</i> Wall. ex Blume.	224
3	ต้นพลองเหมือด	<i>Memecylon edule</i> Roxb.	56
4	ต้นอ้อยช้าง	<i>Lannea coromandelica</i> (Houtt.) Merr.	56
5	ต้นขาเป๋	<i>Hymenopyramis parvifolia</i> Moldenke	54
6	ต้นรัง	<i>Shorea siamensis</i> Miq.	40
7	มะม่วงหาวแมงวัน	<i>Buchanania lanzan</i> Spreng	40
8	ต้นยอป่า	<i>Morinda coreia</i> Ham.	34
9	ต้นหนามเค็ด	<i>Catunaregam tomentosa</i> (Blume ex DC.) Triveng.	26
10	ต้นกระมอ	<i>Gardenia obtusifolia</i> Roxb.exKurz	23

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

Regression Statistics	
Multiple R	0.809111057
R Square	0.654660703
Adjusted R Square	0.653823178
Standard Error	12.35636358
Observations	1241

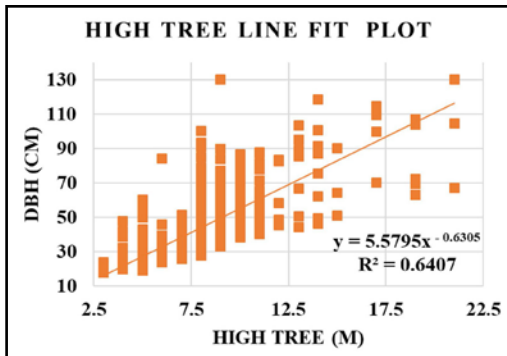
จากตารางแสดงที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (DBH) ความสูงของต้นไม้ และทิศทางของเรือนยอด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.6547$ ซึ่งบ่งชี้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้มีประสิทธิภาพ ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่ค่อนข้างดี การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อ DBH เพิ่มขึ้น ความสูงของต้นไม้และขนาดเรือนยอดก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสะท้อนถึงการเติบโตของต้นไม้ทั้งในด้านลำต้นและกิ่งก้าน การใช้โมเดลการถดถอยช่วยให้สามารถคาดการณ์ลักษณะของต้นไม้ แม้ในพื้นที่ที่ไม่ได้สำรวจ โดยค่าคงที่ของโมเดลมีความสำคัญในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและช่วยในการทำนายแนวโน้มการเติบโตของต้นไม้ดังแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ

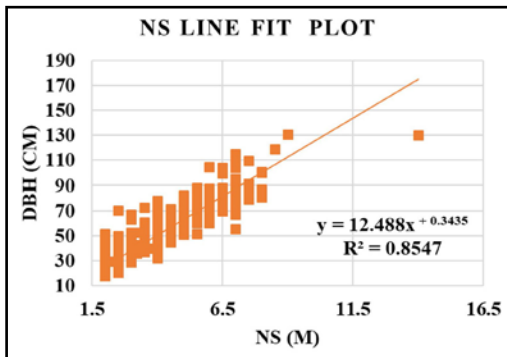
ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางระดับอก (DBH) ความสูงของต้นไม้ (H) และข้อมูลทรงพุ่ม (NE, EW) โดยค่าจุดตัดแกนอยู่ที่ -16.2766 ซึ่งเป็นค่าคงที่ในสมการถดถอย ค่า Standard Error 1.3076 บ่งชี้ถึงความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย และแสดงระดับความกระจายตัวของข้อมูล ค่า SE ที่ต่ำหมายถึงความแม่นยำที่สูงขึ้นของสมการถดถอย สมการที่ได้ถูกพัฒนาโดยใช้แบบจำลอง Machine learning ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับยอดไม้ Tree-tops detection และการแบ่งส่วนทรงพุ่ม Canopy model ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อกัน Positive correlation และสามารถใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อแสดงการเชื่อมโยงของข้อมูลในตัวแปรต่าง ๆ โดยกราฟดังกล่าวแสดงผลที่สอดคล้องกับสมการที่สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์โมเดลดังรูปที่ 7 - 9 ดังนี้

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ทรงพุ่มโมเดลจาก UAV

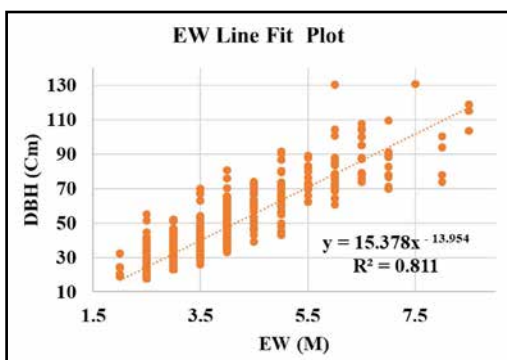
ผลวิเคราะห์ทรงพุ่ม		ทรงพุ่มต้นไม้ (ตร.ม.)
		Canopy Model (area m ²)
True Positive	TP	24,423.84
False Negative	FP	2,639.37
False Positive	FN	13,872.39



รูปที่ 7 เส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับความสูงของต้นไม้



รูปที่ 8 เส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับทิศเหนือ-ใต้ (NS)



รูปที่ 9 เส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW)

รูปที่ 7 แสดงเส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับความสูงของต้นไม้ พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.6406$ แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับปานกลางถึงสูง มีทิศทางเชิงบวก หมายความว่าเมื่อลำต้นโตขึ้น DBH เพิ่มขึ้นความสูงของต้นไม้ก็มักจะเพิ่มขึ้นด้วย การเจริญเติบโตของต้นไม้มีความสัมพันธ์กันทั้งในแนวตั้ง (H) และแนวนอน (DBH) ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการสะสมมวลชีวภาพของต้นไม้

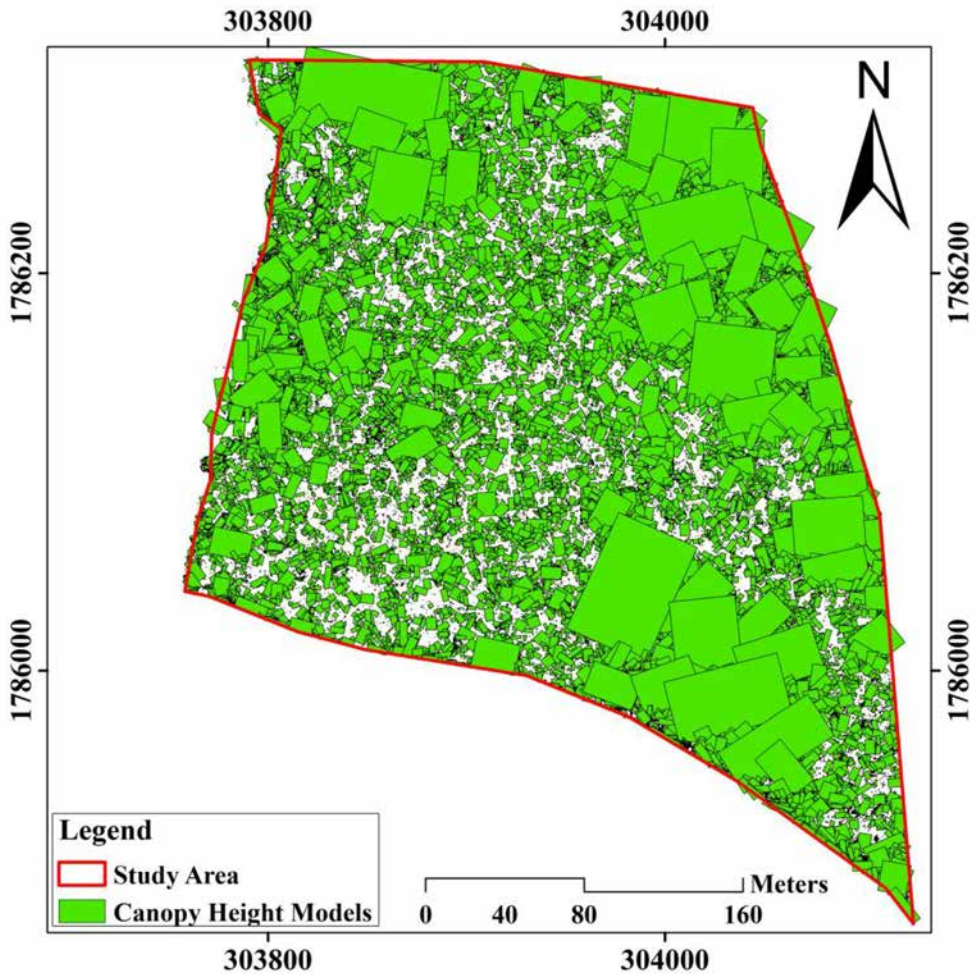
รูปที่ 8 แสดงเส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับขนาดเรือนยอดในทิศเหนือ-ใต้ (NS) พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.8547$ แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงมีทิศทางเชิงบวก หมายความว่าเมื่อ DBH เพิ่มขึ้น ขนาดเรือนยอดในทิศเหนือ-ใต้ก็ขยายตัวขึ้น แสดงถึงพฤติกรรมการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่เมื่อมีการสะสมมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น ลำต้นและทรงพุ่มจะขยายตัวไปพร้อมกัน การขยายเรือนยอดในแนวนีช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสงแดดและประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง

รูปที่ 9 แสดงเส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับขนาดเรือนยอดในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.8111$ แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงมีทิศทางเชิงบวก หมายความว่าเมื่อ DBH เพิ่มขึ้น ขนาดทรงพุ่มในทิศตะวันออก-ตะวันตกก็ขยายตัวตาม ความสัมพันธ์นี้แสดงถึงกระบวนการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่สมดุลกันทั้งแนวนอนและแนวตั้ง โดยเฉพาะการตอบสนองต่อปัจจัยแสงแดด และพื้นที่ว่างทรงพุ่มในแนวตะวันออก-ตะวันตกขยายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงในสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเจริญเติบโต

ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง DBH ความสูงของต้นไม้ และทรงพุ่มในแนวต่าง ๆ มีแนวโน้มเป็นบวกทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าต้นไม้ที่มีลำต้นใหญ่ขึ้นมักจะสูงขึ้นและมีทรงพุ่มที่ขยายกว้างขึ้นทั้งในแนวเหนือ-ใต้และตะวันออก-ตะวันตก ข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างป่าไม้ ปริมาณคาร์บอน และการจัดการทรัพยากรป่าไม้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการเรียนรู้ด้วยเครื่อง
การใช้ UAV ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง
(Machine learning) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ
ในการตรวจจับและวิเคราะห์ลักษณะของทรงพุ่มต้นไม้

เช่น ขนาดเรือนยอดและความสูงของต้นไม้ จากการ
วิเคราะห์พบว่า โมเดลสามารถระบุขอบเขตของทรงพุ่ม
ต้นไม้ได้อย่างแม่นยำ มีความคลาดเคลื่อนต่ำเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 Canopy Model

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์ผลการตรวจสอบความถูกต้องของทรงพุ่มโมเดลจาก UAV

ID	Canopy Model
Precision	0.902
Recall	0.638
Accuracy	0.597
F1- Score	0.747
Percent	74.737%

จากรูปที่ 10 เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดต้นไม้ (CHM) จากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ถูกแปลงเป็นแบบจำลองเชิงพื้นที่ความละเอียดสูงด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงพื้นที่ แสดงพิกัดและความสูงของทรงพุ่ม พบทรงพุ่มทั้งหมด 123,555 Polygons โดยแต่ละ Polygon แทนทรงพุ่มที่ตรวจจับได้ วิเคราะห์ด้วยวิธี Classification และคำนวณค่ากว้าง-ยาวของจุดกึ่งกลาง Polygon ขนาดทรงพุ่มเฉลี่ย 5 เมตร สะท้อนระดับการเติบโต ขนาดเรือนยอดเฉลี่ย NS 0.77 ซม., EW 0.42 ซม., และเส้นรอบวงระดับอก (DBH) 15 ซม. แสดงอัตราการเจริญเติบโตของลำต้น

3.4 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบความแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบความแม่นยำระหว่างข้อมูลภาคสนาม และผลข้อมูลจากการวิเคราะห์โมเดลของทรงพุ่มเรือนยอดต้นไม้ ซึ่งกำหนดความสูงของการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ ความสูงจากระดับพื้นดินอยู่ที่ 3 เมตร เพื่อให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกับข้อมูลของภาคสนาม ดังตารางที่ 3 จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทรงพุ่มโมเดลจากข้อมูลจาก UAV แสดงความแม่นยำสูงและสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม โดยเปรียบเทียบขนาดทรงพุ่มกับข้อมูลจริง (Ground truth) ผ่านเทคนิค Intersection เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดังตารางที่ 4 จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบความถูกต้องของทรงพุ่มโมเดล Canopy Model โดยใช้เมตริกต่าง ๆ

เช่น Precision, Recall, Accuracy, F1-Score, และ Percent ช่วยในการประเมินความแม่นยำ และประสิทธิภาพของการจำลองทรงพุ่มในแต่ละโมเดล ร่วมกับข้อมูลภาคสนาม โมเดลนี้มีความสามารถวิเคราะห์ต้นไม้ แสดงถึงความแม่นยำในการจำแนกรูปทรงพุ่มที่ถูกต้อง รวมถึงสามารถค้นหาต้นไม้หรือทรงพุ่ม

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลคาร์บอนเหนือพื้นดิน

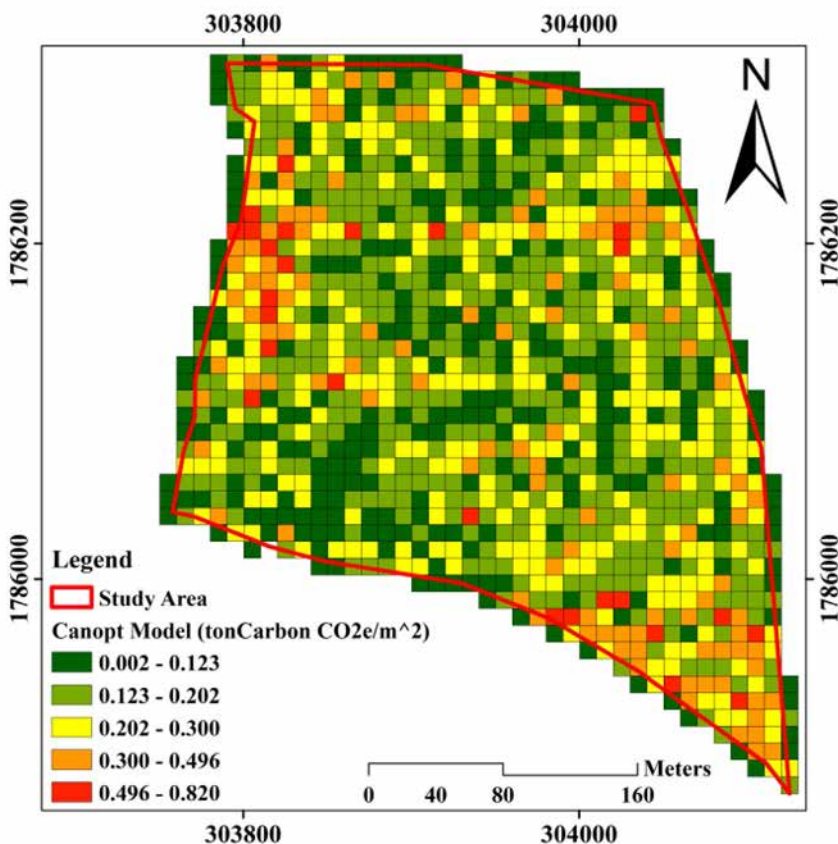
ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดิน แสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยใช้การวิเคราะห์ผ่าน Machine Learning ร่วมกับสมการแอลโลเมตรี เพื่อประเมินมวลชีวภาพและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ โดยพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (DBH) ความสูง และชนิดของต้นไม้ การประยุกต์ใช้ Machine Learning ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยข้อมูลภาคสนามถูกนำมาใช้เพื่อวัดปริมาณคาร์บอนจริง ในขณะที่ข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลอง Canopy model ถูกนำมาใช้เพื่อจำแนกโครงสร้างของต้นไม้ในพื้นที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนต่อพื้นที่ ซึ่งได้จาก Canopy model แสดงไว้ในตารางที่ 6 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่วิเคราะห์ได้อยู่ที่ -0.48% และค่าความแตกต่างของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวมอยู่ที่ 0.001020 kgCO₂e/m²

ผลการศึกษาด้วยสมการแอลโลเมตรีสามารถนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบเชิงพื้นที่ของ Canopy Model รูปแบบ Polygon รูปทรงสี่เหลี่ยม เป็นการใช้พื้นที่

ย่อยขนาด 10 ตารางเมตร (0.001 เฮกตาร์) เป็นหน่วยวิเคราะห์ช่วยให้สามารถเข้าใจการกระจายตัวของคาร์บอนในระดับที่ละเอียดและเจาะจงมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 ผลความหนาแน่นคาร์บอนต่อพื้นที่ของ Canopy Model ผลการศึกษาพบว่า ความหนาแน่นของคาร์บอนในพื้นที่ 10 ตารางเมตร อยู่ในช่วง 0.0-0.820 $\text{tonCO}_2\text{e/m}^2$ โดยพื้นที่ที่มีความหนาแน่น

สูงสุด 0.496-0.820 $\text{tonCO}_2\text{e/m}^2$ เป็นบริเวณที่มีพรรณไม้หนาแน่นและเรือนยอดสูง ตามข้อมูลจาก UAV ส่วนพื้นที่ที่มีความหนาแน่นต่ำสุด 0.000-0.123 $\text{tonCO}_2\text{e/m}^2$ มีทรงพุ่มบาง พตต้นไม้ขนาดเล็ก เส้นรอบวง <15 ซม. และพืชพื้นล่างหนาแน่น ความหนาแน่นเฉลี่ยของพื้นที่อยู่ที่ 0.0625 $\text{tonCO}_2\text{e/m}^2$ หรือ 0.01 t/ha



รูปที่ 11 ความหนาแน่นคาร์บอน Canopy Model

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการแอลโลเมตรีและ Machine Learning

Carbon sequestration		Plant component	Biomass quantity		Carbon sequestration capacity		Carbon sequestration capacity (kg/ha)	Percentage proportion
			Average (tCO ₂ e/ha)	Per area (kgCO ₂ e/m ²)	Average (tCO ₂ e/ha)	Per area (kgCO ₂ e/m ²)		
Field data	Plant part	Trunk	0.000311	3.106160	0.022120	1.459895	0.000146	24.35
		Leaf	0.000105	1.047605	0.007460	0.492374	0.492374	8.21
		Twig	0.000015	0.148418	0.001057	0.069756	0.069756	1.16
Machine learning	Canopy Model	Trunk	0.000326	3.258323	0.023203	1.531412	1.531412	25.55
		Leaf	0.000088	0.875185	0.006232	0.411337	0.411337	6.86
		Twig	0.000015	0.148285	0.001056	0.069694	0.069694	1.16
total			0.001275	12.754811	0.090830	5.994761	4.535012	100

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนปริมาณการกักเก็บคาร์บอนต่อพื้นที่

Carbon Sequestration	Carbon density per area (field data)	Carbon Sequestration Canopy Model
tCO ₂ e	213.53	212.51
kgCO ₂ e/m ²	2.022026	2.012442
tCO ₂ e/ha	0.002022	0.000201
Error (%)	100	0.48%
Carbon sequestration total quantity difference carbon density per area (kgCO ₂ e/m ²)		0.001020

4. สรุป

การประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนด้วยเทคนิคของข้อมูลจาก UAV จากปัจจุบันพบปัญหาด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ในพื้นที่ป่าชุมชนในจังหวัดมหาสารคาม ขนาดพื้นที่ 66 ไร่ หรือ 10.56 เฮกตาร์ โดยใช้ UAV ถ่ายภาพพื้นที่ป่าด้วยระบบ RGB ร่วมกับการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ Agisoft Photo Scan วิเคราะห์ภาพ เก็บข้อมูลต้นไม้ภาคสนาม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก UAV ใช้โมเดลการเรียนรู้ด้วยเครื่อง (Machine learning) ในรูปของ Canopy model เพื่อตรวจจับเรือนยอดต้นไม้ ผลการศึกษาพบว่า ป่าชุมชนสามารถกักเก็บคาร์บอนได้ประมาณ $2.02 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ ความแม่นยำของโมเดลพบค่า Precision = 0.902, Recall = 0.638, Accuracy = 0.597, F1-Score = 0.747, และ Percent = 74.737% จากการวิเคราะห์ประเมินคาร์บอนในป่าได้แม่นยำกว่าการสำรวจแบบดั้งเดิม ลดเวลาและต้นทุน ไม่ต้องลงพื้นที่สำรวจทุกต้น ใช้ข้อมูลเพื่อบริหารจัดการป่าอย่างยั่งยืน โดยที่ความแม่นยำของโมเดลยังไม่ถึง 100% มีโอกาสผิดพลาดในการตรวจจับต้นไม้บางส่วนต้องใช้ข้อมูลภาคสนามมาประกอบเพื่อเพิ่มความถูกต้อง และขึ้นอยู่กับคุณภาพของภาพถ่ายจาก UAV เช่น แสง เงา หรือความละเอียดของภาพ เป็นต้น จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการสนับสนุนการบริหารป่าชุมชน วางแผนการอนุรักษ์หรือปลูกป่าเพิ่ม ช่วยติดตามการเปลี่ยนแปลงของป่า วิเคราะห์การเติบโตของต้นไม้ใช้เป็นต้นแบบสำหรับพื้นที่อื่นในการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยข้อมูลจาก UAV และ Machine learning สามารถช่วยวิเคราะห์และบริหารจัดการป่าได้แม่นยำขึ้น แม้จะยังมีข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำของโมเดล แต่ก็ยังเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพในการช่วยลดโลกร้อนผ่านการประเมินคาร์บอนจากป่าอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าเทคโนโลยี UAV และ Machine learning จะช่วยให้

การศึกษาป่าชุมชนแม่นยำขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำของโมเดล ข้อจำกัดของข้อมูล และปัจจัยสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ควรพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ ผสานข้อมูลหลายแหล่ง และเพิ่มการฝึกอบรมให้ชุมชน เพื่อให้การนำเทคโนโลยีไปใช้เกิดประโยชน์สูงสุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte et al., Eds., Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2021.
- [2] C. Le Quéré et al., "Global Carbon Budget 2022," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, pp. 2671 - 2740, 2022.
- [3] L. Liu, B. Li, Z. Chen, and J. Liu, "Global Warming and Its Impact on Human Health: A Review," *IJERPH*, vol. 19, p. 6695, 2022.
- [4] J. Rogelj et al., "Pathways Limiting Global Warming to 1.5°C ," vol. 9, pp. 713 - 718, 2019.
- [5] T. Angkahad et al., "An Empirical Analysis of Above-Ground Biomass and Carbon Sequestration Utilizing UAV Photogrammetry and Machine Learning Techniques," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 186740 - 186752, 2024.
- [6] W. Jundang, L. Puangchit, and S. Diloksumpun, "Carbon Storage of Dry Dipterocarp Forest and Eucalypt Plantation at Mancha Khiri Plantation," *Thai J. Forestry*, vol. 29, no. 3, pp. 36 - 44, 2010.

- [7] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, and T. Rotjanakusol, "Atmospheric Environment Monitoring in Thailand via Satellite Remote Sensing: A Case Study of Carbon Dioxide," *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 32, no. 4, pp. 3645 - 3651, 2023.
- [8] Y. Uttaruk, P.V. Khao, and T. Laosuwan, "A Guideline for Greenhouse Gas Emission Reduction and Carbon Sequestration in Forest Sector Based on Thailand Voluntary Emission Reduction Programme," *Sains Malays.*, vol. 53, pp. 477 - 486, 2024.
- [9] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, S. Nakapan, J. Itsarawisut, and C. Plybour, "Evaluation of Tree Biomass and Carbon Sequestration through Remote Sensing and Field Methods," *Geogr. Tech.*, vol. 20, no. 1, pp. 33 - 43, 2025.
- [10] Y. Uttaruk and T. Laosuwan, "Development of Prototype Project for Carbon Storage and Greenhouse Gas Emission Reduction from Thailand's Agricultural Sector," *Sains Malays.*, vol. 48, no. 10, pp. 2083 - 2092, 2019.
- [11] Y. Uttaruk, P. V. Khao, and T. Laosuwan, "A Guideline for Greenhouse Gas Emission Reduction and Carbon Sequestration in Forest Sector Based on Thailand Voluntary Emission Reduction Programme," *Sains Malays.*, vol. 53, no. 3, pp. 477 - 486, 2024.
- [12] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, S. Nakapan, J. Itsarawisut, and C. Plybour, "Evaluation of Tree Biomass and Carbon Sequestration through Remote Sensing and Field Methods," *Geogr. Tech.*, vol. 20, no. 1, pp. 33 - 43, 2025.
- [13] Y. Uttaruk, and T. Laosuwan, "Development of Prototype Project for Carbon Storage and Greenhouse Gas Emission Reduction from Thailand's Agricultural Sector," *Sains Malays.*, vol. 48, no. 10, pp. 2083 - 2092, 2019.
- [14] T. Pothong, S. Elliott, S. Chairuangstri, W. Chanthorn, D. P. Shannon, and P. Wangpakapattanawong, "New Allometric Equations for Quantifying Tree Biomass and Carbon Sequestration in Seasonally Dry Secondary Forest in Northern Thailand," *New Forests*, vol. 53, pp. 17 - 36, 2022.
- [15] F. Noulèkoun, J. B. Naab, J. P. A. Lamers, S. Baumert, and A. Khamzina, "Sapling Biomass Allometry and Carbon Content in Five Aforestation Species on Marginal Farmland in Semi-arid Benin," *New Forests*, vol. 49, pp. 363 - 382, 2018.
- [16] T. S. Chinembiri, O. Mutanga, and T. Dube, "Landsat-8 and Sentinel-2 Based Prediction of Forest Plantation C Stock Using Spatially Varying Coefficient Bayesian Hierarchical Models," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 22, p. 5676, 2022.
- [17] B. M. Gramig, J. M. Barnard, and L. S. Prokopy, "Farmer Beliefs About Climate Change and Carbon Sequestration Incentives," *Clim. Res.*, vol. 56, no. 2, pp. 157 - 167, 2013.
- [18] J. D. Watts, R. L. Lawrence, P. Miller, and C. Montagne, "An Analysis of Cropland Carbon Sequestration Estimates for North Central Monana," *Clim. Change*, vol. 108, pp. 301 - 331, 2011.

- [19] P. Saengpradit, S. Sangpradid, and T. Laosuwan, "Estimation of Above-Ground Biomass using Hybrid Machine Learning based on Satellite Imagery," *IJTPE*, vol. 16, no. 61, pp. 7 - 13, 2024.
- [20] W. Vattanavongsiri, S. Sangpradid, W. Chokkuea, and T. Laosuwan, "Estimation of Above-Ground Carbon Sequestration in the National Reserved Forest using Vegetation Indices and Gradient Boosting Machine Learning," *IJTPE*, vol. 16, no. 60, pp. 361 - 366, 2024.
- [21] Y. Uttaruk and T. Laosuwan, "Comparison of Carbon Storage Measurement Methods on Agroforestry Systems in Sakon Nakhon Province," Northeast Thailand, *Sci. J. King Faisal Univ.*, vol. 21, pp. 95 - 99, 2020.
- [22] H. Ogawa, K. Yoda, K. Ogino, and T. Kira, "Comparative Ecological Studies on Three Main Type of Forest Vegetation in Thailand. II. Plant Biomass," *Nature and Life in South East Asia*, vol. 4, pp. 49 - 80, 1965.
- [23] M. Doraisami, G. M. Domke, and A. R. Martin, "Improving Wood Carbon Fractions for Multiscale Forest Carbon Estimation," *Carbon Balance Manag.*, vol. 19, no. 25, 2024.
- [24] N. Ahmad *et al.*, "Comparative Analysis of Remote Sensing and Geo-Statistical Techniques to Quantify Forest Biomass," *Forests*, vol. 14, no. 2, p. 379, 2023.
- [25] C. Wu *et al.*, "Building Damage Detection Using U-Net with Attention Mechanism from Pre- and Post-Disaster Remote Sensing Datasets," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 5, p. 905, 2021.
- [26] R. M. Alzoman and M. J. F. Alenazi, "A Comparative Study of Traffic Classification Techniques for Smart City Networks," *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4677, 2021.
- [27] A. Jierula, S. Wang, T. - M. Oh, and P. Wang, "Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, p. 2314, 2021.

An Investigation of YOLO-Based Helmet Detection for Workers on GPU and CPU Platforms

Kittakorn Viriyasatr¹ Warakorn Luangluewut^{1, 2} Phunsak Thiennviboon^{2*}
Achitpon Charoensuk³ Piyarose Maleecharoen¹ Siraphob Santironnarong¹
Ubon Thongsatapornwatana¹ and Pantape Kaewmongkol¹

Received 29 April 2025, Revised 30 May 2025, Accepted 4 June 2025

Abstract

This research focused on enhancing workplace safety by detecting workers' helmet usage through the integration of artificial intelligence with closed-circuit television systems (CCTV). The detection process was based on object detection techniques using the YOLO (You Only Look Once) model family. This study evaluates the performance of the latest versions—YOLOv10 and YOLOv11—on both CPU and GPU platforms, considering both detection accuracy and inference speed. Among the tested model variants, a maximum processing speed of 454.52 frames per second was achieved on GPU and 34.01 frames per second on CPU, demonstrating their suitability for real-time CCTV-based applications. In terms of accuracy, YOLOv11n achieved a mean Average Precision (mAP@50) of 98.3% for helmet detection and 96.6% for head detection. The model also demonstrated strong classification performance, with precision and recall of 85.76% and 96.98% for the head class, and 93.02% and 96.56% for the helmet class, respectively. These results confirmed the model's effectiveness and balanced performance in distinguishing between helmeted and non-helmeted workers, supporting its potential for practical and cost-effective deployment in real-time safety monitoring systems.

Keywords: Closed Circuit Television System, YOLO, Helmet detection, CPU, GPU, Frame per second

¹ Research & Development Department, Defence Technology Institute

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³ Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: phunsak.t@ku.th

การศึกษาการตรวจจับหมวกนิรภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยใช้ YOLO บนแพลตฟอร์ม GPU และ CPU

กิตติกร วิริยะศาสตร์¹ วรากร เลื่องลือวุฒิ^{1, 2} พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์^{2*}
อชิตพล เจริญสุข³ ปิยะรส มาลีเจริญ¹ สิริภพ สันติธรรณรงค์¹
อุบล ธงสถาพรวัฒนา¹ และ พันธุ์เทพ แก้วมงคล¹

วันที่รับ 29 เมษายน 2568 วันที่แก้ไข 30 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 4 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มความปลอดภัยในสถานที่ทำงานโดยการตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยของผู้ปฏิบัติงานผ่านการบูรณาการปัญญาประดิษฐ์เข้ากับระบบโทรทัศน์วงจรปิด ผ่านกระบวนการตรวจจับวัตถุด้วยชุดแบบจำลองตระกูล YOLO (You Only Look Once) โดยงานวิจัยนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองเวอร์ชันล่าสุด ได้แก่ YOLOv10 และ YOLOv11 บนแพลตฟอร์มทั้ง CPU และ GPU โดยพิจารณาทั้งในด้านความแม่นยำในการตรวจจับและความเร็วในการประมวลผล จากแบบจำลองที่ทดสอบ พบว่า แบบจำลองสามารถประมวลผลได้สูงสุดถึง 454.52 เฟรมต่อวินาที บน GPU และ 34.01 เฟรมต่อวินาที บน CPU ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับระบบโทรทัศน์วงจรปิดแบบเรียลไทม์ ในด้านความแม่นยำ YOLOv11n ให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (mAP@50) เท่ากับ 98.3% สำหรับการตรวจจับหมวกนิรภัย และ 96.6% สำหรับการตรวจจับศีรษะ รวมถึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการจำแนกประเภท โดยมีค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าการเรียกคืน (Recall) เท่ากับ 85.76% และ 96.98% สำหรับคลาสศีรษะ และ 93.02% และ 96.56% สำหรับคลาสหมวกนิรภัยตามลำดับ ผลการทดลองยืนยันถึงประสิทธิภาพและความสมดุลของแบบจำลองในการจำแนกระหว่างผู้ที่สวมและไม่สวมหมวกนิรภัย ซึ่งสนับสนุนศักยภาพของแบบจำลองนี้ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับระบบตรวจสอบความปลอดภัยที่มีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV), YOLO, การตรวจจับหมวกนิรภัย, หน่วยประมวลผลกลาง, หน่วยประมวลผลกราฟิก, จำนวนเฟรมต่อวินาที

¹ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้แต่ง, อีเมล: phunsakt@ku.th

I. INTRODUCTION

In modern times, workplace safety in industrial environments has become increasingly critical due to the high incidence of accidents involving workers over the years [1] - [2]. One key safety measure is requiring workers to wear Personal Protective Equipment (PPE) to ensure their safety in any environment where workers are exposed to hazards that can cause injury or illness such as construction sites. Recently, advancements in computer vision technology [3] have been applied to worker safety in various scenarios [4] - [7], particularly for detecting whether workers are properly equipped with the necessary safety gear in designated work areas. This study specifically explores the use of the latest YOLO model versions for such safety-related tasks. YOLO models are well known for their superior speed and efficiency compared to other object-detection algorithms [8], making them particularly suitable for real-time safety monitoring systems.

While previous studies have applied YOLO to safety-related tasks [5], this study focused on evaluating the performance of the latest YOLO models—YOLOv10 and YOLOv11 (in both nano and extra-large variants)—for potential use in workplace safety applications. Instead of implementing a physical system, we conceptually adopted a CCTV-based configuration as described in [9] - [10] and assessed the models on both CPU and GPU platforms to examine whether their accuracy and frame rate were suitable for practical deployment. The goal was to determine whether CPU-based inference, which offered a significantly lower cost than GPU-based systems, could still deliver acceptable performance in real-time safety monitoring. If acceptable speed and accuracy can be maintained without GPUs [4] - [7], this could enable more cost-effective system design, particularly in selecting appropriate servers and hardware for specific environments.

II. BACKGROUND

1. YOLO (You Only Look Once)

YOLO, first introduced by J. Redmon et al. [11], is a family of single-stage deep learning models for object detection. Unlike two-stage detectors that first generate region proposals and then classify them, YOLO performs all tasks in a single forward pass. It predicts the bounding box coordinates, an objectness score (indicating the likelihood that an object is present), and the class probabilities for each detected object. This approach treats object detection as a single regression problem. Early versions of YOLO used a fixed grid structure (7×7 in YOLOv1), where each grid cell was responsible for predicting a few boxes. Later versions improved performance by introducing anchor boxes, multi-scale features, and anchor-free detection heads. Most versions used a technique called Non-Maximum Suppression (NMS) to remove overlapping boxes, but the newest versions—such as YOLOv10 and YOLOv11—replace NMS with end-to-end strategies that still follow the same "look once" principle.

YOLO is known for three main strengths: real-time speed, simple and unified architecture, and strong accuracy. A recent benchmark comparing YOLOv1 through YOLOv11 shows steady improvements in detection accuracy (mAP), processing speed, and efficiency. These developments are clearly illustrated in the Figure 1. titled Evolution of YOLO model versions, adapted from N. Jegham et al. [12]. Because of its speed, open-source availability, and ease of use, YOLO is widely used in both research and real-world applications that require fast and accurate object detection. This work focused on the most recent versions—YOLOv10 and YOLOv11—in both nano (-n) and extra-large (-x) variants, offering a practical comparison between lightweight and high-performance models. YOLOv10 and YOLOv11 are the latest versions in the YOLO family, incorporating architectural improvements that further enhance detection performance, particularly in terms of speed and efficiency.

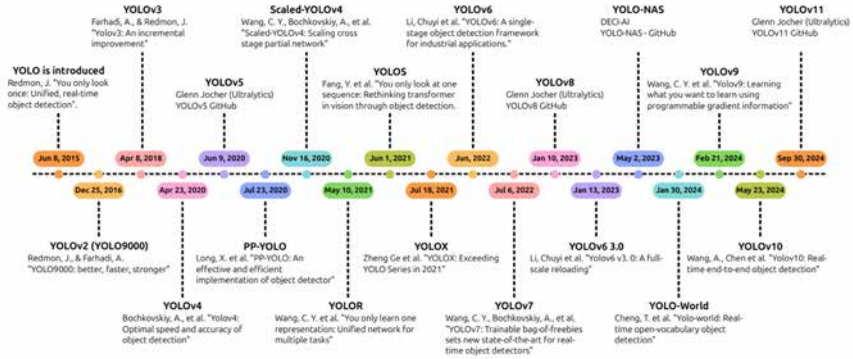


Fig.1 Evolution of YOLO model versions, adapted from N. Jegham *et al.* [12].

2. Model Evaluation

This study evaluated the model's performance using four metrics derived from the confusion matrix [13] - [14]. Let TP , FP , and FN denote the number of true positive (correct positive prediction), false positive (incorrect positive prediction), and false negative (incorrect negative prediction) samples, respectively. The definitions of these metrics are as follows:

- **Precision** measures the accuracy of positive predictions (ranging from 0 to 1) and is calculated with Equation (1).

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

- **Recall** measures the accuracy of predicting actual positive samples (ranging from 0 to 1) and is calculated with Equation (2).

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

- **Average Precision (AP)** measures the area under the precision-recall (PR) curve (ranging from 0 to 1) and is calculated using Equation (3).

$$AP = \int_0^1 p(r)dr \quad (3)$$

where p and r are precision and recall, respectively.

- **Mean Average Precision (mAP)** measures the average of the Average Precision (AP) scores across all classes. **mAP@50** refers to mAP evaluated at a 50%

overlap threshold between predicted and ground truth bounding boxes, and it is a commonly used metric for assessing the accuracy of object detection algorithms.

3. Benchmark Frame Rate in CCTV Systems

This section discusses the relevance of processing speed in CCTV systems, referencing prior works that have proposed cost-effective solutions using Raspberry Pi devices [9] - [10]. In particular, we focused on the system developed by A. Kurniawan *et al.* [10], which employed a Raspberry Pi as a server and is conceptually illustrated in Figure 2. This Raspberry Pi-based CCTV system achieved frame rates ranging from 10 to 30 frames per second (fps), depending on the resolution. We later referred to this frame rate range as a practical benchmark for real-time or near-real-time CCTV applications in constrained environments.

However, when considering AI-powered applications, the Raspberry Pi may not be suitable due to its limited computational power, restricted memory, and lack of dedicated AI accelerators such as GPUs or TPUs, which are essential for efficiently handling complex models and high-speed data processing [15]. Therefore, in this study, we explored the feasibility of using the same CCTV system while replacing the Raspberry Pi-based server with CPU- and GPU-based servers for object detection tasks. Our objective was to evaluate the performance and processing speed (in fps)

of various YOLO algorithms on these alternative computing platforms, using the Raspberry Pi’s frame rate range as a reference constraint.



Fig. 2 Conceptual illustration of a CCTV camera system, adapted from A. Kurniawan *et al.* [10].

4. Model scaling

Model scaling [8] refers to the process of adjusting the size of a deep learning model by modifying parameters such as **depth** and **width**, in order to tailor the model to specific resource constraints and performance requirements. In the case of YOLO, model scaling primarily involves two parameters.

- **Depth Multiple** adjusts the number of layers in the model to increase or decrease its depth.

- **Width Multiple** adjusts the number of channels in each layer to increase or decrease its width.

By tuning these parameters, YOLO can be scaled to create models of different sizes according to task requirements. For instance, smaller models may offer faster computational speeds, while larger models can provide improved accuracy. The YOLO family includes several model variants, each with different scaling configurations.

III. METHODOLOGY

1. Data Preparation

The dataset used in this study is the publicly available Hard Hat Workers Dataset [16], which includes annotated images of people with and without helmets. The annotations were prepared using two class labels: class 0 for heads without helmets, and class 1 for heads with helmets. Example images from the dataset are shown in Figure 3.

The training and testing processes were conducted using Google Colab [17], which provides access to a variety of CPU and GPU configurations as shown in Figure 4. This study aims to assess the performance of different hardware types—both in terms of detection accuracy and inference speed (frame rate)—to determine whether cost-effective CPU-based deployment is feasible for real-time safety monitoring.



Fig. 3 Sample images used for data preparation, including individuals with and without helmets. To protect personal privacy, certain details in the images have been censored.

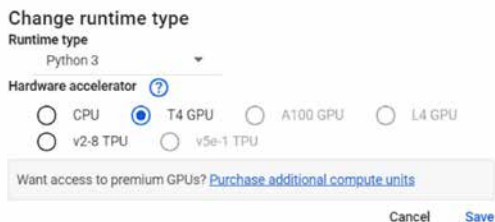


Fig. 4 Hardware accelerators available on Google Colab, including various CPU and GPU configurations used in this study.

The tested GPU models included NVIDIA A100 and NVIDIA T4 [18], while the CPU models included an Intel Xeon processor (CPU-Xeon) [19] and an AMD EPYC processor (CPU-AMD) [20]. These setups were evaluated to simulate their use as potential server-side processing units for a CCTV-based safety system running the YOLO model.

2. Model Training

After data preparation, a subset of the labeled dataset was used to train object detection models. In total, 4,858 images were used for training and 1,464 images for validation. The validation set contained 1,505 labeled instances of people without helmets and 4,021 labeled instances of people wearing helmets. This study evaluated four YOLO models to compare their performance in terms of speed and accuracy. The selected models included YOLOv10n, YOLOv10x, YOLOv11n, and YOLOv11x. These variants differed in model scale, specifically in their depth and width multipliers, which controlled the architecture's depth and width, respectively. All images used for training had a resolution of 640x640 pixels. The Nano models (YOLOv10n and YOLOv11n) were designed for low-resource environments, offering faster inference and smaller model size, but typically with lower accuracy. In contrast, the Extra-Large models (YOLOv10x and YOLOv11x) offered higher

detection accuracy but required more computational resources and run at slower speeds. All training was performed using the Ultralytics YOLO implementation in Python [21].

3. Model Testing

After training the four models—YOLOv10n, YOLOv10x, YOLOv11n, and YOLOv11x—we evaluated their performance using a separate test dataset to ensure no overlap with the training or validation data [12]. This helped to maintain the integrity of the evaluation and avoids overfitting. The test set consisted of 1,812 images, containing a total of 6,840 labeled instances, including 1,788 examples of people not wearing helmets (class 0) and 5,052 examples of people wearing helmets (class 1).

The goal of testing was to assess each model's accuracy and inference speed (frame rate) in object detection. All test images had a resolution of 640 x 640 pixels, consistent with the training process.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

1. Training Results

All four models—YOLOv10n, YOLOv10x, YOLOv11n, and YOLOv11x—were trained for 100 epochs. The original training dataset was split into two mutually exclusive subsets for model training and validation during the training process. The results showed that all models achieved comparable performance, with mAP@50 stabilizing at approximately 97–98%. Examples of the training performance of the YOLOv11n model are illustrated in Figure 5.

During the validation phase, all YOLO models demonstrated high detection accuracy. In many cases, the confidence scores of correctly detected objects ranged from 80% to 90%. Representative validation results are shown in Figure 6.

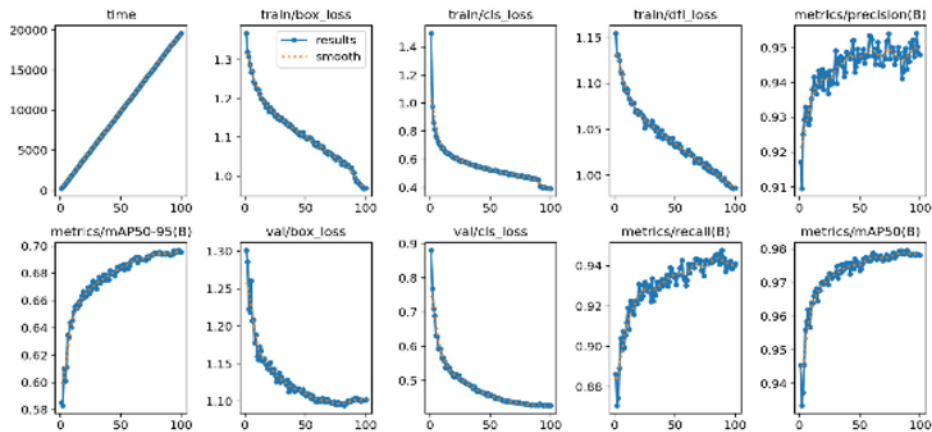


Fig. 5 Example training performance of the YOLOv11n model over 100 epochs, including loss, mAP@50, and other evaluation metrics.



Fig. 6 Example output from the YOLOv11n model detecting individuals wearing and not wearing helmets. To protect personal privacy, certain details in the image have been censored.

2. Test Results

The testing results for both YOLOv10 and YOLOv11 models are summarized in Tables I and II. The mAP@50 values are very similar across all variants, with approximately 96-97% for head detection and 98-99% for helmet detection. This also indicates that model scaling (Nano vs. Extra-Large) has little impact on detection accuracy.

In contrast, inference speed differs significantly depending on the model size. As

expected, the Nano variants (YOLOv10n and YOLOv11n) run substantially faster than their Extra-Large counterparts across both CPU and GPU platforms. Notably, when running on CPUs, the Nano models achieved 21-34 frames per second (FPS)—a frame rate sufficient for many CCTV camera applications, such as the example described in Section II-3. These results suggest that CPU-based deployment can be a viable and cost-effective solution for real-time safety monitoring, especially in environments with limited computational resources. Using GPUs in such cases may represent an unnecessary use of resources.

Further insight is provided by the confusion matrix for the YOLOv11n model, shown in Figure 7. The model correctly detected 1,734 out of 1,788 head instances and 4,878 out of 5,052 helmet instances. This corresponds to a precision of 85.76% (head) and 93.02% (helmet), a recall of 96.98% (head) and 96.56% (helmet), and F1-scores of 91.02% (head) and 94.76% (helmet), respectively. Interestingly, misclassifications between head and helmet objects were relatively low, while most errors were due to missed detections or false positives involving the background.

V. CONCLUSION

YOLOv11 demonstrated slightly higher accuracy than YOLOv10 across all test scenarios. For head detection, YOLOv11 achieved mAP@50 values between 0.966 and 0.968, compared to 0.961

for YOLOv10. For helmet detection, both models performed similarly well, with mAP@50 values ranging from 0.981 to 0.986, indicating consistently strong detection capabilities.

TABLE I. Testing Results for YOLOv10n and YOLOv10x models (Nano and Extra-Large variants) across Various Hardware Platforms

Model	Hardware accelerator	mAP@50 (Head)	mAP@50 (Helmet)	Speed (FPS)
YOLOv10n	GPU-A100	0.961	0.981	454.52
	GPU-L4			416.71
	GPU-T4			169.51
	CPU-Xeon			30.96
	CPU-AMD			21.55
YOLOv10x	GPU-A100	0.961	0.982	185.20
	GPU-L4			46.95
	GPU-T4			25.58
	CPU-Xeon			2.256
	CPU-AMD			1.447

TABLE II. Testing Results for YOLOv11N and YOLOv11X Models (Nano and Extra-Large variants) across Various Hardware Platforms

Model	Hardware accelerator	mAP@50 (Head)	mAP@50 (Helmet)	Speed (FPS)
YOLOv11n	GPU-A100	0.966	0.983	384.62
	GPU-L4			344.83
	GPU-T4			158.73
	CPU-Xeon			34.01
	CPU-AMD			25.77
YOLOv11x	GPU-A100	0.968	0.986	169.49
	GPU-L4			44.84
	GPU-T4			21.28
	CPU-Xeon			2.39
	CPU-AMD			1.31

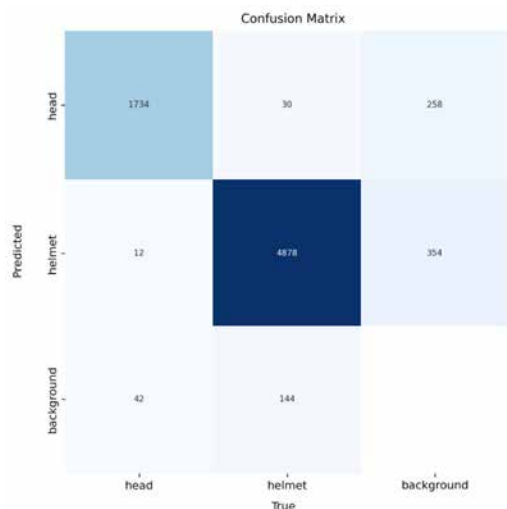


Fig. 7 Confusion matrix for the YOLOv11n model evaluated on the test dataset. Ground-truth classes include only head and helmet. The “background” row represents missed detections (i.e., true head or helmet objects that were not detected), while the “background” column represents false positives—predicted objects that do not correspond to any labeled object. Precision and recall are reported only for the head and helmet classes, as background is not an annotated class.

In terms of inference speed, the GPU-A100 delivered the highest performance, with YOLOv10n reaching 454.52 FPS and YOLOv11n achieving 384.62 FPS. Other GPUs, such as the T4 and L4, provided lower but still acceptable frame rates for many real-time applications. In contrast, CPUs—including Intel Xeon and AMD EPYC—produced significantly slower speeds, with Xeon achieving 31–34 FPS and AMD 21–26 FPS. Despite the speed advantage of GPUs, CPU-based deployment remains a cost-effective and practical alternative—especially for CCTV monitoring systems. Notably, Nano-scaled YOLO models on CPUs deliver detection accuracy comparable to their GPU-based counterparts, making them suitable for resource-constrained environments where cost-efficiency is prioritized over maximum processing speed.

VI. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to the Research & Development Department, Defence Technology Institute (DTI), Nonthaburi, Thailand, for their invaluable support and resources, which played a vital role in the success of this research. Special thanks are extended to the Director and members of the research division at DTI for their guidance and encouragement throughout the project. The authors also gratefully acknowledge the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, for their technical assistance, expertise, and collaboration, which were instrumental in achieving the objectives of this study. Finally, the authors thank all individuals who contributed to this research, including those not mentioned by name, for their support and encouragement throughout the project.

VII. REFERENCES

- [1] CBC News. “Surveyor Killed in Quebec Road Construction Accident.” CBC.ca. <http://www.cbc.ca/news/canada/story/2011/09/02/worker-death-chateauguay.html> (accessed Aug. 3, 2013).
- [2] CBC News. “3 Most Dangerous Job Sectors in Canada.” CBC.ca. <http://www.cbc.ca/news/canada/story/2012/04/25/f-dangerous-jobs.html> (accessed Aug. 3, 2013).
- [3] A. Voulodimos, N. Doulamis, A. Doulamis, and E. Protopapadakis, “Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,” *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2018, no. 1, 2018, doi: 10.1155/2018/7068349.
- [4] M. - W. Park, N. Elsafty, and Z. Zhu, “Hardhat-wearing detection for enhancing on-site safety of construction workers,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 141, no. 9, p. 04015024, 2015, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000974.
- [5] E. Wanlin, Z. Yang, and J. Yu, “Detection and Recognition of Personal Protection Equipment Wearing Based on an Improved YOLOv5 Algorithm,”

- in *2023 4th Int. Symp. Comput. Eng. Intell. Commun. (ISCEIC)*, Nanjing, China, 2023, pp. 229 - 232, doi: 10.1109/ISCEIC59030.2023.10271227.
- [6] S. Chen, W. Wang, Y. Ouyang, H. Zhu, T. Ji, and W. Tang, "Detection of Safety Helmet Wearing Based on Improved Faster R-CNN," in *2020 Int. Joint Conf. Neural Netw. (IJCNN)*, Glasgow, UK, Jul. 2020, pp. 1 - 7, doi: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207574.
 - [7] J. Hu, X. Gao, H. Wu, and S. Gao, "Detection of Workers Without Helmets in Videos Based on YOLO V3," in *2019 12th Int. Congr. Image Signal Process., Biomed. Eng. Inform. (CISP-BMEI)*, Oct. 2019, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966045.
 - [8] M. Tan, R. Pang, and Q. V. Le, "EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection," in *2020 IEEE/CVF Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. (CVPR)*, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 10781 - 10790, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.01079.
 - [9] E. Rohadi *et al.*, "Internet of Things: CCTV Monitoring by Using Raspberry Pi," in *2018 Int. Conf. Appl. Sci. Technol. (ICAST)*, Oct. 2018, pp. 454 - 457, doi: 10.1109/ICAST1.2018.8751612.
 - [10] A. Kurniawan, A. Ramadlan, and E. M. Yuniarno, "Speed Monitoring for Multiple Vehicle Using Closed Circuit Television (CCTV) Camera," in *2018 Int. Conf. Comput. Eng. Netw. Intell. Multimedia (CENIM)*, Surabaya, Indonesia, Nov. 2018, pp. 88 - 93, doi: 10.1109/CENIM.2018.8710854.
 - [11] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," in *2016 IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. (CVPR)*, Jun. 2016, pp. 779 - 788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
 - [12] N. Jegham, C. Y. Koh, M. F. Abdelatti, and A. Hendawi, "Evaluating the Evolution of YOLO (You Only Look Once) Models: A Comprehensive Benchmark Study of YOLO11 and Its Predecessors," 2024, arXiv:2411.00201.
 - [13] S. Visa, B. Ramsay, A. Ralescu, and E. van der Knaap, "Confusion Matrix-based Feature Selection," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 710, pp. 120 - 127, 2011.
 - [14] A. Subasi, *Practical Machine Learning for Data Analysis Using Python*. Academic Press, 2020.
 - [15] P. Steadman, P. Jenkins, R. S. Rathore, and C. Hewage, "Challenges in Implementing Artificial Intelligence on the Raspberry Pi 4, 5 and 5 with AI HAT," in *Int. Conf. Comput. Commun., Cybersecurity AI*, London, UK, 2024, pp. 147 - 157.
 - [16] Roboflow. "Hard Hat Workers Dataset." PUBLIC. ROBOFLOW.ai. <https://public.roboflow.ai/object-detection/hard-hat-workers> (accessed: Dec. 24, 2024).
 - [17] E. Bisong, "Google Colaboratory," in *Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform*, 1st ed. Berkeley, CA, USA: Apress, 2019, pp. 59 - 64, doi: 10.1007/978-1-4842-4470-8_7.
 - [18] NVIDIA, "GPU Positioning for Virtualized Compute and Graphics Workloads," NVIDIA, Tech. Rep. TB-09867-001_v03, Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: <https://images.nvidia.com/data-center/technical-brief-gpu-positioning-virtualized-compute-and-graphics-workloads.pdf>
 - [19] Intel, "Measuring Processor Power: TDP vs. ACP Whitepaper," Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/dam/doc/white-paper/resources-xeon-measuring-processor-power-paper.pdf>
 - [20] AMD, "5th Gen AMD EPYC Processor Architecture Whitepaper," Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/epyc-business-docs/white-papers/5th-gen-amd-epyc-processor-architecture-white-paper.pdf>
 - [21] Ultralytics. "Ultralytics YOLO11." DOCS. ULTRALYTICS.com. <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/> (accessed May 19, 2025).

การออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีควบคุมแบบโหมดเลื่อน

ปนัดดา โตชัยภูมิ¹ จิรศักดิ์ คำโสภา² ศิวะโรจน์ บำเพ็ญทาน² และ ณัฐพล ใจสำรวม^{1, 2*}

วันที่รับ 21 เมษายน 2568 วันที่แก้ไข 6 มิถุนายน 2568 วันที่ตอบรับ 18 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

การควบคุมโหมดเลื่อน (Sliding Mode Control: SMC) เป็นเทคนิคการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีความเสถียรสูงต่อความไม่แน่นอนของระบบและสัญญาณรบกวน มีการนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบระบบควบคุมการบิน (Flight Control) สำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ SMC ในสภาพแวดล้อมการจำลองด้วย MATLAB-Simulink โดยมุ่งเน้นการออกแบบตัวควบคุม เพื่อรักษาเสถียรภาพและติดตามเส้นทางการบินที่กำหนด ระบบควบคุมได้รับการออกแบบโดยการกำหนดสมการพลวัตของอากาศยานไร้คนขับ และการพัฒนาระบบควบคุมโหมดเลื่อนที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบจากความไม่แน่นอน นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองและวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบควบคุมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง SMC และวิธีควบคุมแบบดั้งเดิม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SMC มีความสามารถสูงในการรักษาเสถียรภาพของอากาศยานไร้คนขับ แม้ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบ

คำสำคัญ: การควบคุมโหมดเลื่อน, อากาศยานไร้คนขับ, การควบคุมการบิน, การจำลองอุปกรณ์โดรน, ระบบไม่เป็นเชิงเส้น

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² หน่วยวิจัยด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืนแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมล: nattaponj89@gmail.com, nattaponj@tu.ac.th

The Design and Control of Unmanned Aerial Vehicles Using the Sliding Mode Control Method

Panatda Tochaiyaphum¹ Jirasak Kamsopa²
Siwaroj Bumpenthan² and Nattapon Jaisumroum^{1, 2*}

Received 21 April 2025, Revised 6 June 2025, Accepted 18 June 2025

Abstract

Sliding Mode Control (SMC) is a nonlinear control technique known for its robustness against system uncertainties and external disturbances. It has been widely applied in the design of engineering's control system. This study presents an approach to designing a flight control system for Unmanned Aerial Vehicles or UAVs using SMC within the MATLAB-Simulink simulation environment. The primary focus was on designing a controller to maintain stability and track predefined flight trajectories. The control system was developed by formulating the UAV's dynamic equations and constructing an appropriate sliding mode to minimize the effects of uncertainties. Additionally, simulations and performance evaluations were conducted to compare SMC with conventional control methods. The simulation results demonstrated that SMC provides superior stability for UAVs, even in the presence of disturbances or parameter variations.

Keywords: Sliding Mode Control, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Flight Control, HIL Simulation, Nonlinear System

¹ Department of Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University.

² Thammasat University Research Unit in Application of Technology and Automation Systems in Industrial for Sustainability, Thammasat University

* Corresponding author, E-mail: nattaponj89@gmail.com, nattaponj@tu.ac.th

1. บทนำ

Quadcopter เป็นระบบที่มีความซับซ้อนสูง เนื่องจากเป็นระบบ ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) และ ไม่เสถียร (Unstable) ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยของอินพุตสามารถทำให้พฤติกรรมของระบบเปลี่ยน ไปอย่างมาก วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบ (Disturbances) แรงลมที่เปลี่ยนแปลงสามารถทำให้ Quadcopter เอียงหรือ สูญเสียการทรงตัว สัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์ เช่น IMU (Inertial Measurement Unit) เป็นต้น อาจทำให้เกิดการ คำนวณผิดพลาด การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุก (Payload) ส่งผลต่อจุดศูนย์ถ่วง ทำให้การควบคุมยากขึ้น

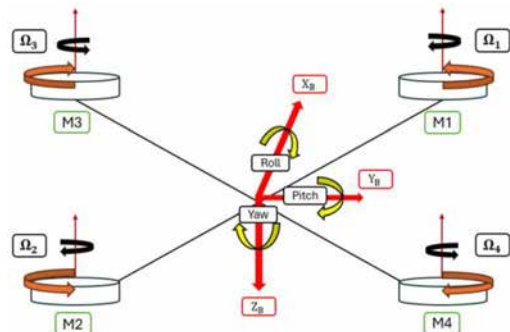
เทคนิคการควบคุมโหมดเลื่อน (Sliding Mode Control: SMC) เป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมแบบไม่เป็น เชิงเส้นที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีความทนทานต่อ ความไม่แน่นอนและสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบ SMC อาศัยหลักการ สร้างพื้นผิวโหมดเลื่อน (Sliding Surface) ที่ช่วยให้ระบบ สามารถเข้าสู่สถานะสมดุลและรักษาสถานะนั้นไว้ได้ แม้จะมี ความผันแปรของระบบ

จากการศึกษาของ C. Cömert และ C. Kasnakoglu [1] พบว่าแม้ SMC จะมีประสิทธิภาพสูงในการติดตาม ค่าอ้างอิงและสามารถตอบสนองได้เร็วกว่า PID แต่ยังคง มีปัญหา Chattering ที่เกิดจากลักษณะของการควบคุม แบบไม่ต่อเนื่อง งานของพวกเขาก็แสดงให้เห็นว่า PID มีความเสถียรมากในช่วง Steady-state แต่ไม่สามารถรับมือ กับ Disturbance ได้ดีเท่ากับ SMC จึงมีข้อเสนอให้ผสาน แนวทางทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ซึ่งสอดคล้องกับ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการเปรียบเทียบ SMC และ PID อย่างเป็นระบบทั้งในด้านเสถียรภาพและความทนทาน และเสนอทางเลือกในการพัฒนา Controller ที่เหมาะสม กับระบบอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles) หรือ UAV ภายใต้เงื่อนไขจริง

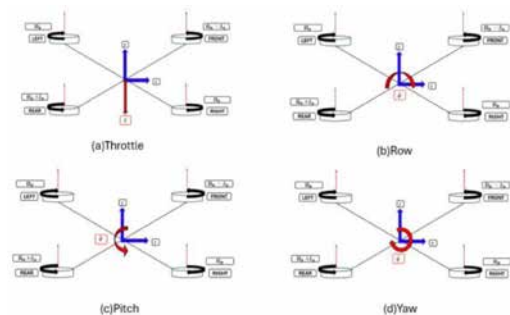
งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบ ระบบควบคุมการบินสำหรับ UAV โดยใช้ SMC ภายใน สภาพแวดล้อมการจำลองของ Simulink โดยมุ่งเน้น การพัฒนาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ SMC เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม ผลลัพธ์ จากการจำลองจะถูกนำมาใช้เพื่อประเมินความสามารถ ของ SMC ในการรักษาเสถียรภาพและติดตามเส้นทางการบิน ภายใต้สภาวะที่มีความไม่แน่นอน

2. หลักการและไดนามิกของควอดคอปเตอร์

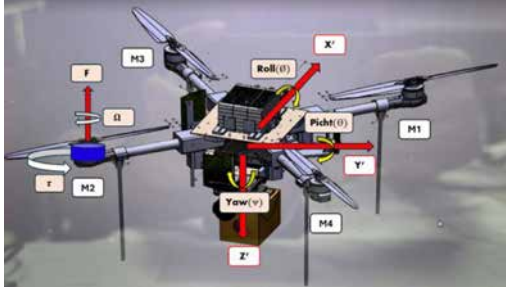
Quadcopter เป็นเครื่องบินที่มี 6 องศาของอิสระ (6-DOF) โดยมีสี่ใบพัดจัดเรียงในรูปแบบตั้งฉากกัน การเคลื่อนไหวยและการทรงตัวจะควบคุมโดยการปรับ ความเร็วและทิศทางของใบพัดโดยการควบคุมจะมี 4 ประเภท การเคลื่อนไหวย ได้แก่ ความสูง (Altitude) การหมุน ตามแกนข้าง (Pitch) การหมุนตามแกนแนวนอน (Roll) และการหมุนตามแกนตั้ง (Yaw) ตามรูปที่ 1 - 3 และสมการ ที่ (1) - (3) โดยสามารถกำหนดค่าการหมุน (Roll, Pitch, Yaw) และความเร็วเชิงมุมโดยใช้กรอบพิกัดที่ยึดกับโลก (Earth-fixed Frame: E) ในขณะที่การเร่งเชิงเส้น จะถูกกำหนดโดยใช้กรอบพิกัดที่ยึดกับตัวลำ (Body-fixed Frame: B) [2] - [3]



รูปที่ 1 Simple quad-copter design



รูปที่ 2 Quadcopter movement principles



รูปที่ 3 Degree of Freedom

x y z หมายถึง ตำแหน่งในแกน $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ คือความเร็วเชิงมุม (Angular velocities) ϕ, θ, ψ คือมุม Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ คือค่าความเร็วเชิงมุม ไดนามิกของควอดคอปเตอร์ ถูกแสดงโดยใช้สมการนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler translational and rotational dynamics formulation) [4] - [5]

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{1}{m}[(\sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi)(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + K_1 \cdot x' \cdot |x'|] \\ \ddot{y} = -\frac{1}{m}[(-\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi)(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + K_1 \cdot y' \cdot |y'|] \\ \ddot{z} = -\frac{1}{m}[(\cos\phi\cos\theta)(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + K_1 \cdot z' \cdot |z'|] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{p} = \frac{1}{J_x} \left[\frac{\sqrt{2}}{2} l(T_2 + T_3 - T_1 - T_4) - qr(J_z - J_y) - K_2 \cdot p \cdot |p| \right] \\ \dot{q} = \frac{1}{J_y} \left[\frac{\sqrt{2}}{2} l(T_1 + T_3 - T_2 - T_4) - pr(J_x - J_z) - K_2 \cdot q \cdot |q| \right] \\ \dot{r} = \frac{1}{J_z} \left[(Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4) - pq(J_y - J_x) - K_2 \cdot r \cdot |r| \right] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi} = p + q \cdot \tan\theta\sin\phi + r \cdot \tan\theta\cos\phi \\ \dot{\theta} = q \cdot \cos\phi - r \cdot \sin\phi \\ \dot{\psi} = q \frac{\sin\phi}{\cos\phi} + r \frac{\cos\phi}{\sin\phi} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 ความสัมพันธ์ของแรงขับและแรงบิดของใบพัด

แรงดันจะทำงานตรงกันข้ามกับทิศทางของความเร็วของวัตถุ ซึ่งทำให้มีเครื่องหมายลบอยู่ในสมการ (4), (5) เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ที่เชิงเส้น แรงดันในการหมุนจะต้านทานการหมุนของวัตถุ ซึ่งทำให้มีเครื่องหมายลบในสมการ (14) [6] - [7]

$$F_{drag} = -k_1 \cdot v \cdot |v| \quad (4)$$

$$M_{drag} = -k_2 \cdot \omega \cdot |\omega| \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tau_{1-4} &= T_{max} \cdot v_{1-4} \\ Q_{1-4} &= Q_{max} \cdot v_{1-4} \end{aligned} \quad (6)$$

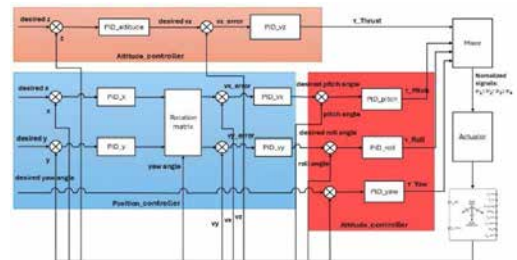
โดย v_{1-4} เป็นสัญญาณอินพุตของมอเตอร์

$$\tau_T = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4T_{max}} \quad (6)$$

โดยใช้แรงขับ T_{1-4} และแรงบิดด้าน Q_{1-4} เราสามารถกำหนดสัญญาณควบคุมมาตรฐาน τ_T, τ_P, τ_R และ τ_y ที่ส่งผลต่อแรงขับของ UAV ตามลำดับสมการ (6) - (8)

desired z, desired x, desired y, และ desired yaw angle เป็นค่าเป้าหมายที่ต้องการให้โดรนเคลื่อนที่ไปถึง *z, x, y, pitch angle, roll angle, และ yaw angle* เป็นค่าปัจจุบันของโดรนที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ ค่าเป้าหมายและค่าปัจจุบันจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันในคอนโทรลเลอร์ PID และ *Rotation matrix* จะแปลงค่าควบคุมตำแหน่ง (x, y) เป็นค่าความเร็วในแกน (vx, vy) เพื่อส่งไปยัง *Actuator* ซึ่งจะแปลงเป็นสัญญาณควบคุมมอเตอร์ *Thrust, pitch, roll, และ yaw* ดังรูปที่ 4

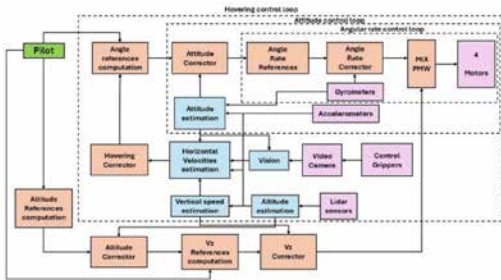
$$\begin{cases} \tau_R = \frac{T_2 + T_3 - T_1 - T_4}{4T_{max}} \\ \tau_P = \frac{T_1 + T_3 - T_2 - T_4}{4T_{max}} \\ \tau_y = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4}{4Q_{max}} \end{cases} \quad (8)$$



รูปที่ 4 The PID-rate controller diagram

รูปที่ 5 แสดงถึงระบบควบคุมการบินของโดรน โดยเริ่มต้นจาก Pilot ซึ่งเป็นผู้ควบคุมโดรนผ่านรีโมตคอนโทรล คำสั่งจากนักบินจะถูกส่งไปยัง Angle references computation เพื่อแปลงเป็นค่าอ้างอิง

มุมที่ต้องการ จากนั้น Attitude estimation จะประมาณค่าทัศนคติปัจจุบันของโดรน โดยใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ Gyrometers และ Accelerometers ค่าอ้างอิงมุมและค่าทัศนคติปัจจุบันจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ Attitude corrector เพื่อคำนวณค่าแก้ไข จากนั้น Angle rate references จะแปลงค่าแก้ไขทัศนคติเป็นค่าอ้างอิงอัตรามุม ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับอัตรามุมปัจจุบันใน Angle Rate corrector เพื่อคำนวณค่าแก้ไขอัตรามุม ค่าแก้ไขอัตรามุมจะถูกส่งไปยัง MIX PHW เพื่อผสมสัญญาณควบคุมและส่งไปยัง Motors เพื่อขับเคลื่อนใบพัดของโดรน ควบคุมการบินขึ้นลง (Hovering control loop) ซึ่งใช้ Altitude References computation, Altitude Corrector, Vertical speed estimation, Vz references computation, และ Vz Corrector เพื่อควบคุมระดับความสูงและความเร็วแนวตั้งของโดรน โดยใช้ข้อมูลจาก Lidar sensors นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น Horizontal Velocities estimation, Vision, Video camera, และ Control grippers เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมและการทำงานของโดรน



รูปที่ 5 หลักการควบคุมและการรวมข้อมูลเซนเซอร์

3. Sliding Mode Controller

3.1 การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (z Acceleration)

ความเร่งในแนวตั้งของควอดคอปเตอร์ ซึ่งถูกกำหนดโดยแรงขับ (Thrust) ดังสมการ (4) z คือ ตำแหน่งตามแนวตั้ง $\ddot{z}$ คือ ความเร่งเชิงเส้นตามแนวตั้ง U_1 คือ แรงขับรวมที่สร้างโดยใบพัดทั้งหมด m คือ มวลของโดรน, g ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, ϕ มุม Roll ของโดรน และ θ มุม Pitch ของโดรน ดังสมการที่ (9)

$$\ddot{z} = -\frac{U_1}{m}(\cos\phi\cos\theta) + g \quad (9)$$

Sliding surface นี้จะบ่งบอกว่าระบบอยู่ในสถานะที่ต้องแก้ไขข้อผิดพลาดหรือไม่ เมื่อค่าเข้าใกล้ศูนย์หมายความว่า โดรนเข้าสู่สภาวะสมดุล s_z คือ Sliding surface สำหรับแกน z , z_d คือ ตำแหน่งที่ต้องการในแนวตั้ง และ λ_z ค่าคงที่ของ Sliding mode control ดังสมการที่ (10)

$$s_z = (\dot{z}_d - \dot{z}) + \lambda_z(z_d - z) \quad (10)$$

Control input ของแกน z ดังสมการ (11) - (12) k_1, k_2 คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุม และ $\text{sign}(s_z)$ คือฟังก์ชัน Sign ที่กำหนดทิศทางของการควบคุม

$$U_1 = \frac{m}{\cos\phi\cos\theta}k_1s_z + k_2\text{sign}(s_z) + \lambda_z(\dot{z}_d - \dot{z}) + g - \ddot{z}_d \quad (11)$$

$$U_1 = 4T_{\max}\tau_T \quad (12)$$

สมการแรงขับ (Thrust) ที่แต่ละใบพัดต้องสร้าง τ_T คือ แรงขับสูงสุดของแต่ละใบพัด และ $T_{\max}$ คือ แรงขับสูงสุดที่ใบพัดสามารถสร้างได้ดังสมการที่ (13)

$$\tau_T = \frac{k_3}{4T_{\max}} \left[\frac{m}{\cos\phi\cos\theta}k_1s_z + k_2\text{sign}(s_z) \right] + k_4 \quad (13)$$

3.2 ความเร่งเชิงมุมของโดรน

I_x, I_y และ I_z คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน x, y และ z (ϕ, θ, ψ) คือมุม Roll, Pitch และ Yaw ($\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$) คืออัตราการหมุนรอบแกน U_{2-3} คือ ค่าอินพุตสำหรับควบคุมการหมุนดังสมการที่ (14)

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} L_z U_2 + (I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} \right) \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} L_z U_3 + (I_z - I_x) \dot{\phi} \dot{\psi} \right) \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} (U_4 + (I_x - I_y) \dot{\phi} \dot{\theta}) \end{cases} \quad (14)$$

Sliding surface สำหรับการหมุนของโดรน ($\lambda_\phi, \lambda_\theta, \lambda_\psi$) คือ ค่าคงที่ของ Sliding mode control สำหรับการหมุนดังสมการที่ (15)

$$\begin{cases} s_\phi = (\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + \lambda_\phi(\phi_d - \phi) \\ s_\theta = (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \lambda_\theta(\theta_d - \theta) \\ s_\psi = (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + \lambda_\psi(\psi_d - \psi) \end{cases} \quad (15)$$

Control input สำหรับการหมุนของโดรน ดังสมการที่ (16) - (18) โดยที่ Q_{max} คือ แรงบิดสูงสุด สำหรับโรเตอร์แต่ละตัว L คือ ความยาวแขนดังสมการที่ (19) และแรงบิดที่ใบพัดต้องสร้าง (Torque) ดังสมการที่ (20)

SMC altitude controller จะควบคุมระดับความสูงของโดรน โดยใช้ค่า desired z, SMC Z Controller ทำหน้าที่ควบคุมระดับความสูง โดยเปรียบเทียบค่า Desired z กับค่า z (ระดับความสูงปัจจุบัน) และคำนวณค่าควบคุมที่เหมาะสม Disturbance observer Z ทำหน้าที่ประมาณค่าการรบกวนภายนอกที่ส่งผลต่อระดับความสูงของโดรนและ Mixer จะแปลงเป็นสัญญาณควบคุมมอเตอร์

$$\begin{cases} U_2 = \frac{2}{\sqrt{2}L} \left[I_x [\ddot{\phi}_d + \lambda_\phi (\dot{\phi}_d - \dot{\phi})] + (I_z - I_y) \dot{\theta} \dot{\psi} \right] - \beta_\phi \text{sign}(s_\phi) \\ U_3 = \frac{2}{\sqrt{2}L} \left[I_y [\ddot{\theta}_d + \lambda_\theta (\dot{\theta}_d - \dot{\theta})] + (I_x - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \right] - \beta_\theta \text{sign}(s_\theta) \\ U_4 = I_z [\ddot{\psi}_d + \lambda_\psi (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + (I_y - I_x) \dot{\phi} \dot{\theta} - \beta_\psi \text{sign}(s_\psi) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} U_2 = -4T_{max} \tau_R \\ U_3 = -4T_{max} \tau_P \\ U_4 = 4Q_{max} \tau_Y \end{cases} \quad (17)$$

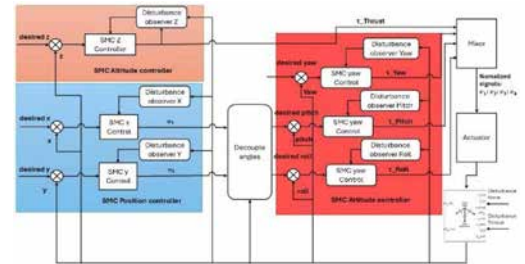
$$\begin{cases} U_2 = -2\sqrt{2}T_{max} \tau_R \\ U_3 = -2\sqrt{2}T_{max} \tau_P \\ U_4 = 2\sqrt{2}Q_{max} \tau_Y \end{cases} \quad (18)$$

$$Q_{max} = T_{max} Q_{max} \frac{\sqrt{2}}{2} L \quad (19)$$

$$\begin{cases} \tau_R = -\frac{1}{2\sqrt{2}T_{max}} \left[I_x \ddot{\phi}_d + I_x \lambda_\phi (\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + (I_z - I_y) \dot{\theta} \dot{\psi} - \beta_\phi \text{sign}(s_\phi) \right] \\ \tau_P = -\frac{1}{2\sqrt{2}T_{max}} \left[I_y \ddot{\theta}_d + I_y \lambda_\theta (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + (I_x - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} - \beta_\theta \text{sign}(s_\theta) \right] \\ \tau_Y = \frac{1}{2\sqrt{2}Q_{max}} \left[I_z \ddot{\psi}_d + I_z \lambda_\psi (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + (I_y - I_x) \dot{\phi} \dot{\theta} - \beta_\psi \text{sign}(s_\psi) \right] \end{cases} \quad (20)$$

SMC Position controller จะควบคุมตำแหน่งของโดรนในระนาบ XY โดยใช้ค่า desired x และ desired y ค่าควบคุมที่ได้จาก SMC Z Controller และค่าการรบกวนที่ประมาณได้จาก Disturbance observer X และ Y จะถูกส่งไปยังบล็อก Decouple angles เพื่อแปลงเป็นค่ามุม Desired pitch และ Desired roll

SMC attitude controller ควบคุมการเคลื่อนที่ของโดรน (pitch, roll, yaw) โดยใช้ค่า Desired pitch, Desired roll, และ Desired yaw, SMC yaw control, SMC pitch control และ SMC roll control ทำหน้าที่ควบคุมมุมแต่ละแกน โดยเปรียบเทียบค่ามุมที่ต้องการกับมุมปัจจุบัน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 The SMC controller diagram

4. Flight Control in MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูงในการจำลองระบบไดนามิกและการควบคุม ซึ่งสามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองโดรนในรูปแบบ 3 มิติ ได้อย่างแม่นยำ โดย Simulink ช่วยให้สามารถออกแบบ ทดสอบ และปรับแต่งตัวควบคุม (Controller) สำหรับโดรนได้อย่างสะดวก ไม่ว่าจะเป็นระบบควบคุมเสถียรภาพ (Stabilization) ระบบนำทาง (Navigation) หรือระบบหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง (Obstacle avoidance)

4.1 Simulation Setup

Initial conditions และ Parameters ของ UAV ในการออกแบบจะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

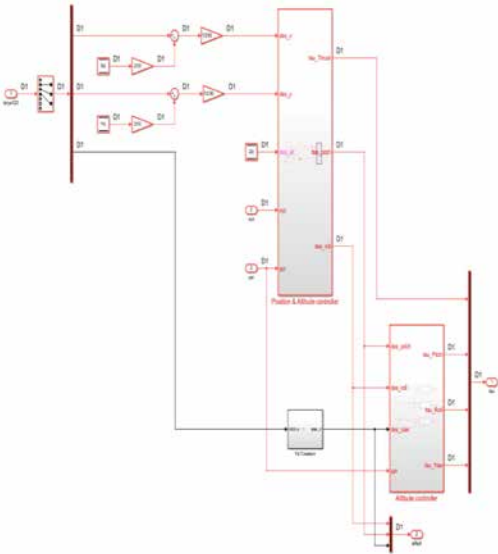
ตารางที่ 1 ค่าเริ่มต้นของการจำลอง

Parameter	Value	Unit
Mass	12	kg
Gravity	9.81	m/s ²
Arm Length	0.50	m
Inertia	0.005	Kg.m ²
Sampling time	0.01	s

Reference trajectory และ Desired trajectory เป็นส่วนของ Input/Reference ซึ่งการคำนวณค่า Disturbance แรงลมจำลองแบบสุ่มในช่วง -1 ถึง +1 โดยที่ Payload อาจเปลี่ยนแปลง ± 0.3 kg ในส่วนของ Measurement noise Gaussian noise ($\mu = 0$, $\sigma = 0.01$) บน Sensor ของ Attitude และ Position และค่า Control constraints จะกำหนด $T_{max} = \pm 2.5$ Nm, $T_{max} = 15$ N

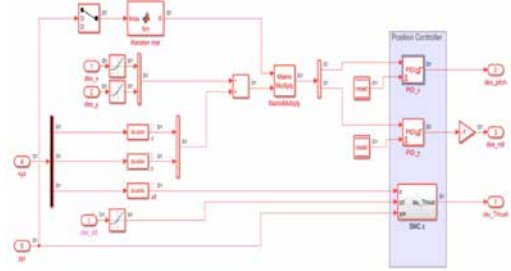
4.2 การออกแบบ Flight Controller

ระบบควบคุมโดรนในโหมด Position flight mode โดยใช้ตัวแปร x_d, y_d, z_d เป็นตำแหน่งเป้าหมาย และ xyz, pqr เป็นค่าตำแหน่งและมุมจริงจากเซนเซอร์ โครงสร้างประกอบด้วย Position & Attitude controller ที่คำนวณค่า $des_x, des_y, des_alt, des_pitch, des_roll, des_yaw$ และส่งไปยัง Attitude Controller เพื่อสร้างแรงบิด $\tau_{Thrust}, \tau_{Pitch}, \tau_{Roll}, \tau_{Yaw}$ สุดท้ายสัญญาณ τ จะถูกใช้เพื่อควบคุมให้โดรนบินตามตำแหน่งที่ต้องการดังรูปที่ 7 [8], [9]



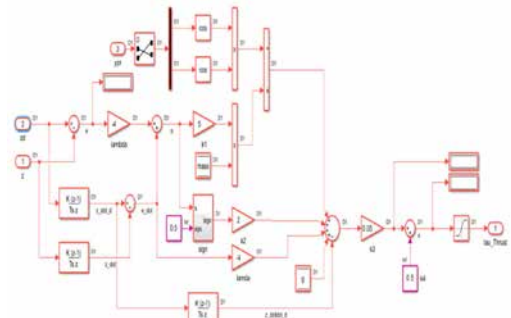
รูปที่ 7 Controller block

โครงสร้างของ Position control ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบโดยใช้ PID controllers และ SMC z ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 Position & Altitude controller

z, z_d เป็นตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งที่ต้องการ e, e_dot เป็นส่วนข้อผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็ว λ, s เป็นค่าตัวแปรสไลด์ k_1, k_2, k_3, k_4 เป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุม $mass, g$ เป็นค่ามวลและแรงโน้มถ่วง ค่าที่ผ่าน sign function และ cos (roll, pitch and yaw) ถูกใช้ปรับค่าแรงขับ τ_{Thrust} ดังสมการที่ (21) ตามรูปที่ 9



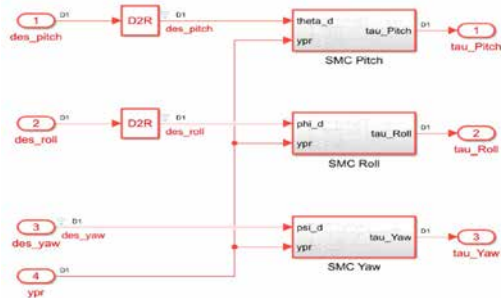
รูปที่ 9 SMC_z

$$\tau_{Thrust} = k \cdot \tanh(s_t) \quad (20)$$

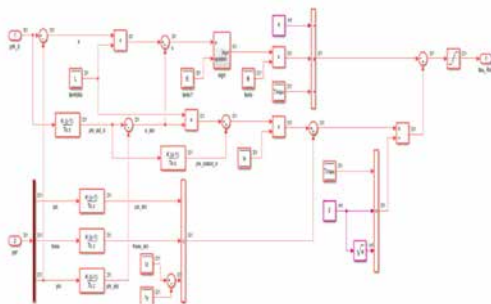
$des_pitch, des_roll, des_yaw$ คือ ค่ามุมที่ต้องการสำหรับการหมุนของวัตถุรอบแกน, D2R คือ แปลงค่ามุมจากองศาเป็นเรเดียน ซึ่งเป็นหน่วยวัดมุมที่ใช้ในระบบควบคุม $\tau_{Pitch}, \tau_{Roll}, \tau_{Yaw}$ คือ ค่าแรงบิดที่คอนโทรลเลอร์ SMC คำนวณได้ เพื่อให้วัตถุหมุนไปยังมุมที่ต้องการดังรูปที่ 10-13

PX4 UORB Read ซึ่งรับข้อมูลสถานะและข้อมูลควบคุมจากระบบ สัญญาณควบคุมเหล่านี้จะถูกนำไปประมวลผล โดยมีการตรวจสอบเงื่อนไขความปลอดภัยและเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ก่อนที่จะส่งไปยัง Mixer table ซึ่งจะแปลงค่าควบคุม ($\tau, Thrust, Pitch, Roll, Yaw$) ให้เป็นสัญญาณควบคุมมอเตอร์แต่ละตัว (Motor1, Motor2,

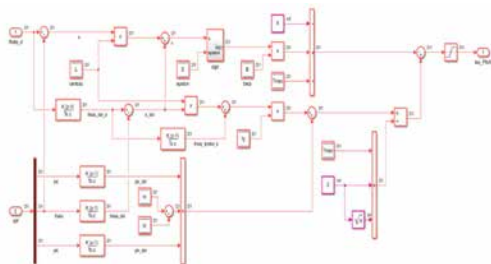
Motor3, Motor4) และ PX4 UORB Write ทำหน้าที่ส่งข้อมูลสถานะและข้อมูลควบคุมกลับไปยังระบบ PX4 ดังรูปที่ 14 [10] - [11]



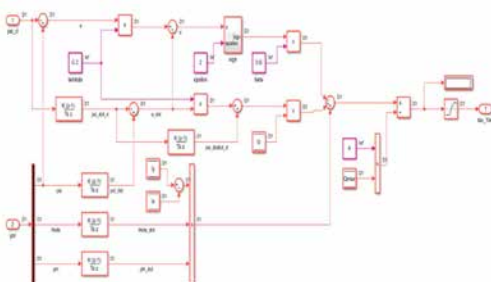
รูปที่ 10 Attitude controller



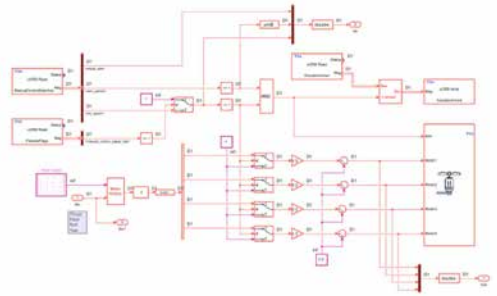
รูปที่ 11 SMC_Roll



รูปที่ 12 SMC_Pitch



รูปที่ 13 SMC_Yaw



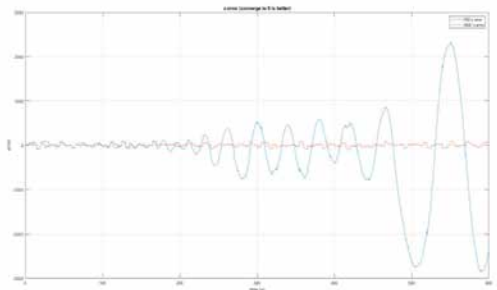
รูปที่ 14 Actuators

5. ผลการทดลอง

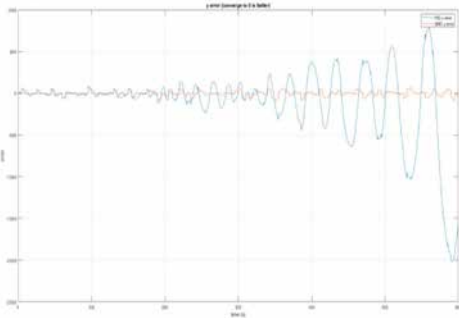
ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบข้อผิดพลาดระหว่าง SMC (Sliding mode control) error กับ PID (Proportional-Integral-Derivative) error ในการติดตามตำแหน่ง (Position tracking performance) ตามแกนต่าง ๆ (x, y, z และ altitude)

ข้อผิดพลาดในแกน x และ y PID error (สีส้ม) ดังรูปที่ 15 และ 16 มีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องแต่ช้า (exponential decay) มีการสั่นสะเทือนน้อยกว่าหรือมีความเรียบมากกว่าแสดงให้เห็นว่าระบบ PID สามารถลดข้อผิดพลาดได้ อาจใช้เวลาและมี Steady-state error ที่คงอยู่ SMC error (สีฟ้า) มีลักษณะการแกว่งที่รุนแรงกว่า PID ในช่วงเริ่มต้นของการติดตามความถี่และแอมพลิจูดของข้อผิดพลาดสูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงเปลี่ยนผ่าน มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว แต่มี Chattering หรือการสลับค่าที่เกิดจากโครงสร้างของ Sliding mode control

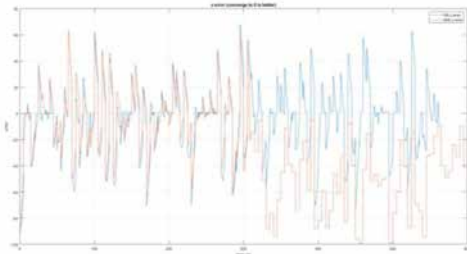
ข้อผิดพลาดในแกน z มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าและมีความถี่ต่ำกว่า ค่าความผิดพลาดที่เข้าสู่ใกล้ 0 มากกว่า และมีความเสถียรมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 17



รูปที่ 15 position tracking performance (x)

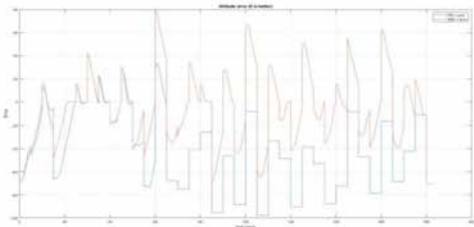


รูปที่ 16 position tracking performance (y)



รูปที่ 17 position tracking performance (z)

ข้อผิดพลาดในแกน Altitude PID error มีลักษณะที่ลดลงอย่างช้า ๆ และมีลักษณะการแกว่งที่น้อย ในส่วนของ SMC error แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงแบบรุนแรง และอาจมีอาการกระชากหรือสลับค่าบ่อยครั้ง (อาจเกิดจาก Chattering effect) ในบางจังหวะของ Altitude error, PID error อาจมี Steady-state error ที่ยังคงอยู่ แต่ SMC พยายามลด Error อย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 Altitude error

เมื่อเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ SMC และระบบ PID ในเชิงเสถียรภาพ (Stability) พบว่ามีค่า Overshoot น้อยกว่า และมี Settling time ที่สั้นกว่าในแกน z และ altitude ขณะที่ PID แสดงพฤติกรรมที่ Smooth แต่มี Steady-state error เล็กน้อยที่ยังคงอยู่ โดยเฉพาะในแกน x และ y

การทดสอบภายใต้ Disturbance จากแรงลมจำลอง 10% ของแรงขับสูงสุด พบว่า SMC สามารถรักษาท่าทางของ UAV ได้ภายใน ± 3 องศา ในขณะที่ PID แสดงการเบี่ยงเบนถึง ± 7 องศาในช่วงแรกของ Disturbance ก่อนจะค่อย ๆ กลับสู่ค่าอ้างอิง

6. สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative) Controller และ SMC ในการควบคุมตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยใช้การจำลองใน Simulink ผลการทดลองถูกประเมินผ่านข้อผิดพลาดของการติดตามตำแหน่ง (Position Tracking Error) ในแกน x, y และ Altitude ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การประเมินเปรียบเทียบ PID และ SMC

เกณฑ์ประเมิน	PID Controller	SMC Controller
Settling Time(s)	4.5 - 6.0	2.0 - 3.0
Overshoot (%)	ต่ำ (~5%)	ต่ำมาก (~2%)
Steady-State Error	คงอยู่เล็กน้อย	ไม่มี
ความไวต่อ Disturbance	สูง	ต่ำ
ความเรียบของการตอบสนอง	เรียบ (Smooth)	มี Chattering
ความทนทาน (Robustness)	ปานกลาง	สูง

PID Controller มีแนวโน้มให้การตอบสนองที่เรียบกว่า (Smooth) และมี Overshoot ที่ควบคุมได้ดี แต่ต้องใช้เวลาในการลดข้อผิดพลาดให้เป็นศูนย์ และมีความไวต่อ Disturbance มากกว่า

SMC Controller มีอัตราการลดข้อผิดพลาดที่เร็วกว่า และสามารถติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ได้แม่นยำกว่า โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความทนทานต่อ Disturbance สูงกว่า PID ทำให้ระบบสามารถรักษาความเสถียรได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม มีปัญหา Chattering ซึ่งเป็นลักษณะของการสั่นของสัญญาณควบคุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SMC มีความสามารถในการควบคุมที่ดีกว่า PID ในกรณีที่มี Disturbance เนื่องจากสามารถลด error ได้เร็วกว่าและรักษาความเสถียรได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม Hybrid PID-SMC เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด เพราะสามารถลดข้อผิดพลาดได้อย่างรวดเร็ว มีความเสถียรสูง และลดปัญหา chattering ของ SMC ได้เป็นอย่างดี ขณะที่ยังคงความทนทานต่อ Disturbance ได้ดีเทียบเท่ากับ SMC

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนตามสัญญาที่ 670201 รวมถึงคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้อำนวยความสะดวกทั้งในเรื่องสถานที่และสิ่งสนับสนุนต่างๆ และสาขาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนที่ได้ช่วยสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Cömert and C. Kasnakoglu, "Comparing and Developing PID and Sliding Mode Controllers for Quadrotor," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 194 - 199, May 2017.
- [2] MathWorks, "6DOF (Quaternion) Block," MathWorks Documentation, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.cn/help/aeroblks/6dofquaternion.html> (<https://www.mathworks.cn/help/aeroblks/6dofquaternion.html>)
- [3] X. Yu, L. Ding, and B. Yao, "Quad-Rotor Unmanned Helicopter Control via Novel Robust Terminal Sliding Mode Control Approach," *Optik*, vol. 125, no. 18, pp. 4946 - 4950, Sep. 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402614000898>
- [4] A. A. Elgohary, A. Ashry, A. Kaoud, M. Gomaa, M. Darwish, and H. Taha, "Hardware-in-the-loop Simulation of UAV Altitude Hold Autopilot," in *AIAA SCITECH 2022 Forum*, Jan. 2022, p. 1520.
- [5] M. Herrera, W. Chamorro, A. P. Gomez, and O. Camacho, "Sliding Mode Control: An Approach to Control a Quadrotor," in *APCASE 2015*, Quito, Ecuador, 2015, pp. 314 - 319, doi: 10.1109/APCASE.2015.62.
- [6] Y. Jing *et al.*, "PX4 Simulation Results of a Quadcopter with a Disturbance-Observer-Based and PSO-Optimized Sliding Mode Surface Controller," *Drones*, vol. 6, no. 9, p. 261, Sep. 2022.
- [7] Y. Jing, A. Mirza, R. Sipahi, and J. Martinez-Lorenzo, "Sliding Mode Controller with Disturbance Observer for Quadcopters; Experiments with Dynamic Disturbances and in Turbulent Indoor Space," *Drones*, vol. 7, no. 5, p. 328, May 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/5/328>
- [8] MathWorks, "HITL Simulink Plant Example," MathWorks Documentation, Accessed: 19-Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/uav/px4/ref/hitl-simulink-plant-example.html>
- [9] MathWorks, "Simulator Plant Model Example," MathWorks Documentation, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021b/supportpkg/px4/ref/simulator-plant-model-example.html>
- [10] MathWorks, "Configure Actuators Using QGroundControl," MathWorks Documentation, Accessed: Mar. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.cn/help/uav/px4/ug/configure-actuator-qgc.html>
- [11] R. W. Beard, "Quadrotor Dynamics and Control," Brigham Young University, Feb. 2008. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265825340_Quadrotor_Dynamics_and_Control

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ LRT และ YOLO สำหรับการแบ่งส่วนพื้นที่น้ำท่วมจากภาพกล้องวงจรปิด: กรณีศึกษาจังหวัดน่าน ประเทศไทย

วรากร เลื่องลือวุฒิ^{1,2} พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์^{2*} กิตติกร วิริยะศาสตร์¹
ชยชัย สุริยจิตติมา³ และ ปิยะรส มาลีเจริญ³

วันที่รับ 10 เมษายน 2568 วันที่แก้ไข 4 มิถุนายน 2568 วันตอบรับ 4 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการจำแนกพื้นที่น้ำท่วมจากภาพกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (Closed-Circuit Television หรือ CCTV) เพื่อการเฝ้าระวังน้ำท่วมในจังหวัดน่าน ประเทศไทย โดยใช้แบบจำลอง Likelihood Ratio Test (LRT) ภายใต้สมมติฐานการแจกแจงแบบ Gaussian ที่มีความแปรปรวนเท่ากันระหว่างคลาส (Equal-Variance Gaussian Distribution) โดยใช้ค่าความเข้ม (Intensity) ของภาพ Grayscale เฉพาะในบริเวณที่สนใจ (Region of Interest หรือ ROI) สำหรับการจำแนกจุดภาพว่าเป็น “น้ำ” หรือ “ไม่ใช่ น้ำ” พร้อมเปรียบเทียบกับแบบจำลอง YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg ซึ่งเป็นเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ที่ได้รับความนิยม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง LRT ให้ค่า F1 Score เท่ากับ 0.84 ซึ่งใกล้เคียงหรือดีกว่าแบบจำลอง YOLO ทั้งสองเวอร์ชันที่ได้รับการฝึกจากข้อมูลต่างโดเมน (Domain adaptation) และมีความโดดเด่นด้านความเร็วในการประมวลผล โดยสามารถทำงานได้สูงถึง 679.54 เฟรมต่อวินาที บน CPU จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและต้องการประมวลผลแบบเรียลไทม์ แม้ว่า LRT จะให้ผลลัพธ์ที่ดีในบริบทของข้อมูลเฉพาะในพื้นที่ศึกษา แต่แบบจำลอง YOLO ยังคงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการ Generalize ภายใต้สถานการณ์ Domain shift ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในกรณีที่มีข้อมูลมีความหลากหลายหรือยังไม่แน่นอน งานวิจัยนี้จึงเสนอข้อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีโครงสร้างเรียบง่ายกับแบบจำลองเชิงลึก เพื่อสนับสนุนการพัฒนาแบบจำลองเฝ้าระวังน้ำท่วมที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับบริบทการใช้งานที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: การแบ่งส่วนภาพ, การจำแนกน้ำ, กล้องวงจรปิด, Likelihood Ratio Test (LRT), ภาพระดับสีเทา, บริเวณที่สนใจ, ระบบเรียลไทม์, การเรียนรู้เชิงลึก, You Only Live Once (YOLO)

¹ ส่วนงานวิศวกรรมการสื่อสารข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และเครือข่ายคอมพิวเตอร์, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ ส่วนงานวิศวกรรมระบบจำลองยุทธและเครื่องช่วยฝึกเสมือนจริง, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: phunsak.t@ku.ac.th

Performance Comparison of LRT and YOLO for Floodwater Segmentation from CCTV Images: A Case Study in Nan Province, Thailand

Warakorn Luangluewut^{1,2} Phunsak Thiennviboon^{2*} Kittakorn Viriyasatr¹
Chayayot Saerejittima³ and Piyarose Maleecharoen³

Received 10 April 2025, Revised 4 June 2025, Accepted 4 June 2025

Abstract

This research article presents an approach for detecting water-covered areas in closed-circuit television (CCTV) images to support flood surveillance in Nan Province, Thailand. The proposed method employed a Likelihood Ratio Test (LRT) model under the assumption of equal-variance Gaussian distributions between classes. Pixel intensities from grayscale images within a predefined Region of Interest (ROI) were used as input features to classify each pixel as either “water” or “non-water.” The LRT model was compared with two widely used deep learning-based segmentation models, YOLOv11n-seg and YOLOv11x-seg. Experimental results show that the LRT model achieved an F1 Score of 0.84. That was comparable to or better than the two YOLO variants trained using domain adaptation. Notably, LRT demonstrated a significant advantage in processing speed, reaching up to 679.54 frames per second (fps) on a CPU, making it highly suitable for real-time applications on resource-constrained systems. While the LRT model yielded strong performance within the specific context of the study area, the YOLO models exhibited better generalization capabilities under domain shift conditions. Therefore, YOLO models may be more appropriate for scenarios involving diverse or uncertain data characteristics. This research highlights a comparative perspective between simple-structured models and deep learning models, providing practical insights for the development of effective and context-appropriate flood surveillance systems.

Keywords: Image segmentation, Water classification, Closed-Circuit Television (CCTV), Likelihood Ratio Test (LRT), Grayscale images, Region of Interest (ROI), Real-time system, Deep Learning, You Only Live Once (YOLO)

¹ Data Communication Division, Defence Technology Institute

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³ Simulation Systems and Virtual Training Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: phunsak.t@ku.ac.th

1. บทนำ

ปัญหา น้ำท่วม เป็นหนึ่งในภัยพิบัติที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของประชาชน และเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างสูง การติดตามระดับน้ำอย่างต่อเนื่องและการวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแจ้งเตือนล่วงหน้าและการวางแผนบริหารจัดการภัยพิบัติอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบัน หน่วยงานราชการในประเทศไทยได้ติดตั้งกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (Closed-Circuit Television หรือ CCTV) ในหลายพื้นที่ ทำให้สามารถใช้ภาพจากกล้องเหล่านี้เป็นแหล่งข้อมูลต้นทุ่นสำหรับการตรวจจับพื้นที่น้ำ ควบคู่ไปกับการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่สามารถจำแนกพื้นที่น้ำออกจากพื้นผิวอื่นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการจำแนกพื้นที่น้ำจากภาพที่ได้จากกล้อง CCTV ในจังหวัดน่าน ประเทศไทย โดยใช้ค่าความเข้มของภาพแบบ Grayscale ภายในบริเวณที่สนใจ (Region of Interest หรือ ROI) [1] ร่วมกับแบบจำลอง Likelihood Ratio Test (LRT) ซึ่งพัฒนาภายใต้สมมติฐานการแจกแจงแบบ Gaussian ที่มีความแปรปรวนเท่ากัน (Equal-Variance Gaussian Distribution) [2] เพื่อจำแนกจุดภาพ (Pixel) แต่ละตำแหน่งให้อยู่ในคลาส “น้ำ” หรือ “ไม่ใช่ น้ำ” อย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการวิเคราะห์ภาพโดยใช้ ROI ช่วยลดความซับซ้อนของข้อมูล ลดความต้องการของชุดข้อมูลขนาดใหญ่ และเพิ่มความแม่นยำในการจำแนก ทั้งยังสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วบนอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด เช่น ระบบที่ใช้เพียงหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) เป็นต้น ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบเฝ้าระวังภัยพิบัติที่ต้องการการตอบสนองแบบเรียลไทม์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแนวทางที่นำเสนอ คณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง YOLO (You Only Look Once) [3] - [5] ซึ่งเป็นแบบจำลอง Deep Learning [6] ที่ได้รับความนิยมอย่างสูง

ในงานตรวจจับวัตถุ โดยเฉพาะเวอร์ชัน YOLOv11 ที่สามารถประมวลผลทั้งการตรวจจับและการแบ่งส่วนภาพ (segmentation) ได้ในขั้นตอนเดียว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Image Segmentation

Image Segmentation เป็นกระบวนการแบ่งภาพออกเป็นส่วนย่อย (Segments) โดยพิจารณาจากคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น สี ความสว่าง พื้นผิว หรือบริบทของภาพ เป็นต้น เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลในขั้นตอนถัดไป โดยมีเป้าหมายเพื่อจัดกลุ่มจุดภาพที่มีลักษณะหรือบริบทที่เกี่ยวข้องกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน และแยกออกจากจุดภาพที่มีลักษณะหรือบริบทแตกต่างกัน [7]

2.2 ภาพ Grayscale

ภาพ Grayscale [8] คือภาพดิจิทัลที่แสดงเฉพาะระดับความเข้มของแสง (Intensity) โดยไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับสี (Hue) หรือความอิ่มตัวของสี (Saturation) จุดภาพในภาพประเภทนี้จะมีค่าความสว่างอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 255 การแปลงภาพสี (RGB) ให้เป็นภาพ Grayscale สามารถทำได้โดยใช้สมการแบบเชิงเส้นดังสมการ (1)

$$\text{Grayscale} = (0.299 \times R) + (0.587 \times G) + (0.114 \times B) \quad (1)$$

โดยที่ R, G, และ B คือ ค่าความเข้มของจุดภาพในช่องสีแดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ 0.299, 0.587 และ 0.114 มาจากการแปลงค่าความสว่าง (Luminance) ตามมาตรฐาน ITU-R BT.601 [9]

ในงานวิจัยนี้ การแปลงภาพจาก RGB เป็นภาพ Grayscale ช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลองที่มีโครงสร้างเรียบง่าย และยังสามารถนำค่าความเข้ม (Intensity) ของจุดภาพในภาพไปใช้ในการจำแนกพื้นที่น้ำ และพื้นที่ที่ไม่ใช่น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในหัวข้อ 4.2

2.3 การจำแนกด้วยแบบจำลอง Likelihood Ratio Test (LRT)

ในทางสถิติ Likelihood Ratio Test (LRT) [2] เป็นวิธีการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) ที่ใช้เปรียบเทียบความเหมาะสม (Goodness-of-Fit) ของสองแบบจำลองเชิงสถิติ โดยพิจารณาสัดส่วนของค่า likelihood ระหว่างแบบจำลองที่มีสมมติฐานสองประเภท วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในงานจำแนกประเภท (Classification) โดยที่แต่ละประเภทหรือคลาส (Class) สามารถมองได้ว่าเป็นสมมติฐานหนึ่ง ดังนั้น LRT จึงสามารถถูกใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการจำแนกประเภท (Classification model) ได้

ในกรณีของการจำแนกประเภทแบบทวิภาค (Binary classification) แบบจำลอง LRT จะประเมิน Likelihood หรือความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional Probability Density Function) ของข้อมูลเข้า x ภายใต้แต่ละคลาส แล้วคำนวณอัตราส่วนของค่า Likelihood (Likelihood Ratio) ดังสมการ (2)

$$\Lambda(x) = \frac{p(x|C_1)}{p(x|C_0)} \underset{C_0}{\geq} \eta \quad (2)$$

โดยที่

x คือ ข้อมูลเข้า (Input) กำหนดให้มีค่าเป็นจำนวนจริง (Real number)

$\Lambda(x)$ คือ ค่า Likelihood ratio

$p(x|C_i)$ คือ ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของคลาส C_i สำหรับ $i \in \{0,1\}$

η คือ ค่า Threshold สำหรับการตัดสินใจ

หากสมมติว่า Likelihood ของแต่ละคลาสมีการแจกแจงแบบ Gaussian [10] – [11] ที่มีค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากัน (Equal-Variance Gaussian Distribution) จะได้ดังสมการ (3)

$$p(x|C_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

โดยที่ μ_i และ σ^2 คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของ Likelihood ของคลาสที่ i ($i \in \{0,1\}$) และค่าความแปรปรวน (Variance) ของทั้งสองคลาสตามลำดับ โดยการแทนค่า (3) ในสมการ (2) แล้วจัดรูปจะได้กฎการตัดสินใจที่พึ่งพาเพียงค่า x ดังสมการ (4)

$$x \underset{C_0}{\geq} T = \frac{2\sigma^2 \ln(\eta) + \mu_1^2 - \mu_0^2}{2(\mu_1 - \mu_0)} \quad (4)$$

นั่นคือ

หาก $x > T$ ให้จำแนกว่าอยู่ในคลาส C_1

หาก $x < T$ ให้จำแนกว่าอยู่ในคลาส C_0

หาก $x = T$ การตัดสินใจสามารถทำได้ตามความเหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้จะตัดสินใจให้ x อยู่ในคลาส C_1

ค่าคงที่ T นี้เรียกว่า Threshold ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยใช้เกณฑ์หลายรูปแบบ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงประจักษ์ ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้แนวทางเชิงประจักษ์ โดยกำหนดค่า Threshold ที่ให้ค่า F1 Score สูงสุดบนชุดข้อมูลฝึก ซึ่งถือเป็นการเลือก Threshold โดยใช้วิธี Metric-based Optimization แทนการใช้เกณฑ์ทางทฤษฎี เช่น Bayes criterion หรือ Neyman–Pearson Criterion เป็นต้น ดังจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.3

2.4 การจำแนกพื้นที่น้ำด้วยแบบจำลอง Deep learning

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการจำแนกพื้นที่น้ำและพื้นที่ที่ไม่ใช่น้ำด้วยวิธีการหลากหลาย เช่น การจำแนกพื้นที่แม่น้ำ [12] – [13] และพื้นที่น้ำท่วม [14] – [16] โดยส่วนใหญ่มักใช้โมเดล Deep learning ที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งแม้จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่อาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานแบบเรียลไทม์ภายใต้ข้อจำกัดด้านทรัพยากร เนื่องจากมีความเร็วในการประมวลผลที่ค่อนข้างต่ำ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิค YOLO Segmentation [17] เป็น Baseline สำหรับการเปรียบเทียบกับเทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นวิธีการที่เรียบง่ายกว่า

โดยใช้สำหรับการแบ่งส่วนภาพ (Segmentation) เพื่อจำแนกพื้นที่น้ำและพื้นที่ที่ไม่ใช่น้ำ โดยเน้นประสิทธิภาพและความเร็วที่เหมาะสมกับระบบที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและต้องการประมวลผลแบบเรียลไทม์

ทั้งนี้ มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีการประยุกต์ใช้ YOLO Segmentation สำหรับการแบ่งส่วนภาพเพื่อจำแนกพื้นที่น้ำท่วมเช่นกัน [15] - [16] โดยเวอร์ชันล่าสุดของ YOLO เช่น YOLOv8-seg, YOLOv10-mask, และ YOLOv11-seg ได้มีการเพิ่ม Segmentation head เข้าไปในโครงสร้างของโมเดล ทำให้สามารถแบ่งส่วนภาพได้โดยตรง และให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการประมวลผลแบบเรียลไทม์

2.5 Domain adaptation

Domain adaptation [18] - [19] เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเรียนรู้เชิงถ่ายโอน (Transfer learning) ที่มุ่งเน้นให้แบบจำลองสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในโดเมนเป้าหมาย (Target domain) ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลแตกต่างจากโดเมนต้นทาง (Source domain) ที่ใช้ในการฝึกแบบจำลอง

โดยทั่วไป แบบจำลองการเรียนรู้มักตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ข้อมูลฝึก (Training data) และข้อมูลทดสอบ (Testing data) ต้องมาจากการแจกแจงข้อมูลเดียวกัน (Data distribution) อย่างไรก็ตาม ในสภาพแวดล้อมจริง ข้อมูลที่ใช้กันมักมีความแตกต่างหรือเบี่ยงเบนจากกัน เช่น ความแตกต่างของแสง เงา คุณภาพของกล้อง หรือสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป ทำให้แบบจำลองที่ถูกฝึกจากโดเมนหนึ่ง อาจไม่สามารถนำไปใช้งานได้ดีในอีกโดเมนหนึ่ง การปรับตัวระหว่างโดเมน (Domain adaptation) จึงเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดช่องว่างระหว่างโดเมนต้นทางและโดเมนเป้าหมาย

ในบริบทของงานวิจัยนี้ การจำแนกพื้นที่น้ำบริเวณจุดเฝ้าระวังน้ำท่วมจากภาพกล้องวงจรปิด (CCTV) ประสบกับปัญหาข้อจำกัดในโดเมนเป้าหมาย ดังนั้น จึงมีการใช้ข้อมูลจากอีกโดเมนหนึ่ง ได้แก่ พื้นที่แม่น้ำ เพื่อฝึกแบบจำลองเบื้องต้น ก่อนจะนำแบบจำลองดังกล่าวไปประเมินผลบนข้อมูลจากจุดเฝ้าระวังน้ำท่วมจริง

2.6 Confusion matrix

Confusion matrix [20] เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลจำแนกประเภท (Classification model) โดยแสดงผลการทำนายที่ถูกต้องและผิดของโมเดลในแต่ละคลาสในรูปของตาราง ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อผิดพลาดและประสิทธิภาพของโมเดลได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตาราง Confusion Matrix

		Predicted Class	
		Positive (1)	Negative (0)
Actual Class	Positive (1)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	Negative	False Positive (FP)	True Negative (TN)

ตัวชี้วัดที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

ความถูกต้อง (Accuracy) คือ อัตราส่วนของการทำนายที่ถูกต้องต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมด โดยคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \tag{5}$$

ความแม่นยำ (Precision) คือ ค่าความถูกต้องเฉพาะในกรณีที่โมเดลทำนายว่าเป็นบวก (Predicted positive) โดยคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \tag{6}$$

Recall คือ ค่าความถูกต้องเฉพาะในกรณีเหตุการณ์ที่เป็นบวกจริง (Actual Positive) โดยคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

F1 Score คือ ค่าประสิทธิภาพที่เป็นค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิก (Harmonic Mean) ของ Precision และ Recall โดยเป็นการรวมทั้งสองค่าดังกล่าวเข้าด้วยกันเป็นค่าประสิทธิภาพเพียงค่าเดียว ซึ่งเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการพิจารณาทั้งความแม่นยำในการทำนายและความสามารถในการตรวจจับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงโดยคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$F1\ Score = \frac{2}{\left(\frac{1}{Recall}\right) + \left(\frac{1}{Precision}\right)} \quad (8)$$

IoU (Intersection over Union) มักใช้ในงานตรวจจับวัตถุ (Object detection) หรือการแบ่งส่วนภาพ (Image segmentation) เพื่อวัดความแม่นยำเชิงพื้นที่ โดยนิยามเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ที่เป็นบวกที่ทำนายได้ถูกต้อง (True positive หรือ Intersection) กับพื้นที่รวมทั้งหมด (Union) ของพื้นที่ที่เป็นบวก (Actual Positive) กับพื้นที่ที่โมเดลทำนายว่าเป็นบวก (Predicted Positive) ดังสมการที่ (9)

$$IoU = \frac{TP}{TP+FP+FN} \quad (9)$$

3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การเตรียมชุดข้อมูลฝึกและชุดข้อมูลทดสอบจากภาพกล้องวงจรปิด

ข้อมูลภาพที่ใช้ในการฝึก (สำหรับแบบจำลอง LRT) และข้อมูลภาพที่ใช้ในการทดสอบ (สำหรับแบบจำลอง LRT และ YOLO Segmentation) ในงานวิจัยนี้ได้มาจากกล้องวงจรปิด (CCTV) ซึ่งติดตั้ง ณ จุดเฝ้าระวังน้ำท่วมในจังหวัดน่าน โดยรวมมีจำนวนทั้งสิ้น 8 ภาพ โดยแต่ละภาพมีขนาด 640x360 ซึ่งมีภาพเป็นจำนวนที่จำกัด เนื่องจากพื้นที่ที่ศึกษาเป็นพื้นที่ใหม่ที่ยังมีข้อมูลสะสมอยู่น้อย ลักษณะเฉพาะของข้อมูลชุดนี้ คือ สีของน้ำในภาพปรากฏเป็นสีแดง ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของน้ำทั่วไปอย่างชัดเจน เนื่องจากมีตะกอนดินปนอยู่ในน้ำ

อย่างเข้มข้น จึงทำให้ภาพจากพื้นที่นี้มีความแตกต่างจากโดเมนอื่นที่เคยใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา

ภาพทั้ง 8 นี้ถูกบันทึกในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่มีระดับน้ำท่วมแตกต่างกัน เพื่อแสดงให้เห็นความหลากหลายของภาพระดับน้ำในพื้นที่ศึกษาดังแสดงในรูปที่ 1 คณะผู้วิจัยได้สุ่มเลือกภาพ p3.jpg เพื่อนำไปสร้างชุดข้อมูลฝึกสำหรับแบบจำลอง LRT ในขณะที่ภาพที่เหลืออีก 7 ภาพ ถูกนำไปสร้างชุดข้อมูลทดสอบสำหรับประเมินแบบจำลอง LRT และ YOLO Segmentation บน CPU ของ Google Colab

สำหรับกระบวนการเตรียมฉลาก (Label) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการออกแบบและพัฒนาแบบจำลอง คณะผู้วิจัยได้ทำการจำแนกจุดภาพในภาพออกเป็นสองประเภท ได้แก่ พื้นที่น้ำ และ พื้นที่ที่ไม่ใช่ น้ำ โดยกำหนดให้จุดภาพที่เป็นน้ำมีสีขาว (ค่า 1) และจุดภาพที่ไม่ใช่ น้ำมีสีดำ (ค่า 0) โดยมีตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ข้อมูลภาพจากกล้องวงจรปิดทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

Image



(a)

Label



(b)

รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลภาพและฉลาก (Label)

(a) ข้อมูลภาพจริง, (b) ฉลากของข้อมูลภาพ (Label)

3.2 การเตรียมชุดข้อมูลฝึกสำหรับแบบจำลอง YOLOv11 Segmentation

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง YOLOv11 Segmentation [21] เพราะเป็นหนึ่งในเวอร์ชันของ YOLO ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงที่สุดในปัจจุบัน [4] เนื่องจากการฝึกแบบจำลอง YOLO จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ชุดข้อมูล River Water Segmentation Computer Vision Project [22] ในการฝึกโมเดล และนำโมเดลที่ได้มาทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบในรูปแบบ Domain Adaptation โดยชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกถูกแบ่งออกเป็นข้อมูลสำหรับการฝึก (Training) จำนวน 241 ภาพ และข้อมูลสำหรับการตรวจสอบ (Validation) จำนวน 80 ภาพ โดยขนาดภาพแต่ละภาพมีขนาด 640x640 ตัวอย่างของข้อมูลที่ใช้แสดงใน รูปที่ 3

นอกจากนี้ เพื่อประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากโมเดลที่มีความซับซ้อนต่างกัน คณะผู้วิจัยได้ทดลองฝึกแบบจำลอง 2 ขนาด [23] ได้แก่ YOLOv11n-seg (โมเดลขนาดเล็กและมีความซับซ้อนต่ำ) และ YOLOv11x-seg (โมเดลขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนสูง) โดยที่โมเดลที่มีความซับซ้อนสูงอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหา Overfitting ได้ [24] เนื่องจากข้อมูลที่ใช้มีจำนวนจำกัด



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพจากชุดข้อมูล River Water Segmentation Computer Vision Project ที่ใช้สำหรับฝึกแบบจำลอง YOLO11n-seg และ YOLO11x-seg

3.3 กระบวนการดำเนินการและการฝึกแบบจำลอง LRT

ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3 แบบจำลอง LRT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างเรียบง่าย ภายใต้สมมติฐานว่า Likelihood ของข้อมูลเข้ามีการแจกแจงแบบ Gaussian และมีความแปรปรวนเท่ากันสำหรับทุกคลาส (Equal-Variance Gaussian Distribution)

ในการทดลองนี้ ข้อมูลเข้าของแบบจำลอง LRT คือค่าความเข้ม (Intensity) ของจุดภาพในภาพ Grayscale ภายในบริเวณที่สนใจ (ROI) ซึ่งได้จากภาพสี (RGB) ของกล้อง CCTV โดยผ่านการ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0.0 - 1.0 แบบจำลองจะเปรียบเทียบค่าความเข้มแต่ละจุดภาพกับค่า Threshold เพื่อจำแนกเป็น “น้ำ” หรือ “ไม่ใช่ น้ำ” และรวมผลลัพธ์เพื่อสร้าง Segment ของภาพที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นสองประเภทดังกล่าว

จากการวิเคราะห์ฮิสโตแกรม (Histogram) ของค่าความเข้มของจุดภาพที่ได้จากภาพ p3.jpg (ดูรูปที่ 1) ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า รูปแบบการแจกแจงของจุดภาพทั้งในพื้นที่น้ำและไม่ใช่ น้ำมีลักษณะใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบ Gaussian และแม้ว่าค่า Variance ของทั้งสองคลาสอาจไม่เท่ากันโดยสมบูรณ์ แต่ด้วยจำนวนข้อมูลที่จำกัดและเพื่อให้ได้โมเดลที่เรียบง่ายและประมวลผลได้รวดเร็ว คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้สมมติฐาน Equal-Variance ซึ่งสามารถทดสอบความเหมาะสมผ่านผลการประเมินกับชุดข้อมูลทดสอบ

ขั้นตอนการดำเนินการของแบบจำลอง LRT มีดังนี้

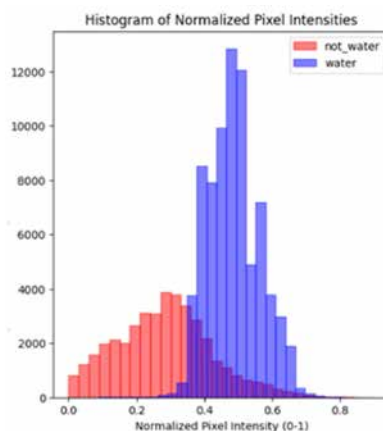
1. แปลงภาพ RGB เป็นภาพ Grayscale และ Normalize ค่าความเข้มของจุดภาพให้อยู่ในช่วง 0.0 - 1.0
2. ระบุบริเวณที่สนใจ (ROI) โดยใช้ ROI Mask ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าจากขอบฟ้าและขอบสะพาน โดยจุดภาพสีขาว ใน ROI Mask หมายถึงบริเวณที่สนใจ
3. เปรียบเทียบค่าความเข้มของจุดภาพใน ROI กับค่า Threshold

- หาก $\geq$ Threshold $\rightarrow$ จำแนกว่าเป็น “น้ำ”
- หาก $<$ Threshold $\rightarrow$ จำแนกว่าเป็น “ไม่ใช่ น้ำ”

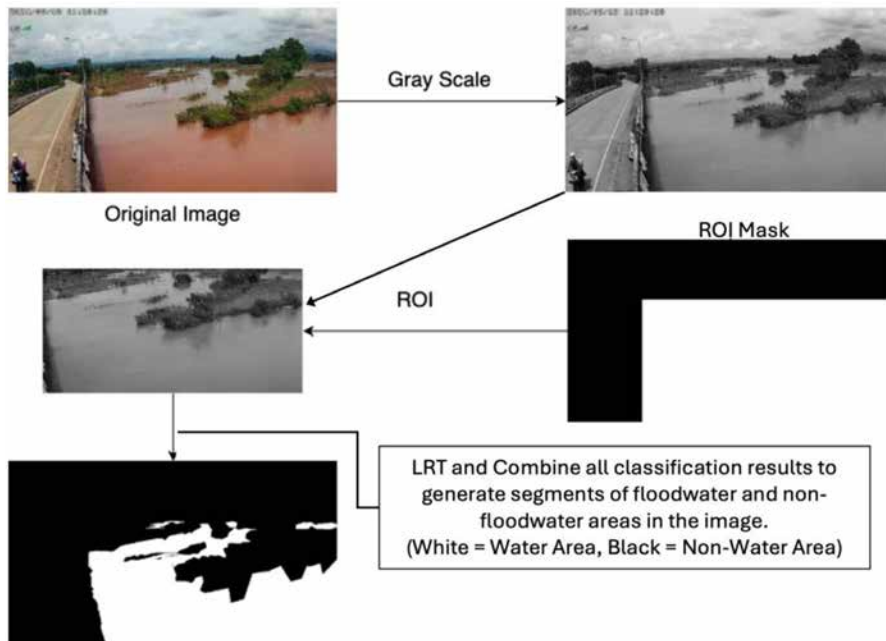
4. รวมผลการจำแนกของจุดภาพทั้งหมดเพื่อสร้างแผนภาพแบ่งส่วน (Segmented Image)

ขั้นตอนดังกล่าวได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อให้เหมาะสมกับบริบทของข้อมูลในงานวิจัยนี้ (ดูภาพรวมในรูปที่ 5)

แม้แบบจำลอง LRT จะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่สามารถถือเป็นรูปแบบหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) [25] โดยขั้นตอนการกำหนด Threshold ที่เหมาะสมจัดเป็นส่วนของการฝึกโมเดล (Training)



รูปที่ 4 ฮิสโตแกรมของค่าความเข้มของจุดภาพในภาพ Grayscale ที่ถูก Normalize ให้มีค่าในช่วง 0.0 - 1.0 สำหรับพื้นที่น้ำและพื้นที่ที่ไม่ใช่ น้ำภายในบริเวณที่สนใจ (ROI) ของภาพ p3.jpg



รูปที่ 5 กระบวนการดำเนินการสำหรับแบบจำลอง LRT

ในการฝึกแบบจำลอง LRT ครั้งนี้ ใช้ภาพ p3.jpg จากกล้องวงจรปิดเป็นข้อมูลฝึก โดยใช้ค่าความเข้มของจุดภาพภายใน ROI และเปรียบเทียบกับ Label ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า จากนั้นดำเนินการค้นหา Threshold ที่ให้ค่า F1 Score สูงสุดผ่านกระบวนการ Grid Search โดยมีรายละเอียดดังนี้

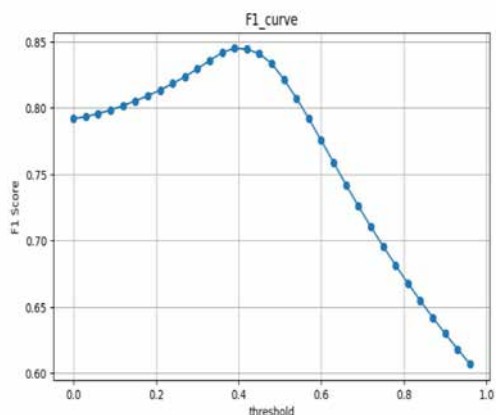
1. สร้างชุดค่า Threshold ตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.96 โดยเพิ่มทีละ 0.03 ได้แก่ {0.00, 0.03, 0.06, ..., 0.96}
2. สำหรับแต่ละ Threshold ที่กำหนด ดำเนินการจำแนกจุดภาพใน ROI ของภาพ p3.jpg
3. คำนวณ F1 Score และเลือก Threshold ที่ให้ค่าดังกล่าวสูงสุด

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการฝึกแบบจำลอง (Training results)

สำหรับแบบจำลอง LRT ผลการฝึกแสดงในรูปที่ 6 โดยแสดงค่า F1 Score ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความเข้มของจุดภาพในภาพ p3.jpg กับค่า Threshold ที่แตกต่างกัน (ตามขั้นตอนที่อธิบาย

ไว้ในหัวข้อ 3.3) จากผลการทดลองพบว่า ค่า Threshold ที่ให้ค่า F1 Score สูงสุดคือ 0.39 โดยให้ค่า F1 Score เท่ากับ 84.9% ซึ่งค่า Threshold ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการทดสอบแบบจำลองกับภาพอื่น ๆ ในขั้นตอนถัดไป ส่วนการฝึกแบบจำลอง YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg นั้น ใช้การประเมินผลกับชุดข้อมูล



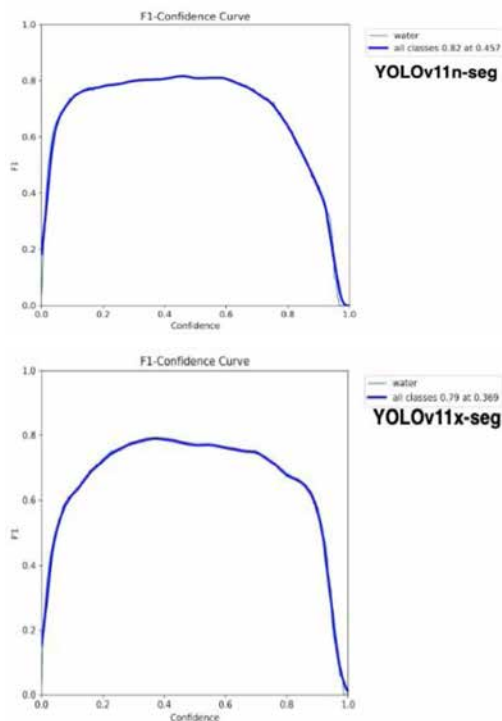
รูปที่ 6 F1 Score ที่ค่า Threshold ต่าง ๆ จากกระบวนการฝึกแบบจำลอง LRT

Validation โดยทดสอบกับค่า Confidence threshold ที่หลากหลายตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 เพื่อหาค่าที่ให้ผลลัพธ์ F1 Score ที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- YOLOv11n-seg ให้ค่า F1 Score สูงสุดเท่ากับ 82% เมื่อใช้ค่า Confidence Threshold เท่ากับ 0.457

- YOLOv11x-seg ให้ค่า F1 Score สูงสุดเท่ากับ 79% เมื่อใช้ค่า Confidence Threshold เท่ากับ 0.369

ค่าความเชื่อมั่น (Confidence threshold) ที่ให้ผลลัพธ์สูงสุดเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบแบบจำลองกับชุดข้อมูลทดสอบในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 7 ค่า F1 SCORE ที่ระดับ Confidence ต่าง ๆ จากการฝึก YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg

4.2 ผลการทดสอบแบบจำลอง (Testing results)

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง LRT, YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg ดำเนินการกับชุดข้อมูลทดสอบจำนวน 7 ภาพ จากกล้องวงจรปิด (ดูรูปที่ 1 โดยไม่รวมภาพ p3.jpg) ซึ่งไม่เคยถูกใช้ในการฝึกแบบจำลองหรือกำหนดพารามิเตอร์ใดมาก่อน ทั้งนี้ ค่าคงที่ Threshold สำหรับแบบจำลอง LRT และค่า Confidence threshold ของแบบจำลอง YOLO ทั้งสองเวอร์ชัน ได้มาจากระบวนการฝึกที่ระบุไว้ในหัวข้อ 4.1

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินผล ได้แก่ Intersection over Union (IoU), Precision, Recall, Accuracy, F1 Score และความเร็วในการประมวลผล (Frames per Second หรือ fps) โดยทำการประมวลผลบน CPU ของ Google Colab และใช้ค่าเฉลี่ยจากผลลัพธ์ของแต่ละภาพเพื่อประเมินภาพรวมของแต่ละโมเดล ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

- แบบจำลอง LRT ซึ่งมีโครงสร้างเรียบง่าย ให้ค่า F1 Score สูงถึง 0.84 ซึ่งสูงกว่า YOLOv11x-seg (0.80) และใกล้เคียงกับ YOLOv11n-seg (0.83) ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการออกแบบโมเดลให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของข้อมูลจากกล้อง CCTV ในพื้นที่ศึกษา

- แม้ว่าแบบจำลอง YOLO ทั้งสองเวอร์ชันจะไม่เคยฝึกกับภาพจากกล้องวงจรปิดที่ใช้ในการทดสอบ แต่ก็สามารถรักษาค่า F1 Score ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่ได้จากชุด Validation ขณะฝึก (YOLOv11n-seg = 0.82 และ YOLOv11x-seg = 0.79) สะท้อนถึงความสามารถในการ Generalize ภายใต้สถานการณ์ Domain shift ได้ดี

- แบบจำลอง LRT แสดงความได้เปรียบอย่างชัดเจนในด้านความเร็ว โดยให้ค่าเฉลี่ย 679.54 fps บน CPU ซึ่งสูงกว่า YOLOv11n-seg (2.45 fps) และ YOLOv11x-seg (0.13 fps) หลายร้อยเท่า

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง LRT, YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg

Model	IOU	Precision	recall	Accuracy	F1 Score	Frame per second (fps)
LRT (LRT with equal-variance Gaussian assumption)	0.73	0.83	0.85	0.90	0.84	679.54
YOLOv11n-seg	0.70	0.74	0.93	0.88	0.83	2.45
YOLOv11x-seg	0.67	0.73	0.89	0.87	0.80	0.13

● แบบจำลอง YOLOv11n-seg ทำงานได้เร็วกว่า YOLOv11x-seg เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่า และยังให้ค่า F1 Score ที่สูงกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยนั้นเพียงพอต่องานนี้ หรือ YOLOv11x-seg ยังไม่มีข้อมูลฝึกที่มากเพียงพอทำให้เกิด Overfitting

ข้อสรุปจากผลการทดสอบมีดังนี้

● แบบจำลอง LRT เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในบริบทเฉพาะของงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านปริมาณข้อมูลและทรัพยากรประมวลผล อีกทั้งสามารถรองรับการทำงานแบบเรียลไทม์บนอุปกรณ์ขนาดเล็กและต้นทุนต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

● ขณะที่แบบจำลอง YOLO ทั้งสองเวอร์ชันแสดงศักยภาพในการ Generalize ได้ดีในสถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของข้อมูลหรือยังไม่ทราบลักษณะเฉพาะของภาพ จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง แม้จะมีข้อจำกัดในด้านความเร็วและทรัพยากรที่ใช้ในการประมวลผลมากกว่า

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่าแบบจำลอง LRT ซึ่งพัฒนาขึ้นจากแนวคิด Likelihood Ratio Test ภายใต้สมมติฐานว่าแต่ละคลาสมีการแจกแจงแบบ Gaussian ที่มีความแปรปรวนเท่ากัน (Equal-Variance Gaussian Distribution) สามารถ

จำแนกพื้นที่น้ำจากภาพกล้องโทรทัศน์วงจรปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ค่า F1 Score เฉลี่ยสูงถึง 0.84 ซึ่งใกล้เคียงหรือดีกว่าแบบจำลอง YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg ที่เป็นโมเดล Deep Learning และได้รับการฝึกจากข้อมูลต่างโดเมน (Domain Adaptation)

ข้อได้เปรียบสำคัญของแบบจำลอง LRT คือโครงสร้างที่เรียบง่าย ใช้พารามิเตอร์เพียงหนึ่งค่า (Threshold) และอาศัยคุณลักษณะพื้นฐานที่สังเกตได้ชัดเจน เช่น ความแตกต่างของค่าสีในภาพ Grayscale ส่งผลให้สามารถประมวลผลได้ด้วยความเร็วสูงมาก โดยให้ค่าเฉลี่ย fps ถึง 679.54 บน CPU ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ โดยเฉพาะในบริบทที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรคอมพิวเตอร์และข้อมูลฝึก

ในทางตรงกันข้าม แบบจำลอง YOLOv11n-seg และ YOLOv11x-seg แม้จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและต้องการข้อมูลฝึกจำนวนมาก แต่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการ Generalize ได้ดี กล่าวคือ แม้ไม่ได้ฝึกจากภาพกล้องวงจรปิดชุดเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบ แต่ก็สามารถให้ค่า F1 Score ใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากชุด Validation ได้ ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมของโมเดล Deep Learning สำหรับสถานการณ์ที่ข้อมูลมีความหลากหลายหรือยังไม่ทราบลักษณะเฉพาะของโดเมน

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของแบบจำลอง LRT คือความสามารถในการจำแนกที่จำเพาะต่อบริบทของชุดข้อมูล โดยเฉพาะของข้อมูลที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ หากนำไปใช้กับข้อมูลที่มีลักษณะต่างไปจากที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง อาจส่งผลให้ความแม่นยำลดลง ในขณะที่แบบจำลอง YOLO สามารถรับมือกับความหลากหลายของข้อมูลและสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่า

โดยสรุป แบบจำลอง LRT เหมาะสำหรับบริบทที่ลักษณะของข้อมูลมีความจำเพาะเจาะจงของงานวิจัยนี้ และระบบมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร โดยให้ประสิทธิภาพดีเยี่ยมภายใต้ข้อจำกัดเหล่านั้น ในขณะที่แบบจำลอง YOLO เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวต่อข้อมูลใหม่ในบริบทที่ไม่แน่นอนหรือเปลี่ยนแปลงได้บ่อย

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของผลผลิตจากโครงการการต่อยอดระบบจำลองสถานการณ์น้ำท่วมด้วยข้อมูลที่ทันสมัยและระบบเตือนภัย ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 ด้านแผนงานวิจัยและนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ เพื่อแก้ปัญหาและผลกระทบจากภัยพิบัติทางธรรมชาติและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ตามสัญญาเลขที่ N81A680725 และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และมหาวิทยาลัยพะเยาในฐานะสถาบันต้นสังกัดของนักวิจัยร่วมในโครงการนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] R. Chitala, K. R. Hoffmann, D. R. Bednarek, and S. Rudin, "Region of Interest (ROI) Computed Tomography," vol. 5368, no. 2, *SPIE*, pp. 534 - 541, 2004.

[2] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Vol. II: Detection Theory*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1998.

[3] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," in *2016 IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. (CVPR)*, Jun. 2016, pp. 779 - 788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

[4] L. He, Y. Zhou, L. Liu, and J. Ma, "Research and Application of YOLOv11-Based Object Segmentation in Intelligent Recognition at Construction Sites," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3777, 2024, doi: 10.3390/buildings14123777.

[5] J. Terven, D. - M. Cordova-Esparza, and J. - A. Romero-González, "A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS," *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, vol. 5, no. 4, pp. 1680-1716, 2023, doi: 10.3390/make5040083.

[6] D. A. Roberts, S. Yaida, and B. Hanin, *The Principles of Deep Learning Theory*. NY, USA: Cambridge University Press, 2022.

[7] S. Minaee, Y. Boykov, F. Porikli, A. Plaza, N. Kehtarnavaz, and D. Terzopoulos, "Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 44, no. 7, pp. 3523 - 3542, 2021.

[8] C. Kanan and G. W. Cottrell, "Color-to-Grayscale: Does the Method Matter in Image Recognition?," *PloS ONE*, vol. 7, no. 1, p. e29740, 2012.

- [9] *Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-Screen 16:9 Aspect Ratios*, Recommendation ITU-R BT.601-7, Mar. 2011. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-III!PDF-E.pdf
- [10] L. A. Curtiss, P. C. Redfern, and K. Raghavachari, "Gaussian 4 Theory," *J. Chem. Phys.*, vol. 126, no. 8, p. 084108, Mar. 2007, doi: 10.1063/1.2436888.
- [11] G. Shafer, "Conditional Probability," *Int. Stat. Rev.*, vol. 53, no. 3, pp. 261-275, 1985, doi: 10.2307/1402890.
- [12] N. A. Muhadi, A. F. Abdullah, S. K. Bejo, M. R. Mahadi, and A. Mijic, "Deep Learning Semantic Segmentation for Water Level Estimation Using Surveillance Camera," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 20, p. 9691, 2021.
- [13] L. Lopez-Fuentes, C. Rossi, and H. Skinnemoen, "River Segmentation for Flood Monitoring," in *2017 IEEE Int. Conf. Big Data (Big Data)*, Boston, MA, USA, 2017, pp. 3746 - 3749, doi: 10.1109/BigData.2017.8258373.
- [14] Y. Wang *et al.*, "Urban Flood Extent Segmentation and Evaluation from Real-World Surveillance Camera Images Using Deep Convolutional Neural Network," *Environ. Model. Softw.*, vol. 173, p. 105939, 2024.
- [15] J. Wan *et al.*, "Automatic Segmentation of Urban Flood Extent in Video Image with DSS-YOLOv8n," *J. Hydrol.*, vol. 655, p. 132974, 2025.
- [16] C. Sazara, M. Cetin, and K. M. Iftekharuddin, "Detecting Floodwater on Roadways from Image Data with Handcrafted Features and Deep Transfer Learning," in *2019 IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, pp. 804 - 809.
- [17] M. G. Ragab *et al.*, "A Comprehensive Systematic Review of YOLO for Medical Object Detection (2018 to 2023)," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 57815 - 57836, 2024.
- [18] W. Luangluewut, P. Thiennviboon, K. Viriyasatr, P. Maleecharoen, and T. Kasetkasem, "Investigating Domain Adaptation Feasibility for Drone Detection: A CPU-Based YOLO Approach Using RGB-Infrared Images," in *2025 Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun. (ICAIIIC)*, Fukuoka, Japan, 2025, pp. 0926 - 0931, doi: 10.1109/ICAIIIC64266.2025.10920826.
- [19] P. Akiva, M. Purri, K. Dana, B. Tellman, and T. Anderson, "H2O-Net: Self-Supervised Flood Segmentation via Adversarial Domain Adaptation and Label Refinement," *2021 IEEE Winter Conf. Appl. Comput. Vision (WACV)*, 2021, pp. 111 - 122, doi: 10.1109/WACV48630.2021.00016.
- [20] S. Visa, B. Ramsay, A. Ralescu, and E. van der Knaap, "Confusion Matrix-based Feature Selection," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 710, pp. 120 - 127, 2011.
- [21] Ultralytics YOLO Docs. "Instance Segmentation." DOC.ULTRALYTICS.com. <https://docs.ultralytics.com/tasks/segment> (accessed Mar. 23, 2025).

- [22] A. Hisyam, "River Water Segmentation Dataset." 2024. Distributed by Roboflow.
- [23] M. Tan, R. Pang, and Q. V. Le, "Efficient Det: Scalable and Efficient Object Detection," in *2020 IEEE/CVF Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. (CVPR)*, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 10778-10787, doi:10.1109/CVPR42600.2020.01079.
- [24] A. Safonova, G. Ghazaryan, S. Stiller, M. Main-Knorn, C. Nendel, and M. Ryo, "Ten Deep Learning Techniques to Address Small Data Problems with Remote Sensing," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 125, p. 103569, 2023, doi:10.1016/j.jag.2023.103569.
- [25] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd ed., NY, USA: Wiley-Interscience Publication, 2001.

การศึกษาสมรรถนะหลังคาต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมผลิตยาแผนปัจจุบัน

ศุภชัย วรเลิศ^{1*} ดุสิต งามรุ่งโรจน์² และ ปรีดา จันทวงษ์³

วันที่รับ 22 เมษายน 2568 วันที่แก้ไข 23 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 30 พฤษภาคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของฉนวนหลังคาที่มีผลกระทบท่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมผลิตยาแผนปัจจุบันแห่งหนึ่ง โดยใช้โปรแกรม OpenStudio ในการวิเคราะห์ข้อมูล การศึกษานี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็นของห้องคลีนรูมเมื่อใช้ฉนวนหลังคาหนาชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Polyethylene (PE) ความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 10 mm และ Polyurethane (PU) ความหนา 25 mm และ Polyurethane (PU) ความหนา 50 mm ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาสามารถลดการใช้พลังงานในการทำ ความเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยฉนวนหลังคา Polyurethane (PU) หนา 50 mm ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการใช้พลังงาน โดยมีค่าการใช้พลังงานรวมตลอดปีอยู่ที่ 68,839.33 kWh และค่าการใช้พลังงานในการทำ ความเย็นลดลงเหลือ 27,159.36 kWh เมื่อเทียบกับฉนวนหลังคา Polyethylene (PE) ความหนา 3 mm ที่มีการใช้พลังงานรวม 71,943.75 kWh และการใช้พลังงานในการทำ ความเย็น 29,817.36 kWh นอกจากนี้ การใช้ฉนวนหลังคาที่มีความหนาเพิ่มขึ้นยังช่วยลดภาระการทำความเย็น (Cooling load) โดยเฉลี่ยจาก 8.93 MBtu ในกรณีของ Polyethylene (PE) ความหนา 3 mm ลดลงเหลือ 7.72 MBtu ในกรณีของ Polyurethane (PU) หนา 50 mm จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การเลือกใช้ฉนวนหลังคาที่มีความหนาเพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยในการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานของห้องคลีนรูมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การติดตั้งฉนวนที่เหมาะสมจึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนพลังงาน และปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร โดยเฉพาะฉนวน Polyurethane (PU) หนา 50 mm ที่ให้ผลดีที่สุด

คำสำคัญ: ห้องคลีนรูม, ภาระการทำความเย็น, การใช้พลังงาน, ฉนวนหลังคา

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้แต่ง, อีเมล: suphachai.worralers@gmail.com

The Study of Roof Performance on Energy Consumption of Cleanroom for Pharmaceutical Production

Suphachai Worralers^{1*} Dusit Ngamrungraj² and Preeda Chantawong³

Received 22 April 2025, Revised 23 May 2025, Accepted 30 May 2025

Abstract

This study aims to evaluate the performance of roof insulation and its impact on energy consumption in a cleanroom of a modern pharmaceutical manufacturing facility using the OpenStudio software for data analysis. The study focused on comparing energy consumption and cooling loads in the cleanroom with various types and thicknesses of roof insulation, including Polyethylene (PE) at 3 mm, 4 mm, 5 mm, and 10 mm thickness, and Polyurethane (PU) at 25 mm and 50 mm thickness. The results indicated that increasing the thickness of roof insulation significantly reduced energy consumption for cooling. The 50 mm thick Polyurethane (PU) insulation provided the highest efficiency, with total annual energy consumption of 68,839.33 kWh and cooling energy consumption reduced to 27,159.36 kWh, compared to 71,943.75 kWh and 29,817.36 kWh, respectively, for 3 mm thick Polyethylene (PE) insulation. Additionally, increasing insulation thickness also lowered the average cooling load from 8.93 MBtu (PE 3 mm) to 7.72 MBtu (PU 50 mm). The findings suggested that selecting thicker roof insulation effectively reduced energy usage and enhances energy efficiency in cleanrooms. Therefore, the appropriate insulation installation was a cost-effective strategy to reduce energy expenses and to improve building energy performance, with 50 mm thick Polyurethane (PU) offering the best results.

Keywords: Cleanroom, Cooling load, Energy consumption, Roof insulation

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

² Department of Social and Applied Science, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: suphachai.worralers@gmail.com

1. บทนำ

ปัจจุบัน การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของประชากรและเทคโนโลยี ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สังคมจึงหันมาใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อม แม้แต่สงครามก็มีส่วนทำให้โลกร้อน จากการใช้พลังงานจำนวนมาก โรงงานผลิตยาแห่งหนึ่ง จึงพัฒนาคลีนรูมต้นแบบด้วยวัสดุประหยัดพลังงาน เพื่อลดผลกระทบและใช้เป็นต้นแบบการพัฒนาต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาสมรรถนะฉนวนหลังคาที่มีผลกระทบ ต่อการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมโดยใช้โปรแกรม OpenStudio

3. การทบทวนวรรณกรรม

OpenStudio และ EnergyPlus เป็นเครื่องมือ สำหรับการจำลองการใช้พลังงานในหลังคา โดย EnergyPlus ทำหน้าที่เป็นกลไกการจำลอง (Simulation engine) ที่คำนวณการใช้พลังงานโดยอาศัยแบบจำลอง ทางกายภาพ (Physical model) ซึ่งใช้สมการทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างหลังคา กับสิ่งแวดล้อมรอบตัวหลังคา การคำนวณนี้อยู่บนพื้นฐาน ของสมดุลความร้อน สำหรับ OpenStudio เป็นโปรแกรม ประเภทอินเทอร์เฟซสำหรับการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (Application Programming Interface: API) ที่ใช้ในการจัดการข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ข้อมูลสภาวะอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม และรังสีอาทิตย์ สำหรับการตรวจสอบการใช้พลังงาน (Energy audit) และการตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง การคำนวณ แบบจำลองพลังงานของ EnergyPlus อาศัยหลักการ สมดุลความร้อน ซึ่งครอบคลุมถึงสมดุลความร้อนที่พื้นผิว สมดุลความร้อนในอากาศ และการจำลองระบบหลังคา การถ่ายเทความร้อนของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผล ต่อการสร้างภาระโหลดของอาคาร ส่งผลต่อการ ใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ การวิเคราะห์คุณสมบัติ

ของวัสดุต่าง ๆ จะใช้ U-value เป็นตัวชี้วัด หรือค่า การถ่ายเทความร้อน ซึ่งคำนวณได้จากค่าความต้านทาน ความร้อน (Thermal resistance) ของวัสดุ ความต้านทานความร้อนของวัสดุที่มีความหนา L (m) และมีค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อน k ($W/m \cdot ^\circ C$) ความต้านทาน ความร้อน R ($m^2 \cdot K/W$) คำนวณได้จากสมการ (1)

$$R = \frac{L}{k} \quad (1)$$

เมื่อ

R คือ ค่าการต้านทานความร้อน ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

L คือ ความหนาของชั้นวัสดุ (m)

k คือ ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot ^\circ C$)

การคำนวณค่า U-value คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) ซึ่งได้จากการกลับค่าสมการของ ความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Thermal resistance) ของส่วนประกอบนั้น ๆ โดยรวมถึงความต้านทานของ ชั้นวัสดุแต่ละชั้นและฟิล์มอากาศภายในและภายนอก คำนวณได้จากสมการ (2)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (2)$$

เมื่อ

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

h_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ภายนอก ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

h_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ภายใน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

L_n คือ ความหนาของวัสดุในชั้นที่ n (m)

k_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ชั้นที่ n ($W/m \cdot ^\circ C$)

การคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารทางหลังคามีลักษณะเช่นเดียวกับการผ่านพื้นที่ผนัง โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุหลังคา และฝ้าเพดาน รวมถึงสีและความหนาแน่นของมวลหลังคา สำหรับวัสดุผนังหลังคาและฉนวนที่นิยมใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบัน พบว่ามีค่าพลังงานความร้อนต่อตารางเมตรสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตามประกาศกระทรวงพลังงาน (2552) [1] ซึ่งอยู่ที่ 25 W/ m² คำนวณได้จากสมการ (3)

$$RTTV_i = U_r(1 - SRR)(TD_{eq}) + U_s(SRR)(\Delta T) + (SRR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (3)$$

เมื่อ

RTTV_i คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารส่วนที่พิจารณา (W/ m²)

U_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาทึบ (W/ m² °C)

SRR คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาส่วนที่พิจารณา

TD_{eq} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent temperature difference) ระหว่างภายนอกและภายในของหลังคา ซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคา (°C)

U_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (W/ m² °C)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกหลังคา (°C)

SHGC คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง

SC คือ สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด

ESR คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาโปร่งแสง และ/หรือหลังคาทึบแสง (W/m²)

$$q''_{\infty, \text{sol}} + q''_{\text{LWR}} + q''_{\text{conv}} + q''_{\text{ko}} = 0 \quad (4)$$

เมื่อ

q''_{∞,sol} คือ รังสีอาทิตย์ที่ดูดซับโดยตรงและกระจาย และฟลักซ์ความร้อน (W/m²)

q''_{LWR} คือ การแลกเปลี่ยนฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนกับอากาศ และสภาพแวดล้อม (W/m²)

q''_{conv} คือ การแลกเปลี่ยนฟลักซ์หมุนเวียนกับอากาศ ภายนอก (W/m²)

q''_{ko} คือ ฟลักซ์การนำความร้อนสู่ผนัง (W/m²)

$$q''_{\text{LWR}} = \varepsilon \sigma F_{\text{gnd}} (T_{\text{gnd}}^4 - T_{\text{surf}}^4) + \varepsilon \sigma F_{\text{sky}} (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{surf}}^4) + \varepsilon \sigma F_{\text{air}} (T_{\text{air}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \quad (5)$$

เมื่อ

ε คือ การปล่อยคลื่นช่วงยาวของพื้นผิว

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10⁻⁸ W/m²·K⁴

F_{gnd} คือ ค่าปรับแก้ของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิพื้นผิวดิน

F_{sky} คือ ค่าปรับแก้ของพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิของท้องฟ้า

F_{air} คือ ค่าปรับแก้ของพื้นผิวผนังต่ออุณหภูมิอากาศ

T_{surf} คือ อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก (°C)

T_{gnd} คือ อุณหภูมิพื้นผิวดิน (°C)

T_{sky} คือ อุณหภูมิท้องฟ้า (°C)

T_{air} คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

$$q''_{\text{conv}} = h_{\text{c,ext}} A (T_{\text{surf}} - T_{\text{air}}) \quad (6)$$

เมื่อ

q''_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนภายนอก (W/m^2)

$h_{\text{c,ext}}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก

A คือ พื้นที่ผิว (m^2)

T_{surf} คือ อุณหภูมิพื้นผิว ($^{\circ}C$)

T_{air} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก ($^{\circ}C$)

$$q''_{\text{co}}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{\text{a},t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{\text{a},t+j\delta} \quad (7)$$

เมื่อ

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

T_o คือ อุณหภูมิขององค์ประกอบภายนอกของหลังคา ($^{\circ}C$)

T_i คือ อุณหภูมิขององค์ประกอบภายในของหลังคา ($^{\circ}C$)

I คือ องค์ประกอบภายในอาคาร

O คือ องค์ประกอบภายนอกอาคาร

X, Y คือ ปัจจัยตอบสนอง

โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

การศึกษามลกระทบของรูปทรงอาคาร การระบายอากาศตามธรรมชาติ และแผงบังแดดต่อสมรรถนะความร้อนของอาคารที่พักอาศัยสามรูปแบบ (สี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปแอล และรูปยู) ในฤดูร้อนที่กรุงอัมมาน ประเทศจอร์แดน โดยใช้โปรแกรม SketchUp กับ plug-in OpenStudio ออกแบบและจำลองผลด้วย EnergyPlus โดยประเมินความสบายเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ASHRAE-55 และแบบจำลอง Fanger พบว่า การระบายอากาศตามธรรมชาติร่วมกับอุปกรณ์บังแดดช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคารได้สูงสุด $8.85^{\circ}C$ ในเวลากลางวัน และ $12.70^{\circ}C$ ในเวลากลางคืน ซึ่งปรับปรุงความสบายเชิงความร้อนของอาคารทุกรูปแบบ [4]

การจำลองแบบไดนามิกได้รับการพัฒนาใน TRNSYS โดยเชื่อมโยงกับโค้ด Fortran เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของกลยุทธ์ระบบกักเก็บพลังงานแบบสองระดับ อาคารสำนักงานขนาดกลางทั่วไปถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้ OpenStudio-EnergyPlus เพื่อจำลองความต้องการพลังงานรายชั่วโมงในแต่ละสภาพภูมิอากาศ อีกทั้งพัฒนาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อทำให้อาคารสำนักงานสามารถแยกตัวจากโครงข่ายไฟฟ้าได้ [5]

การสร้างแบบจำลองอาคารและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศแบบสารดูดความชื้นในอาคารของสถาบันในเขตภูมิอากาศกึ่งร้อนชื้นที่มีลักษณะคล้ายกับภูมิอากาศในเซ็นทรัลควีนส์แลนด์ โดยใช้ OpenStudio เพื่อกำหนดความต้องการด้านความร้อนและความเย็นของอาคาร จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศแบบ VRF ที่ติดตั้งอยู่ในอาคารอ้างอิง โดยการพัฒนาแบบจำลองใน EnergyPlus (EP) แบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลการวัดที่บันทึกจากระบบบริหารจัดการอาคาร (BMS) หลังจากนั้นได้ทำการเพิ่มระบบปรับอากาศแบบสารดูดความชื้น (Desiccant Air Conditioning: DAC) เข้าไปในแบบจำลองเพื่อช่วยลดความชื้นของอาคารอ้างอิงให้สามารถบรรลุสถานะความสบายทางความร้อนในแง่ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ [5]

วิจัยพัฒนาหลังคาเย็นใหม่ใช้ฟิล์ม metamaterial "RadiCold" ที่มีคุณสมบัติต้านแสงและความร้อนโดดเด่น พร้อมปรับปรุงโมเดลคำนวณ RTTV ให้แม่นยำขึ้น โดยรวมผลกระทบของมวลความร้อนหลังคาโดยการทดสอบในสามเมืองสหรัฐฯ (Tucson, Los Angeles, Orlando) เปรียบเทียบวัสดุหลังคา Shingle, TPO และ RadiCold พบว่า RadiCold กระจายความร้อนได้ดีที่สุด ผลลัพธ์แสดงการประหยัดไฟฟ้า $113.0 - 143.9 \text{ kWh}/(m^2 \cdot \text{yr})$ เมื่อเทียบกับ Shingle และ $88.0 - 92.4 \text{ kWh}/(m^2 \cdot \text{yr})$ เมื่อเทียบกับ TPO [6]

การวิจัยนี้พัฒนารูปแบบการคำนวณ RTTV สำหรับหลังคาเขียวในเขตร้อนชื้น โดยตรวจสอบความแม่นยำของโมเดลการถ่ายโอนความร้อนด้วยข้อมูลภาคสนาม และจำลองความร้อนผ่านหลังคาเขียว 4 ประเภท

ผลการคำนวณ RTTV อยู่ในช่วง 2.29-2.49 W/m² และพัฒนาแบบจำลองการถดถอย 3 รูปแบบ พบว่า multilayer perceptron (MLP) มีความแม่นยำสูงกว่า multiple regression และ random forest สุดท้ายคำนวณค่าความต้านทานความร้อนเทียบเท่าของชั้นพืชเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบง่าย 5 แบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพความร้อนของหลังคาเขียวในขั้นตอนของการออกแบบ [7]

4. ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นออกแบบและจำลองการทำงานของหลังคาห้องคลีนรูมโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ห้องคลีนรูม จากรูปที่ 1 ขนาด 4.20 x 4.20 x 2.50 m, เครื่องจักร 10 kW, แสงสว่าง 56 W, จำนวนผู้ปฏิบัติงาน 4 ท่าน และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องที่ 22°C ใช้ PIR หนา 50 mm เป็นผนังและฝ้าใช้เวลา 12 เดือน ในการวิเคราะห์การทำงานกำหนดอุณหภูมิ 25°C ตามมาตรฐาน ISO 14644 โดยเลือกวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ไม่มีการติดฉนวนโดยติดเพียงหลังคา Metal sheet หนา 0.47 mm, ฉนวน Polyethylene (PE) ที่ความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm, 10 mm และฉนวน Polyurethane (PU) ที่ความหนา 25 mm และ 50 mm เพื่อศึกษาหาสมรรถนะของหลังคาห้องคลีนรูมในสภาวะต่าง ๆ โดยวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติการนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความร้อนจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 1

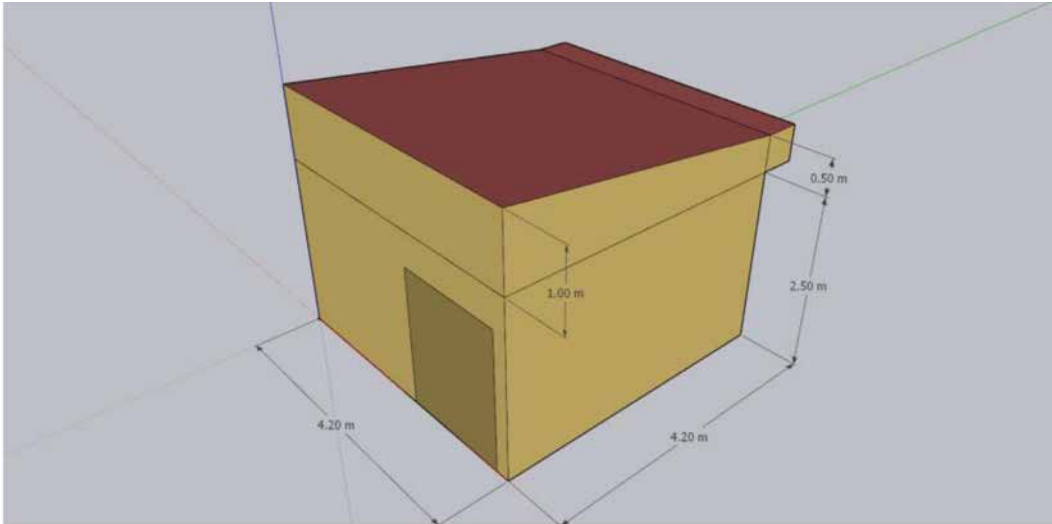
วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบและจำลองผนังห้องคลีนรูมด้วยโปรแกรม OpenStudio เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานความร้อนของวัสดุ โดยใช้แผ่นโลหะหนา 0.47 mm และวัสดุฉนวนสองชนิด ได้แก่ Polyethylene (PE) หนา 3, 4, 5 และ 10 mm และ Polyurethane (PU) หนา 25 และ 50 mm กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วยการตั้งค่าโครงการ สร้างแบบจำลอง กำหนดภาระพลังงาน เลือกเครื่องกลและจำลองผล ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้อย่างเป็นระบบ เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในอนาคต [8]

การใช้ OpenStudio จำลองพลังงานหลังคาเริ่มจากการสร้างโครงการใหม่และตั้งค่าข้อมูลพื้นฐาน เช่น ชื่อ สถานที่ และฐานข้อมูลภูมิอากาศ จากนั้นสร้างแบบจำลองหลังคาใน Geometry tab กำหนดขนาด รูปทรง และการแบ่งโซน กำหนดภาระพลังงานใน Loads tab ระบุปริมาณพลังงานแต่ละส่วนและตารางการใช้งาน ตั้งค่าการควบคุมใน Schedules Tab และ Thermostat setpoints เพื่อจัดการอุณหภูมิแต่ละโซน เลือกเครื่อง HVAC ที่เหมาะสมใน HVAC systems tab เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงาน เมื่อตั้งค่าครบถ้วนแล้วทำการจำลองใน Run Simulation Tab และวิเคราะห์ผลลัพธ์จาก Results summary ในรูปแบบกราฟ ตาราง หรือรายงานตัวเลข OpenStudio ช่วยให้การจำลองและวิเคราะห์การใช้พลังงานหลังคาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ

ตารางที่ 1 แสดงค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [9]

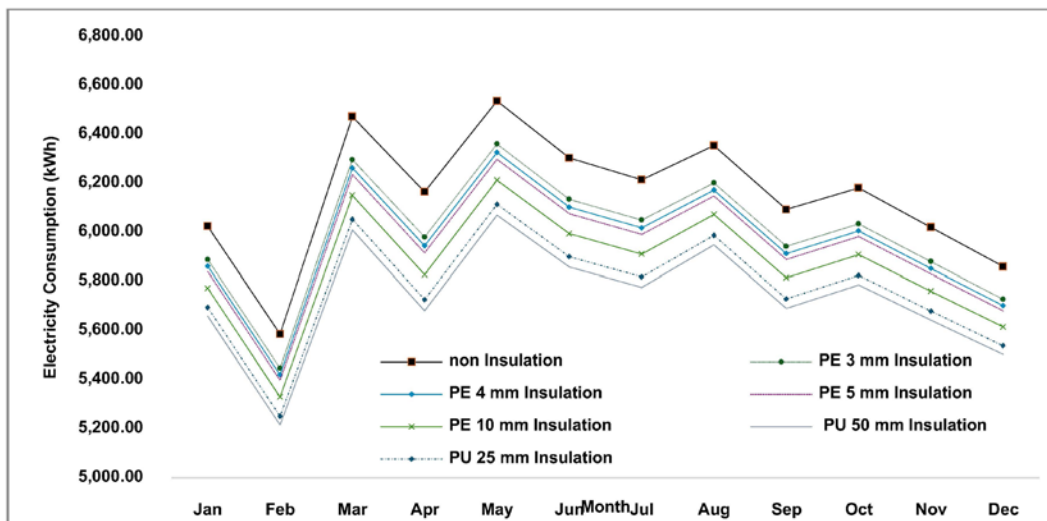
วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k , W/m·°C)	ความหนาแน่น (ρ , kg/m ³)	ค่าความร้อนจำเพาะ (c_p , kJ/kg·°C)
Metal Sheet	211	2,672	0.896
Polyethylene	0.029	45	1.210
Polyurethane	0.026	40	1.590



รูปที่ 1 ขนาดห้องและหลังคาของห้องคลีนรูม

จากการจำลองของโปรแกรม OpenStudio สำหรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity consumption) การใช้งานไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) และปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละเดือน (Monthly load profiles) ที่แสดงในตารางมีความสำคัญในการเข้าใจผลกระทบของการออกแบบหลังคาต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า

ในกรณีนี้จะพูดถึงผลกระทบที่เกิดจากการใช้วัสดุฉนวนหลังคา (Roof insulation) ที่มีความหนาต่างกัน ซึ่งจะสามารถช่วยในการประเมินผลการใช้พลังงานในหลังคาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในอาคาร แสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity consumption) ของห้องคลีนรูมที่ติดฉนวนหลังคาแต่ละวัสดุ

จากรูปที่ 2 แสดงถึง การใช้พลังงานไฟฟ้า มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาของฉนวนกันความร้อนบนหลังคา โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

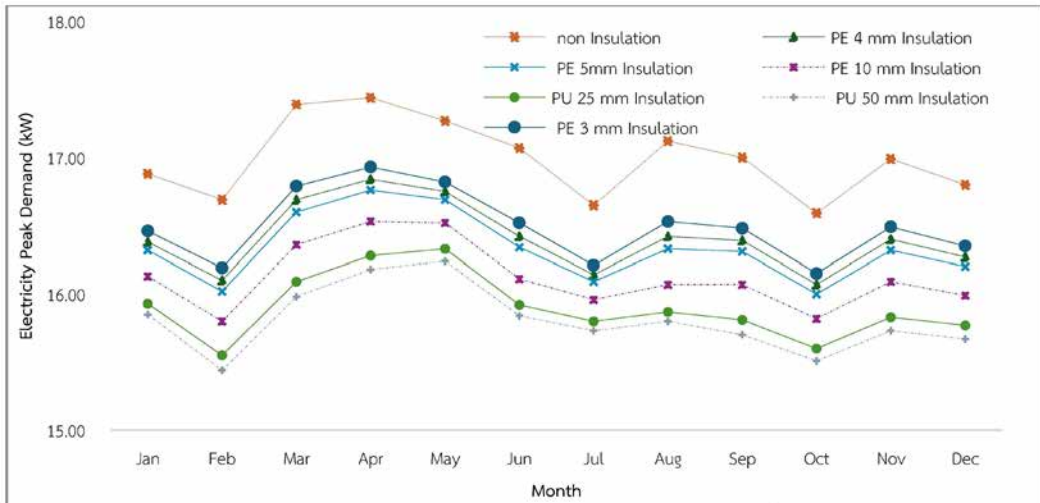
การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม แสดงถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในอาคารตลอดทั้งปี ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน พบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมสูงสุดอยู่ที่ 73,811.77 kWh ในขณะที่หลังคาที่มีฉนวน PU 50 mm มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมลดลงเหลือ 68,839.33 kWh ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มความหนาของฉนวนจากที่ไม่ติดฉนวนเลยเป็นการติดฉนวน PU 50 mm ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้ประมาณ 6.73%

ระบบทำความเย็นเป็นส่วนที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในอาคาร โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนขึ้น ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบทำความเย็นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบทำความเย็นอยู่ที่ 31,396.78 kWh ในขณะที่หลังคาที่มีฉนวน PU 50 mm ลดลงเหลือ 27,159.36 kWh ซึ่งเป็นการลดลงประมาณ 13.49%

การลดลงของการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดจากคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนที่ช่วยลดการถ่ายเท

ความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร จากหลักการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ฉนวนกันความร้อนมีหน้าที่หลักในการลดการนำความร้อน (Conduction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านวัสดุจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อฉนวนกันความร้อนมีความหนามากขึ้นความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อน (R-value) จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารได้น้อยลง ทำให้ระบบทำความเย็นไม่ต้องทำงานหนักเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้คงที่ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรมพลังงานที่ว่า การลดภาระการทำความเย็น (Cooling load) จะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนกันความร้อน โดยแสดงแผนภาพความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) ของการติดตั้งฉนวนกันความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity Peak Demand) ของห้องคลีนรูมที่ติดตั้งหลังคาแต่ละวัสดุ

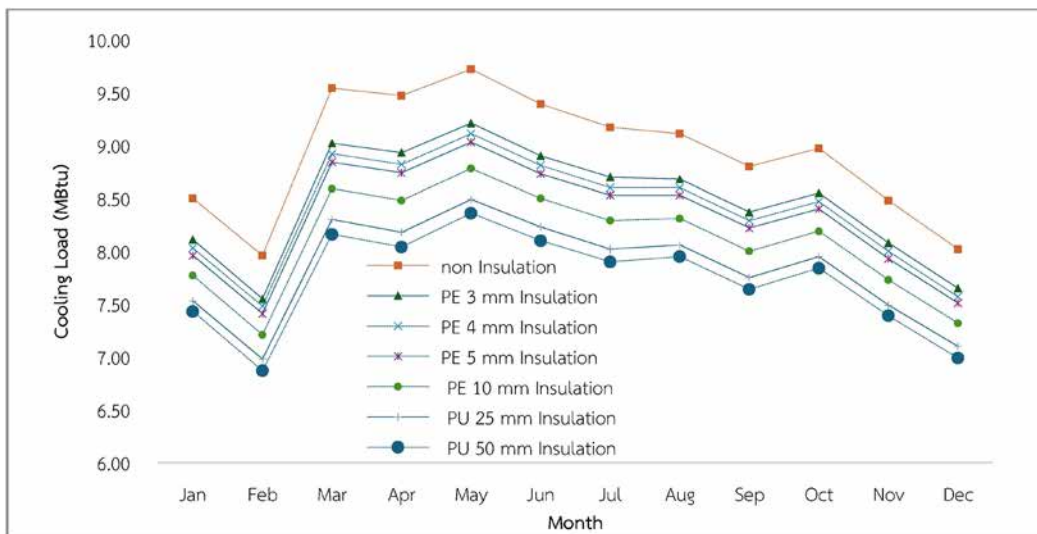
จากรูปที่ 3 สามารถอธิบายในเรื่องของความ ต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้ดังนี้

ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน พบว่า ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดรวมอยู่ที่ 203.88 kW ในขณะที่หลังคาที่มีฉนวน PU 50 mm ลดลงเหลือ 189.67 kW ซึ่งเป็นการลดลงประมาณ 6.97 % ระบบ ทำความเย็นเป็นส่วนที่ส่งผลต่อความต้องการไฟฟ้าสูงสุด มากที่สุด ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด จากระบบทำความเย็นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่ม ความหนาของฉนวน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของหลังคา ที่ไม่มีฉนวน ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดจากระบบ ทำความเย็นอยู่ที่ 80.11 kW ในขณะที่หลังคาที่มี ฉนวน PU 50 mm ลดลงเหลือ 66.72 kW ซึ่งเป็นการลดลงประมาณ 16.71%

ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด มักเกิดขึ้นในช่วงเวลา ที่ระบบทำความเย็นทำงานหนักที่สุด ซึ่งมักสัมพันธ์

กับอุณหภูมิภายนอกที่สูงขึ้น ฉนวนกันความร้อน ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้ ระบบทำความเย็นไม่ต้องทำงานหนักในช่วงเวลาที่มี ความต้องการสูงสุด ส่งผลให้ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ลดลง ตามหลักการของระบบไฟฟ้า (Electrical system) การลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้าน พลังงาน (Energy cost) และลดความเครียดของระบบ ไฟฟ้า (Electrical grid stress) ซึ่งเป็นประโยชน์ทั้งใน ระดับผู้ใช้และระดับระบบไฟฟ้าทั่วประเทศ

ภาระการใช้พลังงานรายเดือน (Monthly cooling load) และอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย (Average outdoor air dry bulb temperature) เป็นข้อมูลที่ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการใช้พลังงาน ในแต่ละเดือน แสดงแผนภาพการใช้พลังงานรายเดือน ของการติดตั้งฉนวนกันความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ภาระการใช้พลังงานรายเดือน (Monthly cooling load) ของห้องคลีนรูมที่ติดตั้งฉนวนหลังคาแต่ละวัสดุ

จากรูปที่ 4 สามารถอธิบายในเรื่องของภาระการทำความเย็นรายเดือน (Monthly cooling load) ลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับผลของวัสดุฉนวนต่อค่าภาระทางความร้อนประกอบด้วย

ประการแรก หลังคาที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนมีค่าภาระทางความร้อนสูงที่สุดในทุกเดือน เนื่องจากไม่มีวัสดุช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร ทำให้อาคารต้องใช้พลังงานในการทำความเย็นมากขึ้น

ประการต่อมา หลังคาฉนวน PE ความหนาต่าง ๆ หลังคาที่ใช้ฉนวน PE จะช่วยลดค่าภาระทางความร้อนได้เมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ไม่มีฉนวน ยิ่งความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้น จาก 3 mm เป็น 10 mm พบว่าค่าภาระทางความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการป้องกันความร้อนที่ดีขึ้นตามความหนาของวัสดุ

ประการสุดท้าย หลังคาฉนวน PU ความหนา 25 mm และ 50 mm วัสดุ PU มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนที่ดีกว่าฉนวน PE ซึ่งเห็นได้จากค่าภาระทางความร้อนที่ลดลงมากกว่า ฉนวน PU ความหนา 50 mm มีค่าภาระทางความร้อนต่ำที่สุดในทุกเดือน

แสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

5. วิจัย/อภิปรายผล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม OpenStudio ในการจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะของวัสดุฉนวนกันความร้อนหลังคาต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity consumption) ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity peak demand) และภาระการใช้พลังงานรายเดือน (Monthly cooling load) ในห้องคลีนรูม โดยศึกษาฉนวนที่มีความหนาต่างกันของ PE และ PU

ผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม พบว่าห้องคลีนรูมที่ไม่มีการติดตั้งฉนวน ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดถึง 73,811.77 kWh ต่อปี ขณะที่หลังคาฉนวน PU 50 mm สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงเหลือ 68,839.33 kWh ซึ่งหมายถึงการลดลงประมาณ 6.73% สาเหตุหลักที่ทำให้การใช้พลังงานลดลง คือ ฉนวนช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคาร ทำให้ระบบทำความเย็นไม่ต้องทำงานหนักเท่ากับอาคารที่ไม่มีฉนวน

ผลกระทบต่อความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand) คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้มากที่สุด ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบระบบไฟฟ้า ห้องคลีนรูมที่ไม่มีฉนวน มี Peak demand สูงสุดที่ 203.88 kW ขณะที่ห้องคลีนรูมที่ใช้ ฉนวน PU 50 mm มี Peak Demand ลดลงเหลือ 189.67 kW หรือลดลงประมาณ 6.97% โดยเฉพาะในระบบทำความเย็น ซึ่งเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานหลัก มี Peak demand ลดลงถึง 16.71% เมื่อใช้ฉนวน PU 50 mm การลด Peak demand ช่วยลดค่าไฟฟ้าและลดภาระของระบบไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้พลังงานสูงสุด

ผลกระทบต่อภาระการใช้พลังงานรายเดือน ในทุกเดือนอาคารที่ไม่มีฉนวนมีภาระทำความเย็นสูงสุด เพราะไม่มีการป้องกันความร้อนจากภายนอก เมื่อใช้ ฉนวน PE (3 mm - 10 mm) ภาระทำความเย็นลดลงตาม ลำดับ ฉนวน PU (25 mm และ 50 mm) มีประสิทธิภาพ ดีที่สุดในการลดภาระความร้อน โดยฉนวน PU 50 mm ช่วยลดภาระการใช้พลังงานรายเดือนได้มากที่สุด

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะฉนวนหลังคาห้องคลีนรูม พบว่า ฉนวนมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการ ใช้พลังงานโดยรวม โดยเฉพาะระบบทำความเย็นซึ่งใช้ พลังงานมากที่สุด การเพิ่มความหนาฉนวนหลังคาทำให้ การใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมลดลงอย่างชัดเจน โดย ฉนวน PU หนา 50 mm ให้ผลการประหยัดพลังงาน ดีที่สุด เนื่องจากช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อน จากภายนอก ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand) ลดลงเมื่อเพิ่มความหนาฉนวน ช่วยลดความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการใช้ พลังงานสูง อันเป็นผลจากการลดภาระการทำงานของ ระบบทำความเย็นและพัดลม การติดตั้งฉนวนที่เหมาะสม จึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนพลังงาน และปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร โดยเฉพาะฉนวน PU 50 mm ที่ให้ผลดีที่สุด

7. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมรรถนะวัสดุประกอบหลังคา ห้องคลีนรูม จะมีทั้งข้อดีและข้อเสียในคุณสมบัติของ วัสดุฉนวนแต่ละประเภท และจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า ช่วงเวลาในการทำงานของห้องคลีนรูมก็มีผลต่อ การเพิ่ม - ลด การใช้พลังงานด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่า ในช่วงเดือน มีนาคม - มิถุนายน จะใช้พลังงานไฟฟ้า ก่อนข้างสูงกว่าทุกเดือน โดยการศึกษาขึ้นจะเป็นแนวทาง หรือทางเลือกให้กับวิศวกร สถาปนิก และผู้ที่มีส่วน เกี่ยวข้องในการออกแบบก่อสร้างห้องคลีนรูมหรืออาคาร ที่มีความคล้ายคลึงกัน รวมไปถึงห้องคลีนรูมผลิตยาและ เครื่องมือแพทย์เพื่อการสนับสนุนทางการแพทย์ทหาร หรือเครื่องมือทางการแพทย์อื่น ๆ ที่ต้องมีการผลิต ภายใต้การควบคุมสภาวะแวดล้อมของห้องคลีนรูมนี้ เพื่อการสนับสนุนความมั่นคงทางการทหาร ในการป้องกันและรักษาอธิปไตยของประเทศชาติ ต่อไป งานวิจัยนี้มีส่วนสำคัญที่สามารถเลือกวัสดุ เพื่อนำมาเป็นฉนวนของหลังคาห้องคลีนรูมดังกล่าว ถ้าเลือกแบบมีสมรรถนะหลังคาที่สามารถป้องกันการ นำ การพา และการแผ่รังสีอาทิตย์ได้ดีก็จะได้มา ซึ่งการประหยัดพลังงานจากระบบ HVAC (Heating, ventilation, and air-conditioning) ทำงานน้อยลง หรือขนาดของระบบจะเล็กลงตามขนาดพิภคของ Cooling load แต่จะตามมาด้วยการลงทุนเริ่มต้น ในการก่อสร้างที่มีราคาสูงตามสมรรถนะของวัสดุที่มี การป้องกันที่ดี ส่วนที่มีการเลือกใช้สมรรถนะหลังคาต่ำ ก็ส่งผลให้การป้องกันรังสีอาทิตย์ได้ไม่ดี จึงทำให้ระบบ HVAC ทำงานหนักและทำให้พิภคของ Cooling load สูงขึ้น จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ต้นทุนในการก่อสร้างเริ่มต้นจะต่ำกว่าห้องคลีนรูม ที่มีสมรรถนะหลังคาที่ดี เป็นต้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Secretariat of the Cabinet, “Ministry of Energy Announcement on the Criteria and Methods for Calculating the Design of Each Building System, the Overall Energy Use of Buildings, and the Use of Renewable Energy in Various Building Systems, B.E. 2552,” in *Royal Thai Government Gazette*, Thailand, vol. 126, Special Part 122 Ngor, pp. 21 - 39, 2009. (in Thai).
- [2] N. Kampelis *et al.*, “An Integrated Energy Simulation Model for Buildings,” *Energies*, vol. 13, no. 5, p. 1170, 2020.
- [3] T. Chuaewong, S. Vorarat, and P. Rittidatch, “Energy Improvement of Building Frames in Government Office Buildings Using Energy Modeling: Case Study of Bang Mae Nang Municipality Office,” *EAU Heritage J. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 92 - 106, 2024.
- [4] E. S. Abbaas, M. Ismail, A. A. Saif, and M. A. Ghazali, “Optimizing the Thermal Performance of Residential Buildings in Jordan,” *J. Eng. Res.*, 2024. doi: 10.1016/j.jer.2024.05.025.
- [5] M. Rasul and C. Doring, “Performance Assessment of Desiccant Air Conditioning System in an Institutional Building in Subtropical Climate,” *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 486 - 491, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.173.
- [6] H. Fang *et al.*, “Performance Evaluation of a Metamaterial-Based New Cool Roof Using Improved Roof Thermal Transfer Value Model,” *Appl. Energy*. vol. 248, pp. 589 - 599, 2019.
- [7] Y. He, E. S. Lin, C. L. Tan, Z. Yu, P. Y. Tan, and N. H. Wong, “Model Development of Roof Thermal Transfer Value (RTTV) for Green Roof in Tropical Area: A Case Study in Singapore,” *Building Environ.*, vol. 203, p. 108101, 2021.
- [8] L. Brackney, A. Parker, D. Macumber, and K. Benne, *Building energy modeling with OpenStudio: A practical guide for students and professionals*. Springer, 2018.
- [9] *2021 ASHRAE Handbook: Fundamentals*, I-P ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, GA, USA, 2021.

คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ)

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

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



■ หลักเกณฑ์การพิจารณาถ่วงน้ำหนักบทความ

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



■ คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์

บทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์จะต้องไม่ เคยเผยแพร่ในวารสารใดมาก่อนและไม่อยู่ในระหว่างการ พิจารณาของวารสารอื่น หากมีเนื้อหาข้อมูลวิจัยบางส่วน เคยพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการจะต้องมีส่วนที่เพิ่ม เติมหรือขยายจากส่วนที่เคยตีพิมพ์และต้องมีคุณค่าทาง วิชาการที่เด่นชัด โดยได้รับการถ่วงน้ำหนักจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

■ บทความที่รับพิจารณาตีพิมพ์



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 เนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสาร อ้างอิง ภาคผนวก (ถ้ามี)

เนื้อเรื่องจะประกอบด้วย บทนำ (Introduction) ขอบเขตการวิจัย/วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย/ทดลอง (Materials and Methods) ผลการวิจัย/ทดลอง (Results) วิเคราะห์ 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 ประสพการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ 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



สแกนเพื่อส่งบทความนี้



วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

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

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ www.dti.or.th



สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ)
47/433 หมู่ที่ 3 ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปากเกร็ด
จังหวัดนนทบุรี 11120
โทรศัพท์ : 0 2980 6688, โทรสาร : 0 2980 6199
www.dti.or.th



สแกนเพื่อส่งบทความ