

ISSN : 2408-235X



SAU JOURNAL

OF SCIENCE & TECHNOLOGY

VOLUME 12 / NUMBER 1 / JANUARY - JUNE 2026

SAUJOURNAL.SAU.AC.TH



SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

เจ้าของ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ที่ปรึกษา

ดร.ฉัททวุฒิ พิษผล

อธิการบดี

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ คั่งทองสุข

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

กองบรรณาธิการภายใน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ คั่งทองสุข

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาวาเอกไชโย ธรรมรัตน์

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนัภา บริบูรณ์สุขศรี

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ โอธนาทรัพย์

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรฐิติ บรรจงศิริ

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ดร.กานูวัฒน์ แตระกุล

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

กองบรรณาธิการภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช อินต๊ะ

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา)

รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี

กรรมการ (มหาวิทยาลัยบูรพา)

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิระ สายสร

กรรมการ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระศักดิ์ ชาญุฒิธรรม

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ)

รองศาสตราจารย์ มนต์รี คำเงิน

กรรมการ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรรมการบริหาร

รองศาสตราจารย์ สิริวิษ ทัดสวน

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรฐิติ บรรจงศิริ

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วราธร แก้วแสง

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)



SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ฝ่ายพัฒนา ดูแลและปรับปรุงเว็บไซต์

นางณัฐภาวี จิระภาพันธุ์

นางสาวชুমณูช แยมรู้การ

นางสาวรุ่งทิวา ลังกาพันธ์

ฝ่ายเลขานุการ

นางณัฐภาวี จิระภาพันธุ์

นางสาวชুমณูช แยมรู้การ

จัดพิมพ์โดย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ที่ติดต่อ วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 โทร 0-2807-4500-27 ต่อ 404

เว็บไซต์ saujournalst.sau.ac.th อีเมล SAUJournalST@sau.ac.th

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยและบทความวิชาการ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหการ อาชีวอนามัยและความปลอดภัย วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเกษตร
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระหว่างนักวิจัย นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความวิจัยที่น่าสนใจ และมีคุณค่าทางวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้เกิดองค์ความรู้ใหม่แก่นักวิจัยของมหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

ขอบเขต

เป็นเอกสารเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ (บทความวิชาการปริทรรศน์ บทความวิชาการเทคนิค บทความวิชาการพิเศษ) ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระการเผยแพร่

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม ของทุกปี

ข้อคิดเห็นในบทความของวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY เป็นทรัพย์สินส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

Objectives

The main objectives of this journal are:

1. to publish research articles and academic articles in science and technology, Journal focus are Electrical Engineering, Electronics and communication Engineering, Computer Science, Computer Engineering, Civil Engineering, Mechanical Engineering, Industrial Engineering, Occupational Health and Safety, Environment Engineering and Agricultural Engineering;
2. to become a center for exchanging innovations in science and technology among researchers and interested persons;
3. to become a collection of interesting and valuable research papers and articles;
4. to promote and encourage Southeast Asia University researchers and interested persons to develop innovations.

Scope

To publish research articles and academic articles (Review articles, Technical article, Special Articles) in science and technology.

Schedule

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is published two issues annually. The first volume is published between January and June and the second is published July and December in each year.

Comments on the article of the SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is a personal opinion of the author. Editors boards may not necessarily agree.

บทบรรณาธิการ

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY ปีที่ 12 ฉบับที่ 1
ประจำเดือน มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2569 ปัจจุบันเป็นวารสารที่ได้รับรองให้อยู่ใน
ฐานข้อมูลของ TCI 2

จากผลการดำเนินงานของวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจทั้งหมด 5 บทความ เป็น
บทความวิจัย จำนวน 5 บทความ ซึ่งกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านจะได้รับความรู้
จากงานวิจัยต่าง ๆ ในวารสารเล่มนี้เป็นอย่างมาก

และในนามของ กองบรรณาธิการวารสาร ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ประเมินบทความทุก
ท่าน ที่ยอมเสียสละเวลาอันมีค่าช่วยกลั่นกรองงานวิจัยให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น รวมถึง
คณาจารย์ นักศึกษา บุคคลทั่ว ๆ ไปทุกท่าน ที่ให้ความสนใจส่งบทความเพื่อเข้าสู่ขบวนการ
พิจารณาคุณภาพเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ทำให้กองบรรณาธิการทุกท่านมีกำลังใจ
เป็นอย่างมากในการพัฒนาวารสารฯ ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

บรรณาธิการ

สารบัญ

บทความวิจัย

หน้า

การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงอุทกพลศาสตร์ของใบจักรเรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลในระบบผลักดันน้ำ Hydrodynamic Performance Analysis of Hull Propellers for Enhancing Flow Efficiency in Water Propulsion Systems จารุพันธุ์ หนูสมตน*, กนกอร รัตนากิจ, อนุสรณ์ ผ่องประภา, สันธยา จำเดช และสมบูรณ์ อัสวรจานนท์	1
กรอบแนวคิดการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้า A Conceptual Framework for Applying Artificial Intelligence in Shoplifting Prevention within Department Stores ทิพภา มีศิลป์* และ ชุติมา พิศาลย์*	20
การออกแบบและพัฒนาระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติขนาดย่อส่วนโดยใช้กลไกแกนทรีสำหรับการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติ Design and Development of a Miniature Automated Storage and Retrieval System Using a Gantry Mechanism for Automation Education ชนภัช เชนนาราพัฒน์	37
การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบจำลองตัวแทนที่ใช้การถดถอยกระบวนการเกาส์เซียนและวิธีฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรม Surrogate Model Optimization Using Gaussian Process Regression and Particle Swarm Optimization for Engineering Design Problems พุทธา จินครวั', นันทวัฒน์ วีระยุทธ', สุกัญญา เจียมวรรณัทกุล', พรเทพ ชมชื่น' และ กิตติพงศ์ บุญโล่ง'*	55

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย

หน้า

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ของกลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อน
หลายลิงก์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่ในแนวคิ่งของหุ่นยนต์ขา

71

Multi-Objective Optimization of a Multi-Link Slider–Crank

Mechanism for Vertical Motion Generation in Legged Robots

กิตติพงศ์ บุญโล่ง¹, พุทธา จินครวั¹, นัฐพล ศรีรัตนศักดิ์¹, และ นันทวัฒน์ วีระยุทธ^{2*}

การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงอุทกพลศาสตร์ของใบจักรเรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลในระบบผลักดันน้ำ

Hydrodynamic Performance Analysis of Hull Propellers for Enhancing Flow Efficiency in Water Propulsion Systems

จารุพันธ์ หนูสมคน*, กนกอร รัตนากิจ, อนุสรณ์ ผ่องประภา, สอนทยา จำเดช และ สมบูรณ์ อัสวรจันนท์

Jaruphant Noosomton*, Kanok-on Rodjanakid, Anusorn Phongprapa, Sonthaya Khamdech

and Somboon Asawarujanon

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

16/10 ถนนเลียบคลองทวีวัฒนา เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : jaruphant.noo@bkkthon.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 ธันวาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 25 กุมภาพันธ์ 2569 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 8 พฤษภาคม 2569

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 13 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอกรณีศึกษาการออกแบบใบจักรเรือชนิดจมผิว (Surface Piercing Propeller: SPP) แบบ 3 ใบ ที่มีมุมโค้งเอน (Rake Angle) 22 องศา ที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะรูปทรงเพื่อใช้ในระบบผลักดันน้ำ สำหรับติดตั้งกับเครื่องยนต์เรือผลักดันน้ำ โดยเน้นการออกแบบใบจักรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และทดสอบกับเครื่องยนต์ขนาด 16 แรงม้า โดยทดสอบสมรรถนะในอุโมงค์น้ำแบบเปิดเพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริง ผลการทดสอบพบว่าใบจักรที่ออกแบบใหม่สามารถทำความเร็วในการผลักดันน้ำได้สูงสุด 6 น็อต (11.112 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ที่ระดับผิวน้ำ ที่มุมเพลานใบ 36 องศา (โดยประมาณ) และระยะจมใบ 30 เซนติเมตร ทำความเร็วเฉลี่ยได้ 5.6 น็อต (10.371 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลงร้อยละ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับใบจักรมาตรฐานทั่วไปในท้องตลาด ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงมุมกวาดของใบจักรมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพแรงดันและการประหยัดพลังงานสำหรับการใช้งานทางเรือ

คำสำคัญ : ออกแบบใบจักร, ปลายปีกใบจักร, ใบจักรโค้งเอน

Abstract: This research presents a case study on the design of a Surface Piercing Propeller (SPP) with an optimized geometry for water propulsion systems. The study focuses on a 3-blade propeller featuring a 12-inch diameter and a 22-degree rake angle, specifically engineered for integration with a 16-horsepower engine. Performance evaluations were conducted in an open-water flume to simulate real-world operational conditions. The experimental results demonstrated that the newly designed SPP achieved a maximum propulsion speed of 6 knots (11.112 km/h) when positioned at the water surface. In contrast, at a submersion depth of 30 cm and an approximate shaft angle of 36 degrees, the propeller maintained an average speed of 5.6 knots (10.371 km/h). Furthermore, the optimized propeller

design contributed to a 16% reduction in fuel consumption compared to conventional standard propellers available in the market. These findings indicate that the enhancement of the propeller's rake angle plays a critical role in improving thrust efficiency and energy conservation for flood mitigation missions.

Keywords: Design Blade, Tip Blade, Camber Blade.

1. บทนำ

จาก “แผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี” [1] (ปรับปรุงครั้งที่ 1 พ.ศ. 2566-2580) โดยคณะกรรมการขับเคลื่อนแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาและพัฒนาทรัพยากรน้ำของประเทศในระยะ 20 ปี โดยยึดหลักแนวทางตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง เพื่อสร้างความสมดุลระหว่างการอนุรักษ์ฟื้นฟูการพัฒนาแหล่งน้ำ และการบริหารจัดการเชิงลุ่มน้ำ ทั้งระบบ ตั้งแต่ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ ที่สอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาทรัพยากรน้ำ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ได้แก่ เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) แผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี แผนแม่บทประเด็นที่ 19 การจัดการน้ำทั้งระบบ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 เป็นต้น โดยได้มีการบูรณาการหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมากกว่า 50 หน่วยงาน เพื่อร่วมกันกำหนดกรอบแนวทางการพัฒนาด้านทรัพยากรน้ำ คำเป้าหมาย ตัวชี้วัด กลยุทธ์ แผนงาน ที่เชื่อมโยงของตัวชี้วัดระดับผลสัมฤทธิ์ ผลกระทบ และดัชนีตัวชี้วัดในแผนระดับต่างๆ ซึ่งได้นำประเด็นสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของโลก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Variability) มาตรการการแก้ปัญหาที่อาศัยธรรมชาติ (Nature-based Solutions) การปรับตัวโดยอาศัยระบบนิเวศ เศรษฐกิจหมุนเวียน (Bio-Circular-Green Economy) เทคโนโลยีดิจิทัล เพื่อนำมากำหนดเป็นเป้าหมายและแนวทางการพัฒนา ซึ่งมีผลทำให้รูปแบบการบริหารจัดการน้ำเปลี่ยนแปลงไปโดยมุ่งเน้นโครงการขนาดเล็กที่มีผลกระทบต่อทรัพยากรน้ำ และการบริหารจัดการที่ไม่ใช่

สิ่งก่อสร้างมากขึ้น พร้อมทั้งได้มีการจัดประชุมรับฟังความคิดเห็น 22 กลุ่มน้ำ เพื่อรับฟังความคิดเห็น ข้อเสนอแนะของผู้แทนคณะกรรมการลุ่มน้ำ องค์กรผู้ใช้น้ำ และภาคประชาชน นำมากำหนดแนวทางการพัฒนาแผนแม่บทดังกล่าว [1] โดยได้กำหนดวิสัยทัศน์ “ประเทศไทยมีการบริหารทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน โดยการมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วนภายใต้การพัฒนาอย่างสมดุลและมีพลวัต เพื่อความมั่นคงด้านน้ำในทุกมิติ” [1]

1.1 ประเด็นปัญหาและการปรับปรุง

ก) การวิเคราะห์สถานการณ์ด้านทรัพยากรน้ำยังไม่ครอบคลุมกับสถานการณ์โลก จึงต้องมีการนำประเด็นสถานการณ์ปัจจุบัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มาตรการการแก้ปัญหาที่อาศัยธรรมชาติ การปรับตัวโดยอาศัยระบบนิเวศ เทคโนโลยีดิจิทัล ช่องว่างการดำเนินงานที่ผ่านมา มาวิเคราะห์เพิ่มขึ้น

ข) การเชื่อมโยงเป้าหมายกับแผนระดับชาติ / นานาชาติยังไม่ครอบคลุมกับประเด็นใหม่ที่เพิ่มขึ้นจึงได้เชื่อมโยงตัวชี้วัดและเป้าหมายเพิ่มเติม ได้แก่ แผนพัฒนาเศรษฐกิจฯ ฉบับที่ 13 SENDAI Frame Work BCG

ค) กรอบแนวทางการพัฒนาเดิมยังขาดการมองในมิติของระบบนิเวศทั้งระบบ จึงได้ปรับปรุงกรอบจาก 6 ด้านเดิม เป็น 5 ด้าน โดยการนำด้าน 4 คุณภาพน้ำ และ 5 พื้นฟูป่าต้นน้ำรวมกันเพื่อมองภาพรวมของนิเวศอย่างเป็นระบบ

ง) การกำหนดเป้าหมายไม่ได้นำปัจจัยด้านงบประมาณมาพิจารณา ทำให้ผลการดำเนินงานจริงไม่สอดคล้องกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ จึงได้มีการนำปัจจัย

เรื่องงบประมาณมาพิจารณา เพื่อให้การดำเนินงานสอดคล้องกับความเป็นจริง

จ) กระบวนการมีส่วนร่วมยังไม่เปิดโอกาสให้ประชาชนกำหนดกรอบการพัฒนา จึงเปิดโอกาสให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วม ตั้งแต่กระบวนการระบุปัญหา กำหนดแนวทางการพัฒนา และให้ข้อเสนอแนะ

ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นกรอบแนวทางเชิงยุทธศาสตร์นโยบาย แต่ในทางปฏิบัติและการนำยุทธศาสตร์มาขยายผลเป็นรูปธรรมนั้น พบว่าไม่สามารถดำเนินการได้ จากหลายๆ สาเหตุและปัจจัย ทั้งในระดับจุลภาค ไม่ว่าจะเป็นระดับชุมชน ตำบล อำเภอ อบต. อบจ. หน่วยงานราชการส่วนท้องถิ่น ที่ขาดความรู้ความเข้าใจในเรื่อง ภูมิศาสตร์ทางน้ำ ภูมิศาสตร์ผังเมือง แผนภูมิการวางแผนทางแบบขั้นบันไดในการแก้ปัญหา ไปจนถึงระดับมหภาค ไม่ว่าจะเป็น ระดับจังหวัด กรม กอง หรือ แม้แต่กระทรวงที่เกี่ยวข้องไปจนถึงระดับผู้บริหาร ที่ไม่มีความชัดเจน ไม่มีความรู้ ขาดความเข้าใจ หวังเพียงผลประโยชน์ จนทำให้การบริหารจัดการน้ำไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเป็นรูปธรรม ขาดการบูรณาการ แม้แต่ระดับท้องถิ่น เกิดปัญหาน้ำท่วม น้ำล้นตลิ่ง ขาดการแจ้งเหตุล่วงหน้า ขาดการเตรียมความพร้อม จึงได้เกิดปัญหาน้ำท่วมทุกปี น้ำระบายไม่ทัน ตลิ่งดินเงิน

จากสถานการณ์อุทกภัยที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรุนแรงในหลายภูมิภาคซึ่งเกิดซ้ำซาก ไม่เพียงแต่สร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินและคุณภาพชีวิตของประชาชนเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจในวงกว้าง แม้ปัจจุบันจะมีการประยุกต์ใช้เรือหางยาวและเครื่องสูบน้ำแบบพญานาคเพื่อเร่งระบายน้ำในลักษณะบรรเทาปัญหาเฉพาะหน้า ทว่าแนวทางดังกล่าวยังประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพเชิงอุทกพลศาสตร์ที่ไม่สอดคล้องกับสภาวะการทำงานที่ต้องการแรงขับเคลื่อนน้ำปริมาณมาก การใช้ใบจักรเรือมาตรฐานที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดส่งผลให้เกิดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงและประสิทธิภาพการจัดการน้ำไม่เป็นไปตามเป้าหมาย

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาใบจักรเรือรูปแบบใหม่ที่มีคุณลักษณะรูปทรงที่เหมาะสมและผ่านกระบวนการออกแบบตามหลักวิศวกรรมอุทกพลศาสตร์ [22,28] เพื่อยกระดับสมรรถนะการผลักดันน้ำและแก้ไขช่องว่างทางเทคนิคดังกล่าว เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มประสิทธิภาพในการบรรเทาอุทกภัย



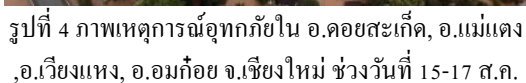
รูปที่ 1 ภาพเหตุการณ์อุทกภัยในอุโบสถวัดภูมินทร์ จ.น่าน ณ วันที่ 24 ก.ค. 2568 [2]



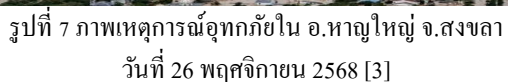
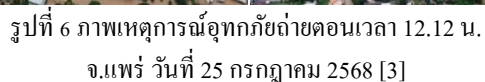
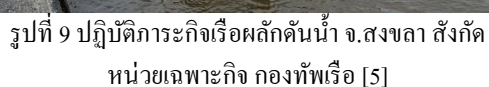
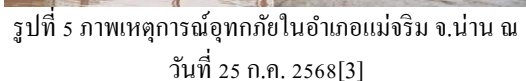
รูปที่ 2 ภาพเหตุการณ์อุทกภัย ณ Lalana Cafe อ.ท่าวังผา จ.น่าน ณ วันที่ 23 ก.ค. 2568 [2]



รูปที่ 3 ภาพเหตุการณ์อุทกภัยในอำเภอเมือง จ.น่าน ช่วงเช้า วันที่ 25 ก.ค. 2568 [3]



รูปที่ 8 ปฏิบัติการภารกิจเรือผลักดันน้ำ จ.เชียงใหม่ สังกัด
หน่วยเฉพาะกิจ กองทัพเรือ [5]



ตารางที่ 1 สถิติปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง วันที่ 23
ก.ค. 2568 เวลา 10.00 น. จ.น่าน [4]

สถิติ ปริมาณน้ำ (หน่วย มม.)	สถานีตรวจวัด	ว/ด/ ป	เวลา
310	บ้านปางมะโอ จ. พะเยา	23- 07- 2025	10.00
298	บ้านขุนน้ำพริก จ. น่าน	23- 07- 2025	10.00
297.5	บ้านน้ำลาว จ.พะเยา	23- 07- 2025	10.00
292.5	บ้านสิบสองพัฒนา จ.พะเยา	23- 07- 2025	10.00

สถิติ ปริมาณน้ำ (หน่วย มม.)	สถานีตรวจวัด	ว/ค/ ป	เวลา
285.5	บ้านปางคำเหนือ จ. พะเยา	23- 07- 2025	10.00
285.2	บ้านผาเวียง จ.น่าน	23- 07- 2025	10.00
282	บ้านสกาตกลาง จ. น่าน	23- 07- 2025	10.00
280	หน่วยจัดการต้นน้ำ น้ำข่วง จ.น่าน	23- 07- 2025	12.00
279.5	บ้านผาน้ำอ้อย จ. น่าน	23- 07- 2025	10.00
276.6	หน่วยพิทักษ์อุทยาน แห่งชาติที่ สก.2 (ภูลังกา) จ.พะเยา	23- 07- 2025	12.00
275.4	หน่วยจัดการต้นน้ำ น้ำหมากหมอก จ.น่าน	23- 07- 2025	12.00
275	สะพานน้ำแม่คะ จ. พะเยา	23- 07- 2025	12.00
272.5	บ้านปางพริก จ. พะเยา	23- 07- 2025	10.00
266.2	หน่วยศึกษาการ พัฒนาการอนุรักษ์ ต้นน้ำจิม จ.พะเยา	23- 07- 2025	12.00

ข้อมูลจากคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ วันที่ 23 ก.ค. 2568 เวลา 10.00 น. แสดงให้เห็นปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงในหลายพื้นที่ทั่วตอนบนของ จ.น่าน เกือบแต่ละตัวเลข 300 มม. ขณะที่ปกติแล้วปริมาณน้ำฝนตลอดทั้งเดือน ก.ค. ของ จ.น่าน เฉลี่ยอยู่ที่ 232.98 มม.

1.2 ปัญหาทางเทคนิคและResearch Gap

1.2.1. ปัญหาทางเทคนิค (Technical Problems) เกิดจากการนำใบจักรแบบทั่วไปมาใช้งานผิวดัดรูปประสงค์ กล่าวคือ

- **ประสิทธิภาพเชิงอุทกพลศาสตร์ไม่เหมาะสม** การใช้เรือหางยาวและเครื่องสูบน้ำแบบพญานาคในปัจจุบันเป็นการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า ซึ่งมีประสิทธิภาพการจัดการน้ำไม่เป็นไปตามเป้าหมาย เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อสร้างแรงขับเคลื่อนน้ำ (Thrust) ในปริมาณมากสำหรับสภาวะน้ำท่วมโดยเฉพาะ

- **ความสิ้นเปลืองพลังงานสูง** การใช้ใบจักรเรือที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดส่งผลให้เครื่องยนต์ต้องทำงานหนักแต่ได้แรงดันน้ำน้อย ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูง

- **การเกิดโพรงอากาศ (Aeration)** ใบจักรทั่วไปเมื่อต้องทำงานในสภาวะน้ำท่วมที่มีความขุ่นและมีเศษวัสดุสูง มักเกิดปัญหาความดันต่ำที่หน้าใบจักรจนเกิดโพรงอากาศ ส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่สามารถส่งถ่ายกำลังได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ หรือที่เรียกว่าอาการ "ใบจักรฟรี" (Slip)

1.2.2. ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) จากการทบทวนวรรณกรรมและสถานการณ์ปัจจุบัน พบช่องว่างที่งานวิจัยนี้ต้องการเติมเต็มกล่าวคือ

- **การขาดองค์ความรู้ด้านการออกแบบใบจักรเพื่อภารกิจผลักดันน้ำโดยเฉพาะ** งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการออกแบบใบจักรเพื่อความเร็วของตัวเรือ แต่ยังขาดการศึกษาและออกแบบรูปทรงใบจักร โดยเฉพาะชนิดจมผิว (Surface Piercing Propeller: SPP) ที่ปรับปรุงมุมโค้ง

เอน (Rake Angle) เพื่อเน้นประสิทธิภาพในการ "ผลักดันมวลน้ำ" ในสภาวะน้ำท่วม

- **ข้อจำกัดด้านมุมโค้งเอน (Rake Angle)** ใบจักรเรือหางยาวทั่วไปมีมุมโค้งเอนต่ำ ทำให้พื้นที่ผิวกระทำของใบและการกระจายความดันไม่เหมาะสมกับการผลักดันน้ำที่ระดับผิวน้ำ งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการเพิ่มมุมโค้งเอนเป็น 22 องศา เพื่ออุดช่องว่างดังกล่าว

- **การขาดข้อมูลเปรียบเทียบในสภาวะการทำงานจริง** ยังมีการศึกษาจำนวนน้อยที่เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง "ใบจักรทั่วไปในท้องตลาด" กับ "ใบจักรที่ออกแบบใหม่" ในมิติของอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงและแรงขับเคลื่อนน้ำในสภาวะกึ่งจมกึ่งลอย (Surface Piercing) เพื่อใช้ในการบรรเทาอุทกภัยอย่างเป็นรูปธรรม

1.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods)

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของอุปกรณ์หลักและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เพื่อทดสอบสมรรถนะของใบจักรเรือชนิดจมผิว (Surface Piercing Propeller: SPP) ที่ออกแบบขึ้นใหม่ ดังนี้

1.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ (Materials and Equipment)

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. **ใบจักรต้นแบบ (Prototype Propeller)** ใบจักร SPP แบบ 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ผลิตจากวัสดุโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูง โดยมีลักษณะเด่นคือการออกแบบมุมโค้งเอน (Rake Angle) ที่ 22 องศา

2. **เครื่องยนต์ทดสอบ** เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ขนาด 16 แรงม้า (4,200 รอบต่อนาที) ปริมาตรกระบอกสูบ 420–425 ซี.ซี. ระบบวาล์วเหนือลูกสูบ (V-OHV)

3. **เครื่องมือวัด** ชุดเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) สำหรับตรวจสอบความเร็วรอบของเพลาลูกพัด (n) และชุดเกจวัดแรงเชื้อเพลิงเพื่อหาอัตราสิ้นเปลือง

4. **สถานที่ทดสอบ** อุโมงค์น้ำแบบเปิด (Open-water tunnel) ที่สามารถควบคุมความเร็วการไหลของน้ำและปรับระดับการจมของใบจักรได้

1.3.2 วิธีการวิจัยและขั้นตอนการทดลอง (Research Methodology & Procedures)

กระบวนการวิจัยดำเนินการตามขั้นตอนเชิงทดลอง (Experimental Design) ดังนี้

1. การเตรียมการและกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ (Preparation)

- ติดตั้งเครื่องยนต์และชุดเพลาลูกพัดใบจักรเข้ากับโครงสร้างประกอบในอุโมงค์น้ำ

- กำหนดระดับความเร็วการไหลของน้ำ (V_A) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังหัว (J)

2. การดำเนินการทดสอบ (Testing Procedures)

ทำการทดสอบโดยแบ่งสภาวะการทำงานของใบจักรเป็น 2 รูปแบบหลัก เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

- **สภาวะจมกึ่งลอยกึ่งจม (Surface Level)** ติดตั้งใบจักรให้จมน้ำเพียงครึ่งเดียว โดยตั้งมุมเพลาลูกพัดระหว่าง 28 - 36 องศา เพื่อจำลองการทำงานของเรือหางยาวที่ใช้ความเร็วสูง

- **สภาวะจมมิดใบ (Submerged Level)** ติดตั้งใบจักรให้จมน้ำที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการสร้างแรงขับในขณะบรรทุกหนักหรือต้องการแรงฉุดลากสูง

3. การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

ในแต่ละสภาวะ จะทำการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์และวัดค่าต่าง ๆ ดังนี้

- วัดแรงขับ (Thrust, T) และแรงบิด (Torque, Q) ที่เกิดขึ้น

- บันทึกความเร็วรอบของเพลาลูกพัด (n) และความเร็วของน้ำ (V_A)

- ตรวจสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วยเวลา

4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Analysis)

นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ไร้มิติ (Dimensionless Coefficients) ตามหลักวิศวกรรมเพื่อประเมินสมรรถนะ ดังนี้

$$\begin{aligned} & - \text{สัมประสิทธิ์แรงขับ, } K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \\ & - \text{สัมประสิทธิ์แรงบิด, } K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \\ & - \text{ประสิทธิภาพน้ำเปิด (Open Water Efficiency)} \} \\ \eta_o &= \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \end{aligned}$$

5. การสังเกตและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางกายภาพ (Physical Observation)

- ศึกษาการเกิดโพรงอากาศ (Aeration) และการดึงอากาศ (Ventilation) ผ่านการบันทึกภาพความเร็วสูง เพื่อวิเคราะห์หัตถิพลของมุม Rake 22 องศา ที่มีต่อการลดการหมุนวนของน้ำที่ปลายใบ (Tip Vortex) และการคงสภาพแรงขับเคลื่อนในสภาวะน้ำขุ่นหรือมีเศษวัสดุ

1.3.3 การทดสอบสมรรถนะ (Performance Testing) ทำการทดสอบในอุโมงค์น้ำเพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริง โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 สภาวะหลัก กล่าวคือ

- สภาวะระดับผิวน้ำ (Surface Level) ติดตั้งใบจักรให้จมถึงลอยกึ่งจมที่ระดับผิวน้ำ โดยมีมุมเพลลาขับประมาณ 28 - 36 องศา

- สภาวะจมมิดใบ (Submerged Level) ติดตั้งใบจักรให้มีระยะจมใบ 30 เซนติเมตร

1.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

- วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ไร้มิติ เป็นการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงขับ (K_T), สัมประสิทธิ์แรงบิด (K_Q), และประสิทธิภาพในน้ำเปิด (η_o) เพื่อเปรียบเทียบกับใบจักรทั่วไปในท้องตลาด

- การประเมินอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างใบจักรที่ออกแบบใหม่กับใบจักรทั่วไปในท้องตลาด

- การสังเกตปรากฏการณ์ทางอุทกพลศาสตร์ ศึกษาการเกิดโพรงอากาศ (Aeration) และการดึงอากาศเข้าสู่ใบจักร

(Ventilation) เพื่ออธิบายประสิทธิภาพการสร้างแรงขับเคลื่อน

1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (Experimental Apparatus)

การทดลองนี้ดำเนินการในสภาวะภาคสนาม (Field Testing) โดยใช้อุปกรณ์หลักดังนี้

1. เรือทดสอบ ติดตั้งเครื่องยนต์เบนซินขนาด 16 แรงม้า

2. ใบจักรทดสอบ ใบจักรที่ออกแบบใหม่ (3 ใบ, 12 นิ้ว, Rake 22°) และใบจักรมาตรฐานในท้องตลาด

3. ระบบวัดความเร็วรอบ (Tachometer) เครื่องวัดความเร็วรอบแบบเลเซอร์ (Digital Laser Tachometer) สำหรับวัดความเร็วรอบของเพลลาขับ (Propeller Shaft)

4. Spring Dynamometer

5. ชุดวัดแรง Thrust Sensor ประกอบด้วยโหลดเซลล์ (Load Cell) ขนาด 20 kg สำหรับวัดแรงผลักในแนวแกน และ Torque Sensor เซนเซอร์วัดแรงบิดที่ติดตั้งบนเพลลาขับ

6. ชุดโครงสร้างปรับมุม (Adjustable Jig) อุปกรณ์จับยึดหางเรือที่สามารถปรับและล็อกมุมเพลลาขับ (Shaft Angle)

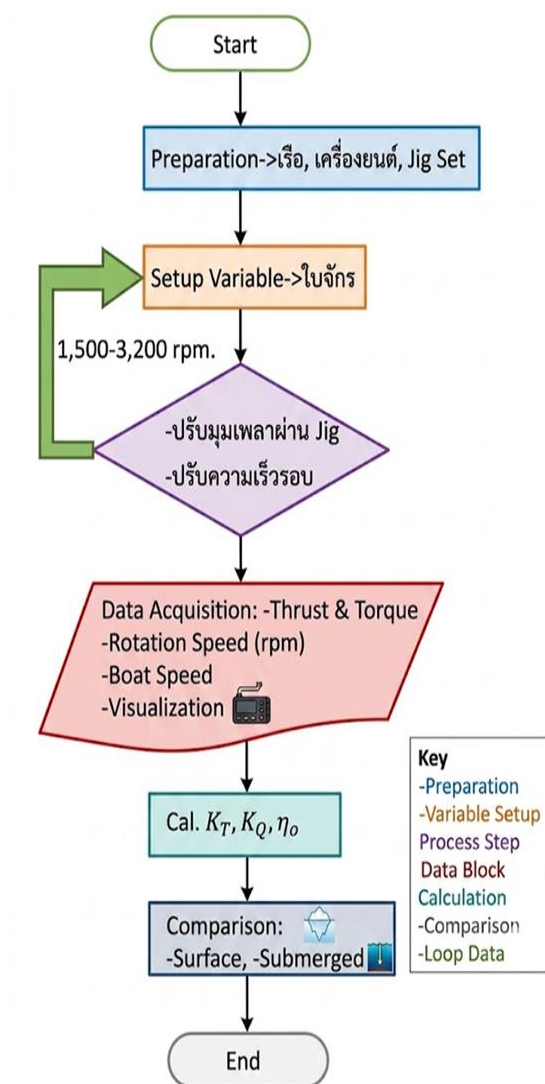
7. ระบบบันทึกภาพ (Visualization) สำหรับบันทึกพฤติกรรมที่เกิดโพรงอากาศบริเวณผิวน้ำ

ตารางที่ 2 อุปกรณ์และข้อมูลทางเทคนิคในการทดลอง

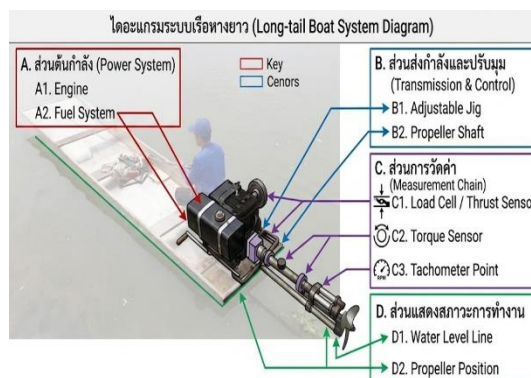
อุปกรณ์	หน้าที่ (Function)	ข้อมูลทางเทคนิค (Specification)
Load Cell (x4)	วัดแรง Thrust ในแนวแกน	Capacity 20 kg
Torque Sensor	วัดแรงบิดที่เพลลาขับ	Integrated on Propeller Shaft
Laser Tachometer	วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์	Digital Display, Precision ± 1 rpm.

Adjustable Jig	ปรับและล็อก มุมเพลลา	Manual Screw/Bolt Locking System
Camera	บันทึกพฤติกรรม Cavitation	High Frame Rate for Visualization

1.3.6 แผนผังการทดลองและการวัดค่า (Experimental Diagram and Measurement)



รูปที่ 10 Flowchart Diagram of the experimental setup showing



รูปที่ 11 Schematic diagram of the experimental setup showing

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องตามหลักสถิติ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการวัดค่าดังนี้

1. การควบคุมสภาวะ ทดสอบในพื้นที่น้ำนิ่ง (Static water) เพื่อลดอิทธิพลของกระแสน้ำและลม

2. การปรับระยะจม (Immersion Depth) กำหนดระยะจมของใบจักร 2 ระดับ คือ สภาวะจมผิวน้ำ (Surface Level) ที่ตำแหน่งแกนเพลลาขนานกับผิวน้ำ และสภาวะจมมิดใบ (Submerged Level) ที่ระยะลึก 30 เซนติเมตร

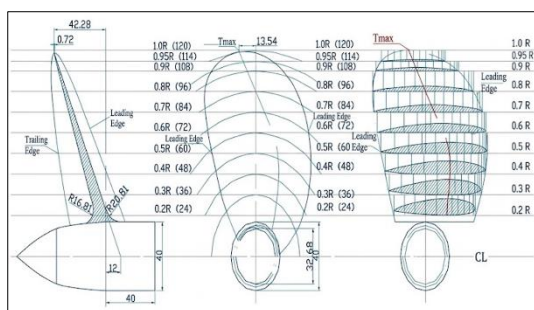
3. การวัดความเร็วและการสิ้นเปลือง ในแต่ละรอบการทดสอบ จะปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ตั้งแต่ 1,500 ถึง 3,200 rpm โดยบันทึกค่าความเร็ว เมื่อสถานะความเร็วคงที่ (Steady State) พร้อมทั้งคำนวณอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการลดลงของปริมาณน้ำมันในถังวัดมาตรฐาน

4. การวัดพฤติกรรมโพรงอากาศ สังเกตและบันทึกลักษณะการดึงอากาศ (Ventilation) และการสิ้นสะท้อนของหางเรือในขณะที่ใบจักรตัดผ่านผิวน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับสมรรถนะการผลักดัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Blade Design

Propeller Base (B_p) จะประกอบไปด้วยเส้น (Contour) ของประสิทธิภาพใบจักร (Propeller Efficiency) หรือ η_o Advance Coefficient หรือ δ และอัตราส่วนพิทช์ (Pitch Ratio) หรือ P/D , [7], [11].



รูปที่ 12 แบบ Drawing Design New Blade



รูปที่ 13 Model ใบจักรแบบใหม่ 3 ปีก มุมโค้ง 22°

การหา δ จากสมการ (1)

$$\delta = \frac{nD}{V_A} \quad (1)$$

การหา ρ_p จากสมการ (2)

$$B_P = \frac{nP_D^{0.5}}{V_A^{2.5}} \quad (2)$$

ความต้านทานความฝืด (Frictional Resistance) คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างตัวเรือกับน้ำ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของเรือแล่นไปในน้ำที่มีความหนืด (Viscosity) ความต้านทานความฝืด (Frictional Resistance) จะมีค่ามากที่สุดในการต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับเรือขณะแล่นไปในน้ำ



รูปที่ 14 Ship Resistance ที่กระทำกับตัวเรือ [6]

ความต้านทานความฝืด (Frictional Resistance) หาได้จากสมการ (3)

$$R_F = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_F \quad (3)$$

ค่า Reynold Number (R_n) หาได้จาก สมการ (4)

$$R_n = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับหรือแรงผลัก (C_p) ค่าสัมประสิทธิ์ใบจักร (C_p) และค่าประสิทธิภาพใบจักร (η_o) หาได้จากสมการ (5)

$$C_p = (P - P_o) / 0.5 \rho n^2 D^2 \text{ for propeller}$$

$$C_T = 2T / \rho A V_a \text{ for Thrust Coefficient,}$$

เมื่อ (A = Propulsion area)

$$\eta_o = T \cdot V_a / 2\pi N Q, \text{ (Propeller Efficiency)} \quad (5)$$

ค่า C_F สามารถหาได้ โดยใช้ ITTA Line (International Towing Tank Conference) จาก สมการ (6)

$$C_F = \frac{0.075}{(\log 10 R_n - 2)^2} \quad (6)$$

กำลังประสิทธิผล (Effective Power, P_E) คือ กำลังที่ต้องเอาชนะความต้านทานของเรือ เพื่อให้เรือแล่นไปได้ตามความเร็วที่ต้องการ เราสามารถหาลำดับประสิทธิผล (Effective Power) ได้จาก สมการ (7)

$$P_E = R_T \times V_S \quad (7)$$

กำลังเพลลา (Shaft Power, P_S) คือ กำลังงานที่เพลลาได้รับหลังจากผ่านเกียร์ (Gear) กำลังเพลลา (Shaft Power) จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเกียร์ (Gear Efficiency) และกำลังเครื่องจักรใหญ่ (Brake Power) จาก สมการ (8)

$$P_S = \eta_G P_B \quad (8)$$

กำลังเครื่องจักรใหญ่ (Brake Power, P_B) คือ กำลังงานที่เครื่องจักรใหญ่สามารถผลิตได้ หักลบความสูญเสีย (Loss) ต่างๆ ภายในเครื่องจักรใหญ่แล้ว เราสามารถหาลำดับเครื่องจักรใหญ่ (Brake Power) ได้ โดยการนำ

เครื่องจักรใหญ่ไปทดลองกับไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) หรือคำนวณจาก สมการ (9)

$$P_B = 2\pi Qn \quad (9)$$

กำลังส่ง (Delivered Power, P_D) คือ กำลังงานตรงเพลาท้าย (Tail Shaft) ที่จะส่งเข้าสู่ใบจักรเพื่อทำให้เกิดแรงผลัก (Thrust) ที่ผลักเรือให้แล่นไปได้ตามความเร็วที่ต้องการกำลังส่ง (Delivered Power) จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการส่ง (Transmission Efficiency) และกำลังเพลา (Shaft Power) จาก สมการ (10)

$$P_D = \eta_T P_S \quad (10)$$

ประสิทธิภาพการส่ง (Transmission Efficiency, η_T) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังส่ง (Delivered Power) กับกำลังเพลา (Shaft Power) ซึ่ง ประสิทธิภาพการส่ง (Transmission Efficiency) จะรวมความสูญเสีย (Loss) ของแบร์ริงต่างๆ ด้วย เป็นไปตาม สมการ(11)

$$\eta_T = \frac{P_D}{P_S} \quad (11)$$

กำลังประสิทธิผล (Effective Power) จะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การผลักดันน้ำ (Quasi Propulsive Coefficient) และ กำลังส่ง (Delivered Power) ดังนั้นจะได้ สมการ (12)

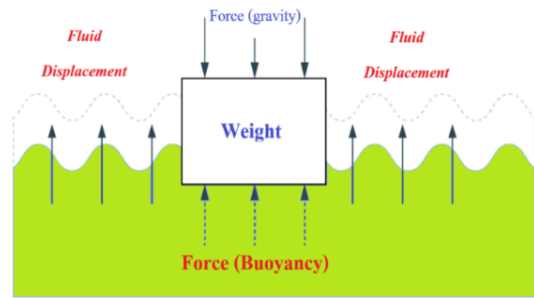
$$P_E = \eta_D P_D \quad (12)$$

ประสิทธิภาพเกียร์ (Gear Efficiency, η_G) คือ อัตราส่วนระหว่าง กำลังเพลา (Shaft Power) กับกำลังเครื่องจักรใหญ่ (Brake Power) จะได้สมการ (13)

$$\eta_G = \frac{P_S}{P_B} \quad (13)$$

สัมประสิทธิ์การผลักดันน้ำ (Quasi-Propulsive Coefficient, η_D) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังประสิทธิผล (Effective Power) กับกำลังส่ง (Delivered Power) จะได้สมการ (14)

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \quad (14)$$



รูปที่ 15 แรงลอยตัวของวัตถุ

แรงลอยตัว (Buoyancy) คือ แรงในแนวตั้งที่ดันเรือขึ้นในลักษณะ Upward พยางเรือไม่ให้จม ดังรูปที่ (11) ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยเรือ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า แรงลอยตัว (Buoyancy) จะมีขนาดเท่ากับระวางขับน้ำ (Displacement) ของเรือ ซึ่งถ้า $F_B = \nabla$ นั่นคือเรือจะลอยน้ำ แต่ถ้าถ้า $F_B < \nabla$ เรือจะจมน้ำ เป็นไปตามความสัมพันธ์ สมการ (15)

$$F_B = \rho \nabla \quad (15)$$

ใบจักรกำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ω ในสนามการไหลเข้าที่แกนสมมาตร (V_∞) นั้นสามารถพิจารณาได้สำหรับกรณีที่ยางกว่าของปีกที่รับแรงไหลเข้าสม่ำเสมอโดยไม่คำนึงถึงพจน์ความเร็วเชิงมุมใน (x_p, y_p, z_p) ระบบพิกัดที่หมุนไปกับใบจักร ค่าเวกเตอร์ความเร็วรวม V สามารถเขียนเป็นผลรวมของการไหลสัมพัทธ์ V_{rel} และความเร็วศักย์ q_{ind} เนื่องจากอิทธิพลความเร็วของใบจักรบนสนามความเร็ว เป็นไปตามสมการ (16)

$$V = V_{rel} + q_{ind} \quad (16)$$

โดยที่ความเร็วสัมพัทธ์ V_{rel} ในระบบอ้างอิงใบจักรสามารถเขียนได้ดังสมการ (17)

$$V_{rel} = V_\infty - \omega \times r \quad (17)$$

ภายใต้สมมติฐาน ที่ว่าของไหลไม่มีความหนืดและไม่สามารถบีบอัดได้ สามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันสเกลาร์จากสมการ (18)

$$q_{ind} = \nabla \phi, \quad \nabla^2 \phi = 0 \quad (18)$$

ที่ขอบท้ายใบจักร (Blade Tailing Edge) [7] ภายใต้งานไขว้ว่าการไหลต้องออกด้วยความเร็วจำกัด หรือแรงดันที่กระโดดที่ขอบท้ายใบจักร ต้องเป็นศูนย์ในปัญหาสถานะคงที่ (Steady State) เงื่อนไข Kuiper G. [7] ช่วยให้เห็นค่าไดโพล (Dipole Intensities, Φ) ได้โดยที่มีค่าคงที่ตลอดแนวกระแสน้ำแต่ละเส้นด้วยการใช้เงื่อนไข “เชิงเส้น” เป็นไปได้สมการ (19)

$$\Delta\Phi_{T.E.} = \Phi_{T.E.}^U - \Phi_{T.E.}^L + V_{rel} \cdot r_{T.E.} \quad (19)$$

2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงอุทกพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Performance Analysis) ของใบจักรที่ออกแบบใหม่ (แบบ 3 ใบ, 12 นิ้ว, Rake angle 22 องศา) โดยพิจารณาผ่านตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Coefficients) เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบอุโมงค์น้ำ

1. สัมประสิทธิ์สมรรถนะของใบจักร (Propeller Performance Coefficients)

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของใบจักรที่ออกแบบขึ้นใหม่กับใบจักรทั่วไป นั้นการวิเคราะห์จะพิจารณาผ่านตัวแปรหลัก 3 ตัว คือ สัมประสิทธิ์แรงขับ (K_T), สัมประสิทธิ์แรงบิด (K_Q) และตัวแปรความเร็วก้าวหน้า (J) ตามสมการ (20 - 22)

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (20)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (21)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (22)$$

โดยที่ J คือสัมประสิทธิ์ก้าวหน้า (Advance Coefficient), V_a คือความเร็วก้าวหน้าของน้ำ (m/s), n คือความเร็วรอบ (rpm) และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางใบจักร (m) จากผลการทดสอบที่ความเร็ว 6 น็อต พบว่าใบจักรที่ออกแบบใหม่มีค่า K_T ที่สูงกว่าใบจักรทั่วไปในย่านความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับการผลักดันน้ำ (Water

Propulsion) ที่ต้องการแรงผลัก (Thrust) สูงในขณะที่อัตราการก้าวหน้าต่ำ

2. ผลของมุมโค้งเอน 22 องศา ต่อประสิทธิภาพการไหล (Influence of 22-Degree Rake Angle)

พบว่า (Rake Angle) ที่ 22 องศา ซึ่งสูงกว่าใบจักรเรือหางยาวทั่วไป การเพิ่มมุมโค้งเอน (rake) ส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวกระทำของใบจักร (Effective Blade Surface Area) และการกระจายความดัน (Pressure Distribution) นั่นคือ

- การเพิ่มโมเมนตัมแนวแกน (Axial Momentum)

มุม Rake 22 องศา ช่วยให้ทิศทางการไหลของน้ำที่ผ่านใบจักรให้มีความเป็นเส้นตรง (Laminar-like flow) มากขึ้น ลดการสูญเสียพลังงานจากการหมุนวน (Rotational Losses) ที่ปลายใบจักร (Tip Vortex)

- ลดการเกิดโพรงอากาศ (Aeration Mitigation) ใน

สภาวะการผลักดันน้ำท่วมที่มีความขุ่นและเศษวัสดุสูง มุมโค้งเอนที่เหมาะสมจะช่วยลดค่าของความดันต่ำที่หน้าใบจักร ส่งผลให้ลดการเกิดโพรงอากาศลง ทำให้เครื่องยนต์ 16 แรงม้าสามารถส่งถ่ายกำลัง (Power Transmission) ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพโดยไม่เกิดอาการ "ใบจักรฟรี" (Slip)

- ประสิทธิภาพในน้ำเปิด (Open Water Efficiency)

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในน้ำเปิด (Open Water Efficiency, η_o) ตามสมการที่ (23)

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \quad (23)$$

พบว่าในสภาวะการทำงานที่ระดับผิวน้ำ ใบจักรที่ออกแบบใหม่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) เพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ระบุว่าสามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้ถึง 16% เนื่องจากเครื่องยนต์ไม่ต้องใช้รอบสูงเกินความจำเป็นเพื่อสร้างแรงขับที่เท่าเดิม (Specific Fuel Consumption ลดลง)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล (Results and Discussion)

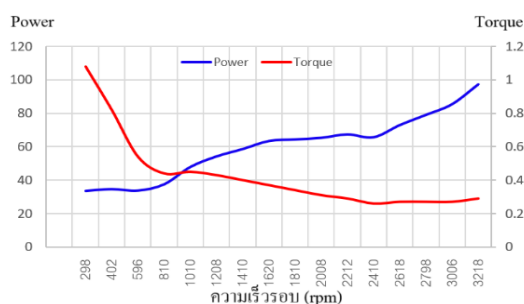
3.1 ผลการทดลอง (Experiments Result)

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงผลัก และแรงบิดที่แปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวของไหลคือน้ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงสมรรถนะของใบจักรที่ออกแบบใหม่นี้ การเปรียบเทียบความเร็วของการหมุนที่ค่าต่างๆ ความดันใช้งานที่เกิดขึ้นได้แสดงให้เห็นแล้วในตารางที่ (3) และรูปที่ (16)

ตารางที่ 3 แสดงผลของความเร็วกระแสน้ำที่ใบจักรทำได้ ณ ความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ (rpm)	Stream water of velocity (ความเร็วกระแสน้ำ)				Torque (Nm)	Power
	Knots	km/hr	m/min	m/s		
298	1.9 3	3.57	59.50	0.9 9	1.0 8	33.62
402	1.9 9	3.68	61.33	1.0 2	0.8 2	34.66
596	1.9 4	3.59	59.83	1.0 0	0.5 4	33.81
810	2.1 5	3.99	66.50	1.1 1	0.4 4	37.58
1010	2.7 5	5.09	84.83	1.4 1	0.4 5	47.94
1208	3.1 1	5.76	96.00	1.6 0	0.4 3	54.25
1410	3.3 6	6.23	103.8 3	1.7 3	0.4 0	58.67
1620	3.6 4	6.74	112.3 3	1.8 7	0.3 7	63.47
1810	3.7 0	6.84	114.0 0	1.9 0	0.3 4	64.42
2008	3.7 5	6.94	115.6 7	1.9 3	0.3 1	65.36
2212	3.8 7	7.16	119.3 3	1.9 9	0.2 9	67.43
2410	3.7 7	6.98	116.3 3	1.9 4	0.2 6	65.73

ความเร็วรอบ (rpm)	Stream water of velocity (ความเร็วกระแสน้ำ)				Torque (Nm)	Power
	Knots	km/hr	m/min	m/s		
2618	4.1 8	7.75	129.1 7	2.1 5	0.2 7	72.99
2798	4.5 4	8.40	140.0 0	2.3 3	0.2 7	79.11
3006	4.9 0	9.08	151.3 3	2.5 2	0.2 7	85.51
3218	5.5 8	10.3 4	172.3 3	2.8 7	0.2 9	97.38



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของกำลังขับ (Power) และแรงบิด (Torque) ที่ใบจักรทำ

อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์เรือที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเครื่องยนต์เรือขนาดเล็ก ประเภทเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ขนาด 16 แรงม้าที่ 4200 รอบต่อนาที ปริมาตรกระบอกสูบ ขนาด 420 – 425 ซี.ซี. ความจุน้ำมันเชื้อเพลิง 6.5 ลิตร ความจุน้ำมันเครื่อง 1.1 ลิตร ระบบวาล์ว V-OHV (วาล์วเหนือลูกสูบ) ดังแสดงในรูปที่ (17) และเครื่องวัดความเร็วรอบที่ระยะรอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ (18)



รูปที่ 17 แสดงเครื่องยนต์ทดสอบ



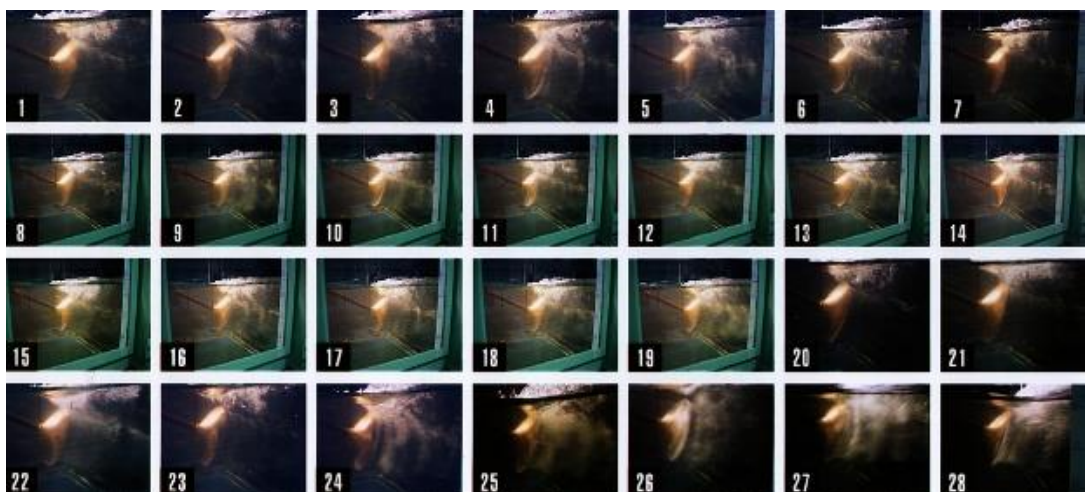
รูปที่ 18 แสดงรอบการหมุนของเพลาลูกบิด ที่ 1982 rpm จากการทดสอบสมรรถนะการผลักดันน้ำในอุโมงค์น้ำแบบเปิด (Open Water Tunnel) พบว่าระดับความลึกในการจุ่มใบจักรมีอิทธิพลอย่างนัยสำคัญต่อความเร็วการไหลของทกพลศาสตร์ จากการวิเคราะห์ในรูปที่ (19) เมื่อกำหนดสภาวะการทำงานที่ระดับจมผิวน้ำ (Surface Level) โดยมีมุมเพลาลูกบิดประมาณ 28 องศา ใบจักรสามารถสร้างความเร็วการไหลเฉลี่ยได้สูงสุดถึง 6 นี้อต (11.112 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มระยะจมของใบจักรเป็น 30 เซนติเมตร (Submerged Level) ประสิทธิภาพในการสร้างความเร็วการไหลกลับมีแนวโน้มลดลง โดยที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงถึง 3,200 รอบต่อนาที (rpm) สามารถทำความเร็วเฉลี่ยได้เพียง 5.6 นี้อต (10.37 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ดังแสดงในรูปที่ (20, 21) ผลการ

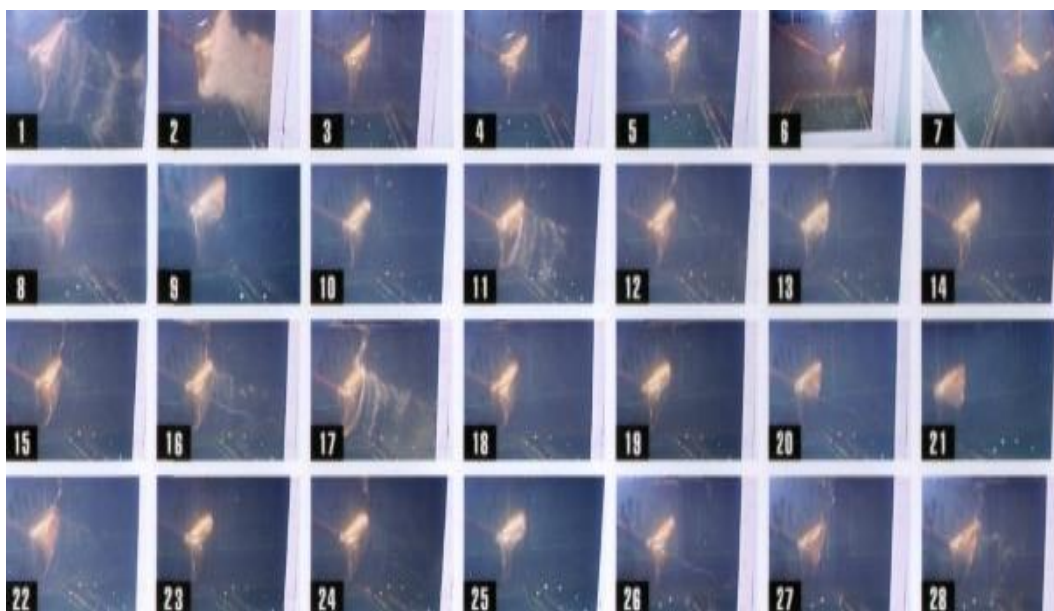
ทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าสภาวะการทำงานแบบกึ่งจมกึ่งลอย (Surface Piercing Condition) ของใบจักรที่ออกแบบใหม่ให้สมรรถนะเชิงอุทกพลศาสตร์ที่เหนือกว่าสภาวะจมมิดใบอย่างชัดเจน

ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการดึงอากาศเข้าสู่ใบจักร (Ventilation) โดยในสภาวะจมผิวน้ำ อากาศจะถูกดึงลงไปปกคลุมบริเวณหลังใบจักร (Suction Side) ทำหน้าที่เป็นชั้นกันชน (Buffer layer) ที่ช่วยควบคุมการลดลงของความดันไม่ให้ต่ำกว่าจุดวิกฤต ส่งผลให้สามารถชะลอการเกิดโพรงอากาศรุนแรง (Severe Cavitation) และป้องกันอาการสูญเสียแรงขับเคลื่อน (Thrust Breakdown) แม้ทำงานที่ความเร็วรอบสูง

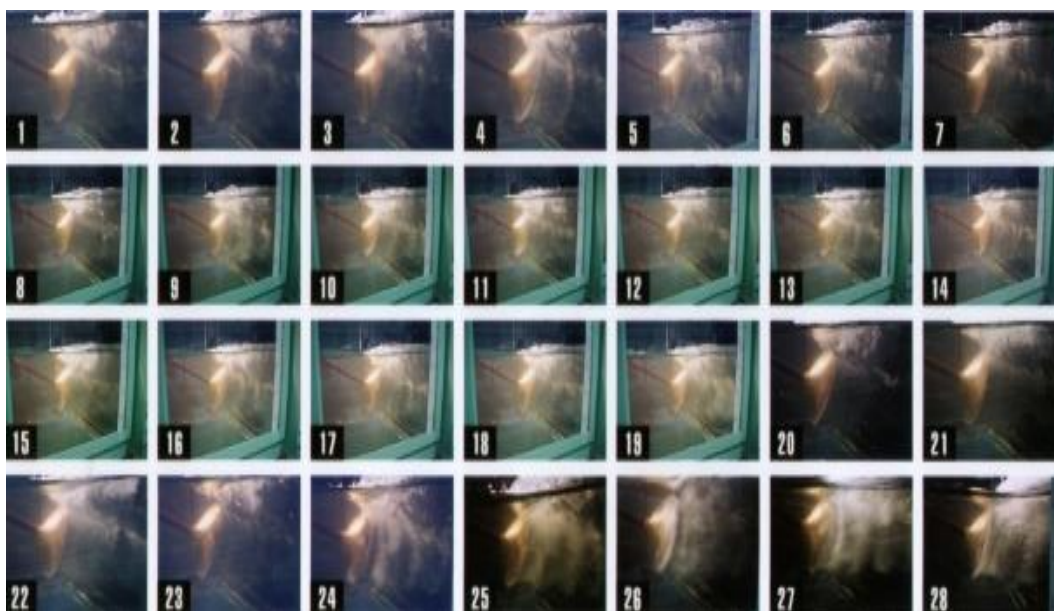
นอกจากนี้ การไหลแบบผสมอากาศ (Aerated Flow) ยังส่งผลดีในการลดแรงต้านจากความหนืดของน้ำ (Viscous Drag) ที่กระทำต่อผิวใบจักร ส่งผลให้เครื่องยนต์ขนาด 16 แรงม้า สามารถถ่ายโอนพลังงานเพื่อสร้างโมเมนตัมการไหลได้สูงกว่าสภาวะจมมิดใบ ซึ่งในสภาวะหลังนี้ใบจักรจะถูกดันด้วยมวลน้ำที่มีความหนาแน่นสูงกว่าและขาดกลไกการลดแรงเสียดทานด้วยชั้นอากาศ (Air-film lubrication) ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง



รูปที่ 19 สมรรถนะการผลักดันน้ำที่ระดับความลึกจมผิวน้ำ (Surface Level) ให้ความเร็วเฉลี่ย 6 นี้อต (11.112 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)



รูปที่ 20 ลักษณะกระแสน้ำที่ระยะจมใบ 30 เซนติเมตร ณ ความเร็วรอบ 1,982 รอบต่อนาที (ประมาณ 2000 รอบ/นาที)



รูปที่ 21 ลักษณะกระแสน้ำที่ระยะจมใบ 30 เซนติเมตร ณ ความเร็วรอบ 3,200 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะการจุ่มใบจักร ณ ระดับผิวน้ำ (Surface Level) ให้ความเร็วการไหลสูงกว่าสภาวะจมมิดใบ (Submerged Level) แม้จะใช้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับหลักเหตุผลทางวิศวกรรมดังนี้

1. การลดแรงต้านเชิงกลและแรงต้านปรสิติก (Reduction of Mechanical and Parasitic Drag) คือเมื่อติดตั้งใบจักรในระดับจมผิวน้ำ ส่วนประกอบของชุดเพลาลำ (Propeller Shaft) และหางเสือจะสัมผัสกับน้ำน้อยลง ส่งผลให้แรงต้านปรสิติก (Parasitic Drag) ที่เกิดจากการ

ปะทะของน้ำกับโครงสร้างที่ไม่ใช่ส่วนสร้างแรงขับเคลื่อน อย่างมีนัยสำคัญ พลังงานจากเครื่องยนตจึงถูกส่งถ่ายไปยังใบจักรเพื่อสร้างแรงขับ (Thrust) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าสภาวะจมมิดใบที่หุดเพลลาทั้งหมดต่อต้านกระแสน้ำ

2. คุณลักษณะเฉพาะของมุมโค้งเอน 22 องศา (Significance of 22-Degree Rake Angle) เป็น การออกแบบใบจักรให้มีมุมโค้งเอน (Rake Angle) สูงถึง 22 องศา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวกระทำน้ำในลักษณะกึ่งจมกึ่งลอย (Surface Piercing) ในสภาวะจมผิว น้ำ มุมโค้งเอนที่สูงจะช่วย “รีดน้ำ” และสร้างลิ้นความดัน (Pressure Wedge) ที่มีความเข้มข้นสูงบริเวณหน้าใบจักร ช่วยลดการเกิดอากาศย้อนกลับ (Ventilation) เข้าไปในระบบ ทำให้ใบจักรสามารถสร้างแรงผลักดันเชิงปริมาตรได้สูงกว่าใบจักรทั่วไปที่มีมุมโค้งเอนต่ำ

3. การถ่ายเทโมเมนตัมและทฤษฎีแรงขับ (Momentum Transfer and Propeller Theory) ในสภาวะจมผิวน้ำ กระแสน้ำที่ถูกเร่งผ่านใบจักรจะมีลักษณะเป็นลำน้ำความเร็วสูง (High-velocity jet) ที่ไม่มีแรงดันต้านจากมวลน้ำด้านบน (Hydrostatic Pressure) ทำให้การขยายตัวของลำน้ำหลังใบจักร (Slipstream expansion) เป็นไปได้อย่างอิสระมากกว่า ส่งผลให้การเปลี่ยนโมเมนตัมของของไหล มีค่าสูงขึ้นตามกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ความเร็วเฉลี่ยพุ่งสูงถึง 6 นี้อ ในขณะที่ยังคงประหยัดเชื้อเพลิงได้มากขึ้นเนื่องจากลดภาระโหด (Torque Load) ของเครื่องยนต์จากการต้านน้ำของใบจักรส่วนที่ไม่จำเป็น

3.2 การอภิปรายผลเชิงเปรียบเทียบ (Validation and Comparison with Previous Studies)

1. การเปรียบเทียบเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Comparison)

จากผลการทดลองพบว่าสภาวะกึ่งจมกึ่งลอย (Surface Piercing) ให้ประสิทธิภาพดีกว่าสภาวะจมมิดใบ กล่าวคือปรากฏการณ์ที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในสภาวะกึ่งจมกึ่ง

ลอย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Olofsson [29] และ Ferrando et al. [30] ซึ่งระบุว่าใบจักรทำงานในสภาวะ Surface Piercing จะมีแรงต้านจากความหนืด (Viscous Drag) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากพื้นที่สัมผัสน้ำของใบจักรลดลงครึ่งหนึ่งในแต่ละรอบการหมุน นอกจากนี้ การเกิดชั้นอากาศ (Air-film lubrication) บนผิวใบจักรยังช่วยลดแรงเสียดทานผิว (Skin friction) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Young and Kinnas [31] ที่อธิบายว่าความหนาแน่นของส่วนผสมอากาศและน้ำ (Aerated flow) ที่ต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ ช่วยให้ใบจักรสามารถทำความเร็วรอบสูงได้โดยไม่เกิด Thrust Breakdown จากแรงต้านมวลน้ำที่มากเกินไป

2. การตรวจสอบความถูกต้องด้วยสมการทางทฤษฎี (Theoretical Validation)

เมื่อพิจารณาผ่านสมการของ Advance Ratio ($J = \frac{V_a}{nD}$) พบว่าที่ความเร็วรอบสูง (3,200 rpm) ค่า J ในสภาวะจมมิดใบมีค่าต่ำกว่าสภาวะกึ่งจมกึ่งลอย ส่งผลให้ Slip ratio สูงขึ้นและสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนและการปั่นป่วนของน้ำ (Turbulence) มากกว่า ซึ่งยืนยันได้ด้วยสมการประสิทธิภาพของใบจักร ($\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$) โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในสภาวะกึ่งจมกึ่งลอย ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (K_Q) ลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงขับ (K_T) อันเนื่องมาจากการลดแรงต้านความหนืด

4. สรุปผล (Conclusion)

จากการศึกษาและทดสอบสมรรถนะเชิงอุทกพลศาสตร์ของใบจักรเรือชนิดจมผิว (Surface Piercing Propeller: SPP) สำหรับระบบผลักดันน้ำในการกักเก็บเรอูทกภัย นั้นสามารถวิเคราะห์ สังเคราะห์ และสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

4.1 พฤติกรรมของโพรงอากาศและสมรรถนะเชิงอุทกพลศาสตร์

1. พฤติกรรมโพรงอากาศ ผลการวิจัยพบว่าในสภาวะจมผิวน้ำ (Surface Level) เกิดปรากฏการณ์การดึงอากาศเข้าสู่ใบจักร (Ventilation) ซึ่งอากาศจะเข้าไปปกคลุมบริเวณหลังใบจักร (Suction Side) พฤติกรรมนี้ช่วยเปลี่ยนรูปแบบจากโพรงอากาศแบบไอระเหย (Vapor Cavitation) ที่มีความรุนแรงและกัดกร่อนผิวใบจักร ให้กลายเป็นโพรงอากาศแบบผสมอากาศ (Ventilated Cavitation) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า

2. การควบคุมความดัน ชั้นอากาศนี้ทำหน้าที่เป็น Buffer Layer ที่ช่วยควบคุมความดันบนผิวใบจักรไม่ให้ต่ำลงจนถึงจุดวิกฤต ส่งผลให้สามารถชะลอการเกิดโพรงอากาศรุนแรง (Severe Cavitation) และป้องกันอาการสูญเสียแรงขับเทียบพลัน (Thrust Breakdown) แม้ทำงานที่ความเร็วรอบสูงถึง 3,200 rpm

3. ผลสัมฤทธิ์ ใบจักรชนิด 3 ใบ ขนาด 12 นิ้ว มุม Rake 22 องศา ให้ความเร็วการไหลเฉลี่ยสูงสุด 6 น็อต ณ มุมเพลลา 28 องศา ซึ่งสูงกว่าสภาวะจมผิวน้ำ (5.6 น็อต) อย่างมีนัยสำคัญ

4.2 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและโหลดทางกล

การที่ใบจักรทำงานในสภาวะกึ่งจมกึ่งลอยช่วยลดแรงต้านจากความหนืด (Viscous Drag) เนื่องจากความหนาแน่นของส่วนผสมอากาศและน้ำต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ พฤติกรรมนี้ส่งผลโดยตรงต่อการลดภาระโหลด (Torque Load) ที่ส่งถ่ายจากเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์ขนาด 16 แรงม้า สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและลดอัตราการใช้สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้ร้อยละ 16 เมื่อเทียบกับใบจักรมาตรฐาน

4.3 การยืนยันผลด้วยหลักการทางทฤษฎี

ผลการวิจัยยืนยันว่าการออกแบบใบจักรให้ทำงานภายใต้กลไก Air-film Lubrication ช่วยให้การส่งถ่ายโมเมนตัมของของไหลเป็นไปได้อย่างอิสระ ตามทฤษฎีลำน้ำความเร็วสูง (High-velocity Jet) ซึ่งพฤติกรรมของ

โพรงอากาศแบบระบายอากาศนี้ (Ventilated Flow) เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ใบจักรที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะเหนือกว่าสภาวะการทำงานแบบปกติ

4.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ควรมีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับ โครงสร้างเชิงมวลของโพรงอากาศ (Cavitation Cloud Structure) โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับการกล้องความเร็วสูง (High-speed Camera) เพื่อวิเคราะห์การยุบตัวของโพรงอากาศในน้ำขุ่นที่มีตะกอน ซึ่งจะช่วยในการพัฒนาวัสดุและรูปทรงใบจักรให้มีความทนทานต่อการกัดเซาะ (Erosion) ในระยะยาวและมีสมรรถนะสูงสุดในสภาวะอุทกภัยจริงอย่างยิ่งต่อไป.

พินัยศัพท์

F_B = แรงลอยตัว (Buoyancy)

V = ปริมาตรระวางขับน้ำ (Volume Displacement)

Re = Reynold Number

P_D = เส้นผ่านศูนย์กลางใบจักร (Diameter), (ft)

Q = แรงบิด (Torque)

P_B = กำลังเครื่องจักรใหญ่ (Brake Power)

P_S = กำลังเพลลา (Shaft Power)

P_E = กำลังประสิทธิภาพ (Effective Power)

P_D = กำลังส่ง (Delivered Power)

V_A = ความเร็วแอดวานซ์ (Advance Speed)

V_S = ความเร็วของเรือ (Ship Speed)

R_T = ความต้านทานเรือ

R_F = ความต้านทานความฝืด (Frictional Resistance)

μ = ความหนืดของน้ำ (Viscosity)

n = จำนวนรอบการหมุนของเครื่องจักรใหญ่, ใบจักร หน่วยเป็น rpm

η_G = ประสิทธิภาพเกียร์ (Gear Efficiency)

η_T = ประสิทธิภาพการส่ง (Transmission Efficiency)

S = พื้นที่ผิวเปียก (Wetted Surface Area)

η_D = สัมประสิทธิ์การผลักดันน้ำ (Quasi-Propulsive Coefficient)

C_F = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความฝืด (Frictional Resistance Coefficient)
 ω = ความเร็วเชิงมุมของใบจักร (Propeller angular velocity)
 $\vec{U}_w$ = ความเร็วการไหลเข้า (ในระบบคงที่ของเรือ), [Effective inflow velocity (in the ship fixed system)]
 $\vec{U}_{in}$ = ความเร็วการไหลเข้า (ในระบบใบจักรคงที่) [Local inflow velocity (in the propeller fixed system)]
 $\vec{q}_t$ = ความเร็วรวม, (Total velocity)
 $\vec{V}_w$ = Total velocity on wake surface
 $C_P = (P - P_0)/0.5\rho U_\infty^2$ Pressure coefficient for otherwise
 $C_P = (P - P_0)/0.5\rho n^2 D^2$ Pressure coefficient for propeller
 $C_T = 2T/\rho A V_a$ for Thrust Coefficient, (A= Propulsion area) สัมประสิทธิ์แรงขับ
 $\eta_o = T \cdot V_a / 2\pi N Q$, ประสิทธิภาพของใบจักร (Propeller Efficiency)
 $\eta_t = R_t \cdot V_s / 2\pi N Q$, Propulsive Efficiency, (R_t = Total Ship resistance)
 $\vec{V}_{Tip}$ = Total velocity at the center of the tip vortex core
 K_Q = ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient), $K_Q = Q/\rho n^2 D^5$
 K_T = ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ (Thrust coefficient), $K_T = T/\rho n^2 D^4$
 n = ความถี่การหมุนของใบจักร (รอบ/วินาที), (Propeller rotational frequency, rev/sec)

เอกสารอ้างอิง

- [1] National Economic and Social Development Council (NESDC). "Official Website." nesdc.go.th. <https://www.nesdc.go.th/> (accessed Feb. 24, 2026).
- [2] BBC News. "World News and Current Events." bbc.com. <https://www.bbc.com> (accessed Feb. 24, 2026).
- [3] Thairath Online. "Daily Newspaper and News." thairath.co.th. <https://www.thairath.co.th/newspaper> (accessed Feb. 24, 2026).
- [4] Office of the National Water Resources (ONWR). "Water Management Systems." onwr.go.th. <https://www.onwr.go.th/> (accessed Feb. 24, 2026).
- [5] Royal Thai Navy. "Official Website of the Royal Thai Navy." navy.mi.th. <https://www.navy.mi.th/> (accessed Feb. 24, 2026).
- [6] P-Cruise. "Working on Cruise Ships." p-cruise.com. <https://p-cruise.com/article/cruise/working-on-cruise/> (accessed Feb. 24, 2026).
- [7] G. Kuiper, *The Wageningen Propeller Series*. Wageningen, Netherlands: MARIN Publication 92-001, 1992.
- [8] H. W. Lerbs, "Moderately loaded propellers with a finite number of blades and an arbitrary distribution of circulation," *SNAME Trans.*, vol. 60, pp. 73–117, 1952.
- [9] T. Brockett, "Minimum pressure envelopes for modified NACA-66 sections with NACA a=0.8 camber and Buships type I and type II sections," David Taylor Model Basin, Washington, D.C., Rep. 1780, 1966.
- [10] J. R. Nielsen, "Program documentation: MAN B&W," Internal Document, 1992.

- [11] W. B. Morgan, V. Silovic, and S. B. Denny, “ Propeller lifting- surface corrections,” *SNAME Trans.*, vol. 76, pp. 307–347, 1968.
- [12] R. A. Cumming, W. B. Morgan, and R. J. Boswell, “Highly skewed propellers,” *SNAME Trans.*, vol. 80, pp. 98–152, 1972.
- [13] D. S. Greeley and J. E. Kerwin, “Numerical methods for propeller design and analysis in steady flow,” *SNAME Trans.*, vol. 90, pp. 415–453, 1982.
- [14] A. H. Tchet, “ Hydrodynamics Reading,” Massachusetts Institute of Technology (MIT) , Version 3.0, pp. 1–19, 2005.
- [15] S. Bal and S. A. Kinnas, “A BEM for the prediction of free surface effects on cavitating hydrofoils,” *Comput. Mech.*, vol. 28, no. 3-4, pp. 260–274, 2002. doi: 10.1007/s00466-001-0281-y
- [16] Y. L. Young and S. A. Kinnas, “A BEM for the prediction of unsteady midchord face and/or back propeller cavitation,” *J. Fluids Eng.*, vol. 123, no. 2, pp. 311–320, 2001. doi: 10.1115/1.1362300
- [17] G. Vaz and J. Bosschers, “ Modeling three dimensional sheet cavitation on marine propellers using a boundary element method,” in *Proc. 6th Int. Symp. Cavitation (CAV2006)* , Wageningen, Netherlands, 2006.
- [18] B. Ji, X. W. Luo, R. E. A. Arndt, and Y. L. Wu, “ Numerical investigation of unsteady cavitating turbulent flow around a full-scale marine propeller,” in *Proc. 9th Int. Conf. Hydrodyn. (ICHD)*, Shanghai, China, 2010.
- [19] N. H. Mostafa and M. A. Boraey, “Numerical and experimental investigation of cavitation in axial pumps,” in *Proc. 8th Int. Water Technol. Conf. (IWTC11)*, Sharm El-Sheikh, Egypt, 2007, pp. 553–564.
- [20] R. Arazgaldi, A. Hajilouy, and B. Farhanieh, “Experimental and numerical investigation of marine propeller cavitation,” *Scientia Iranica*, vol. 16, no. 6, pp. 525–533, 2009.
- [21] A. Konno, T. Wakaba, N. Yamaguchi, and Y. Toda, “On the mechanism of the bursting phenomena of propeller tip vortex cavitation,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 6, pp. 181– 192, 2002. doi: 10.1007/s007730200005
- [22] J. Noosomton and W. Gunnuang, “Case Study on CFD Simulation and Experiment of New Developed Propeller for Trailing Thai Boat,” in *Proc. 5th Int. Symp. Mar. Propuls. (SMP’17)*, Helsinki, Finland, Jun. 2017.
- [23] J. Noosomton, “Case Study: Experimental of New Propeller Design 2 Blades Type and Observation Cavitation of Tailing Thai Boat,” in *Proc. Seoul Int. Conf. Appl. Sci. Eng. (SICASE2015)*, Seoul, South Korea, Jun. 2015.
- [24] J. Noosomton and J. Charoensuk, “Case Study: Method New Design of Propeller 3 Blades Type on 75 Developed Area and Testing cavitation of Tailing Thai Boat,” in *Proc. Int. Conf. Eng. Technol. Appl. Sci. (ICETA-2015)*, Taipei, Taiwan, Apr. 2015.
- [25] J. Noosomton and J. Charoensuk, “Case Study New design 3 Blades Type on 35 Developed Area and Testing cavitation of Tailing Thai Boat,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Ind. Appl. Eng. (ICIAE2015)*, Kitakyushu, Japan, Mar. 2015. doi: 10.12792/iciae2015.042

- [26] J. Noosomton and J. Charoensuk, “The New Propeller design 3 Blades Type on 18° Skew Angle and Testing cavitation of Tailing Thai Boat,” in *Proc. Annu. Conf. Eng. Inf. Technol. (ACEAIT)*, Osaka, Japan, Mar. 2015.
- [27] J. Noosomton and J. Charoensuk, “Performance Design and Testing of Propeller for Shallow-Fishery and Tailing Thai Boat: 2-blade type Part (2): A method for optimum cavitation of ship propeller [AMM-1037],” in *Proc. 4th TSME Int. Conf. Mech. Eng. (TSME-ICoME)*, Pattaya, Thailand, Oct. 2013.
- [28] J. Noosomton and J. Charoensuk, “Propeller Design and Finding of Match-Point for Shallow-Fishery and Tailing Thai Boat: 3-Blade Type [AMM-1036],” in *Proc. 4th TSME Int. Conf. Mech. Eng. (TSME-ICoME)*, Pattaya, Thailand, Oct. 2013.
- [29] N. Olofsson, “Force and flow characteristics of a partially submerged propeller,” Ph.D. dissertation, Dept. Naval Architecture and Ocean Engineering, Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 1996.
- [30] M. Ferrando, S. Gaggero, and C. Podenzana-Bonvino, “Surface piercing propellers: A numerical and experimental study on a series of models,” in *Proc. 24th ONR Symp. Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan, 2002, pp. 1–15.
- [31] Y. L. Young and W. L. Kinnas, “Numerical modeling of supercavitating and surface-piercing propellers,” *J. Ship Res.*, vol. 47, no. 4, pp. 302–313, Dec. 2003.

ประวัติผู้ประพันธ์ :



จารุพันธุ์ หนูสมตน
การศึกษา: วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
งานวิจัยที่สนใจ: กลศาสตร์ของไหล วิศวกรรมใบจักร วิศวกรรมงานระบบ



กนกอร รจนากิจ
การศึกษา: วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
งานวิจัยที่สนใจ: กลศาสตร์ของไหล Oil-lubricant



อนุสรณ์ ผ่องประภา
การศึกษา: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
งานวิจัยที่สนใจ: การคำนวณเชิงตัวเลข กลศาสตร์ของไหล กลศาสตร์ของแข็ง



สนธยา จันเดช
การศึกษา: MBA. การจัดการการบิน
งานวิจัยที่สนใจ: Aerodynamic Fluid-Flow Airplane-Mechanic



สมบูรณ์ อัสวรุจันนัท
การศึกษา: นักบินพาณิชย์ตรี สถาบันการบินพลเรือน
งานวิจัยที่สนใจ: Aerodynamic Fluid-Flow Airplane-Mechanic

กรอบแนวคิดการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ เพื่อป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้า

A Conceptual Framework for Applying Artificial Intelligence in Shoplifting Prevention within Department Stores

ทิปปภา มีศิลป์¹ และ ชุตินา พิสาละย์^{2*}

Tippapa Meesin and Chutima Pisarn

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรการจัดการนวัตกรรมดิจิทัลเทคโนโลยี/ มหาวิทยาลัยรังสิต

^{2*}วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการเทคโนโลยี/ มหาวิทยาลัยรังสิต

52/347 ถนน พหลโยธิน ตำบล หลักหก อำเภอเมืองปทุมธานี ปทุมธานี 12000 ประเทศไทย

*ผู้ติดต่อประสานงาน : chutima@rsu.ac.th

วันที่รับบทความ: 5 เมษายน 2569 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 12 พฤษภาคม 2569 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์ : 14 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพื่อป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้า โดยมุ่งศึกษาเทคโนโลยี AI ที่สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการโจรกรรม พัฒนกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าว และประเมินความเหมาะสมของกรอบแนวคิดโดยผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) โดยใช้รูปแบบการวิจัยเอกสาร (Documentary Research) โดยเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง และสร้างกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ในงานวิจัยนี้ สำหรับป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้า ซึ่งกรอบแนวคิดการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้า ประกอบด้วย การบริหารจัดการความเสี่ยงด้านการโจรกรรม การพิจารณาดำเนินการตามรูปแบบของธุรกิจค้าปลีกเพื่อกำหนดแนวทางการใช้เทคโนโลยี งบประมาณและกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันการโจรกรรมทรัพย์สินในห้างสรรพสินค้า ผลการวิจัยจากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ ได้ให้ความเห็นว่าโดยรวมแล้วกรอบแนวคิดที่นำเสนอมีความเหมาะสมสำหรับการป้องกันการโจรกรรมสินค้าในธุรกิจค้าปลีก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบรักษาความปลอดภัย และสอดคล้องกับแนวทางการบริหารความเสี่ยงในธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่ที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี AI ร่วมกับระบบกล้องวงจรปิด (Closed Circuit Television: CCTV) และการวิเคราะห์พฤติกรรม ทั้งนี้ องค์กรสามารถนำกรอบแนวคิดมาปรับใช้ป้องกันการโจรกรรมได้จริง ภายใต้แนวทางการบริหารความเสี่ยงที่ชัดเจน โดยเริ่มจากพื้นที่เสี่ยงสูง เลือกเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับรูปแบบธุรกิจ งบประมาณ และระบบขององค์กร ทั้งนี้ ควรคำนึงถึงข้อกำหนดทางกฎหมาย และประเมินความคุ้มค่าก่อนนำไปใช้

คำสำคัญ : ปัญญาประดิษฐ์, การป้องกันการโจรกรรมสินค้า, ห้างสรรพสินค้า, ธุรกิจค้าปลีก, การวิเคราะห์พฤติกรรม

Abstract This study aims to examine the application of Artificial Intelligence (AI) technology for preventing merchandise theft in department stores. The research focuses on exploring AI technologies that can be applied to theft prevention, developing a conceptual framework for applying such technologies, and evaluating the suitability of the proposed framework through expert assessment. This research adopts a qualitative research approach using documentary research, emphasizing the analysis of relevant documents to develop a conceptual framework for this study in preventing theft in department stores. The proposed conceptual framework consists of theft risk management, the identification of risk-prone areas based on retail business formats to determine appropriate technological applications, budget and consideration of legal frameworks related to theft prevention technologies in department stores. The results from expert evaluation indicate that, overall, the proposed framework is appropriate for preventing merchandise theft in retail businesses. It can enhance the effectiveness of security systems and aligns with modern retail risk management practices, particularly through the integration of AI technologies with (Closed Circuit Television: CCTV) systems and behavioral analytics. Organizations can practically apply this conceptual framework for shoplifting prevention under a clear risk management approach by starting with high-risk areas and selecting technologies that align with the business model, budget, and existing organizational systems. In addition, legal requirements and cost-effectiveness should be carefully considered before implementation.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Shoplifting Prevention, Department Stores, Retail Business, Behavioral Analytics

1. บทนำ

การโจรกรรมสินค้า เป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดความสูญเสียต่อธุรกิจค้าปลีก อาทิ ห้างสรรพสินค้า ร้านสะดวกซื้อมานานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อรายได้ที่สูญเสียไป รวมถึงต้นทุนในการบริหารจัดการที่เพิ่มขึ้น แม้จะมีความพยายามนำเครื่องมือต่างๆ มาใช้ในการป้องกัน ซึ่งหนึ่งในนั้นได้แก่ กล้องวงจรปิด (CCTV) ที่ติดตั้งเพื่อเฝ้าระวังเหตุการณ์ต่างๆ แต่ในทางปฏิบัติ พนักงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบ มีข้อจำกัดทั้งด้านเวลา จากภาระหน้าที่และประสิทธิภาพในการทำงาน ส่งผลให้อาจไม่สามารถป้องกันเหตุการณ์หรือจับกุมผู้ก่อเหตุได้ทันเวลาที่

เป็นการดำเนินการในลักษณะตรวจหาการกระทำความผิดเพื่อเป็นหลักฐานเมื่อเกิดเหตุการณ์ขึ้น

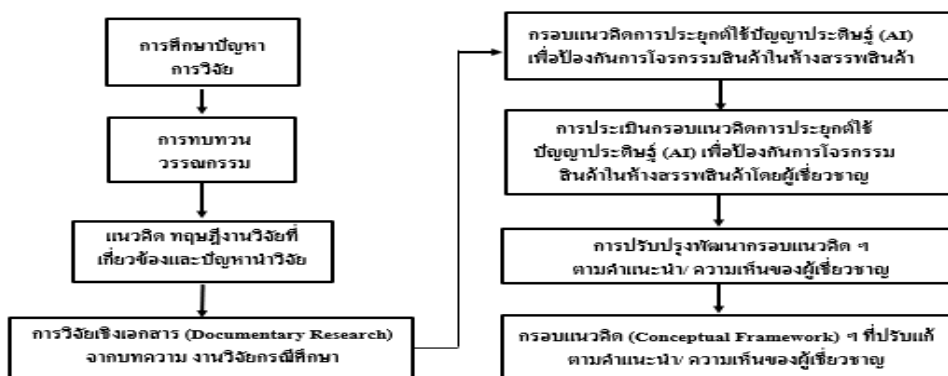
ในปี 2025 ร้านค้าปลีกในสหราชอาณาจักรเผชิญกับการขโมยสินค้าเกือบ 55,000 ครั้งต่อวัน [1] และมีการสูญเสียทางเศรษฐกิจมากกว่า 2.2 พันล้านปอนด์ต่อปี [2] นอกจากนี้ยังกล่าวว่าชาวอังกฤษประมาณหนึ่งในสี่เคยพบเห็นเหตุการณ์ขโมยสินค้า และมีแนวโน้มที่พนักงานในร้านจะเผชิญกับการล่วงละเมิดหรือความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น [3] ปัญหานี้ไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะในประเทศตะวันตกเท่านั้น แต่ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในภูมิภาคเอเชีย รวมถึงไทยด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่เศรษฐกิจมีความผันผวนและต้นทุนการดำเนินธุรกิจสูงขึ้น ทั้งนี้ ในไทย เดือน เมษายน 2569 พบการขโมยของสดในร้านค้าชุมชน 22 ครั้งในเดือนเดียว [4]

จากความก้าวหน้าของการพัฒนาเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ซึ่งมีการพัฒนาให้ทำงานหลากหลาย รวมถึงเป็นเครื่องมือสนับสนุนกิจกรรมต่างๆ มากมาย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผล สำหรับการโจรกรรมสินค้า ที่ผ่านมามีการใช้กล้องวงจรปิด (Closed Circuit Television: CCTV) ทั้งการป้องกัน (Prevent) และตรวจจับ (Detect) อย่างไรก็ตาม การใช้ CCTV ในรูปแบบดั้งเดิม ยังต้องมีการใช้พนักงานเฝ้าระวัง CCTV หรือตรวจหาเหตุการณ์ย้อนหลัง ซึ่งมีต้นทุนทั้งการเงินและระยะเวลา

ทั้งนี้ ปัจจุบัน พบว่ามีการนำเทคโนโลยี AI เข้ามาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังป้องกัน และตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติแบบเรียลไทม์ ตลอดจนพัฒนาการแจ้งเตือน เพื่อดำเนินมาตรการที่เหมาะสมอย่างทันทั่วทั้ง สามารถช่วยบริหารความเสี่ยงได้

แม้ AI อาจใช้ต้นทุนสูงกว่าการใช้พนักงาน แต่ธุรกิจควรมีการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในระยะยาว ประสิทธิภาพ ประสิทธิผล โดยธุรกิจขนาดใหญ่ การใช้เทคโนโลยี AI อาจช่วยสนับสนุนการประหยัดจากขนาด (Economy of scale) แต่การใช้ AI อาจต้องพิจารณาถึงความแม่นยำและประเด็นด้านข้อมูลส่วนบุคคลหรือกฎหมาย กฎระเบียบที่เกี่ยวข้องของประเทศนั้นๆ ด้วย

2. วิธีการวิจัย



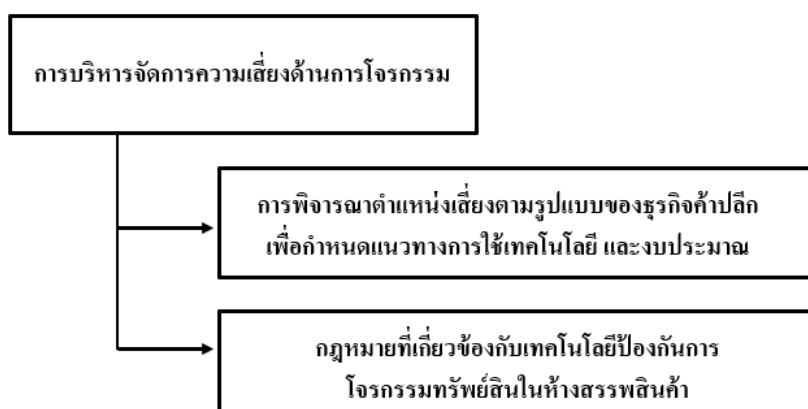
รูปที่ 1 วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาเทคโนโลยี AI ที่สามารถนำมาใช้ป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้า พร้อมทั้งพัฒนากอบแนวคิด (Conceptual Framework) สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าว โดยมีการประเมินความเหมาะสมของกรอบแนวคิดโดยผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง แล้วนำมาปรับแก้เป็นกรอบแนวคิดที่พัฒนาแล้วต่อไป ซึ่งงานวิจัยในบริบทของประเทศไทย ยังพบได้น้อย โดยเฉพาะการนำเสนอกรอบแนวคิดที่เชื่อมโยงเทคโนโลยี AI เข้ากับตำแหน่งเสี่ยง รูปแบบร้านค้า

จากการทบทวนวรรณกรรมมีงานวิจัยที่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อสนับสนุนการใช้เทคโนโลยีในการป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้าและธุรกิจค้าปลีก ตัวอย่างเช่น Reddy et al. [5] ที่กล่าวถึงการใช้เทคโนโลยีตรวจจับพฤติกรรม อีกทั้งยังสอดคล้องกับ Ezze et al. [6] ได้กล่าวถึงการใช้เทคโนโลยี AI และ Machine Learning ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากจุดขาย (Point of Sale: POS) ข้อมูลสินค้าคงคลัง และตารางเวลาการทำงานของพนักงาน เพื่อระบุช่วงเวลาและตำแหน่งที่มีความเสี่ยงสูงต่อการโจรกรรม ใช้ข้อมูลเชิงธุรกิจร่วมกับ AI ระบุความเสี่ยง สำหรับ Kathirya et al. [7] กล่าวถึงการพัฒนากล้องวงจรปิดที่ใช้เทคโนโลยี AI และ Machine Learning วิเคราะห์พฤติกรรมและรูปแบบบุคคลแบบเรียลไทม์ ตรวจจับพฤติกรรมที่น่าสงสัย เช่น การเข้าถึงพื้นที่หวงห้ามหรือพฤติกรรมที่ผิดปกติ แจ้งเตือนเจ้าหน้าที่ได้ทันที

จากรูปที่ 1 วิธีการวิจัย เริ่มจากศึกษาปัญหา กำหนดประเด็นและขอบเขตของการวิจัย ซึ่งกรอบแนวคิด ๑ สำหรับป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้าที่วิจัยนี้ มีขอบเขตการศึกษาเฉพาะการป้องกันทรัพย์สินทางกายภาพเท่านั้น จากนั้นได้ทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำมาสังเคราะห์ประเด็นนำวิจัยเป็นพื้นฐานการวิจัยเชิงเอกสาร ซึ่งขั้นตอนนี้มีการรวบรวมจัดกลุ่มงานวิจัยตามลักษณะเรื่อง วัตถุประสงค์ และเทคโนโลยีที่ใช้วิเคราะห์ระบุ “ตำแหน่งเสี่ยง”

แนวทางการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี และประเด็นที่เกี่ยวข้อง สรุปผล กำหนดกรอบแนวคิด โดยกรอบแนวคิดหลัก กล่าวถึงการบริหารจัดการความเสี่ยงด้านการโจรกรรม ประเด็นหลัก ได้แก่ การพิจารณาตำแหน่งเสี่ยงตามรูปแบบของธุรกิจค้าปลีก กำหนดแนวทางการใช้เทคโนโลยี และงบประมาณ ประเด็นที่ 2 ได้แก่ กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันการโจรกรรมทรัพย์สินในห้างสรรพสินค้า ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้า

จากนั้น ประเมินกรอบแนวคิดโดยผู้เชี่ยวชาญ โดยผู้วิจัยนำเสนอชุดคำถามซึ่งผู้วิจัยออกแบบสำหรับการประเมินกรอบแนวคิด ๑ ไปตรวจสอบความสอดคล้องคำถามก่อนนำไปใช้สอบถามผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item–Objective Congruence: IOC) โดยผู้ตรวจสอบเครื่องมือแบบสอบถามให้คะแนน แล้วคัดเลือกข้อที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีความสอดคล้องมากกว่า +0.5 และปรับปรุงตามข้อเสนอแนะ ก่อนนำไปสอบถามผู้เชี่ยวชาญ เพื่อประเมินกรอบแนวคิดที่นำเสนอ โดยกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ ประมาณ 3–5 คน เพื่อให้ครอบคลุมมุมมองที่หลากหลายและเหมาะสมกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยต้องมีประสบการณ์ในการทำงานไม่น้อยกว่า

5 ปี ในด้านที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียง เช่น การรักษาความปลอดภัยในธุรกิจค้าปลีก งานด้านบริหารจัดการในธุรกิจค้าปลีก เทคโนโลยีสารสนเทศ AI หรือการเงิน เป็นต้น

ทั้งนี้ ได้มีการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญจำนวน 4 ท่าน ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านการป้องกันและรักษาผลประโยชน์ห้างสรรพสินค้า นักวิชาการด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ผู้เชี่ยวชาญด้าน Supply Chain และผู้เชี่ยวชาญด้านการเงิน จากนั้น ข้อคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis) เพื่อสกัดสาระสำคัญจากความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน แล้วจัดกลุ่มประเด็นหลัก เช่น ความเหมาะสมของเทคโนโลยี ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง ความคุ้มค่า ข้อจำกัดในการ

ดำเนินงาน และประเด็นด้านกฎหมายหรือข้อมูลส่วนบุคคล แล้วเปรียบเทียบความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเพื่อค้นหาประเด็นที่สอดคล้อง แตกต่าง หรือควรนำไปปรับปรุง ก่อนนำผลการวิเคราะห์ไปพัฒนารอบแนวคิดฯ ให้มีความเหมาะสม และเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

เพื่อให้กรอบแนวคิดที่น่าเสนอมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติมากขึ้น ผู้วิจัยได้รวบรวมความเห็นของผู้เชี่ยวชาญมาสรุปผลการวิจัยและอภิปรายผลในประเด็นสำคัญ ดังนี้

3.1 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1.1 ผลการวิจัย

ผู้เชี่ยวชาญ 3 ใน 4 ท่านเห็นว่ากรอบแนวคิดฯ มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้ได้จริง โดยสอดคล้องกับแนวทางการบริหารความเสี่ยงในธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่ ซึ่งมีการบูรณาการ AI ร่วมกับกล้องวงจรปิดและการวิเคราะห์พฤติกรรมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับเหตุผิดปกติและลดการสูญเสีย ทั้งนี้ มีข้อเสนอให้พิจารณาใช้เทคโนโลยีเสริม เช่น ระบบเสียงการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้ หมายถึง การประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณภาพ สัญญาณเสียง สัญญาณคลื่นวิทยุ เช่น RFID สัญญาณตำแหน่ง (Localization signal) สำหรับตรวจติดตามสิ่งผิดปกติ การระบุตำแหน่ง RFID และระบบติดตามแบบสามมิติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบ

ในด้านปัจจัยที่ใช้พิจารณาคำแห่งเสี่ยง พบว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ ขนาคร้าน รูปแบบการให้บริการ การจัดวางสินค้า มูลค่าสินค้า และกลุ่มลูกค้า อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ปริมาณลูกค้า จำนวนพนักงาน ประวัติการสูญเสีย สิ่งบ่งชี้ มุมอับ และจำนวนทางเข้า-ออกของพื้นที่ รวมถึงการกำหนดขอบเขตกลุ่มเสี่ยงให้ชัดเจน เพื่อให้การประเมินมีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

สำหรับตำแหน่งเสี่ยง กรอบแนวคิดสามารถครอบคลุมพื้นที่สำคัญ เช่น พื้นที่ขายสินค้า จุดชำระเงิน พื้นที่เก็บสินค้า ทางเข้า-ออก และพื้นที่สินค้ามูลค่าสูง อย่างไรก็ตาม ควรเพิ่มเติมพื้นที่ที่มีทัศนวิสัยต่ำ พื้นที่โปรโมชัน พื้นที่ Self-checkout พื้นที่ทิ้งขยะ และพื้นที่ขายสินค้าเฉพาะ รวมถึงควรแยกประเภททางเข้า-ออก และเพิ่มรายละเอียดระดับพื้นที่ย่อยเพื่อสะท้อนบริบทจริง

ในด้านแนวทางการใช้เทคโนโลยี พบว่าเทคโนโลยีหลัก ได้แก่ กล้อง AI, Machine Learning และ RFID มีความเหมาะสมและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเฝ้าระวังเมื่อเทียบกับการใช้คนอย่างเดียว โดยควรออกแบบให้เชื่อมต่อกับระบบเดิม เช่น CCTV และ POS ควรปรับรูปแบบการใช้งานให้สอดคล้องกับแต่ละจุดเสี่ยง เช่น จุดที่มีสิ่งบดบังนอกจากกล้อง อาจพิจารณาใช้เทคโนโลยีเสริม อาทิ ระบบเสียงและการระบุตำแหน่ง เป็นต้น

ในประเด็นการเลือกเทคโนโลยีตามงบประมาณ การจำแนกระดับงบประมาณถือว่ามีความเหมาะสมและสนับสนุนการตัดสินใจลงทุน โดยควรให้ความสำคัญกับพื้นที่เสี่ยงสูงเป็นลำดับแรก และกำหนดตัวชี้วัด เช่น การลดการสูญเสีย จำนวนเหตุการณ์ที่ตรวจพบ และระยะเวลาในการตอบสนอง อย่างไรก็ตาม การประเมินความคุ้มค่าไม่ควรพิจารณาเฉพาะ (Return on Investment: ROI) แต่ควรคำนึงถึงมิติด้านความปลอดภัย ภาพลักษณ์องค์กร และความรับผิดชอบต่อสังคม พร้อมทั้งกำหนดนิยามความสำเร็จที่ชัดเจน

ด้านกฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง การใช้ AI ในธุรกิจค้าปลีกต้องปฏิบัติตามกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล โดยมีการแจ้งการใช้ CCTV กำหนดนโยบายด้านการจัดเก็บข้อมูล การควบคุมสิทธิ์การเข้าถึง และระยะเวลาในการเก็บข้อมูลอย่างชัดเจน รวมถึงการแจ้งเตือนจากระบบสอดคล้องกับข้อกำหนดทางกฎหมาย

อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้มิได้วิเคราะห์ประเด็นกฎหมายในเชิงลึก เนื่องจากอยู่นอกขอบเขตการ

วิจัยและข้อจำกัดด้านความเชี่ยวชาญของผู้ให้ข้อมูล แต่ประเด็นดังกล่าวยังมีความสำคัญและควรรักษาในอนาคต

ด้านความเป็นไปได้และข้อจำกัด พบว่ากรอบแนวคิดสามารถนำไปใช้ได้จริง โดยเลือกเทคโนโลยีให้เหมาะกับขนาดองค์กร ระดับความเสี่ยง และการเชื่อมต่อกับระบบเดิม โดยควรเริ่มจากโครงการนำร่อง (Proof of Concept: POC) ข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ความคุ้มค่าที่ขึ้นกับหลายปัจจัย และความเสถียรของอุปกรณ์

โดยภาพรวม กรอบแนวคิดสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติ แต่ควรกำหนดขั้นตอนการดำเนินงานให้ชัดเจน เช่น การจัดทำ (Standard Operating Procedure:

SOP) สำหรับการแจ้งเตือน การตรวจสอบ และการตอบสนอง รวมถึงขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง การเลือกเทคโนโลยี การติดตั้ง ทดสอบ และประเมินผล

สำหรับข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ควรออกแบบระบบ AI ให้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการทำงานของเจ้าหน้าที่ โดยมีระบบแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ ควบคู่กับการกำหนดขั้นตอนปฏิบัติหลังการแจ้งเตือน รวมถึงการเปรียบเทียบระบบ (Calibration) และการประเมินผล (Post-audit) การกำหนดนโยบายข้อมูล การควบคุมสิทธิ์การเข้าถึง การลดความคลาดเคลื่อนของระบบ และการพัฒนาศักยภาพบุคลากรในการใช้งานระบบอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 สรุปความเห็นหลักของผู้เชี่ยวชาญ

ประเด็นหลัก	สรุปความเห็นหลักของผู้เชี่ยวชาญ
1. ความเหมาะสมของกรอบแนวคิด	กรอบแนวคิดมีความเหมาะสมและใช้ได้จริง โดย AI ร่วมกับ CCTV และการวิเคราะห์พฤติกรรมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ควรเสริมเทคโนโลยีเพื่อความแม่นยำ
2. ปัจจัยตำแหน่งเสี่ยง	ปัจจัยหลักคือ ขนาดร้าน รูปแบบบริการ การจัดวางสินค้า มูลค่า และลูกค้า ควรเพิ่มปริมาณลูกค้า พนักงาน ประสิทธิภาพ เสีย จุดอับ และทางเข้า-ออก
3. การครอบคลุมพื้นที่เสี่ยง	ครอบคลุมพื้นที่หลัก แต่ควรเพิ่มพื้นที่ที่สนใจวิสัยทัศน์ โปรโมชัน และ Self-checkout พร้อมรายละเอียดเชิงพื้นที่
4. การใช้เทคโนโลยี	AI Camera, ML และ RFID มีความเหมาะสม ควรเชื่อมต่อกับระบบเดิมและเลือกใช้ตามระดับความเสี่ยง
5.งบประมาณและการลงทุน	การแบ่งระดับงบประมาณ ควรเน้นพื้นที่เสี่ยงสูงและกำหนดตัวชี้วัดที่ชัดเจน
6. ความคุ้มค่า	พิจารณามากกว่า ROI เช่น ความปลอดภัย ภาพลักษณ์ ความรับผิดชอบต่อสังคม
7. กฎหมาย	ติดตามการเปลี่ยนแปลงตามบริบทของกฎหมายในแต่ละช่วงเวลา
8. การนำไปใช้จริง	สามารถใช้ได้จริง ควรเริ่มจาก POC และกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานอย่างเป็นระบบ

3.1.2 อภิปรายผล

ผลการวิจัยครั้งนี้สะท้อนว่า ความเห็นหลักของผู้เชี่ยวชาญสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมซึ่งชี้ว่า การป้องกันการโจรกรรมสินค้าใน

ธุรกิจค้าปลีกจำเป็นต้องอาศัยทั้งการวิเคราะห์จุดเสี่ยง การวิเคราะห์พฤติกรรม และการใช้เทคโนโลยีหลายรูปแบบร่วมกัน มิใช่ใช้กลไกวงจรปิดแบบเดิมเพียงอย่างเดียว โดยความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านการป้องกันและรักษา

ผลประโยชน์ในห้างสรรพสินค้า และผู้เชี่ยวชาญด้านการเงินที่สนับสนุนการใช้ AI ร่วมกับ CCTV และการวิเคราะห์พฤติกรรม สอดคล้องกับ Kathiriy et al. [7] ที่อธิบายว่า AI-enhanced cameras สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมที่บ่งชี้การโจรกรรม แจ้งเตือนเจ้าหน้าที่ และพัฒนาความแม่นยำของระบบได้อย่างต่อเนื่อง โดยการบูรณาการข้อมูล IoT เช่น แท็ก RFID และเซ็นเซอร์สินค้าอัจฉริยะ เพื่อใช้ข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของสินค้าแบบเรียลไทม์ การใช้ Generative Adversarial Networks (GANs) และ Variational Autoencoders (VAEs) ช่วยจำลองสถานการณ์การโจรกรรมต่างๆ โดยการติดตั้งทั้งแบบใช้คลาวด์เพื่อรองรับการขยายระบบ และแบบ edge servers ช่วยการประมวลผลที่รวดเร็วและปลอดภัยยิ่งขึ้น รวมทั้งสอดคล้องกับ Ezzeh et al. [6] ที่ระบุว่าระบบเฝ้าระวังวิดีโอที่ใช้ AI และ Machine Learning สามารถวิเคราะห์ภาพแบบเรียลไทม์และแจ้งเตือนได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าระบบดั้งเดิม นอกจากนี้ Ounnak and Buapun [8] ยังกล่าวถึงการใช้ Deep Learning โดยเฉพาะ 3D Convolutional Neural Networks (3D CNN) วิเคราะห์วิดีโอแบบเรียลไทม์จากกล้องวงจรปิดและระบุกิจกรรมที่ผิดปกติโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม Gabriela [9] กล่าวถึงการวิเคราะห์เชิงป้องกัน (pre-emptive analysis) เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี AI ในระบบจดจำใบหน้า สำหรับเฝ้าระวังในร้านค้าปลีกของบราซิล ระบุผู้ต้องสงสัย โดยใช้ (Convolutional Neural Networks : CNN) ประมวลผล โดยระบบจดจำใบหน้าที่ระบุตัวคนผิดค่าผิดพลาดในอัตราที่สูงกว่าคนผิวขาว 5 ถึง 10 เท่า

ประเด็นเรื่องปัจจัยที่ใช้พิจารณาตำแหน่งเสี่ยง มีข้อเสนอของนักวิชาการด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ เรื่องสิ่งบดบัง มุมอับ และจำนวนทางเข้า-ออก ก็สอดคล้องกับ Kanimozhi et al. [10] งานวิจัยที่ระบุว่าสภาพแวดล้อมที่มีผู้คนหนาแน่นหรือทัศนวิสัยต่ำเป็นบริบทที่ท้าทายต่อการตรวจจับ และ สอดคล้องกับ Khonghuairap and Lertputtharak [11] ที่กล่าวถึงความจำเป็นของการติดตั้ง

ระบบเฝ้าระวังบริเวณทางเข้า-ออก จุดอับสายตา และพื้นที่เฉพาะ

ในด้านตำแหน่งเสี่ยงที่ควรเฝ้าระวัง ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านการป้องกันและรักษาผลประโยชน์ในห้างสรรพสินค้า และผู้เชี่ยวชาญด้านการเงินที่เห็นว่าพื้นที่ขายสินค้า จุดชำระเงิน พื้นที่เก็บสินค้า และทางเข้า-ออก เป็นจุดเสี่ยงสำคัญ สอดคล้องกับ Reddy et al. [5] ที่กล่าวถึงพื้นที่ที่มีสินค้ามูลค่าสูง เคาน์เตอร์ชำระเงิน และพฤติกรรมการวนเวียนผิดปกติ นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับ Kathiriy et al. [7] ที่ระบุจุดเสี่ยง เช่น ห้องเก็บสินค้า จุดชำระเงิน เครื่องคิดเงิน จุดขาย และประตูหลัง รวมทั้งสอดคล้องกับ Pham and Lukowski [12] ที่ระบุบริเวณทางเข้า-ออก แผนกเครื่องสำอางแอลกอฮอล์ พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย (เช่น บริเวณมุมอับ มุมห้อง หรือหลัง shelf ตั้งสินค้า) และจุดเช็คเอาท์ด้วยตนเองว่าเป็นพื้นที่เสี่ยงสูงต่อการโจรกรรม Manchikanti [13] ได้กล่าวถึงพื้นที่หลังร้านและพื้นที่โลจิสติกส์ เช่น พื้นที่รับสินค้า และพื้นที่ขนถ่ายสินค้า การใช้เทคโนโลยี RFID สามารถช่วยติดตามการเคลื่อนย้ายสินค้าได้อย่างต่อเนื่อง และลดความเสี่ยงจากการสูญหายในกระบวนการจัดเก็บและขนถ่าย ซึ่งระบบกล้องวงจรปิดไม่สามารถตรวจจับได้โดยตรง ส่วน Seelsat et.al [14] กล่าวถึงการใช้เทคโนโลยี AI ร่วมกับ CCTV ในการตรวจจับและระบุตัวบุคคล ทั้งในกรณีสวมหน้ากากอนามัยและไม่สวมหน้ากากซึ่งใช้ทั้ง AI Deep Learning โดยมีการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep Neural Network : DNN) และ โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Deep Convolutional Neural Network : DCNN) ตรวจจับใบหน้า (Face Detection) ซึ่งโมเดลหลักสำหรับการรู้จำใบหน้า (Face Recognition Model) ได้แก่ ArcFace (Additive Angular Margin Loss for Deep Face Recognition)

สำหรับประเด็นการวิเคราะห์พฤติกรรม ผู้เชี่ยวชาญด้านการป้องกันและรักษาผลประโยชน์ในห้างสรรพสินค้าให้ความสำคัญกับการตรวจจับเหตุการณ์

ฝึกปฎิแบบเรียลไทม์และการตอบสนองอย่างรวดเร็ว หลังการแจ้งเตือน ซึ่งสอดคล้องกับ Reddy et al. [5] ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยี Deep Learning ร่วมกับระบบกล้องวงจรปิด (CCTV) เพื่อคาดการณ์พฤติกรรมการโจรกรรม (Robbery Behavior Potential) สะท้อนแนวคิดการใช้ AI ในเชิงคาดการณ์ (Predictive) นอกจากนี้ยังใช้โมเดล YOLOv5 ทั้ง โมดูลตรวจจับการปกปิดศีรษะ (Head Cover Detection) ตรวจจับบุคคลที่ปกปิดใบหน้าหรือศีรษะ โมดูลตรวจจับฝูงชน (Crowd Detection) รวมทั้ง โมดูลตรวจจับการเดินเตร่ (Loitering Detection) และ DeepSORT ในการตรวจจับพฤติกรรม เช่น การปกปิดศีรษะ การรวมกลุ่ม และการเดินวนเวียน ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมที่ผิดปกติ อีกทั้งยังมีการใช้ Fuzzy Inference System เพื่อรวบรวมข้อมูลจากหลายโมดูลและสนับสนุนการตัดสินใจของระบบ ส่วน Pham and Lukowski [12] ได้พัฒนาโมเดล BobDontRob เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ซื้อและทำนายว่าการกระทำนั้นเป็นการโจรกรรมหรือพฤติกรรมปกติของลูกค้า ตลอดจนสอดคล้องกับ Kanimozhi et al. [10] ที่กล่าวถึงระบบ Stealth Watch ซึ่งสามารถตรวจจับพฤติกรรมที่น่าสงสัยแบบเรียลไทม์ แยกแยะพฤติกรรมลูกค้าปกติกับพฤติกรรมโจรกรรม และแจ้งเตือนไปยังอุปกรณ์ของเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยได้ทันที Pham and Lukowski [12] ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น การซ่อนสินค้า การเคลื่อนไหวผิดปกติ หรือการอยู่ในพื้นที่เป็นเวลานาน สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเสี่ยงของตารางที่ 2 สรุปข้อเสนอแนะแนวทางการใช้เทคโนโลยีที่ใช้จัดการตำแหน่งเสี่ยง

การโจรกรรม และเพิ่มความแม่นยำการตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติ Manchikanti [13] ได้กล่าวถึงการ ใช้ Computer Vision ในการวิเคราะห์พฤติกรรมจากวิดีโอแบบเรียลไทม์ และ การใช้ IoT เช่น RFID และเซ็นเซอร์ ในการติดตามสินค้าคงคลังแบบเรียลไทม์ Pinijpara and Lakkhongkha [15] ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมว่า AI สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของผู้คนเพื่อตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติหรือความเสี่ยงด้านความปลอดภัย

4. กรอบแนวคิด (Conceptual Framework) การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อป้องกันการโจรกรรมสินค้าในห้างสรรพสินค้าที่ปรับแก้ตามคำแนะนำ/ ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

ผู้วิจัยได้นำกรอบแนวคิดที่พัฒนาขึ้นจากการทบทวนและวิเคราะห์วรรณกรรม เพื่อนำเสนอผู้เชี่ยวชาญประเมินให้ความเห็นและข้อเสนอแนะ แล้วนำมาปรับปรุง เพื่อพัฒนากรอบแนวคิดฯ ดังนี้

4.1 แนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้าน AI สำหรับป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้า

4.1.1 สรุปข้อเสนอแนะแนวทางการใช้เทคโนโลยีที่ใช้จัดการตำแหน่งเสี่ยงเพื่อป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้า

ตำแหน่งเสี่ยง / เทคโนโลยี	1	2	3	4	5	6
1) พื้นที่ขายและแสดงสินค้า						
- พื้นที่ที่มีสิ่งของราคาแพง	/		/	/	/	/
- แผนกเครื่องสำอางค์	/			/	/	/
- พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย เช่น ใต้เสื้อผ้า กระเป๋าเสื้อ กระเป๋าถือ ใต้เสื้อโค้ท ถุงเท้า กระเป๋าเป้ ถุงข้อปิ้ง และถุงขยะ (กรณีพื้นที่ส่วนการทิ้งขยะหรือการขาย office supply อาจมีพนักงานซุกซ่อนสินค้าออกมา และอาจมีการร่วมมือกับบุคคลภายนอกได้)	/			/		/

ตำแหน่งเสี่ยง / เทคโนโลยี	1	2	3	4	5	6
- พื้นที่ที่มีพฤติกรรมรวมเวียนและการเคลื่อนไหวที่ผิดปกติ	/			/	/	/
- พื้นที่โปรโมชัน	/			/	/	
2) จุดชำระเงิน						
- เคาน์เตอร์ชำระเงิน (Checkout areas) เครื่องคิดเงิน (Cash registers) รวมถึงพฤติกรรม การเปิดบรรจุภัณฑ์และยัดสินค้าขึ้นเล็กลงภายในเพื่อเลี่ยงการชำระเงิน และการสลับป้าย ราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า	/	/		/	/	
- จุดเช็คเอาท์ด้วยตัวเอง (Self-checkout stations)	/	/		/	/	
3) พื้นที่เก็บและเคลื่อนย้ายสินค้า						
- พื้นที่เก็บสินค้า ห้องเก็บของ (Supply rooms) พื้นที่ในไลน์ผลิตและพื้นที่ทำงาน รวมถึงประตูหลัง (Backdoors)	/			/	/	
- พื้นที่รับสินค้า เก็บรักษา เบิกจ่ายสินค้า ขนถ่ายสินค้า และพื้นที่โหลดสินค้า (Loading bays)	/		/	/	/	/
4. ทางเข้า-ออก และพื้นที่รอบนอก						
- ทางเข้าและทางออกของร้านค้า		/		/	/	
- ประตู หน้าต่าง ช่องเปิด ทางหนีไฟ ถนน ลานจอดรถ แนวรั้วโดยรอบพื้นที่ทั่วไป และ จุดอับสายตา	/			/	/	/
5) พื้นที่ที่มีความท้าทายในการตรวจจับ						
- พื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน	/			/	/	/
- พื้นที่ที่คนวิสัยต่ำ (Blind spot)	/			/	/	/
6) พื้นที่เฉพาะและประวัติความเสี่ยง						
- จุดที่เคยเกิดอุบัติเหตุ ห้องไฟฟ้า ห้องแบตเตอรี่ รวมถึงทรัพย์สินของบริษัทและพื้นที่ เก็บข้อมูลสำคัญ	/			/	/	
- พื้นที่เก็บสินค้ามูลค่าสูงหรือเป็นที่ต้องการของตลาด	/		/	/	/	/
7) การระบุช่วงเวลาและสถานที่เสี่ยงสูงด้วยเทคโนโลยี						
- การวิเคราะห์ข้อมูล ณ จุดขาย (POS) และการวิเคราะห์ตารางเวลาของพนักงานเพื่อหา ความผิดปกติที่อาจบ่งชี้ถึงการโจรกรรมทั้งภายในและภายนอก	/	/		/	/	
- การวิเคราะห์ข้อมูลบันทึกสินค้าคงคลัง		/		/	/	

หมายเหตุ : 1) กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม 2) ML 3) RFID 4) ความรู้สึกของผู้ต้องสงสัยก่ออาชญากรรม

5) การวิเคราะห์พฤติกรรม 6) การระบุตำแหน่ง/ การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล/ ข้อมูลภาพ คลื่นและเสียง/ ข้อมูลภาพสามมิติ

4.2 การบริหารความเสี่ยงด้านการโจรกรรม

การบริหารความเสี่ยงเพื่อป้องกันการโจรกรรม โดยใช้ AI ครอบคลุมการระบุ ประเมิน จัดการ และ ติดตามความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ โดยพิจารณาความเสี่ยงแบบองค์รวม โดยครอบคลุมตั้งแต่ความเสี่ยงระดับองค์กรไปจนถึงความเสี่ยงด้านข้อมูลส่วนบุคคลและ ESG เนื่องจากความเสี่ยงจากการใช้ AI ในพื้นที่สาธารณะ อาจส่งผลกระทบต่อสังคมในวงกว้างมาก เช่น ห้างสรรพสินค้า มักมีความเชื่อมโยงกันและสามารถส่งผลกระทบต่อชื่อเสียงและความเชื่อมั่น ทั้งในด้านจริยธรรมของ AI และความเป็นส่วนตัวของผู้บริโภค รวมถึงผู้มีส่วนได้เสียได้ที่เกี่ยวข้อง

โดยเมื่อมีการนำเทคโนโลยีไปใช้ควรเริ่มจากโครงการนำร่อง (Pilot/POC) ในพื้นที่เสี่ยง และมีการปรับเทียบระบบ (Calibration) ก่อนใช้งานจริง รวมถึงประเมินผลภายหลัง (Post-Audit) โดยพิจารณาความแม่นยำและอัตราการแจ้งเตือนผิดพลาด

ซึ่งจะมีการพิจารณาดำเนินความเสี่ยงตามรูปแบบของธุรกิจค้าปลีกเพื่อกำหนดแนวทางการใช้เทคโนโลยีตามรูปแบบของร้านจากปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้อง

4.2.1 การพิจารณาดำเนินความเสี่ยงตามรูปแบบของธุรกิจค้าปลีกเพื่อกำหนดแนวทางการใช้เทคโนโลยี

ปัจจัยหลักที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาแนวทางการใช้เทคโนโลยีสำหรับจัดการจุดเสี่ยงเพื่อป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้า จะมีผลต่อรูปแบบและความเสี่ยงจากการโจรกรรม โดยพิจารณาโอกาสเกิดและมูลค่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบร้านค้า

ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงนั้น ควรพิจารณาความเหมาะสมของงบประมาณกับต้นทุนและประโยชน์ (Cost-effectiveness) โดยใช้ตัวชี้วัดทั้งเชิงตัวเงิน เช่น ROI และการวิเคราะห์ต้นทุนและประโยชน์ รวมถึงไม่เป็นตัวเงิน เช่น CSR ระบบตรวจจับการลัดของบุคคล ขณะที่ตัวชี้วัดด้านประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับระบบ เช่น Precision, Recall, Accuracy, AUC หรือ Sensor Accuracy และอาจขึ้นอยู่กับมาตรฐาน เช่น ISO เป็นต้น

ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาปัจจัยหลัก ได้แก่ ขนาดร้าน โครงสร้างและการออกแบบพื้นที่ มูลค่าสินค้า และลักษณะกลุ่มลูกค้า ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบการโจรกรรมและระดับความเข้มข้นของมาตรการควบคุม โดยสังเคราะห์เป็นตัวแปรเชิงโครงสร้าง (S และ V) ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3

ทั้งนี้ ควรพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ปริมาณลูกค้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ประวัติการเกิดเหตุการณ์โจรกรรม และจำนวนพนักงานในพื้นที่ขาย สำหรับทางเข้า-ออกสามารถจำแนกเป็นสองลักษณะ คือ ทางเข้า-ออกแบบเปิด และทางเข้า-ออกแบบควบคุมเป็นรายบุคคล โดยอาจพิจารณาปริมาณลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วน จำนวนพนักงานประจำพื้นที่ และประวัติการสูญเสียสินค้า เพื่อให้การประเมินตำแหน่งเสี่ยงมีความครอบคลุมมากขึ้น

หลังจากการกำหนดปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องแล้ว ผู้วิจัยได้นำปัจจัยดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกรูปแบบของธุรกิจค้าปลีก โดยพิจารณาจากขนาดร้าน และมูลค่าสินค้า เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดตำแหน่งเสี่ยงหลักและเทคโนโลยีที่เหมาะสมในแต่ละประเภทร้านตามแต่ละรูปแบบ ดังนี้

ตารางที่ 3 : ตั้งเคราะห์แนวคิดปัจจัยที่ใช้พิจารณาดำเนินงานเสี่ยงตามรูปแบบร้าน

ปัจจัยหลัก	สัญลักษณ์/ ความหมาย
1. ขนาดร้าน โครงสร้าง การจัดวาง และการออกแบบ สิ่งบดบังและจำนวนมุมอับภายในโซน จำนวนทางเข้า-ออกของพื้นที่ (Store size, structural configuration, layout and architectural design, the presence of obstructions and blind spots within zones, and the number of entry and exit points of the area)	S1 : ขนาดเล็ก ($\leq 10,000$ ตร.ม.) รูปแบบการให้บริการ โครงสร้างการจัดวางและการออกแบบไม่ซับซ้อน มีสิ่งบดบังภายในพื้นที่น้อย มุมอับน้อย มีจำนวนทางเข้า-ออกของพื้นที่ไม่มาก
	S2 : ขนาดกลาง ($10,000 - 30,000$ ตร.ม.) รูปแบบการให้บริการ โครงสร้างและการออกแบบมีความหลากหลาย มีหลายโซน นอกเหนือจากพื้นที่จำหน่ายสินค้าทั่วไป อาจมีสิ่งบดบังจากการจัดวาง หรือการออกแบบ มีมุมอับภายในบางโซน มีจำนวนทางเข้า-ออกของพื้นที่มากขึ้น
	S3 : ขนาดใหญ่ ($\geq 30,000$ ตร.ม.) รูปแบบการให้บริการ โครงสร้างการจัดวางและการออกแบบซับซ้อน มีหลายโซนเชื่อมต่อกัน พื้นที่กว้างขวาง มีสิ่งบดบังจำนวนมากจากการจัดวาง หรือการออกแบบ มีมุมอับหลายตำแหน่ง มีจำนวนทางเข้า-ออกของพื้นที่หลายจุด
2. มูลค่าสินค้าและกลุ่มลูกค้า (Product value and customer segments)	V1 : สินค้าราคาถูกถึงปานกลาง มีจำนวนหมวดสินค้าไม่มาก ลูกค้าระดับล่างถึงปานกลาง
	V2 : สินค้าราคาปานกลาง มีสินค้าราคาสูงบางโซน ลูกค้าระดับกลางถึงระดับสูง
	V3 : สินค้าราคาสูงหลายหมวด ลูกค้าระดับกลางถึงระดับสูง

4.2.2 สรุปข้อเสนอแนะแนวทางการใช้เทคโนโลยีจัดการจุดเสี่ยงเพื่อป้องกันการโจรกรรมในห้างสรรพสินค้าตามรูปแบบของร้านจากปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้อง

1) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P1 (S1+V1) ซึ่งเป็นร้านขนาดเล็ก/ห้างสรรพสินค้า ที่มีสินค้าน่าค้าต่ำ-ปานกลาง เช่น ไฮเปอร์มาร์เก็ต (พื้นที่ขาย $\leq 10,000$ ตร.ม.) ดำเนินงานหลักประกอบด้วย เคนเตอร์ชำระเงิน

เครื่องคิดเงิน จุดเช็คเอาต์ด้วยตัวเอง ทางเข้า-ออกของร้าน ประตูหลัง คลังสินค้า/ห้องเก็บของ แผนกเครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ และพื้นที่ที่สนวิสัยต่ำ โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม การวิเคราะห์พฤติกรรม และอาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล

2) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P2 (S1+V2) ซึ่งเป็นร้านขนาดเล็ก/ ห้างสรรพสินค้า ที่มีสินค้าน่าค้าปาน

กลาง-สูง เช่น ห้างสรรพสินค้าขนาดเล็ก ที่มีการจำหน่ายสินค้ามูลค่าสูง อาทิ เซ็นทรัล โรบินสัน (พื้นที่ขาย $\leq 10,000$ ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย เคาน์เตอร์ชำระเงิน จุดเช็คเอาท์ด้วยตัวเอง ทางเข้า-ออก คลังสินค้า/ห้องเก็บของ แผนกเครื่องสำอางแอลกอฮอล์ พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย การสลับป้ายราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า พื้นที่ที่สนวิสัยต่ำ และโซนสินค้ามูลค่าสูง โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม การวิเคราะห์พฤติกรรม RFID (Radio-Frequency Identification) อาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล และอาจพิจารณาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านอื่นร่วมด้วย เช่น เทคโนโลยีด้านเสียง (Sound และ Voice) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) และการระบุตำแหน่ง (Localization)

3) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P3 (S1+V3) ซึ่ง เป็นร้านขนาดเล็ก/ ห้างสรรพสินค้า ที่มีสินค้าราคาสูง/ ลักซ์วรี เช่น ห้างสรรพสินค้าขนาดเล็กที่มีสินค้าแบรนด์เนม (พื้นที่ขาย $\leq 10,000$ ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย ทางเข้า/ทางออก จุดชำระเงิน/แคชเชียร์ พื้นที่ที่มีพฤติกรรมวนเวียนและการเคลื่อนไหวที่ผิดปกติ พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย จุดจัดแสดงสินค้าโปรโมชั่น พื้นที่ที่มีสิ่งของราคาแพง การสลับป้ายราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า แผนกเครื่องสำอางแอลกอฮอล์ และโซนสินค้ามูลค่าสูง โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม ML เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรม RFID (Radio-Frequency Identification) อาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล และอาจพิจารณาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านอื่นร่วมด้วย เช่น เทคโนโลยีด้านเสียง (Sound และ Voice) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) และการระบุตำแหน่ง (Localization)

4) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P4 (S2+V1) ซึ่ง เป็นร้านขนาดกลาง สินค้าราคาต่ำ-ปานกลาง เช่น ซูเปอร์เซ็นเตอร์หรือไฮเปอร์มาร์เก็ต อาทิ บิ๊กซี / โลตัส (พื้นที่ขาย $10,000 - 30,000$ ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย เคาน์เตอร์ชำระเงิน จุดเช็คเอาท์ด้วยตัวเอง ทางเข้า-ออกของร้าน แผนกเครื่องสำอางแอลกอฮอล์ คลังสินค้า/ห้องเก็บของ พื้นที่ที่สนวิสัยต่ำ พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย และพื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม อาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล และอาจพิจารณาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านอื่นร่วมด้วย เช่น เทคโนโลยีด้านเสียง (Sound และ Voice) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) และการระบุตำแหน่ง (Localization)

5) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P5 (S2+V2) ซึ่ง เป็นร้านขนาดกลาง สินค้าราคาปานกลาง-สูง เช่น ห้างสรรพสินค้าขนาดกลาง ที่มีการจำหน่ายสินค้ามูลค่าสูง อาทิ บิ๊กซี โลตัส เซ็นทรัล โรบินสัน ขนาดกลาง (พื้นที่ขาย $10,000 - 30,000$ ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย ทางเข้า/ทางออกหลายจุด เคาน์เตอร์ชำระเงิน จุดเช็คเอาท์ด้วยตัวเอง คลังสินค้า/ห้องเก็บของ แผนกเครื่องสำอางแอลกอฮอล์ การสลับป้ายราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า การเปิดบรรจุภัณฑ์และยัดสินค้าชิ้นเล็กภายในเพื่อเลี่ยงการชำระเงิน และพื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม และอาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล โดยอาจใช้ข้อมูลจากคลื่นหรือสัญญาณต่าง ๆ โดยการใช้ข้อมูลหลายรูปแบบร่วมกัน เช่น ข้อมูลภาพ คลื่นและเสียง

6) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P6 (S2+V3) ซึ่ง เป็นร้านขนาดกลาง สินค้าราคาสูง/ลักซ์วรี เช่น เซ็นทรัล (พื้นที่ขาย $10,000 - 30,000$ ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย เคาน์เตอร์ชำระเงิน ทางเข้า-ออกของร้าน

พื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน พื้นที่ที่มีสิ่งของราคาแพง พื้นที่ที่เก็บสินค้ามูลค่าสูงหรือเป็นที่ต้องการของตลาด พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย การสลับป้ายราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า แผนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และโซนสินค้ามูลค่าสูง โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม การวิเคราะห์พฤติกรรม ML การวิเคราะห์พฤติกรรม RFID (Radio-Frequency Identification) ควรใช้การวิเคราะห์พฤติกรรม ร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล อาจพิจารณาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านอื่นร่วมด้วย เช่น เทคโนโลยีด้านเสียง (Sound และ Voice) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) และการระบุตำแหน่ง (Localization) และอาจมีการบูรณาการการทำงานของเทคโนโลยีหลายประเภทเข้าด้วยกัน

7) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P7 (S3+V1) ซึ่งเป็นร้านขนาดใหญ่ สินค้าราคาต่ำ-ปานกลาง เช่น ไฮเปอร์มาร์เก็ต/ซูเปอร์เซ็นเตอร์ ห้างสรรพสินค้าท้องถิ่น (พื้นที่ขาย $\geq 30,000$ ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย เคาน์เตอร์ชำระเงิน จุดเช็คเอาท์ด้วยตัวเอง ทางเข้า-ออกของร้าน แผนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ คลังสินค้า/ห้องเก็บของ พื้นที่ที่สนวิสัยต่ำ พื้นที่ที่ซ่อนสินค้าได้ง่าย พื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน และพื้นที่รับสินค้า เก็บรักษา เบิกจ่ายสินค้า ขนถ่ายสินค้า โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม อาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล อาจพิจารณาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านอื่นร่วมด้วย เช่น เทคโนโลยีด้านเสียง (Sound และ Voice) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) และการระบุตำแหน่ง (Localization) และอาจมีการบูรณาการการทำงานของเทคโนโลยีหลายประเภทเข้าด้วยกัน

8) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P8 (S3+V2) ซึ่งเป็นร้านขนาดใหญ่ สินค้าราคาปานกลาง-สูง เช่น ซูเปอร์เซ็นเตอร์/ไฮเปอร์มาร์เก็ต (10,000–30,000 ตร.ม.) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย ทางเข้า/ทางออกหลายจุด

เคาน์เตอร์ชำระเงิน จุดเช็คเอาท์ด้วยตัวเอง คลังสินค้า/ห้องเก็บของ แผนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การสลับป้ายราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า การเปิดบรรจุภัณฑ์และยึดสินค้าขึ้นเล็กภายในเพื่อเลี่ยงการชำระเงิน พื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน พื้นที่รับสินค้า เก็บรักษา เบิกจ่ายสินค้า ขนถ่ายสินค้า และโซนสินค้ามูลค่าสูง โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม การวิเคราะห์พฤติกรรม ML เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรม RFID (Radio-Frequency Identification) และอาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติ อาจใช้ข้อมูลจากคลื่นหรือสัญญาณต่าง ๆ โดยการใช้ข้อมูลหลายรูปแบบร่วมกัน เช่น ข้อมูลภาพ คลื่นและเสียง

9) รูปแบบร้านค้าตามปัจจัย P9 (S3+V3) ซึ่งเป็นร้านขนาดใหญ่ สินค้าราคาสูง/ลักซ์วรี เช่น ห้างสรรพสินค้า/ลักซ์วรีดีพาร์ทเมนต์ + ศูนย์การค้า (ใหญ่) ตำแหน่งเสี่ยงหลักประกอบด้วย ทางเข้า/ทางออกหลายจุด + โซนแบรนด์หรู เคาน์เตอร์ชำระเงิน ทางเข้า-ออกของร้าน พื้นที่ที่มีผู้คนพลุกพล่าน พื้นที่ที่มีสิ่งของราคาแพง พื้นที่ที่เก็บสินค้ามูลค่าสูงหรือเป็นที่ต้องการของตลาด พื้นที่ที่สามารถซ่อนสินค้าได้ง่าย การสลับป้ายราคาไปยังสินค้าที่ถูกกว่า แผนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และโซนสินค้ามูลค่าสูง โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ กล้อง AI / Image Processing / วิเคราะห์พฤติกรรม การวิเคราะห์พฤติกรรม ML เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรม ความรู้สึกของผู้ต้องสงสัยก่ออาชญากรรม RFID (Radio-Frequency Identification) และอาจใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมร่วมกับข้อมูลภาพสามมิติบุคคล

ความแตกต่างของการเลือกใช้เทคโนโลยีในแต่ละรูปแบบร้านค้าขึ้นอยู่กับระดับความซับซ้อน ขอบเขตการใช้งาน และการผสมผสานเทคโนโลยีตามปัจจัยหลัก ได้แก่ มูลค่าสินค้า ขนาดร้าน และลักษณะพื้นที่เสี่ยง โดยร้านค้าที่มีสินค้ามูลค่าสูงและโครงสร้างซับซ้อนมีแนวโน้มใช้เทคโนโลยีบูรณาการหลายระบบ

แม้เทคโนโลยีที่ใช้ในแต่ละจุดเสี่ยงจะคล้ายกัน แต่การประยุกต์ใช้และการจัดวางอุปกรณ์ควรแตกต่างกันตามลักษณะร้านค้า ประเภทสินค้า และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ โดยควรเชื่อมต่อกับระบบเดิม เช่น CCTV และ POS และอาจใช้เทคโนโลยีเพิ่มเติม เช่น การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การเลือกใช้เทคโนโลยีควรพิจารณาความเหมาะสมและงบประมาณองค์กร เริ่มจากพื้นที่เสี่ยงสูงก่อน และกำหนดตัวชี้วัด เช่น การลดการสูญเสียสินค้า จำนวนเหตุการณ์ที่ตรวจพบ และระยะเวลาในการตอบสนอง รวมทั้งพิจารณา ROI และประโยชน์อื่น อาทิ ความปลอดภัยหรือ CSR เช่น ระบบตรวจจับการลี้ภัยของบุคคล โดยตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบอาจใช้ Precision, Recall, Accuracy, AUC หรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เช่น ISO สำหรับระบบจดจำใบหน้า แต่เนื่องจากข้อมูลต้นทุน งบประมาณ ส่วนใหญ่เป็นความลับทางธุรกิจ ส่งผลให้การนำเสนอข้อมูลดังกล่าวใช้แต่แหล่งข้อมูลที่เปิดเผยเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นเท่านั้น

แม้เทคโนโลยีที่ใช้ในแต่ละจุดเสี่ยงจะคล้ายกัน แต่การประยุกต์ใช้และการจัดวางอุปกรณ์ควรแตกต่างกันตามลักษณะร้านค้า ประเภทสินค้า และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ โดยควรสามารถเชื่อมต่อกับระบบเดิม เช่น CCTV และ POS และยังสามารถใช้เทคโนโลยีเพิ่มเติม เช่น การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ทั้งนี้ ระบบกลังสำหรับการป้องกันการโจรกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ กลังที่มีหน่วยประมวลผลในตัว (Edge Computing) ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลได้ที่ตัวอุปกรณ์ และกลังที่ทำหน้าที่บันทึกภาพแล้วส่งข้อมูลไปประมวลผลที่ศูนย์กลาง โดยระบบที่มีต้นทุนต่ำมักเป็นกลังที่บันทึกภาพและส่งสัญญาณไปยังศูนย์ประมวลผลกลาง (Central Command) ซึ่งอาจใช้ระบบที่พัฒนาเองหรือบริการแบบ Subscription ทั้งนี้รูปแบบการใช้งานสามารถแบ่งเป็นการประมวลผลภายในองค์กร (On-Premise) ซึ่งควบคุมข้อมูลได้แต่มี

ต้นทุนสูง และการใช้ระบบ Cloud หรือ Subscription ซึ่งมีการจ่ายต่อเนื่องและอาจมีความเสี่ยงด้านการจัดเก็บหรือการส่งข้อมูลไปยังผู้ให้บริการ

4.2.3 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกัน การโจรกรรมทรัพย์สินในห้างสรรพสินค้า

การใช้เทคโนโลยีป้องกันการโจรกรรม เช่น CCTV หรือระบบวิเคราะห์ภาพด้วย AI ต้องปฏิบัติตามกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล[16] โดยอาศัยฐานผลประโยชน์โดยชอบธรรมเพื่อวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัยได้ แต่ต้องจำกัดการใช้ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว หากมีการนำข้อมูลไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นต้องแจ้งหรือขอความยินยอมจากเจ้าของข้อมูล โดยองค์กรต้องมีมาตรการคุ้มครองข้อมูล เช่น การแจ้งเจ้าของข้อมูล การกำหนดระยะเวลาการเก็บข้อมูล การควบคุมการเข้าถึงข้อมูล การจัดทำ ROPA และการประเมินผลกระทบด้านข้อมูลส่วนบุคคล (DPIA) ในกรณีที่ใช้เทคโนโลยีที่มีความเสี่ยงสูง เช่น ระบบจดจำใบหน้า

นอกจากนี้ การใช้ AI ยังควรสอดคล้องกับแนวทางการกำกับดูแล AI ของไทย ซึ่งมีแนวคิดการกำกับดูแลตามระดับความเสี่ยง กำหนดให้ผู้พัฒนาและผู้ใช้งานรับผิดชอบต่อการบริหารความเสี่ยง การกำกับดูแลโดยมนุษย์ การรักษาคุณภาพข้อมูล และการแจ้งผู้ที่อาจได้รับผลกระทบจากการใช้ระบบ AI [17] โดยการใช้ผลลัพธ์จากระบบควรเป็นไปอย่างรอบคอบและสอดคล้องกับกฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามบริบทของกฎหมายในแต่ละช่วงเวลา

จากงานวิจัยนี้พบว่า การบูรณาการ AI ร่วมกับระบบกลังวงจรปิดและการวิเคราะห์พฤติกรรม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับเหตุผิดปกติแบบเรียลไทม์และลดความสูญเสียจากการโจรกรรมทรัพย์สินในห้างสรรพสินค้าได้ แนวทางสำคัญประกอบด้วย การบริหารจัดการความเสี่ยงด้านการโจรกรรมอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การระบุตำแหน่งเสี่ยงสำคัญ การพิจารณา

ตำแหน่งเสี่ยงตามรูปแบบของธุรกิจค้าปลีก เพื่อกำหนดแนวทางการเลือกใช้เทคโนโลยีและงบประมาณให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละองค์กร รวมถึงการเริ่มต้นการดำเนินการจากโครงการนำร่องในพื้นที่เสี่ยงสูง การกำหนดตัวชี้วัด และการติดตามผลการใช้งาน นอกจากนี้ควรพิจารณา กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันการโจรกรรมทรัพย์สินในห้างสรรพสินค้า อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มิได้วิเคราะห์ประเด็นกฎหมายเชิงลึก และอาจมีข้อจำกัดด้านความเสถียรของเทคโนโลยี ทั้งนี้ ความคุ้มค่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรกำหนดแนวปฏิบัติการใช้เทคโนโลยีให้ชัดเจนทั้งกระบวนการให้ปฏิบัติได้จริง ให้ความสำคัญกับการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล เพื่อป้องกันการรั่วไหล จัดให้มีระบบตรวจสอบติดตาม และตอบสนองได้ทันทั่วถึง รวมถึงแนวปฏิบัติให้สอดคล้องกับกฎหมายและข้อกำหนดที่เปลี่ยนแปลงตลอดจนกฎหมาย/บทลงโทษ/กระบวนการทางคดีการป้องปราม ในด้านความคุ้มค่า ควรมีการเก็บข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง วิเคราะห์สาเหตุ บูรณาการข้อมูลทั้งจากภายในและภายนอกองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตอบแบบสอบถาม ซึ่งมีส่วนสำคัญในการนำมาวิเคราะห์ สังเคราะห์ และปรับปรุงกรอบแนวคิดให้มีความเหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทของธุรกิจค้าปลีกได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] British Retail Consortium, “Retail Crime ‘Spiralling Out of Control’,” Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://brc.org.uk/news-and-events/news/corporate-affairs/2025/ungated/retail-crime-spiralling-out-of-control/>
- [2] Reuters, “Theft and Violence in UK Retail Soar to Record Levels, Survey Shows,” Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/world/uk/theft-violence-uk-retail-soar-record-levels-survey-shows-2025-01-30/>
- [3] G. Topham, “Nearly One in Four Britons Have Witnessed Shoplifting, Study Shows,” Mar. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/business/2025/mar/13/nearly-one-in-four-britons-have-witnessed-shoplifting-study-shows>
- [4] Thairath TV, “Planning a sting operation to catch a woman stealing pork and chicken from a shop,” YouTube, Apr. 30, 2026 (in Thai). [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=CddjU4IL4E0>
- [5] V. Ranadheer Reddy, P. Chaturya, P. Shruthi and P. Sudha, “Propounding First Artificial Intelligence Approach for Predicting Robbery Behaviour Potential in an Indoor Security Camera,” International Journal of Engineering Research and Science & Technology, vol. 20, no. 3, pp. 250–262, Aug. 2024.
- [6] P. O. Ezzeh, A. B. Ekpoudom and E. E. Aye, “Technology Driven Theft Management: Evaluating the Effectiveness of AI and Machine Learning on Identifying and Preventing Theft,” International Journal of Modern Technology and Engineering Research, vol. 1, no. 1, pp. 74–90, Dec. 2024.
- [7] S. Kathiriyai, A. Sinha and A. Shende, “Enhancing Retail Theft Prevention with Generative AI Technologies,” International Journal of Science and Research, vol. 12, no. 12, pp. 2079–2083, Dec. 2023, doi: 10.21275/SR24304172353.

- [8] W. Ounnak and S. Buapun, “ Monitoring and surveillance system through CCTV utilizing deep neural networks algorithm,” in Proc. 16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024), 2024, pp. 213–216 (in Thai).
- [9] G. D. Caldas, Face Recognition, Shoplifting and Racial Discrimination: A Pre-Emptive Analysis in the Brazilian Society, Master’ s thesis, Tilburg University, 2 0 2 1 . [Online] . Available: <https://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=158123>
- [10] T. Kanimozhi et al. , “ StealthWatch: Artificial Intelligence Based Shoplifting Detection [Retail Theft],” in Proc. 2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS), Dec. 2024, pp. 193–196, doi: 10.1109/ICUIS64676.2024.10866412.
- [11] N. Khonghuairop and S. Lertputtharak, “Demand for Closed- Circuit Television Installation among Manufacturing and Service Entrepreneurs Employing Migrant Workers of Three Nationalities in the Eastern Economic Corridor,” Journal of Suvarnabhumi Institute of Technology, vol. 10, no. 2, Jul.–Dec. 2024 (in Thai).
- [12] D. T. Pham and F. Lukowski, BobDontRob: Hybrid Neural Network for Shoplifting Detection: Detecting Theft from Camera Footage in Grocery Retail Stores, Degree Project, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Jun. 2024. [Online] . Available: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1885503/FULLTEXT01.pdf>
- [1 3] D. R. Manchikanti, “ AI- Enabled Retail Loss Prevention: A Framework for Enhanced Security and Operational Efficiency,” International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), vol. 7, no. 2, pp. 1 6 5 – 1 7 2, Feb. 2 0 2 5 . [Online].Available:https://www.researchgate.net/profile/Durga-Rao-Manchikanti/publication/389036392_AI-Enabled_Retail_Loss_Prevention_A_Framework_for_Enhanced_Security_and_Operational_Efficiency/links/68054ab8bd3f1930dd606f9a/AI-Enabled-Retail-Loss-Prevention-A-Framework-for-Enhanced-Security-and-Operational-Efficiency.pdf
- [14] A. Seelsat, P. Praneetpolgrang, and P. Sanguanbhokai, “ Face Detection Systems for Effective Facial Recognition with Artificial Intelligence Using Closed Circuit Television Camera,” in Proc. The Eighteenth National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT2022), 2022, pp. 202–207 (in Thai).
- [15] S. Pinijpara and K. Lakkhongkha, “Digital Logistics as a Key Success Factor of Retail Industry,” Journal of Industrial Business Administration, vol. 6, no. 1, Jan.–Jun. 2024 (in Thai)
- [1 6] S. Chakraphatmatra, The Protection of Personal Data: A Study of Artificial Intelligence Data Processing, Independent Study, Master of Laws Program in Business Law, University of the Thai Chamber of Commerce, 2018 (in Thai).
- [1 7] Ministry of Digital Economy and Society and Electronic Transactions Development Agency, “Results of the Review of the Draft Law on Artificial Intelligence,” Office of the Council of State, May 10–Jun. 24, 2025 (in Thai). [Online]. Available:https://law.go.th/listeningDetail?survey_id=NTMxNkRHQV9MQVdfRlJPJTIRFTkQ=

ประวัติผู้ประพันธ์ :



นางสาว ทิพปภา มีศิลป์

-นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรการจัดการ
นวัตกรรมดิจิทัลเทคโนโลยี/ มหาวิทยาลัยรังสิต
-ธุรกิจส่วนตัว



ผศ.ดร.ซุติมา พิศาลย์

ผู้อำนวยการหลักสูตรวิทยาศาสตร
มหาบัณฑิตการจัดการนวัตกรรมดิจิทัล
(ระบบการศึกษาทางไกลผ่านอินเทอร์เน็ต)

การออกแบบและพัฒนาระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติขนาดเล็ก โดยใช้กลไกแกนทรีสำหรับการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติ

Design and Development of a Miniature Automated Storage and Retrieval System Using a Gantry Mechanism for Automation Education

ชนภัช เดชนาราพัฒน์

Shanaphat Dechnaraphat

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ผู้นิพนธ์ประสานงาน : Shanaphatd@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 20 มกราคม 2569 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 03 มีนาคม 2569 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 17 มีนาคม 2569

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 15 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติขนาดเล็กแบบแกนทรีเพื่อใช้เป็นต้นแบบด้านระบบอัตโนมัติ โดยใช้โครงสร้างการเคลื่อนที่แกน X-Y-Z ควบคุมด้วยพีแอลซี ผ่านปุ่มกดและจอสัมผัส เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดการพึ่งพาแรงงานในการจัดเก็บสินค้า ผลการทดสอบเชิงปริมาณพบว่า ระบบมีเวลาทำงานเฉลี่ย 23.1–30.2 วินาทีต่อรอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 0.23 วินาที ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งเฉลี่ย 0.2 มิลลิเมตร และอัตราความสำเร็จ 100% แสดงถึงความแม่นยำและความสามารถในการทำซ้ำ นอกจากนี้ การประเมินผล ก่อนเรียน และ หลังเรียน นักศึกษา 40 คน พบว่าคะแนนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.22 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สะท้อนว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีทั้งสมรรถนะเชิงวิศวกรรมและประสิทธิผลด้านการเรียนรู้

คำสำคัญ: ระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติ, กลไกแกนทรี, ตัวควบคุมลอจิกแบบตั้งโปรแกรมได้, การเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติ, ต้นแบบขนาดเล็ก

Abstract: This research presents the design and development of a gantry-based Mini Automated Storage and Retrieval System (Mini-AS/RS) as a prototype for automation systems. The system employs an X-Y-Z motion structure controlled by a PLC via push buttons and a touch screen interface to enhance positioning accuracy and reduce reliance on manual labor in storage operations. Quantitative performance evaluation shows that the system achieves an average operating time of 23.1–30.2 seconds per cycle, with a standard deviation of less than 0.23 seconds. The average positional error is 0.2 mm, and the positioning success rate is 100%, indicating high accuracy and repeatability. Furthermore, a pre-test and post-test assessment conducted with 40 students revealed a 30.22% increase in the average score, with statistically

significant improvement. These findings demonstrate that the developed system not only achieves reliable engineering performance but also effectively enhances learning outcomes.

Keywords: Automated Storage and Retrieval System; Gantry Mechanism; Programmable Logic Controller; Automation Education; Miniature Prototype.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบโลจิสติกส์และคลังสินค้าต้องการความรวดเร็ว ความแม่นยำ และประสิทธิภาพในการจัดเก็บและเบิกคืนสินค้า เพื่อลดต้นทุนแรงงานและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติ (Automated Storage and Retrieval System: AS/RS) จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคการผลิตและการกระจายสินค้า Roodbergen[1] และ Bortolini[2] โดยช่วยเพิ่มความหนาแน่นในการจัดเก็บ ลดระยะเวลาดำเนินงาน และลดความผิดพลาดจากมนุษย์ งานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนา AS/RS ทั้งด้านโครงสร้างเชิงกล การออกแบบอัลกอริทึมเพื่อลดเวลาเดินทาง และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี เช่น ปัญญาประดิษฐ์ ระบบควบคุม และ IoT เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจากงานวิจัย [3]–[18] และ Rayman[20] อย่างไรก็ตาม ระบบ AS/RS เชิงพาณิชย์และชุดฝึกที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักมีราคาสูงและมีความซับซ้อนเกินความจำเป็นสำหรับการเรียนการสอน ส่งผลให้การประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการยังมีข้อจำกัด [21], [22]–[24] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบ Mini-AS/RS แบบแกนทรีที่มีโครงสร้างเรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และสามารถปรับแต่งได้ เพื่อรองรับการเรียนการสอน การวิจัยเชิงทดลอง และการประเมินประสิทธิภาพของระบบในระดับห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งสนับสนุนการบูรณาการองค์ความรู้ด้านเมคาทรอนิกส์และระบบควบคุมเพื่อการเรียนรู้เชิงปฏิบัติ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบ AS/RS

AS/RS คือระบบอัตโนมัติสำหรับการจัดเก็บและเบิกคืนสินค้า โดยใช้กลไกเชิงกลร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างจัดเก็บ (rack) อุปกรณ์เคลื่อนที่ เช่น stacker crane, shuttle หรือ gantry robot และระบบควบคุม Roodbergen[1] และ Bortolini[2] ระบบดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการดำเนินงาน เพิ่มความหนาแน่นในการจัดเก็บ และลดความผิดพลาดจากมนุษย์ พร้อมทั้งรองรับการเชื่อมต่อกับระบบบริหารจัดการคลังสินค้า รูปแบบของ AS/RS มีหลายประเภท เช่น single-deep, double-deep และ multiple-deep rack ในงานวิจัย Tan[3] และ Rizqi[4] รวมถึงระบบ multi-aisle และ mobile rack ของ Guezzen[26] และ Song[28] ซึ่งแตกต่างกันในด้านความเร็ว และต้นทุนการติดตั้ง งานวิจัยที่ผ่านมาได้มุ่งพัฒนา AS/RS ทั้งด้านการออกแบบเชิงกลและการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอัลกอริทึม เช่น การลดเวลาเดินทาง และการจัดตารางคำสั่ง [7], [8], [12], [14]

2.2 แบบจำลองเวลาเดินทาง (Travel Time Model)

งานของ Narayana และคณะ [22] ได้นำเสนอ Mini-AS/RS ระดับต้นแบบเชิงกายภาพ โดยมุ่งเน้นการทำงานพื้นฐานของระบบ ขณะที่ Mareeswaran [15] และ Joy และคณะ [16] พัฒนาระบบ AS/RS ที่ควบคุมด้วยพีแอลซี โดยเน้นการบูรณาการฮาร์ดแวร์ อย่างไรก็ตาม งานดังกล่าวยังไม่มีการรายงานค่าความคลาดเคลื่อนเชิง

ตำแหน่งหรือการวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำเชิงสถิติอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับ Rahman[20] ที่มุ่งเน้นการติดตามผลแบบเรียลไทม์มากกว่าการประเมินสมรรถนะเชิงปริมาณ เมื่อเปรียบเทียบกัน งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบซ้ำ ต่อหนึ่งตำแหน่ง พร้อมรายงานค่าเฉลี่ยเวลา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งเฉลี่ย และอัตราความสำเร็จในการหยิบจับ สะท้อนถึงความแม่นยำและความสามารถในการทำซ้ำที่ได้รับการยืนยันเชิงสถิติ

หนึ่งในตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่สำคัญของ AS/RS คือเวลาเดินทางของอุปกรณ์จัดเก็บและเบิกคืนสินค้า งานวิจัยของ Roodbergen[1] ได้นำเสนอแบบจำลองเวลาเดินทางของ stacker crane แบบเคลื่อนที่สองแกน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบ gantry ได้ โดยเวลาเดินทางสามารถคำนวณจากสมการ

$$T = \max\left(\frac{x}{v_x}, \frac{y}{v_y}\right) \quad (1)$$

เมื่อ

T คือ เวลาเดินทางของอุปกรณ์จัดเก็บและเบิกคืนสินค้า (Travel Time)

x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวแกนนอน (Horizontal travel distance)

y คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical travel distance)

V_x คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ในแนวนอน

V_y คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

โดยที่ x และ y คือระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวนอนและแนวตั้ง ตามลำดับ และ V_x , V_y คือความเร็วในแต่ละแกน Roodbergen[1] และ Li [9] ได้นำแบบจำลองนี้ถูกนำไปใช้ในงานด้านการจำลอง การวิเคราะห์สมรรถนะ และการเพิ่มประสิทธิภาพของ

AS/RS อย่างแพร่หลาย ทั้งในระดับอุตสาหกรรมและระดับงานวิจัยเชิงทดลอง [9]–[11] ในงานวิจัยนี้ สมการที่ (1) ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าระบบสามารถเคลื่อนที่ในสองแกนพร้อมกัน (Simultaneous motion) และเวลาเดินทางรวมถูกกำหนดโดยแกนที่ใช้เวลามากที่สุด (Governing axis principle) ภายใต้เงื่อนไขความเร็วคงที่และไม่พิจารณาช่วงเร่ง-หน่วงความเร็ว ผลลัพธ์จากสมการจึงถูกนำไปใช้ในการกำหนดความเร็วที่เหมาะสมของมอเตอร์ในแต่ละแกน รวมถึงประมาณค่า cycle time ของระบบก่อนการสร้างต้นแบบจริง ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐานสำหรับ stacker crane และ gantry-based AS/RS [1], [9]–[11]

2.2 เวลาในหนึ่งรอบการทำงาน (Cycle Time Model)

เวลาในหนึ่งรอบการทำงาน (Cycle Time) ของ AS/RS ประกอบด้วยเวลาจัดเก็บ (storage time) และเวลาเบิกคืน (retrieval time) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$T_{cycle} = T_{store} + T_{retrieve} \quad (2)$$

เมื่อ

T_{cycle} คือ เวลาในหนึ่งรอบการทำงานของระบบ (Cycle Time)

T_{store} คือ เวลาในการจัดเก็บสินค้าเข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนด

$T_{retrieve}$ คือ เวลาในการเบิกคืนสินค้าจากตำแหน่งจัดเก็บ

แนวคิดนี้ถูกใช้ในงานวิจัยหลายฉบับเพื่อวิเคราะห์ throughput และประสิทธิภาพของระบบ [1], [4], [6] ในกรณีของระบบ dual-command cycle สมการสามารถขยายเพื่อรวมการเคลื่อนที่หลายจุดได้ [4]

2.3 แบบจำลอง Throughput ของระบบ AS/RS

Throughput เป็นตัวชี้วัดจำนวนคำสั่งจัดเก็บหรือเบิกคืนที่ระบบสามารถดำเนินการได้ต่อหน่วยเวลา โดยสามารถคำนวณจาก

$$TH = \frac{1}{T_{cycle}} \quad (3)$$

เมื่อ

TH คือ อัตราการทำงานของระบบ (Throughput) หน่วยเป็นคำสั่งต่อหน่วยเวลา

T_{cycle} คือ เวลาเฉลี่ยในหนึ่งรอบการทำงานของระบบ

ตัวชี้วัด throughput ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้าง AS/RS หลายรูปแบบ เช่น single-deep, double-deep และ multi-aisle system [3], [4], [6]

2.4 Mean (ค่าเฉลี่ย)

เราสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยเวลา $\bar{T}$ ใช้เป็นค่าตัวแทนของสมรรถนะโดยรวมของระบบโดยค่าเฉลี่ยสะท้อนแนวโน้มส่วนกลางของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และช่วยลดอิทธิพลความผันผวนแบบสุ่มในแต่ละครั้งของการวัด ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยดังกล่าวยังเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติพิจารณาจากสมการที่ 4

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (4)$$

เมื่อ

T_i คือ ค่าเวลาที่วัดได้จากการทดลองครั้งที่ i

n คือ จำนวนครั้งที่ทดลอง

$\bar{T}$ คือ ค่าเฉลี่ยเวลาในการทดลองทั้งหมด n ครั้ง

2.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} \quad (5)$$

เมื่อ SD แสดงถึงระดับความแปรปรวนของเวลาเดินทาง ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดความสม่ำเสมอของการทำงานของระบบ

2.6 ค่าความคลาดเคลื่อน

ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละระหว่างทดลองและค่าทฤษฎีคำนวณได้จาก

$$Error = \frac{|T_{exp} - T_{model}|}{T_{model}} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ

T_{exp} คือ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง

T_{model} คือ ค่าเวลาเดินทางจากสมการ (1)

การวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินทั้งความแม่นยำ (accuracy) และความเสถียร (repeatability) ของระบบที่พัฒนาขึ้น

2.7 การจำลองและการเพิ่มประสิทธิภาพระบบ AS/RS

การจำลอง (Simulation) เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ AS/RS ภายใต้ความต้องการแบบสุ่ม งานวิจัยของ Li และคณะ[9] และ Singh และคณะ[10] ได้นำเสนอการใช้แบบจำลองการจำลองร่วมกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพารามิเตอร์ เพื่อลดเวลา cycle time และเพิ่ม throughput

2.8 ระบบควบคุมและการบูรณาการเทคโนโลยี

ในเชิงการควบคุม ระบบ AS/RS นิยมใช้ PLC เป็นแกนหลักในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์และเซนเซอร์ [15], [16], [17] รวมถึงการบูรณาการเทคโนโลยี RFID, Vision System และ IoT เพื่อเพิ่มความสามารถในการติดตามและควบคุมแบบเรียลไทม์ [19], [18], [20]

2.9 แนวคิด Digital Twin และ Mini-AS/RS

แนวคิด Digital Twin ได้ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของ AS/RS ในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง ช่วยลดต้นทุนและความเสี่ยงในการพัฒนาระบบจริง Accorsi[25] สำหรับระบบ Mini-AS/RS

งานวิจัยหลายฉบับชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมในการใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนและแพลตฟอร์มการทดลองทางวิศวกรรม [21]–[24] แม้ว่างานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการควบคุมและการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ AS/RS

อย่างหลากหลาย แต่ส่วนใหญ่ยังขาดการบูรณาการระหว่างการสร้างแบบจำลอง การควบคุม และการพัฒนาต้นแบบในระบบขนาดห้องปฏิบัติการ แสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติ (AS/RS)

อ้างอิง	ปี	ลักษณะระบบ	กลยุทธ์การควบคุม	การจำลอง	เทคนิคอัจฉริยะ	การทดสอบต้นแบบ	ขอบเขตการนำไปใช้
[1]	2009	งานทบทวน AS/RS	-	✓	-	-	ภาพรวมงานวิจัย
[4]	2023	AS/RS แบบ Dual Stacker	กฎ (Rule-based)	✓	-	-	วิเคราะห์สมรรถนะ
[20]	2019	AS/RS	กฎ Heuristic & Exact	✓	-	-	การออกแบบระบบ
[21]	2010	AS/RS	Metaheuristic	✓	✓	-	ปรับเส้นทาง
[8]	2019	AS/RS ร่วมกับหุ่นยนต์	ฟิเอลลชี	-	-	✓	พัฒนาต้นแบบ
[16]	2016	Mini AS/RS	ฟิเอลลชี	-	-	✓	การเรียนการสอน
[6]	2020	AS/RS	แบบจำลอง/การจำลอง	✓	-	-	วิเคราะห์ความต้องการ
[22]	2020	AS/RS	Machine Learning	✓	✓	-	การจัดตารางงาน
[23]	2021	AS/RS	Reinforcement Learning	✓	✓	-	การควบคุมอัจฉริยะ
[10]	2021	AS/RS	PLC + RFID	-	-	✓	บูรณาการระบบ
[12]	2021	AS/RS	Vision-based	-	✓	✓	การนำทางด้วยภาพ

อ้างอิง	ปี	ลักษณะระบบ	กลยุทธ์การควบคุม	การจำลอง	เทคนิคอัจฉริยะ	การทดสอบต้นแบบ	ขอบเขตการนำไปใช้
[13]	2021	AS/RS	ระบบเฝ้าติดตาม	-	-	✓	ติดตามแบบเรียลไทม์
งานวิจัยนี้	2025	AS/RS ระดับห้องปฏิบัติการ	แบบผสม	✓	ต่อยอดได้	✓	จำลองร่วมกับต้นแบบจริง

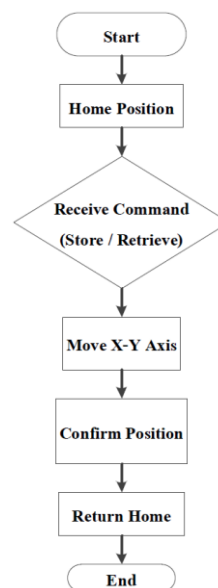
3. รายละเอียดและโครงสร้างของระบบ

หัวข้อนี้อธิบายรายละเอียดและโครงสร้างของระบบจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าอัตโนมัติขนาดเล็ก (Mini-AS/RS) ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยครอบคลุมโครงสร้างเชิงกล หลักการทำงาน และการจัดวางองค์ประกอบของระบบ เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองและการทดลองในหัวข้อถัดไป

3.1 ภาพรวมของระบบ Mini-AS/RS

ระบบ Mini-AS/RS ที่พัฒนาขึ้นถูกออกแบบเป็นแพลตฟอร์มต้นแบบสำหรับการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติ โดยจำลองหลักการทำงานของระบบ AS/RS ระดับอุตสาหกรรมในรูปแบบขนาดเล็ก ระบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) โครงสร้างเชิงกลแบบแกนทรี (X-Y) สำหรับการเคลื่อนที่ 2) ชุดควบคุมด้วย พีแอลซี และระบบสื่อสารกับ HMI และ 3) ชุดจัดเก็บสินค้าหลายตำแหน่ง (A1-B3) การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 โหมดหลัก คือ โหมดจัดเก็บ (Store) และโหมดเบิกคืน (Retrieve) โดยเริ่มต้นจากตำแหน่งอ้างอิง (Home) ระบบจะรับคำสั่งจากผู้ใช้ผ่าน HMI จากนั้น พีแอลซี จะประมวลผลและควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน X และ Y ไปยังตำแหน่งเป้าหมายตามลำดับการทำงานที่กำหนด ภาพรวมดังกล่าวแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างเชิงกล ระบบควบคุม และกระบวนการทำงานของ Mini-AS/RS ก่อนเข้าสู่รายละเอียดเชิงลึกในหัวข้อถัดไป ระบบ

ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนโครงสร้างเชิงกล ส่วนควบคุม และส่วนติดต่อผู้ใช้ ซึ่งทำงานประสานกันภายใต้ลำดับการทำงานที่กำหนดในพีแอลซี เพื่อให้เห็นภาพรวมของกระบวนการควบคุมการทำงานของระบบอย่างเป็นลำดับขั้น จึงได้จัดทำแผนผังลำดับการทำงาน (Flow Chart) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นตอน ตั้งแต่การกำหนดตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น (Home Position) จนถึงการสิ้นสุดกระบวนการ พิจารณารูปที่ 1

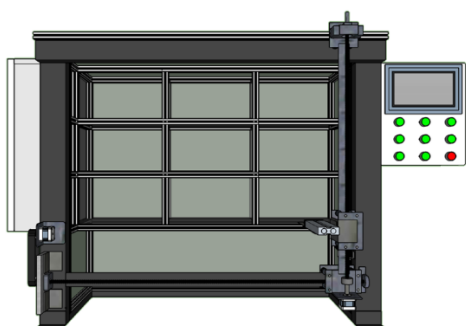


รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบ

จากรูปที่ 1 ลำดับการทำงานของระบบแสดงดัง Flowchart โดยเริ่มต้นจากตำแหน่ง Home เมื่อผู้ใช้เลือกโหมดการทำงาน (Store หรือ Retrieve) ผ่าน HMI

ระบบจะประมวลผลคำสั่งและควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน X และ Y ไปยังตำแหน่งที่กำหนด หลังจากดำเนินการจัดเก็บหรือเบิกคืนเสร็จสิ้น ระบบจะกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นเพื่อรอคำสั่งถัดไป

โครงสร้างที่รองรับลำดับการทำงานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2-3 ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างแกนทรีและตำแหน่งจัดเก็บสินค้า



รูปที่ 2 ชั้นงานในการออกแบบด้านหน้า

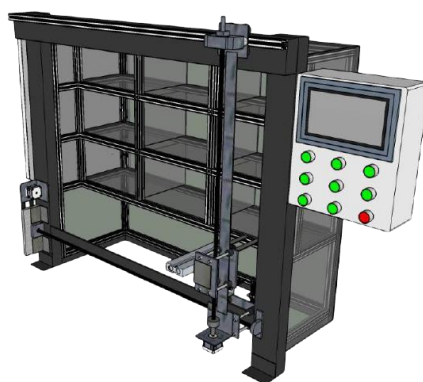
จากภาพที่ 2-3 เป็นส่วนประกอบโครงสร้างภาพรวมชั้นวางสินค้าเก็บสินค้า มีลักษณะคล้ายตู้ขนาดใหญ่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มี 3 ชั้น รายละเอียดดังนี้

- จำนวนชั้นที่ใช้เก็บสินค้าทั้งหมด 3 ชั้น สามารถวางพาเลทสินค้าได้ 6 ช่อง และมีช่อง INPUT OUTPUT และ HOME

- ขนาดพื้นที่โดยสังเขป 100x50x85 (กว้างxยาวxสูง) เซนติเมตร

- ขนาดพื้นที่ของช่อง เข้า-ออก สินค้า โดยสังเขป 27x22x15 (กว้างxยาวxสูง) เซนติเมตร

- ตำแหน่งชั้นวาง โดยมีออกแบบชั้นวางชั้นที่ 1,2 และ 3 สามารถวางได้ชั้นละ 2 ช่อง



รูปที่ 3 ชั้นงานในการออกแบบด้านข้าง

3.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบโครงสร้างเชิงกล

3.2.1 วัสดุโครงสร้างหลัก

- โครงสร้างหลักใช้ อลูมิเนียมโปรไฟล์อุตสาหกรรม T-slot

- วัสดุเป็น Aluminum Alloy เกรด 6063-T5

- รางสไลด์เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนชุบแข็ง

- เพลาส่งกำลังเป็นเหล็กกล้า S45C

- เหล็กโครงสร้างมาตรฐาน ASTM A36 หรือ มอก. 1227-2558

โครงสร้างหลักผลิตจากอลูมิเนียมโปรไฟล์เกรด 6063-T5 เป็นวัสดุมาตรฐานสำหรับงานโครงสร้างน้ำหนักเบาในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและทนต่อการกัดกร่อน

3.2.2 ประเมินการงบประมาณต้นแบบ

งบประมาณในการสร้างต้นแบบ Mini-AS/RS รวมทั้งสิ้นประมาณ 16,600 บาท โดยแบ่งเป็นค่าโครงสร้างเชิงกลประมาณ 9,000 บาท ระบบขับเคลื่อนประมาณ 3,600 บาท และระบบควบคุมประมาณ 4,000 บาท ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับต้นแบบเพื่อการเรียนการสอน

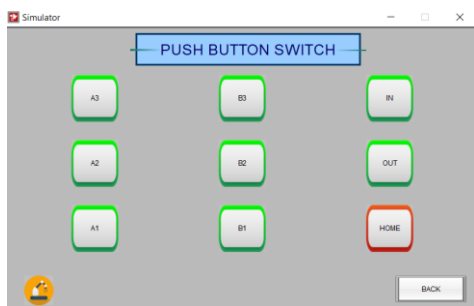
งบประมาณในการพัฒนาต้นแบบ Mini-AS/RS ถูกประมาณการตามรายการอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการก่อสร้างและติดตั้งระบบควบคุม พิจารณาจากตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายการ การประมาณงบประมาณ

หมวดหมู่	รายการหลัก	งบประมาณ (บาท)
โครงสร้าง เชิงกล	อลูมิเนียมโปร ไฟล์, รางสไลด์	9,000
ระบบขับเคลื่อน	Stepper motor Board micro step	3,600
ระบบควบคุม	PLC, HMI, Power Supply	4,000
รวมทั้งสิ้น		16,600

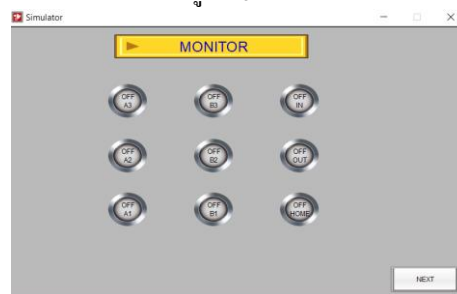
3.3 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้

ระบบ Human–Machine Interface (HMI) ทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับระบบอัตโนมัติ โดยรับคำสั่งจากผู้ควบคุมและแสดงผลข้อมูลจากอุปกรณ์ควบคุม เช่น พีแอลซี เพื่อให้สามารถตรวจสอบและสั่งการระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย [15]-[17]. ส่วนติดต่อผู้ใช้ (HMI) ถูกออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมและติดตามสถานะของระบบได้อย่างสะดวก โดยหน้าจอหลักประกอบด้วยเมนูเลือกโหมดการทำงาน (Store / Retrieve) และเมนูเลือกตำแหน่งจัดเก็บสินค้า ระบบแสดงสถานะการเคลื่อนที่และตำแหน่งปัจจุบันแบบ Real-time ผ่านการสื่อสารระหว่าง HMI และ PLC ด้วยโปรโตคอล Modbus RTU แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 หน้าจอ HMI การสั่งงานด้วยปุ่มกด

ส่วนติดต่อผู้ใช้ (Human-Machine Interface: HMI) ถูกออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมและติดตามสถานะการทำงานของระบบ Mini-AS/RS ได้อย่างสะดวก โดยหน้าจอแสดงเมนูการเลือกโหมดการทำงาน ตำแหน่งจัดเก็บ และสถานะการเคลื่อนที่ของแกนแบบเรียลไทม์ ทั้งนี้โครงสร้างหน้าจอถูกจัดวางให้สอดคล้องกับลำดับการทำงานของระบบเพื่อลดความซับซ้อนในการใช้งาน พิจารณาในรูปที่ 5



รูปที่ 5 หน้าจอ HMI การแสดงสถานะการทำงาน

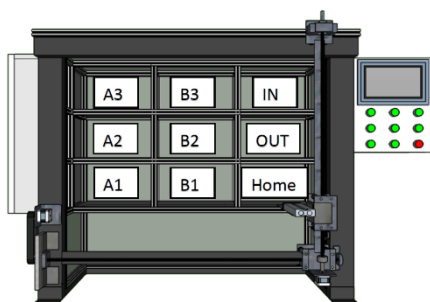
3.4 การออกแบบระบบกลไก (Mechanical Design)

การออกแบบระบบกลไกมุ่งพัฒนาต้นแบบที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และสามารถแสดงหลักการทำงานของระบบ AS/RS ได้อย่างชัดเจน โครงสร้างหลักใช้อลูมิเนียมโปรไฟล์ขนาด 20×20 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้สะดวก ระบบประกอบด้วยกลไกเคลื่อนที่สองแกน ได้แก่ แกน X สำหรับการเคลื่อนย้ายตำแหน่งจัดเก็บ และแกน Y สำหรับการยกและวางชิ้นงาน โดยใช้รางสไลด์เชิงเส้นเพื่อลดแรงเสียดทานและเพิ่มความแม่นยำ ชุดหัวจับแบบนิวเมติกส์ติดตั้งที่ปลายแขนยกเพื่อเพิ่มความนุ่มนวลและความปลอดภัยในการทำงาน พื้นที่การทำงานครอบคลุมช่องจัดเก็บ 9 ช่อง เพื่อจำลองการทำงานของระบบหลายตำแหน่งในระดับอุตสาหกรรม โดยมีแนวคิดสอดคล้องกับงานของ Song et al. [28] และ Bortolini et al. [2] แต่

ถูกย่อส่วนให้เหมาะสมกับการเรียนการสอนในระดับห้องปฏิบัติการ

3.4.1 การกำหนดตำแหน่งช่องเก็บสินค้า

จากรูปที่ 6 แสดงโครงสร้างตำแหน่งช่องเก็บสินค้าในระบบซึ่งจัดเรียงเป็นแถวและคอลัมน์ จำนวน 6 ช่อง ได้แก่ A1–A3 และ B1–B3 โดยใช้หลักการกำหนดรหัสตำแหน่ง (Location Addressing) เพื่อให้ง่ายต่อการอ้างอิงตำแหน่งและลดความซับซ้อนของโปรแกรมควบคุม ระบบยังประกอบด้วยช่องรับสินค้าเข้า (IN) ช่องจ่ายสินค้าออก (OUT) และตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น (Home) ซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิงเชิงกลสำหรับการตั้งค่าศูนย์ก่อนเริ่มการทำงาน การกำหนดตำแหน่งดังกล่าวช่วยเพิ่มความแม่นยำในการเคลื่อนที่ ลดความคลาดเคลื่อนสะสม และเอื้อต่อการขยายจำนวนช่องเก็บสินค้าในอนาคตโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนแนวคิดหลักของระบบควบคุม



รูปที่ 6 แสดงการรับข้อมูลฟังก์ชันสินค้า

3.5 การออกแบบระบบไฟฟ้าและการควบคุม (Electrical/Control System)

ระบบไฟฟ้าและการควบคุมเป็นหัวใจหลักของชุดสาธิต ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณจากเซ็นเซอร์ ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์วและกระบอกลม รวมถึงเชื่อมโยงการทำงานกับหน้าจอ HMI เพื่อให้สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดอัตโนมัติและโหมดแมนนวล ระบบควบคุมหลักใช้ PLC Mitsubishi

FX3U ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบโปรแกรมได้ (Programmable Logic Controller) ที่รองรับการประมวลผลความเร็วสูงและมีพอร์ตสื่อสาร RS-485 สำหรับเชื่อมต่อกับจอ HMI ผ่านโปรโตคอล Modbus RTU โดยมีการออกแบบวงจรไฟฟ้าทั้งในส่วนของแหล่งจ่าย สัญญาณควบคุม และอุปกรณ์ความปลอดภัยดังนี้

3.5.1 โครงสร้างระบบไฟฟ้า

ในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ การกำหนดตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของ พีแอลซี ถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของลำดับการทำงานและความแม่นยำในการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ภาคสนามกับตัวควบคุม [15] การกำหนดตัวแปรในงานวิจัยนี้จึงอ้างอิงตามหลักการเดียวกับที่ Mareeswaran et al. [15] ได้ใช้ในระบบ AS/RS ขนาดเล็ก เพื่อให้สัญญาณทั้งหมดสามารถทำงานประสานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดพิจารณาตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การกำหนดตัวแปรและสัญญาณควบคุมของพีแอลซี (PLC I/O Assignment)

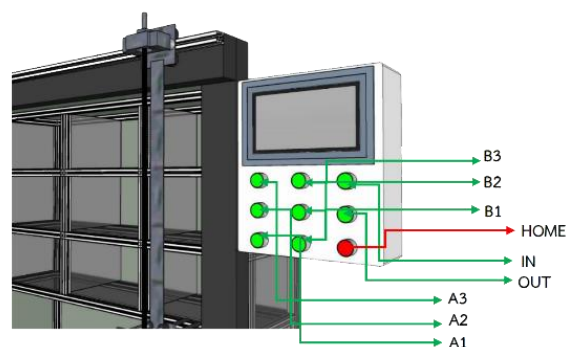
ประเภท	ตัวแปร	พีแอลซี
Input	X0	ปุ่มกด (Home)
Input	X1	ปุ่มกด (Output)
Input	X2	ปุ่มกด (Input)
Input	X3	ปุ่มกด (A3)
Input	X4	ปุ่มกด (A2)
Input	X5	ปุ่มกด (A1)

ประเภท	ตัวแปร	พีแอลซี
Input	X6	ปุ่มกด (B3)
Input	X7	ปุ่มกด (B2)
Input	X10	ปุ่มกด (B1)
Input	X12	ตัวตรวจจับ แกน X
Input	X13	ตัวตรวจจับ แกน Y
Input	X14	ตัวตรวจจับ (Output)
Input	X15	ตัวตรวจจับ (Input)
Output	Y0	บอร์ดสเต็ปเปอร์ มอเตอร์ ๓A Pulse
Output	Y4	บอร์ดสเต็ปเปอร์ มอเตอร์ ๓A Direction
Output	Y1	บอร์ดสเต็ปเปอร์ มอเตอร์ ๓A Pulse
Output	Y6	บอร์ดสเต็ปเปอร์ มอเตอร์ ๓A Direction
Output	Y10	โซลินอยด์

3.5.2 การออกแบบส่วนปุ่มกด

พิจารณารูปที่ 7 แสดงการจัดวางปุ่มควบคุมบนแผงส่วนติดต่อผู้ใช้ซึ่งออกแบบให้สอดคล้องกับตำแหน่งช่องเก็บสินค้าในระบบจริง โดยปุ่มแต่ละปุ่มแทนตำแหน่ง A1–A3 และ B1–B3 เพื่อลดภาระทาง

ความคิดของผู้ใช้งานและลดความผิดพลาดในการสั่งงาน นอกจากนี้ ปุ่มคำสั่ง Home, IN และ OUT ถูกแยกออกจากกลุ่มปุ่มเลือกตำแหน่งอย่างชัดเจน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถแยกแยะหน้าที่ของคำสั่งได้อย่างเป็นระบบ การออกแบบดังกล่าวยึดแนวคิด user-centered design โดยเชื่อมโยงโครงสร้างเชิงกายภาพของระบบกับโครงสร้างการสั่งงานผ่านผู้ใช้ ส่งผลให้ระบบใช้งานง่าย มีความเป็นมิตรต่อผู้ใช้ และเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นชุดทดลองทางการศึกษา



รูปที่ 7 ตำแหน่งปุ่มกด

3.5.3 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมได้รับการออกแบบให้ พีแอลซี เป็นศูนย์กลางในการรับข้อมูลจาก Input Devices (เช่น เซ็นเซอร์, ปุ่มกด) และส่งสัญญาณควบคุมไปยัง Output Devices (เช่น โซลินอยด์วาล์ว, หลอดไฟแสดงสถานะ, กระบอกลม) โดยใช้ตรรกะตามโปรแกรม Ladder Diagram ที่เขียนขึ้นเพื่อควบคุมลำดับการทำงานของระบบ

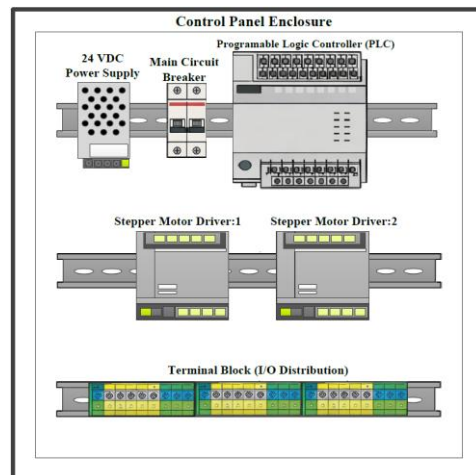
ลำดับการทำงานของโปรแกรมประกอบด้วย

ตรวจสอบสัญญาณเริ่มระบบ (Start) และสถานะหยุด (Stop)

รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตำแหน่งเพื่อกำหนดลำดับการเคลื่อนที่ของเกรน

ส่งสัญญาณสั่งเปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์วเพื่อควบคุมกระบอกลมในแนวตั้งและแนวนอน

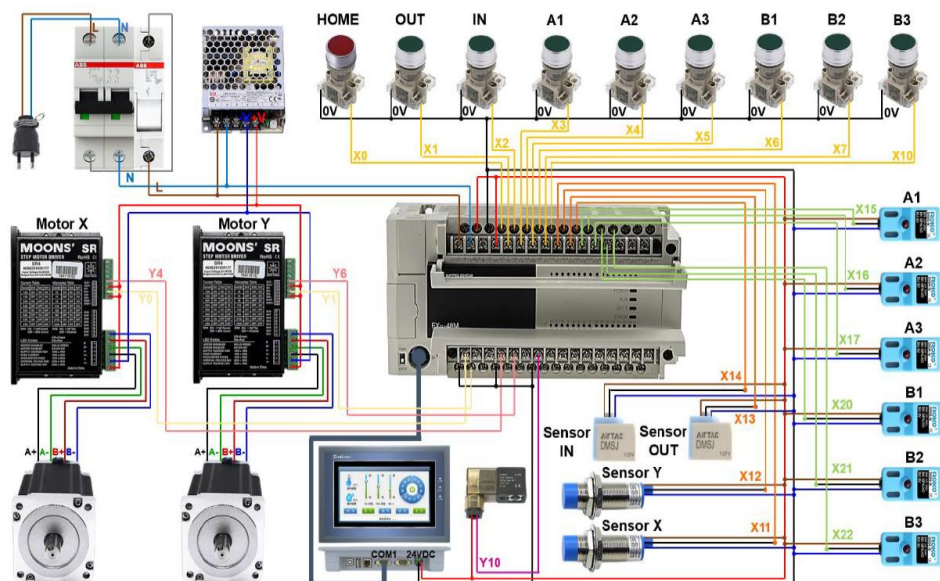
ส่งค่าการทำงานแบบเรียลไทม์ไปยังจอ HMI เพื่อ
แสดงสถานะของอุปกรณ์พิจารณารูปที่ 8



รูปที่ 8 ฟังก์ชันการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบ Mini-AS/RS

โครงสร้างระบบไฟฟ้าและการควบคุมถูก
ออกแบบให้ พีแอลซี ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผล
หลัก โดยรับสัญญาณจากเซนเซอร์และส่งสัญญาณ

ควบคุมไปยังไดรเวอร์มอเตอร์และอุปกรณ์นิวแมติกส์
รายละเอียดการเชื่อมต่อพิจารณารูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและสัญญาณควบคุมของระบบ Mini-AS/RS

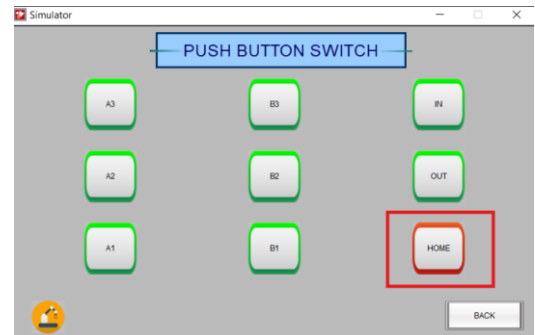
3.5.4 การเชื่อมโยงการทำงานกับ HMI

ระบบควบคุมเชื่อมต่อระหว่าง พีแอลซี และ HMI ผ่านการสื่อสารแบบ RS-485 โดยใช้โปรโตคอล Modbus RTU เพื่อรองรับการรับ-ส่งข้อมูลแบบสองทิศทางและเพิ่มความเสถียรของระบบ ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานและตรวจสอบสถานะผ่านจอ HMI ได้โดยไม่ต้องเข้าถึง พีแอลซี โดยตรง เช่น การเลือกโหมดการทำงาน การตรวจสอบสถานะ I/O และค่าความดันในระบบนิวเมติกส์ แนวทางการออกแบบนี้สอดคล้องกับงานของ Mareeswaran[9] และ Bargiotas[21] เน้นการใช้พีแอลซี เป็นตัวควบคุมหลักร่วมกับระบบสื่อสารเพื่อการควบคุมและแสดงผลแบบเรียลไทม์ ดังนั้น ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นจึงมุ่งเน้นความเข้าใจง่ายของลำดับการทำงานและความเสถียรเมื่อสั่งงานผ่าน HMI

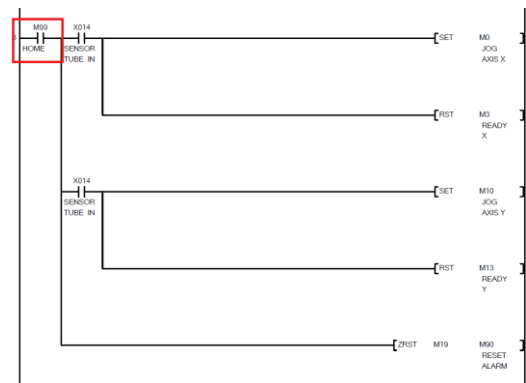
3.5.5 การออกแบบตรรกะการควบคุมด้วยแลคเกอร์ไคอะแกรม

เพื่อให้ระบบทำงานตามลำดับและเงื่อนไขที่กำหนด ตรรกะการควบคุมจึงถูกพัฒนาโดยใช้แลคเกอร์ไคอะแกรม ซึ่งเหมาะสมกับระบบควบคุมแบบลอจิก และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต เอาต์พุต และเงื่อนไขการทำงานได้อย่างชัดเจน ตรรกะดังกล่าวถูกออกแบบให้สอดคล้องกับลำดับการทำงานของระบบ Mini-AS/RS ตั้งแต่การรับคำสั่งจากผู้ใช้งานจนถึงการหยุดทำงานอย่างปลอดภัย การสั่งงานเริ่มต้นผ่านหน้าจอ HMI โดยคำสั่งถูกส่งไปยัง พีแอลซี เพื่อประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด ระบบจะตรวจสอบสถานะความพร้อมของอุปกรณ์และเซนเซอร์ก่อนอนุญาตให้ดำเนินการ เพื่อลดความเสี่ยงจากการสั่งงานที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างตรรกะการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 10 เป็นการสั่งให้เครนเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น (Home Position) โดยระบบจะหยุดการเคลื่อนที่เมื่อได้รับสัญญาณจากเซนเซอร์ตำแหน่งโฮมและรีเซ็ตสถานะเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับคำสั่งถัดไป ซึ่งช่วยเพิ่ม

ความแม่นยำในการอ้างอิงตำแหน่งของระบบ นอกจากนี้ยังมีการกำหนดเงื่อนไขด้านความปลอดภัย เช่น การป้องกันการสั่งงานหลายทิศทางพร้อมกันและการจำกัดการสั่งงานแบบแมนนวลในโหมดอัตโนมัติ ส่งผลให้ระบบควบคุมมีความเสถียร เข้าใจง่าย และเหมาะสมสำหรับการเรียนการสอนและการทดลองด้านระบบอัตโนมัติ

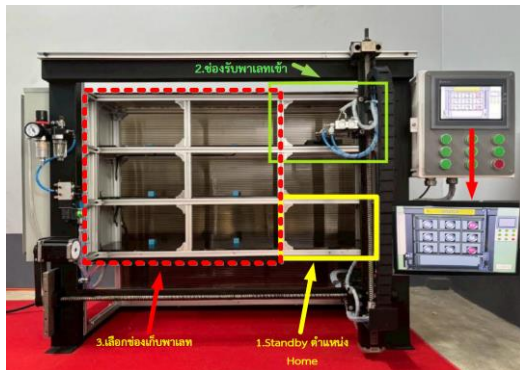


รูปที่ 10 ปุ่มโฮม

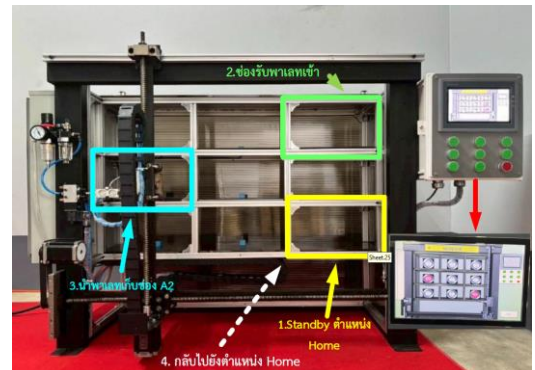


รูปที่ 11 แลคเกอร์ไคอะแกรม

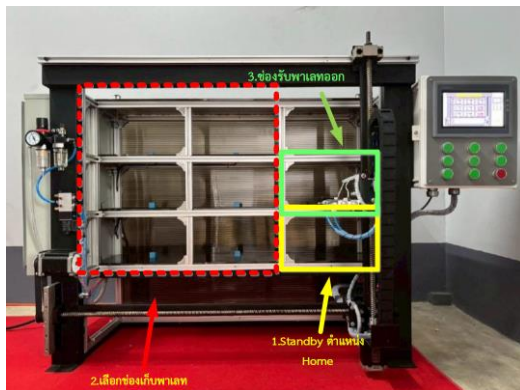
เพื่อประเมินความถูกต้องของลำดับการทำงานและความแม่นยำของการกำหนดตำแหน่ง ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังทุกตำแหน่งจัดเก็บภายใต้เงื่อนไขการควบคุมเดียวกัน โดยให้ผู้ใช้งานเลือกตำแหน่งผ่านหน้าจอ HMI จากนั้น พีแอลซี จะประมวลผลคำสั่งและควบคุมแกน X และ Y ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ผลการทดสอบในแต่ละตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 12-19



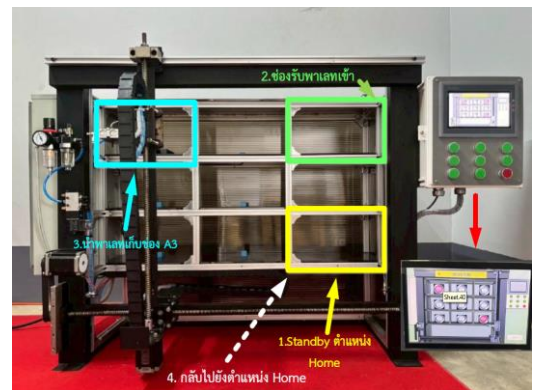
รูปที่ 12 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องรับสินค้าเข้า



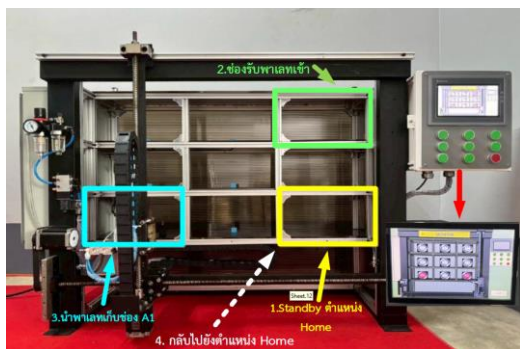
รูปที่ 15 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้า A2



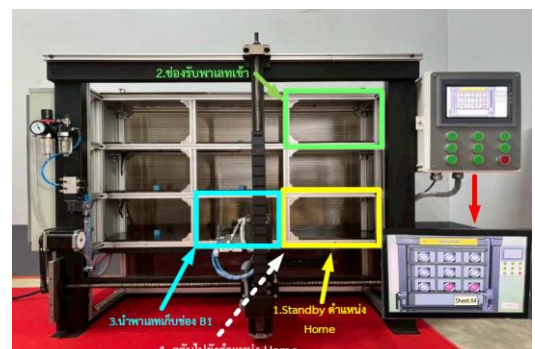
รูปที่ 13 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้าออก



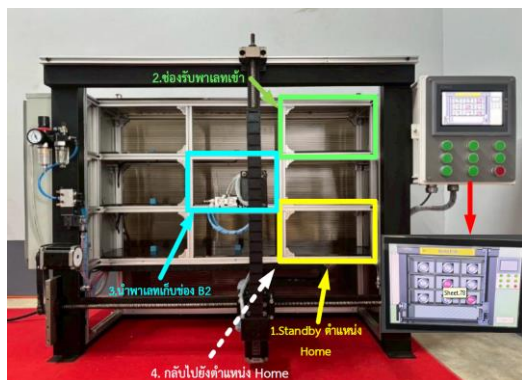
รูปที่ 16 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้า A3



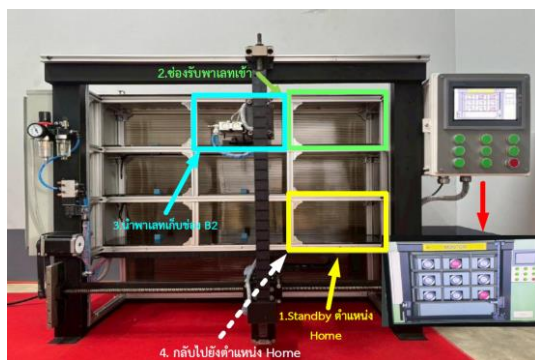
รูปที่ 14 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้า A1



รูปที่ 17 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้า B1



รูปที่ 18 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้า B2



รูปที่ 19 การทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายตามคำสั่งไปยังช่องนำสินค้า B3

การทดสอบดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) และความถูกต้องของการหยุดตำแหน่ง (positional accuracy) ของระบบต้นแบบ

4.ผลการทดสอบ

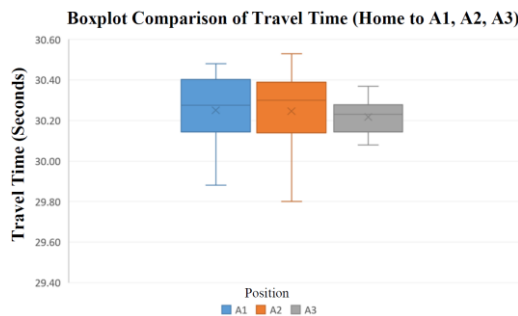
เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องของระบบ ได้ดำเนินการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ควบคุม โดยให้ผู้ใช้งานเลือกตำแหน่งจัดเก็บผ่านหน้าจอ HMI จากนั้นระบบควบคุมประมวลผลคำสั่งและสั่งการชุดขับเคลื่อนให้เครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนถูกตรวจสอบให้เป็นไปตามลำดับการทำงานที่ออกแบบไว้ และยืนยันตำแหน่ง

ปลายทางด้วยสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง การทดสอบทำซ้ำในหลายตำแหน่งเพื่อประเมินความถูกต้อง ความสม่ำเสมอ และความน่าเชื่อถือของระบบ พิจารณาจากรูปที่ 12-19

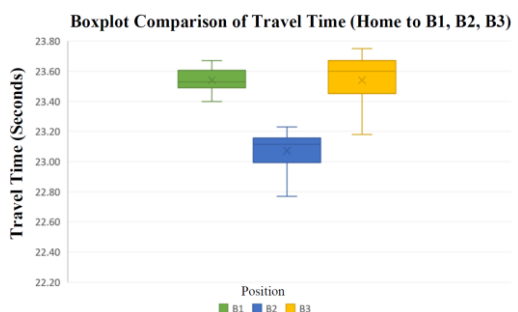
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเวลาในการเคลื่อนที่ไปยังแต่ละตำแหน่ง หน่วย (S) : วินาที

ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย (S)	SD (S)	ค่าต่ำสุด (S)	ค่าสูงสุด (S)
A1	30.25	0.18	29.88	30.48
A2	30.25	0.23	29.80	30.53
A3	30.22	0.09	30.08	30.37
B1	23.54	0.08	23.40	23.67
B2	23.07	0.14	22.77	23.23
B3	23.54	0.18	23.18	23.75

จากผลการทดสอบจำนวน 10 ครั้งในแต่ละตำแหน่ง พบว่าระบบมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 0.25 วินาทีในทุกตำแหน่ง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ที่ดีของระบบต้นแบบ โดยตำแหน่ง A มีเวลาเฉลี่ยประมาณ 30 วินาที ขณะที่ตำแหน่ง B มีเวลาเฉลี่ยประมาณ 23 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของแกน Y โดยประเมินลักษณะการกระจายของข้อมูลเชิงลึกและตรวจสอบความสม่ำเสมอของระบบต้นแบบ นอกเหนือจากค่าทางสถิติพื้นฐานที่แสดงในตารางที่ 4 จึงได้จัดทำกราฟ Box plot เพื่อแสดงค่ามัธยฐาน ช่วงระหว่างควอไทล์ (IQR) และการกระจายของข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง พิจารณารูปที่ 20 และรูปที่ 21 ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ของระบบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 20 การกระจายของเวลาในการเคลื่อนที่ของ
ตำแหน่ง A1-A3



รูปที่ 21 การกระจายของเวลาในการเคลื่อนที่ของ
ตำแหน่ง B1-B3

ภายหลังการดำเนินการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ตามแผนที่กำหนด ผู้วิจัยได้รวบรวมและวิเคราะห์คะแนนก่อนและหลังเรียนของกลุ่มตัวอย่าง เพื่อสะท้อนระดับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละช่วงเวลา โดยผลการวิเคราะห์เชิงพรรณนาพิจารณาตารางที่ 5

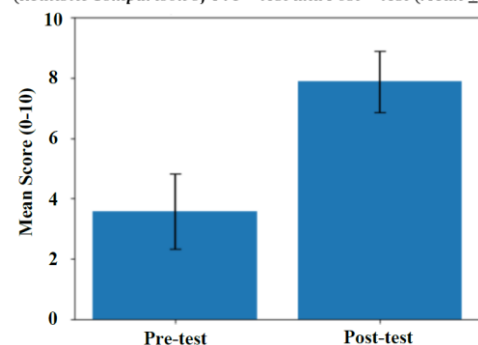
ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบคะแนนก่อนและหลังเรียนของกลุ่มตัวอย่าง (n=40)

ทดสอบ	N	Mean	SD
ก่อนเรียน (Pre-test)	40	3.58	1.24

ทดสอบ	N	Mean	SD
หลังเรียน (Post-test)	40	7.88	1.02

เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยได้คำนวณสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนก่อนและหลังเรียน และสรุปผล พิจารณารูปที่ 22

(Realistic Comparison of Pre – test and Post – test (Mean $\pm$ SD)



รูปที่ 22 แสดงผลการเปรียบเทียบคะแนนก่อนและหลัง
เรียนของกลุ่มตัวอย่าง

4.1 การวิเคราะห์ศักยภาพด้านแรงงานและระบบโลจิสติกส์

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4 พบว่าเวลาเฉลี่ยในการจัดเก็บและเบิกคืนสินค้าของแต่ละตำแหน่งมีค่าอยู่ระหว่าง 23.07–30.25 วินาที โดยเมื่อกำหนดค่าเฉลี่ยรวมของทั้งระบบจาก 6 ตำแหน่งทดสอบ พบว่า $\bar{x}_{\text{รวม}} = 26.81$ วินาทีต่อรอบ เมื่อพิจารณาศักยภาพเชิงทฤษฎีของระบบในช่วงเวลาการทำงาน 1 ชั่วโมง (3,600 วินาที) จะได้อัตราการทำงานสูงสุด (Throughput) เท่ากับ $3600/26.81$ เท่ากับ 134 รอบต่อชั่วโมง ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถปฏิบัติงานได้อย่างสม่ำเสมอ และมีความสามารถในการรองรับปริมาณงานในระดับที่สูงกว่าการปฏิบัติงานด้วยแรงงานมนุษย์ทั่วไป เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพในการลดการพึ่งพา

แรงงาน ได้ทำการเปรียบเทียบเชิงสมมติฐานกับกระบวนการทำงานแบบใช้แรงงานคน ซึ่งโดยทั่วไปอาจใช้เวลาประมาณ 45 วินาทีต่อการหยิบสินค้า คิดเป็นอัตราการทำงานประมาณ 80 รอบต่อชั่วโมง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถเพิ่มอัตราการทำงานได้ประมาณ 1.67 เท่า หรือเพิ่มผลผลิตภาพประมาณร้อยละ 67 ภายใต้เงื่อนไขการเปรียบเทียบเดียวกัน ในมุมมองด้านระบบโลจิสติกส์ การลดระยะเวลาเฉลี่ยต่อการรอบและการลดความแปรปรวนของเวลาในการทำงาน ส่งผลให้ Lead Time มีความสม่ำเสมอมากขึ้น เพิ่มความสามารถในการคาดการณ์ (Predictability) และเพิ่ม Throughput ของคลังสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการลดการพึ่งพาแรงงานมนุษย์ลงได้ประมาณร้อยละ 40 ภายใต้สมมติฐานเชิงทฤษฎี และสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบของระบบจัดเก็บสินค้าอัตโนมัติในบริบทของ Smart Logistics และระบบคลังสินค้าอัตโนมัติระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

5.สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดลองเชิงปริมาณยืนยันว่า Mini-AS/RS ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์การออกแบบและสามารถทำงานได้อย่างเสถียรในทุกตำแหน่งจัดเก็บ จากการทดสอบ 10 ครั้งต่อหนึ่งตำแหน่ง พบว่าเวลาเฉลี่ยตำแหน่ง A1 ถึง A3 = 30.2 วินาที และตำแหน่ง B1 ถึง B3 = 23.1–23.5 วินาที ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน < 0.23 วินาที ทุกตำแหน่ง ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งเฉลี่ย 0.2 มิลลิเมตร อัตราความสำเร็จในการเข้าตำแหน่ง = 100% ค่าความแปรปรวนที่ต่ำมากและไม่พบความผิดพลาดตลอดการทดสอบ แสดงถึงความสอดคล้องของโครงสร้างเชิงกล ระบบขับเคลื่อน และตรรกะการควบคุมอย่างสมบูรณ์ ระบบที่พัฒนาขึ้นผ่านการยืนยันสมรรถนะ ทั้งด้านความแม่นยำ ความสามารถในการทำซ้ำ และความน่าเชื่อถือเชิงปฏิบัติการ

นอกจากนี้ การนำระบบไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนในวิชาการวัดและเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า โดยให้นักศึกษาเข้าถึงชิ้นงาน แนวคิด การออกแบบ ร่วมกับการทดสอบก่อนเรียน และ หลังเรียน กับนักศึกษา 40 คน พบว่าคะแนนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 6.85 คะแนน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.12) ก่อนเรียน เป็น 8.92 คะแนน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.95) หลังเรียน คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.22 และผลการทดสอบทางสถิติ แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สะท้อนว่าต้นแบบที่พัฒนาขึ้นไม่เพียงผ่านการยืนยันสมรรถนะเชิงวิศวกรรม แต่ยังส่งผลต่อการยกระดับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนอย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้ สามารถบูรณาการเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อการติดตามสถานะและบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] K. J. Roodbergen and I. F. A. Vis, "A survey of literature on automated storage and retrieval systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 194, no. 2, pp. 343–362, Apr. 2009.
- [2] S. Bortolini, M. Faccio, and E. Ferrari, "Design and optimization of automated warehouses," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 170, pp. 89–104, 2015.
- [3] S. Tan, L. -Y. Ong, and M. -C. Leow, "A systematic review on automated warehouse with multiple-deep rack," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 1–22, 2025.
- [4] Z. U. Rizqi, S. Y. Chou, and S. S. Choon, "Performance of Dual Stacker Automated Storage and Retrieval System (AS/RS) with Double-Deep Configuration," in *Proc. 2023 IEEE Eurasia Conf. IoT, Commun. and Eng. (ECICE)*, 2023, pp. 683–687.
- [5] M. A. Hamzaoui, T. Arbaoui, Z. Sari, and F. Yalaoui, "Exact and heuristic approaches for the design of automated storage and retrieval systems," in *Proc. 2019 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Appl. (ICIEA)*, 2019.
- [6] J. Sebastián et al., "Performance analysis of multi-aisle automated storage and retrieval systems," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 12, no. 4, pp. 589–600, 2020.

- [7] J. Wen, X. Liu, and P. Yang, "Stochastic storage/ retrieval scheduling considering shuttle failure in multi-shuttle AS/RS," in Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manage. (IEEM), 2018.
- [8] B. Xing, W. J. Gao, F. V. Nelwamondo, K. Battle, and T. Marwala, "Ant colony optimization for automated storage and retrieval system," in Proc. IEEE Congr. Evol. Comput. (CEC), 2010, pp. 1–8.
- [9] X. Li and Y. Liu, "Simulation modeling of automated storage and retrieval systems with random demand," Int. J. Prod. Res., vol. 58, no. 3, pp. 849–863, 2020.
- [10] S. K. Singh and A. K. Sharma, "Simulation-based design optimization of AS/RS," Int. J. Simul. Model., vol. 19, no. 1, pp. 121–132, 2020.
- [11] R. Lu and L. Feng, "Modeling and analysis of AS/RS with multiple storage policies," Comput. Ind. Eng., vol. 139, pp. 106–123, 2020.
- [12] P. Gharehgozli et al., "Machine learning-based scheduling for automated storage and retrieval systems," J. Manuf. Syst., vol. 57, pp. 167–179, 2020.
- [13] M. R. Jahanshahi and J. Barua, "Deep learning applications in warehouse automation," IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 18, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [14] Y. Chen and Q. Zhang, "Scheduling optimization of AS/RS using multi-agent reinforcement learning," IEEE Trans. Cybern., vol. 51, no. 4, pp. 1875–1887, 2021.
- [15] G. Mareeswaran et al., "PLC-based automated storage and retrieval system with robotic end effector," Int. J. Eng. Trends Technol., vol. 67, no. 7, pp. 11–14, 2019.
- [16] A. Joy, B. Padmanabhan, and A. Abinaya, "Advanced technology of automated storage and retrieval system using PLC integration," Int. J. Eng. Trends Technol., vol. 9, no. 9, pp. 471–474, 2014.
- [17] A. Pérez et al., "Design and control of AS/RS using PLC and RFID technologies," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 112, pp. 1123–1135, 2021.
- [18] H. Kim and J. Lee, "Vision-based guidance and control for automated storage and retrieval systems," Robot. Comput.-Integr. Manuf., vol. 68, Art. no. 102059, 2021.
- [19] L. Zhang et al., "Integration of IoT and AS/ RS for smart warehousing," IEEE Access, vol. 8, pp. 148999–149012, 2020.
- [20] R. A. Rahman et al., "Development of an AS/ RS prototype with real- time monitoring," Int. J. Ind. Autom., vol. 12, no. 2, pp. 77–88, 2021.
- [21] D. Bargiotas, A. Ktena, C. Manasis, and O. Ladoukakis, "A scalable low- cost automated storage and retrieval system," in Proc. Int. Conf. Syst., Signals Image Process., 2009.
- [22] H. M. Narayana and R. T. Naayagi, "Design and implementation of mini automated storage and retrieval system," Int. J. Innov. Technol. Res., vol. 4, no. 5, pp. 2345–2349, 2016.
- [23] F. Hanani et al., "Development of automated storage and retrieval system for flexible manufacturing system," J. Eng. Technol., vol. 4, no. 1, pp. 43–50, 2016.
- [24] Y. Z. Koç, "Automatic storage and retrieval system design for manufacturing systems," Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng., vol. 9, no. 2, pp. 102–104, 2023.
- [25] R. Accorsi et al., "Digital twin in logistics and automated warehousing systems," IEEE Access, vol. 9, pp. 131635–131648, 2021.
- [26] A. H. Guezzen, Z. Sari, and L. Ghomri, "Study on mobil racks automated storage and retrieval system (M-AS/RS)," in Proc. Int. Conf. Commun., Comput. Control Appl., 2011.
- [27] M. T. Islam et al., "Energy- efficient strategies for automated storage and retrieval systems," Energy Convers. Manage., vol. 192, pp. 1–13, 2019.
- [28] R. Song, L. Zhang, and X. Chen, "Design of a robotic automated storage and retrieval system for high-density warehouses," Int. J. Adv. Robotic Syst., vol. 17, no. 6, 2020.
- [29] I. Hachemi and H. Alla, "Dynamic control of a flow- rack automated storage and retrieval system," IEEE Conf. Control Appl., 2009.
- [30] P. Athikomrattanakul and C. Dichaiyo, "Factors affecting selection of automated storage and retrieval systems," Sci. Eng. Connect., vol. 44, no. 2, pp. 339–354, 2021.

ประวัติผู้ประพันธ์



ชนภัช เชนนาราคพัฒน์

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา

โท (วศ.ม.ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัย

เอเชียอาคเนย์ ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่งอาจารย์ประจำ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : เครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้า

กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรม

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบจำลองตัวแทนที่ใช้การถดถอยกระบวนการเกาส์ เขียนและวิธีฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรม Surrogate Model Optimization Using Gaussian Process Regression and Particle Swarm Optimization for Engineering Design Problems

พุทธา จินครวั¹, นันทวัฒน์ วีระยุทธ², สุกัญญา เจียมวรณันท์กุล³, พรเทพ ชมชื่น³ และ กิตติพงษ์ บุญโล่ง¹*

Puttha Jeenkour¹, Nantawatana Weerayuth², Sukanya Jiamworanunkul³, Porntep Chomcheon³, and
Kittipong Boonlong¹*

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถนนลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมือง
จ.ชลบุรี ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 หมู่ 4 ต.เมืองศรีไค อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย

³สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม 39/1
ถนนรัชดาภิเษก แขวงจันทรเกษม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน : kittipong@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 เมษายน 2569 / วันที่แก้ไขบทความ: 29 พฤษภาคม 2569 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 25 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model Optimization; SMO) เพื่อการออกแบบทางวิศวกรรม SMO ที่ถูกนำเสนอในบทความนี้มีกระบวนการหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่สร้างชิ้นจำนวนน้อย และมีการปรับสเกลตัวแปรก่อนทำแบบจำลองตัวแทน เพื่อให้มีตัวแปรแต่ละตัวมีผลกระทบต่อค่าตอบใกล้เคียงกัน โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ของเครื่องแบบการถดถอยร่วมกับขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ของเครื่องแบบถดถอยที่เลือกเพื่อประเมินได้แก่ การถดถอยด้วยกระบวนการเกาส์เขียน (GPR), การถดถอยซัพพอร์ตเวกเตอร์ (SVR), และโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ขณะที่ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ใช้คือ Particle Swarm Optimization (PSO) ซึ่งจากการทดสอบด้วยปัญหาฟังก์ชันมาตรฐานพบว่า SMO ที่ใช้ GPR ร่วมกับ PSO มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และดีกว่าเทคนิคทางด้านการออกแบบการทดลองซึ่งก็คือวิธีทากูชิ โดยจาก 3 ปัญหาฟังก์ชันมาตรฐาน SMO ใช้ GPR ร่วมกับ PSO ดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0001, 0.0000, 0.0856 ขณะที่วิธีทากูชิมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0000, 0.1249, 1.0000 ตามลำดับ SMO ที่ใช้ GPR ร่วมกับ PSO สามารถแก้ไขปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรมมาตรฐานและปัญหาการออกแบบคำนวณเชิงตัวเลขโดย Solidworks ได้อย่างดี โดยให้ค่าวัตถุประสงค์การออกแบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) เพียง 0.63 % และ 0.58 % สำหรับ 2 ปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรมมาตรฐานซึ่งทราบผลเฉลยแม่นยำตรง ดังนั้น SMO ที่ใช้ GPR ร่วมกับ PSO จึงเหมาะสมสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบจำลองตัวแทนสำหรับปัญหาการออกแบบวิศวกรรม

คำสำคัญ : การหาค่าเหมาะที่สุดแบบจำลองตัวแทน, การเรียนรู้ของเครื่อง, การถดถอย, ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค, การออกแบบวิศวกรรม

Abstract: This research proposes surrogate model optimization (SMO) for engineering design by the use of machine learning regression algorithms and an optimization algorithm. The SMO proposed in this research features an optimization process designed to use only a small number of generated solutions. Additionally, variable scaling is applied prior to constructing the surrogate model to ensure that each variable has a similar impact on finding the optimal solution. The machine learning regression algorithms to be evaluated are gaussian process regression (GPR), support vector regression (SVR), and artificial neural network (ANN), while the optimization algorithm used is particle swarm optimization (PSO). After testing with benchmark function optimization problems, GPR with PSO has the highest performance and outperforms the design of experiment (DOE) technique, Taguchi method. For three standard benchmark functions, the proposed SMO using GPR and PSO yielded average errors of 0.0001, 0.0000, and 0.0856, whereas the Taguchi method resulted in average errors of 0.0000, 0.1249, and 1.0000, respectively. Thereafter, SMO using GPR and PSO can effectively solve engineering design benchmark problems and engineering design problems with the numerical calculation by Solidworks software. It produced design objective values with deviations of only 0.63% and 0.58% from the exact solutions for two standard engineering design problems where the exact solutions are known. Therefore, SMO using GPR combined with PSO is considerably suitable for surrogate model optimization in engineering design problems.

Keywords: Surrogate Model Optimization, Machine Learning, Regression, Particle Swarm Optimization, Engineering Design

1. บทนำ

ในการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design) ปัญหาส่วนใหญ่มีลักษณะซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการออกแบบ (Design Variables) เงื่อนไขบังคับ (Constraints) และวัตถุประสงค์ (Objectives) มักไม่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันคณิตศาสตร์แบบชัดแจ้ง (Explicit Functions) ได้โดยตรง แต่ต้องอาศัยการประเมินผ่านแบบจำลองเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) [1,2] ซึ่งมีต้นทุนด้านเวลาและทรัพยากรการคำนวณสูง

โดยเฉพาะในปัญหาที่มีความซับซ้อนเชิงโครงสร้างหรือมีจำนวนตัวแปรมาก [3] ดังนั้นเพื่อเป็นการลดภาระทางคอมพิวเตอร์ จำนวนการประเมินคำตอบด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจึงควรมีน้อยครั้งที่ที่สุด การนำแนวทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model Optimization: SMO) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบัน [4] การผสมผสานเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) เข้ากับ SMO ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถสร้าง

แบบจำลองประมาณค่าที่มีความแม่นยำและคำนวณได้รวดเร็ว

ก่อนหน้านี้มีงานวิจัยที่ประยุกต์การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) เข้ากับ SMO เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองประมาณค่า (Approximation Models) ที่มีความแม่นยำและคำนวณได้รวดเร็ว [5] เช่น งานวิจัยที่ใช้โมเดลตัวแทนแบบหลายรูปแบบ (Multi-Surrogate Models) ในการปรับปรุง Truss Structure ซึ่งสามารถลดระยะเวลาการคำนวณลงได้อย่างมีนัยสำคัญในขณะที่ยังคงความเสถียรและความแม่นยำสูง [6] รวมถึงยังมีการประยุกต์ใช้โมเดลตัวแทน GPR ร่วมกับการสุ่มตัวอย่างแบบปรับตัว (Adaptive Sampling) ในการออกแบบवादัลลดแรงดันก๊าซธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดเสียงรบกวน [7] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งซึ่งใช้ GPR ในการจำลองใน SMO ดังเช่น การใช้ GPR ร่วมกับ Bayesian Optimization เพื่อพยากรณ์และปรับปรุงค่าความหนืดของวัสดุเรซินคอมโพสิตอุดฟันให้เหมาะสมกับการใช้งานทางคลินิก [8] การประยุกต์ใช้ GPR ควบคู่กับอัลกอริทึมพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Genetic Algorithms) ในการออกแบบโครงสร้างอนุภาคแบบครึ่งคลื่น (HWR) เพื่อทดแทนการจำลองที่ใช้เวลานาน [9] การใช้ GPR เพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุดในการออกแบบรูระบายความร้อนแบบพัดบนผนังโค้งเว้า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปกป้องพื้นผิวจากความร้อนสูง [10] เป็นต้น

บทความนี้จะนำเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในวิธี SMO ที่นำเสนอ ในวิธี SMO ที่นำเสนอนี้ คำตอบที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาใช้เพื่อระบุฟังก์ชันประมาณค่า (Approximated Functions) ของตัวแปรการออกแบบสำหรับเงื่อนไขบังคับและวัตถุประสงค์ ซึ่งจะส่งผลให้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแก้ปัญหาได้ในเวลาสั้น ยังทำการประเมินเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยจำนวน 3 เทคนิค ได้แก่ Gaussian Process Regression (GPR) [7,8,10], Support Vector Regression (SVR) [11,12], และ Artificial Neural Network:

ANN) [13,14] วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [15,16] จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันประมาณค่า โดยจะทำการประเมินเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยใช้ใน SMO ผ่านปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันที่ชัดเจนและปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรม ในขณะที่เดียวกันก็จะนำวิธี SMO ไปเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) แบบทากูชิ (Taguchi Method) [18] ด้วย

ทั้งนี้ที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับ SMO จำนวนมาก โดยมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ใช้คำตอบที่สร้างขึ้นจำนวนมาก โดยอาจจะใช้หลักการของการเลือกสร้างแบบ DOE เช่น Orthogonal Array [19], ซึ่งแต่ละรอบการหาค่าตอบจะต้องสร้างคำตอบใหม่จำนวนหนึ่งซึ่งอาจจะต้องใช้คำตอบจำนวนมากในกระบวนการหาค่าตอบ โดย [19] ใช้คำตอบจำนวน 2,100 คำตอบเพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาที่มี 4 ตัวแปรออกแบบ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองตัวแทนเป็นตัวช่วยในขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดดังเช่น [20] ซึ่งการค้นหาค่าตอบจะเป็นไปตามกระบวนการขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ใช้ ซึ่งอาจจะต้องใช้คำตอบจำนวนมาก งานวิจัย [20] แก้ปัญหาที่มี 5 ตัวแปรออกแบบ โดยใช้ 1,600 คำตอบจากจำนวนประชากรในแต่ละรุ่น (Population size) เท่ากับ 32 จำนวนรุ่นในการวิวัฒนาการ (Generations): เท่ากับ 50 รุ่น โดยบทความนี้จะนำเสนอ SMO ที่มีกระบวนการที่ใช้คำตอบจำนวนน้อยรวมถึงมีการปรับสเกลของตัวแปรก่อนการจำลองตัวแทนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อให้แต่ละตัวแปรมีผลกระทบต่อการกระบวนการใกล้เคียงกันด้วย

2. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากแบบจำลองตัวแทน

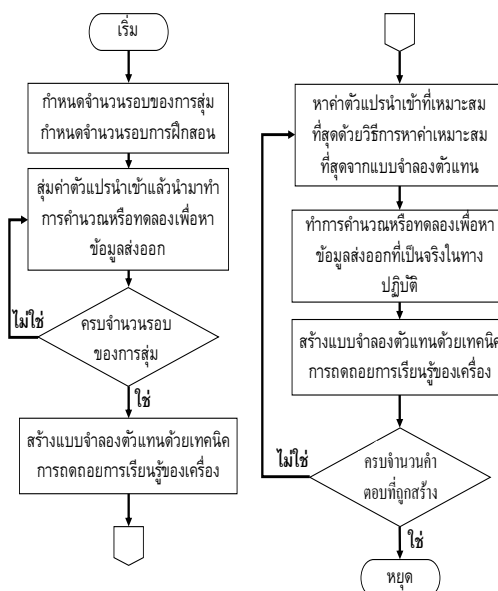
การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบจำลองตัวแทน (SMO) ดังรูปที่ 1 โดยเริ่มต้นจากการสุ่มค่าของตัวแปรนำเข้า (Input Variable; IV) และนำไปทำการคำนวณหรือทดลองเพื่อหาข้อมูลส่งออก ซึ่งเป็นค่าวัตถุประสงค์ (Objective Value; OV) หรือเงื่อนไขบังคับ (Constraint) ที่

จะทำการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยทำซ้ำจนกระทั่งครบจำนวนรอบที่กำหนด โดยเริ่มต้นค่าตอบจะถูกสร้างโดยการสุ่มจำนวนหนึ่งดังแสดงในด้านซ้ายของรูปที่ 1 จากนั้นก็จะนำชุดข้อมูลที่ได้นี้มาสร้างเป็นแบบจำลองตัวแทนด้วยการฝึกสอนจากเทคนิคการถดถอยการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Regression) ดัง

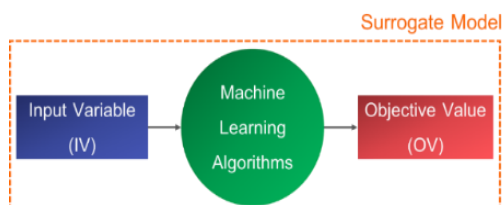
รูปที่ 2 เพื่อประมาณเป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ของ Input ซึ่งก็คือตัวแปรออกแบบและ Output เป็น Constraint กับ Objective จากนั้นใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Algorithm) มาใช้ในการหาค่าตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมที่สุดจากแบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model) ซึ่งอาจจะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดขึ้นอยู่กับปัญหา ต่อจากนั้นนำค่าตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมที่สุดนี้ไปทำการคำนวณหรือทำการทดลองอีกครั้ง เพื่อหาข้อมูลส่งออกที่เป็นจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งอาจจะได้จากการทดลองหรือการคำนวณเชิงตัวเลข แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้นี้มารวมเข้ากับชุดข้อมูลก่อนหน้าเพื่อฝึกสอนในรอบถัดไป ทำซ้ำจนกระทั่งครบจำนวนค่าตอบที่กำหนด ค่าตอบที่สร้างขึ้นจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 ในแต่ละรอบการสร้างแบบจำลองดังกล่าว โดยค่าของข้อมูลนำเข้าในการทดลองรอบไหนที่ทำให้ได้ค่าข้อมูลส่งออกที่เหมาะสมที่สุด ค่าของตัวแปรนำเข้านั้นจะเป็น Output ของการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ SMO ทั้งนี้ SMO ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น DOE [21] ซึ่งใช้เพื่อช่วยในการลดจำนวนครั้งการทดลองได้อีกด้วย

สำหรับจำนวนค่าตอบเริ่มต้น โดยการสุ่มในบทความนี้น้อยกว่ากับจำนวนตัวแปรออกแบบบวก 2 ซึ่งโดยหลักการก็คือต้องการให้ได้ความสัมพันธ์เริ่มต้นที่เป็นลักษณะระนาบโค้งเพื่อหลีกเลี่ยงค่าตอบเริ่มต้นที่ได้จาก PSO เป็นค่าตอบที่ขีดขอบใดขอบหนึ่งของขอบเขตตัวแปรออกแบบ ทั้งนี้โดยทฤษฎีแล้วความสัมพันธ์แบบระนาบสามารถประมาณโดยทศพหุนามโดยใช้จำนวนข้อมูลเท่ากับจำนวนตัวแปรออกแบบบวก 1 ในที่นี้จึงเพิ่มจำนวนค่าตอบเริ่มต้นโดยการสุ่มจึงเพิ่มไปอีกอย่างน้อย 1

ตัวด้วยเหตุผลดังกล่าว ข้อมูลก่อนทำการจำลองความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรออกแบบและ Objective Value จะต้องปรับสเกล โดยในบทความนี้ข้อมูลจะถูกปรับสเกลให้เป็น Z-score เพื่อให้ตัวแปรทุกตัวและ Objective Value เป็นค่าสเกลเดียวกันมีความสำคัญใกล้เคียงกันในการประมาณความสัมพันธ์ ด้วยการ ใช้ StandardScaler ใน Library “sklearn” คำสั่งย่อย สำหรับเปลี่ยนค่าปกติเป็น Z-score และเปลี่ยนจากค่า Z-score กลับมาเป็นค่าปกติ ด้วยกระบวนการแบบนี้ตัวแปรที่ผ่านการหาค่าเหมาะสมที่สุด เป็นค่าแบบ Z-score จึงต้องผ่านการเปลี่ยนจากค่าเพื่อทำให้เป็นตัวแปรปกติ เพื่อไปคำนวณหา Objective Value ที่แท้จริงต่อไป



รูปที่ 1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้แบบจำลองตัวแทน



รูปที่ 2 การสร้างแบบจำลองตัวแทนด้วยเทคนิคการถดถอยการเรียนรู้ของเครื่อง

3. ปัญหาทดสอบและผลการจำลอง

ปัญหาที่ใช้ทดสอบแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดมาตรฐาน ซึ่งใช้เพื่อทดสอบหา Machine Learning Algorithm ที่เหมาะสม ขณะที่กลุ่มที่ 2 เป็นปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมมาตรฐาน ส่วนกลุ่มที่ 3 เป็นปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมโดยคำนวณ Finite Element Method (FEM) โดยโปรแกรม Solidworks ขณะที่ SMO ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม Python โดยจำนวน Generated Solution ที่ใช้ในแต่ละปัญหาจะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปร และจำนวนเงื่อนไขบังคับ (Constraints) โดยปัญหา 2 กลุ่มแรกใช้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของ SMO ซึ่งทางปฏิบัติแล้วหากทราบ Explicit Function ของ Objective และ Constraint แล้วไม่จำเป็นต้องใช้ SMO เพราะสามารถใช้ Optimization Algorithm ร่วมกับโปรแกรมที่เหมาะสม เช่น Python, Java, Matlab เนื่องจากการคำนวณ Objective และ Constraint ใช้เวลาน้อยเพราะทราบ Explicit Function แล้ว โดยในทางปฏิบัติแล้ว SMO เหมาะที่ใชกับปัญหากลุ่มที่ 3 ซึ่งใช้เวลานานในการคำนวณ Objective และ Constraint ดังการคำนวณโดย FEM ซึ่งจำเป็นต้องใช้จำนวน Generated Solutions ให้น้อยที่สุดเพราะมีผลโดยตรงกับเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

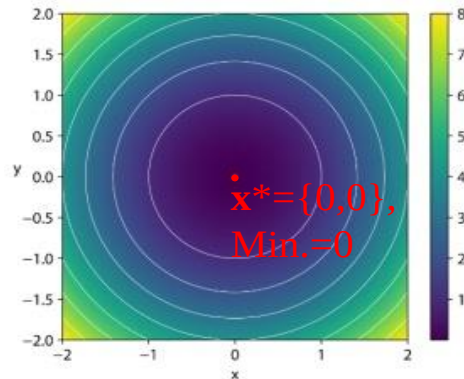
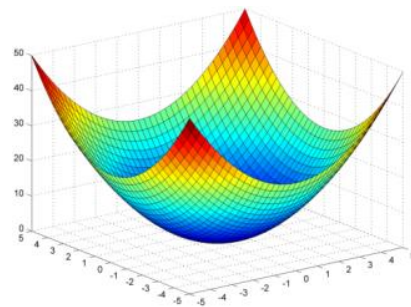
3.1 การทดสอบกับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดฟังก์ชัน

มาตรฐาน

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดฟังก์ชันมาตรฐานที่นำมาทดสอบทั้งหมด 3 ฟังก์ชันทดสอบ (Test Function) ประกอบด้วย Sphere Function, Multi-modal Function, และ Rosenbrock Function โดยปัญหามาตรฐานทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ SMO กับการหาค่าเหมาะที่สุดทางสถิติซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) ซึ่งใช้วิธีที่เรียกว่าวิธีการทาคุชิ (Taguchi's Method) [18] ปัญหามาตรฐาน

ทั้งหมดมีตัวแปรตัดสินใจ 2 ตัวแปร โดยเฉพาะ Multi-Modal Function ที่เป็นปัญหาการหาค่าสูงสุด ส่วนที่เหลือจะเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุด โดยการอธิบายปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดฟังก์ชันมาตรฐานเป็นดังต่อไปนี้

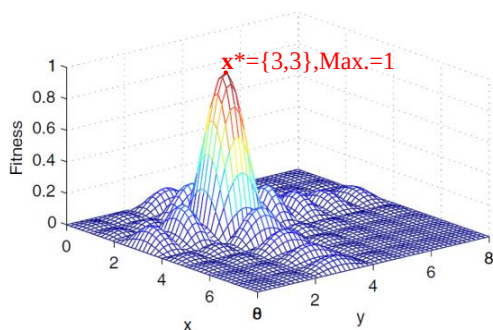
ปัญหาที่ 1 คือ Sphere Function (รูปที่ 3) เป็นปัญหาง่ายที่สุด แต่ละตัวแปรเป็นอิสระต่อกันอธิบายด้วยสมการที่ (1) โดยที่ $x_1, x_2 \in [-10, 10]$, คำตอบที่ดีที่สุดคือ $\mathbf{x}^* = \{0, 0\}$ ซึ่งให้ $f^* = 0$



รูปที่ 3 Sphere Function

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 \quad (1)$$

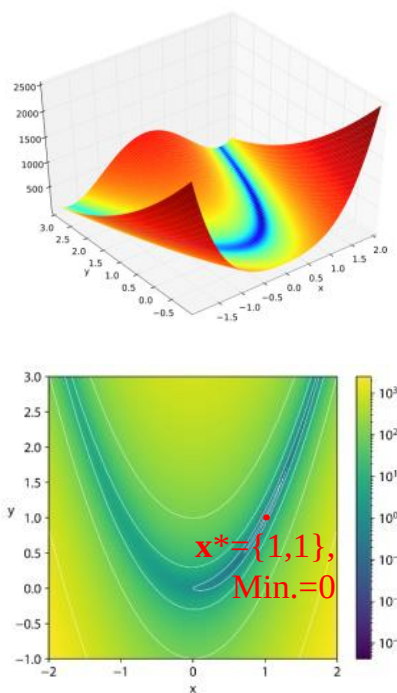
ปัญหาที่ 2 คือ Multi-Modal Function [18] (รูปที่ 4) โดยอธิบายด้วยสมการที่ (2) โดยที่ $x_1, x_2 \in [0, 8]$ คำตอบที่ดีที่สุดคือ $\mathbf{x}^* = \{3, 3\}$ ซึ่งให้ $f^* = 1$



รูปที่ 4 Multi-Modal Function

$$f(x_1, x_2) = \left| \frac{\sin[\pi(x_1-3)]}{\pi(x_1-3)} \right| \left| \frac{\sin[\pi(x_2-3)]}{\pi(x_2-3)} \right| \quad (2)$$

ปัญหาที่ 3 คือ Rosenbrock Function (รูปที่ 5) เป็นฟังก์ชันการที่ (3) โดยที่ $x_1, x_2 \in [-5, 5]$ ค่าตอบดีที่สุดคือ $x^*=\{1,1\}$ ซึ่งให้ $f^*=0$ ทั้งนี้แต่ละปัญหาจะทำการรันซ้ำ 10 ครั้งของแต่ละ Algorithm ที่ใช้



รูปที่ 5 Rosenbrock Function

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2^2 - x_1^2)^2 - (1 - x_1)^2 \quad (3)$$

ในการคำนวณจะใช้ซอฟต์แวร์ Python โดย Learning Regression Algorithm ใน SMO ที่เลือกเพื่อประเมินได้แก่ การถดถอยด้วยกระบวนการเกาส์เซียน (GPR), การถดถอยซัพพอร์ตเวกเตอร์ (SVR), และโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) โดย GPR และ SVR จะเรียกใช้จาก Library “sklearn” โดย GPR ซึ่งมีการประมาณความแปรปรวนร่วมของข้อมูลจะใช้ Radial Basis Function (RBF) ในการประมาณดังกล่าว โดยที่จะมีออกมา Hyper Parameter ที่จะทำการ Optimization ได้แก่ Length Scale (l), Variance (σ^2), และ Noise Variance (σ_n^2) โดย Optimizer ที่ใช้ภายใน GPR คือ L-BFGS-B algorithm ขณะที่ SVR ใช้ Kernel เป็น RBF เพื่อให้ประมาณความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ Regularization Parameter (C) และ Epsilon (ϵ) เท่ากับ 100.0 และ 0.1 ตามลำดับ ส่วน ANN จะถูกเรียกใช้การ Library “TensorFlow” โดย ANN ใช้ 2 Input Node ตามจำนวนตัวแปร และ 1 Output Node ตามจำนวน Objective ซึ่งเท่ากับ 1 โดย ANN มี 2 Hidden Layer โดยแต่ละ Layer ประกอบด้วย 20 Node และมี Activation Function เป็น Hyperbolic Tangent Function เพื่อการประมาณความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ขณะที่ Output Layer ใช้ Linear Function เป็น Activation Function โดย ANN ใช้ Learning Rate=0.001 ขณะที่ Optimizer ที่ใช้คือ Adaptive Moment Estimation (Adam)

ในการหาคำตอบของการหาค่าเหมาะที่สุดแบบจำลองตัวแทน (SMO) ในแต่ละกรณีจะมีใช้คำตอบที่สร้างขึ้น (Generated Solution) จำนวน 25 คำตอบ เช่นเดียวกับ Taguchi’s Method โดย SMO ใช้ 4 คำตอบเริ่มต้นโดยสุ่ม ขณะที่ Taguchi’s Method ใช้ Orthogonal Array OA (9, 2, 3, 2) และ Reduced Rate (RR) = 0.6 เช่นเดียวกันกับ [18] ซึ่ง Taguchi’s Method ทำการหาคำตอบ 3 รอบ ซึ่งจะมีคำตอบที่สร้างขึ้นเท่ากับ $9+8+8=25$ คำตอบ ตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย, SD, ค่าดีที่สุด และค่าแย่ที่สุดของผลลัพธ์ที่ได้ของแต่ละปัญหา

ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะ Regression Technique ที่ใช้ใน SMO โดย T-test พบว่า GPR ให้ผลลัพธ์ดีกว่า $p\text{-value} < 0.05$ เมื่อนำ SMO ที่ใช้ GPR และ PSO เปรียบเทียบกับ Taguchi Method ทั้งสองให้ผลคำตอบที่ตรงกับ Exact Solution ใน Sphere Function ขณะที่สำหรับ Multi-modal Function และ Rosenbrock Function โดย T-test พบว่า GPR ให้ผลลัพธ์ดีกว่า $p\text{-value} < 0.05$ โดยคำตอบที่ได้จาก SMO ใช้ GPR และ PSO ให้คำตอบที่ตรงกับ Exact Solution ใน Sphere Function และ Multi-modal Function ขณะที่ Rosenbrock Function นั้น เนื่องจากส่วนแรกของ Objective function f ในสมการที่ (3) มีค่าคงที่ ซึ่งก็คือ 100 อยู่ด้วย ทำให้ผลของเทอมแรกจะสูงกว่าเทอมหลัง รวมถึงลักษณะปัญหาที่มีการเกี่ยวเนื่องกัน (Coupling) ระหว่างตัวแปรทั้งสองค่อนข้างสูงซึ่งแสดงในเทอมแรกของสมการดังกล่าว แต่ก็ถือได้ว่า GPR+PSO ให้คำตอบที่ดีใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริงพอสมควร

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์คำตอบ Sphere Function

f	Taguchi Method	Regression Techniques		
		GPR	SVR	ANN
Avg.	0.0000	0.0001	0.0356	0.0414
SD.	0.0000	0.0002	0.0369	0.0687
Best	0.0000	0.0000	0.0011	0.0036
Worst	0.0000	0.0008	0.0871	0.1443

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์คำตอบ Multi-Modal Function

f	Taguchi Method	Regression Techniques		
		GPR	SVR	ANN
Avg.	0.8751	1.0000	0.8583	0.8362
SD.	0.0000	0.0000	0.1443	0.3266
Best	0.8751	1.0000	0.9977	0.9996
Worst	0.8751	1.0000	0.5772	0.2164

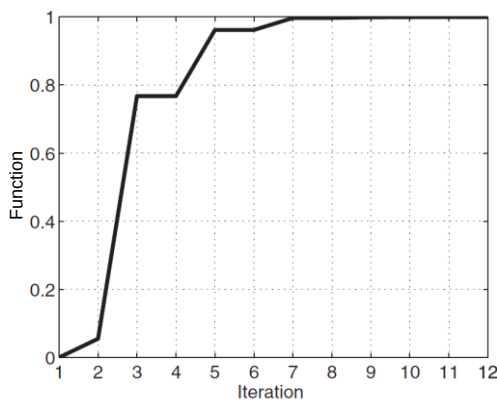
ตารางที่ 3 ผลลัพธ์คำตอบที่ Rosenbrock Function

f	Taguchi Method	Regression Techniques		
		GPR	SVR	ANN
Avg.	1.0000	0.0856	2.5664	5.7304
SD.	0.0000	0.0467	2.2866	3.1807
Best	1.0000	0.0021	0.0707	0.3059
Worst	1.0000	0.1332	5.1215	8.6309

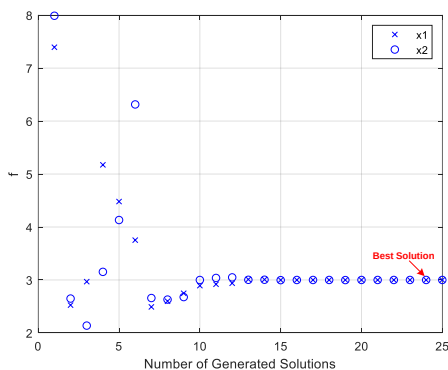
ทั้งนี้เนื่องด้วยว่า GPR มีการประมาณความแปรปรวนร่วมภายในทั้งตัวแปรเข้าและตัวแปรออกจากข้อมูลที่ใช้ เนื่องด้วย GPR สามารถจัดการจุดข้อมูลที่คล้ายคลึงกันได้ดีเนื่องจากใช้ความแปรปรวนร่วม ในการทำนายสามารถลดผลกระทบของจุดข้อมูลที่คล้ายกันได้ แตกต่างจาก SVR และ ANN ซึ่งจุดข้อมูลที่คล้ายกันนี้อาจจะมีผลกับ Loss ทำให้ฟังก์ชันประมาณโดย SVR และ ANN พยายามจะไปใกล้หรือผ่านจุดข้อมูลนี้เพื่อจะได้ค่า Loss ที่ลดลง โดยเฉพาะกรณีที่จำนวนข้อมูลน้อย ทั้งนี้เนื่องด้วยว่างานวิจัยนี้ได้นำเสนอ SMO ที่พยายามใช้คำตอบที่สร้างขึ้นจำนวนน้อยจึงทำให้มีชุดข้อมูลขนาดเล็กในการประมาณฟังก์ชันความสัมพันธ์ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของ SVR ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าพารามิเตอร์หลายๆ อย่างมาก เช่น ค่า C , ϵ และพารามิเตอร์ของ Kernel เช่น γ ใน RBF Kernel ซึ่งการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรก็ควรพัฒนาขึ้นในงานวิจัยในอนาคต ขณะที่ ANN มีแนวโน้มสูงมากที่จะเกิด Overfitting ในชุดข้อมูลขนาดเล็กเพราะ ANN มีพารามิเตอร์เยอะเกินกว่าปริมาณข้อมูล

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการหาคำตอบโดย SMO ใช้ GPR และ PSO และ Taguchi's Method โดยเลือกเฉพาะ Multi-modal Function โดยจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [18] ได้ทำการหาคำตอบโดยใช้ทั้งหมด 12 รอบ (Iteration) ซึ่งใช้คำตอบทั้งหมด 97 คำตอบ ซึ่งได้คำตอบที่ดีที่สุดคือ $x_1 = x_2 = 3.0037$ ให้ค่า $f = 0.999955$ ดัง เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาคำตอบ ขณะที่รูปที่ 7 แสดงคำตอบที่สร้างขึ้นแต่ละครั้งของ SMO ที่ใช้ GPR และ

PSO โดยจากทั้งหมด 25 คำตอบที่สร้างขึ้น SMO นี้สามารถให้คำตอบที่ดีที่สุดเช่นเดียวกับ Exact Solution คือ $x_1=x_2=3.0000$ และ $f=1.000000$ โดยคำตอบที่ดีที่สุดได้ในครั้งที่ 24 ซึ่งจะได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกัน SMO สามารถลดจำนวนคำตอบที่ต้องใช้ถึง 74.23% อีกทั้งยังให้คำตอบที่ดีกว่าด้วย ดังนั้นเฉพาะ SMO ที่ใช้ GPR และ PSO จะถูกใช้กับปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 6 การหาคำตอบของ Taguchi's Method สำหรับ Multi-Modal Function

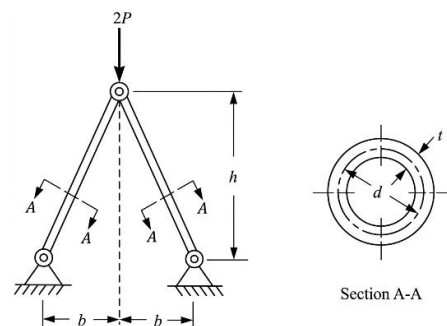


รูปที่ 7 Generated Solution แต่ละครั้งของ SMO (GPR+PSO) สำหรับ Multi-Modal Function

3.2 การทดสอบกับปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมมาตรฐาน

ปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่ใช้สำหรับทดสอบก็จะเป็นปัญหาที่สามารถแสดงฟังก์ชัน

ทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกันกับ Benchmark Optimization Problem เพื่อเป็นการแสดงประสิทธิภาพของ SMO ด้วยการใช้ GPR ร่วมกับ PSO โดยปัญหาที่ 1 เป็นการออกแบบ Two-Bar Truss จักรวาลแบบตัว A (รูปที่ 8) จากรูป $b = 30$ inch, Truss ทำจากวัสดุมีความหนาแน่น $\rho = 0.3$ lb/in³, Young's Modulus $E = 30000$ kpsi, แรง $P = 33,000$ kip โดยที่จะมี 3 ตัวแปรในการออกแบบคือขนาด h, d , และ t ในหน่วยนิ้ว โดยที่ $h \in [10,30]$, $d \in [1,3]$, และ $t \in [0.01,0.25]$ ทั้งนี้ Objective ของการออกแบบคือ Truss ต้องมีน้ำหนักน้อยที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) โดยในส่วนของ Constraint จะถูกกำหนดโดยความเค้น (Stress, σ) ใน Truss, ความเค้น โกง (Buckling Stress, σ_b) และระยะยุบ (δ) ที่แรงกระทำดังสมการที่ (5), (6), และ (7) ตามลำดับ ขณะที่เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ทั้งหมดของปัญหานี้คือ σ ต้องไม่เกิน Yield Strength (S_y) ของ Truss โดยที่ $S_y = 100$ kpsi ดังสมการที่ (8), σ ต้องไม่เกินความเค้น โกง σ_b ดังสมการที่ (9) และระยะ δ ต้องไม่เกิน $\delta_{max} = 0.25$ in ดังสมการที่ (10)



รูปที่ 8 การออกแบบ Two-Bar Truss

$$f = W = 2\pi d t \rho \sqrt{b^2 + h^2} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{2P\sqrt{b^2 + h^2}}{2\pi t d h} \quad (5)$$

$$\sigma_b = \frac{\pi^2 E (d^2 + t^2)}{8(b^2 + h^2)} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{P(b^2 + h^2)^{3/2}}{2\pi t d h^2 E} \quad (7)$$

$$g_1 = \sigma - S_y \leq 0 \quad (8)$$

$$g_2 = \sigma - \sigma_b \leq 0 \quad (9)$$

$$g_3 = \delta - \delta_{max} \leq 0 \quad (10)$$

โดย Objective เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 11.8093 lb โดยที่ $h, d, t = 30, 2.204, 0.067$ นิ้ว ตามลำดับ [22]

SMO (GPR+PSO) ใช้คำตอบเริ่มต้นโดยการสุ่ม 10 ตัว โดยใช้คำตอบทั้งหมด 50 ตัว ตารางที่ 4 แสดงคำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) กับปัญหา โดยพบว่าได้คำตอบที่ได้น้ำหนักของ Truss 11.8836 lb แตกต่างกัน 0.63% โดยที่ค่าตัวแปรออกแบบที่ได้โดย SMO ก็มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบแท้จริงจาก [22]

ตารางที่ 4 คำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) กับปัญหาการออกแบบ Two-Bar Truss

Variable	Value (in)	Constraints	Value
h	29.4950	g_1	-0.0161
d	2.2216	g_2	-3.3195
t	0.0675	g_3	-0.0500

สำหรับปัญหาที่ 2 [16] ถึงเก็บลมอัดซึ่งมีความดัน 3000 psi และมีปริมาตรอย่างต่ำ 750 ft^3 ถึงทรงกระบอกที่ปิดปลายทั้ง 2 ด้านด้วยครึ่งทรงกลมดั่ง ด้วยการใช้แผ่นโลหะม้วน แผ่นโลหะม้วนถูกเชื่อมตามแนวยาวเพื่อให้ได้ทรงกระบอก วัตถุประสงค์ (Objective) คือเพื่อให้ต้นทุนรวม ตัวแปรออกแบบได้แก่ ความหนาส่วนหน้าหลัง (ครึ่งทรงกลม) x_1 , ความหนาส่วนทรงกระบอก x_2 , รัศมีภายใน x_3 , และความยาวทรงกระบอก x_4 โดยที่ตัวแปร x_1 และ x_2 มีค่าไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคูณ 0.0625 in, Objective ของการออกแบบแสดงดังสมการที่ (11) ขณะที่ Constraint แสดงดังสมการที่ (12)-(15)

$$f = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \quad (11)$$

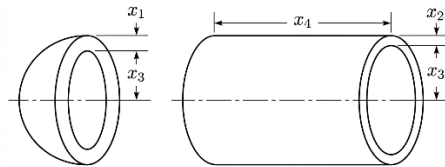
$$g_1 = -x_1 + 0.0193x_3 \quad (12)$$

$$g_2 = -x_2 + 0.0095x_3 \leq 0 \quad (13)$$

$$g_3 = -\pi x_3^2x_4 - \frac{4}{3}\pi x_3^3 + 1296000 \leq 0 \quad (14)$$

$$g_4 = x_4 - 240 \leq 0 \quad (15)$$

โดยที่ $1 \times 0.0625 \leq x_1, x_2 \leq 99 \times 0.0625$ และ $10 \leq x_3, x_4 \leq 200$ คำตอบที่ดีที่สุดจริง $\mathbf{x}^* = \{0.8125, 0.4375, 42.098446, 176.636596\}$ โดยให้ค่า $f(\mathbf{x}^*) = 6059.714335$



รูปที่ 9 ถังรับแรงดัน (Pressure Vessel)

SMO (GPR+PSO) ใช้คำตอบเริ่มต้นโดยการสุ่ม 40 ตัว โดยใช้คำตอบทั้งหมด 150 ตัว ตารางที่ 5 แสดงคำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) กับปัญหาการออกแบบถังรับแรงดัน (Pressure Vessel) โดยพบว่าคำตอบที่ได้จาก SMO; $\mathbf{x}_{\text{smo}} = \{0.08125, 0.4375, 41.9011, 179.5759\}$, $f_{\text{smo}} = 6095.0246$ ใกล้เคียงกับคำตอบแท้จริง คำตอบที่ดีที่สุด $\mathbf{x}^* = \{0.8125, 0.4375, 42.098446, 176.636596\}$, $f(\mathbf{x}^*) = 6059.714335$ ซึ่งมีค่า f แตกต่างกัน 0.58% ถือว่าคำตอบโดย SMO เชื่อถือได้

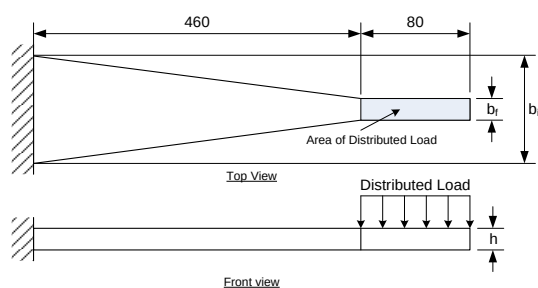
ตารางที่ 5 คำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) กับปัญหาการออกแบบถังรับแรงดัน (Pressure Vessel)

Variable	Value (in)	Constraints	Value
x_1	0.8125	g_1	-0.0038
x_2	0.4375	g_2	-0.0378
x_3	41.9011	g_3	-2635.97
x_4	179.5759	g_4	-60.4241
Objective f			6095.0246

3.3 ปัญหาที่คำนวณโดย Finite Element Method

การออกแบบ Cantilever Beam วัสดุ Cast Alloy Steel รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 10 ถูกใช้เป็นการศึกษาสำหรับการทดสอบกับปัญหาการออกแบบคำนวณ Finite Element Method (FEM) โดย Solidworks

จากรูปคานยาวรวมทั้งหมด 540 mm และแยกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นรูปร่าง Top View เป็นสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีความยาว 460 mm และส่วนที่มี Front View เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 80 mm ส่วนนี้จะรับแรง Distributed Load ที่มีแรงลัพธ์รวม 1000 N ตัวแปรที่ต้องการออกแบบคือ ความกว้างเริ่มต้น (b_i) ความกว้างด้านท้าย (b_f) และความหนา (h) โดยที่ $50 \text{ mm} \leq b_i \leq 150 \text{ mm}$, $4 \text{ mm} \leq b_f \leq 40 \text{ mm}$, และ $10 \text{ mm} \leq h \leq 20 \text{ mm}$ ทั้งนี้ปัญหานี้มี 2 เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ซึ่งก็คือ Maximum Von Mises Stress ($\sigma_{v,max}$) และ Maximum Deflection (δ_{max}) ของคานต้องไม่เกิน Von Mises Stress ยอมได้ ($\sigma_{v,all}$) และระยะแอ่นคานยอมได้ (δ_{all}) ตามลำดับ ขณะที่ Objective (f) คือน้ำหนักรวมของคาน โดยที่จะออกแบบให้ได้คานที่เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับทั้งสอง และมีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยคานนี้ทำจากวัสดุ Cast Alloy Steel ปัญหานี้แยกได้เป็น 2 กรณีตาม Constraint ที่แตกต่างกันดังตารางที่ 6 โดยแสดงดังสมการที่ (16) และ (17) ซึ่งที่แท้จริงแล้ว SMO นี้เหมาะกับลักษณะงานแบบนี้ เพราะใช้เวลานานในการคำนวณ Objective และ Constraint โดย FEM ซึ่งจำเป็นต้องใช้จำนวน Generated Solutions ให้น้อยที่สุดเพราะมีผลโดยตรงกับเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ การคำนวณ Constraint และ Objective ทำโดยใช้ Solidworks สร้างภาพ 3 มิติของคานจากนั้นก็ทำการสร้าง Surface ที่ Fixed และใส่แรงกระทำแล้ว ค่อยด้วยการสร้าง Mesh เพื่อใช้ในการคำนวณ Finite Element Method (FEM) จากนั้นก็สามารถทราบ Von Mises Stress, Maximum Deflection และน้ำหนักของคานต่อไปได้



รูปที่ 10 Cantilever Beam รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู

ตารางที่ 6 Constraint ของแต่ละกรณีการออกแบบ Cantilever Beam รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู

Constraints	Case 1	Case 2
$\sigma_{v,all}$ (MPa)	75	150
δ_{all} (mm)	15	7.5

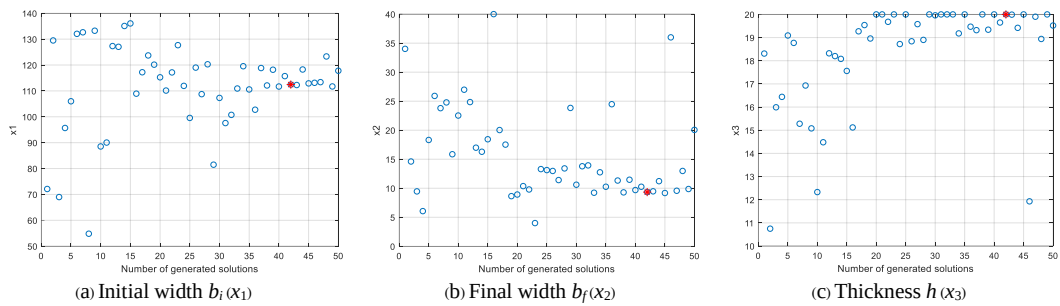
$$g_1 = \sigma_{v,max} - \sigma_{v,all} \leq 0 \quad (16)$$

$$g_2 = \delta_{max} - \delta_{all} \leq 0 \quad (17)$$

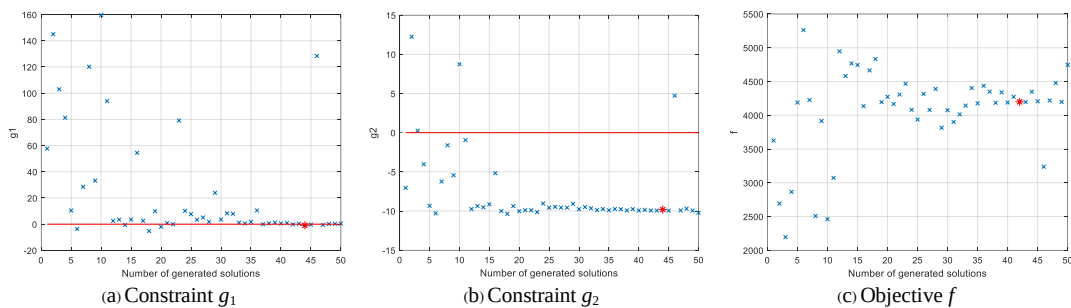
ตารางที่ 7 คำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) ของการออกแบบ Cantilever Beam รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู

ตัวแปร	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
b_i (mm)	112.45	73.42
b_f (mm)	9.34	8.29
h (mm)	20.00	20.00
g_1	-0.11	-47.40
g_2	-9.94	-0.01
f	4198.80	2840.65

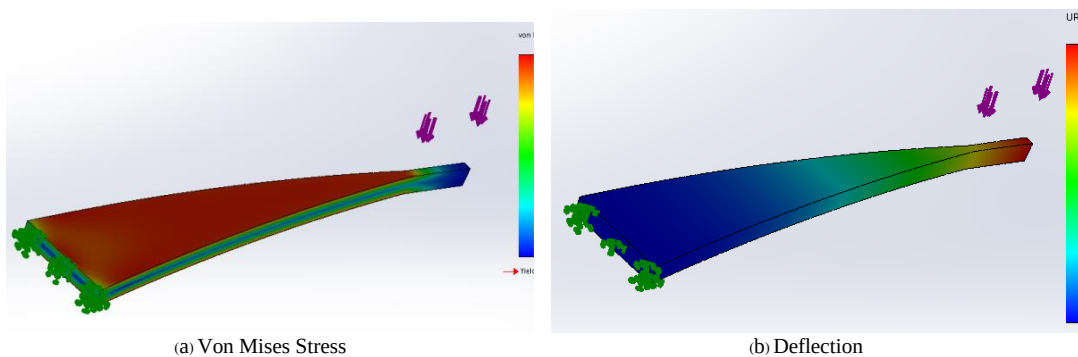
ตารางที่ 7 แสดงคำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) ของการออกแบบ Cantilever Beam รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู รูปที่ 11-รูปที่ 16 แสดง Generated Solution แต่ละครั้งรอบ SMO, Constraint และ Objective แต่ละครั้งของ SMO, Contour Plot ของ Von Mises Stress ของคำตอบที่ได้จาก SMO, และ Contour Plot ของ Von Mises Stress ของ Deflection of Beam ของคำตอบที่ได้จากทั้ง 2 กรณี



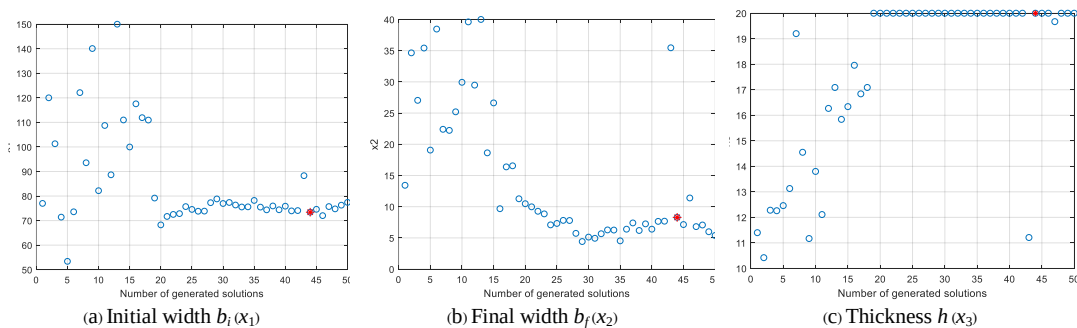
รูปที่ 11 Generated Solution แต่ละครั้งของ SMO สำหรับการออกแบบ Cantilever Beam กรณีที่ 1



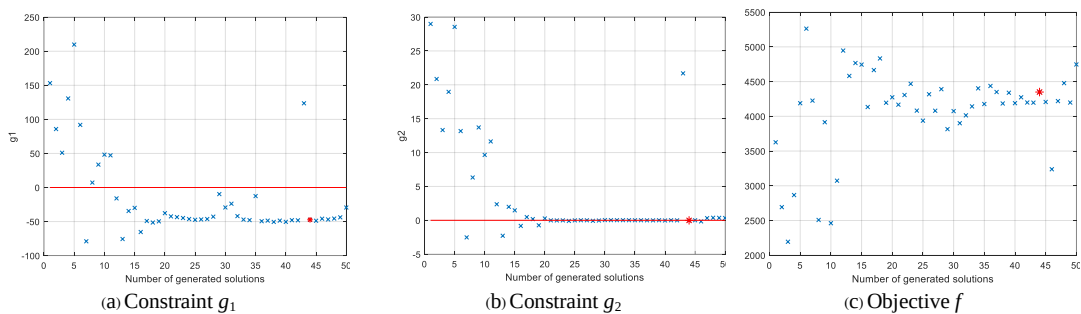
รูปที่ 12 Constraint และ Objective แต่ละครั้งของ SMO สำหรับการออกแบบ Cantilever Beam กรณีที่ 1



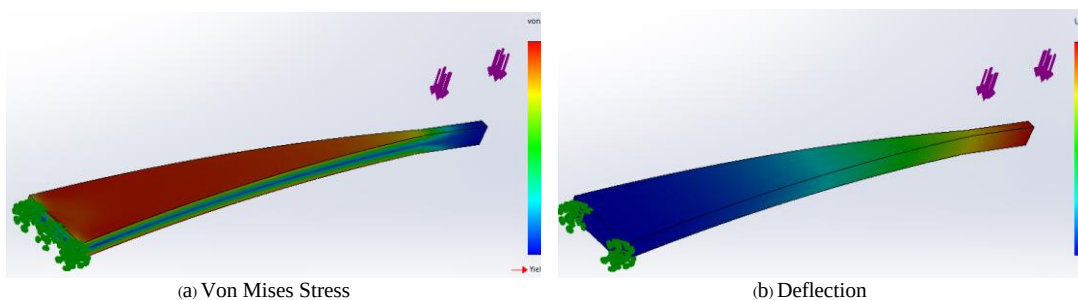
รูปที่ 13 Contour Plot ของ Von Mises Stress และ Deflection ของคำตอบที่ได้จาก SMO สำหรับการออกแบบ Cantilever Beam กรณีที่ 1



รูปที่ 14 Generated Solution แต่ละครั้งของ SMO สำหรับการออกแบบ Cantilever Beam กรณีที่ 2



รูปที่ 15 Constraint และ Objective แต่ละครั้งของ SMO สำหรับการออกแบบ Cantilever Beam กรณีที่ 2



รูปที่ 16 Contour Plot ของ Von Mises Stress ของคำตอบที่ได้จาก SMO สำหรับการออกแบบ Cantilever Beam กรณีที่ 2

ขณะที่การทดสอบกับปัญหาการออกแบบคำนวณโดย Solidworks ที่มี 2 Constraint g_1 และ g_2 ซึ่งกำหนดโดย Von Mises Stress ยอมได้ ($\sigma_{v,all}$) และระยะแอ่นคานยอมได้ (δ_{all}) โดยมี 2 กรณีศึกษา $\sigma_{v,all}$ และ δ_{all} ที่แตกต่างกัน ตารางที่ 7 แสดง คำตอบที่ได้จาก SMO (GPR+PSO) ของการออกแบบ Cantilever Beam รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมูทั้ง 2 กรณี ซึ่งทั้ง 2 กรณี เนื่องจากค่าความหนาผลมากที่สุดต่อค่า Moment of Inertia (I) คำตอบทั้ง 2 กรณีจึงได้ค่าความหนาสูงสุด 20 mm สำหรับกรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาการดูเข้าของ Generated Solution แต่ละครั้งของ SMO ดังรูปที่ 11 ขณะการดูเข้าของ Constraint และ Objective แสดงดังรูปที่ 12 เมื่อพิจารณาการดูเข้าของ g_1, g_2, f ได้ดูเข้าสู่ค่าหนึ่ง โดยพบว่า g_1 ดูเข้าสู่ 0 ซึ่งหมายถึงว่า g_1 มีผลต่อคำตอบมากกว่า g_2 ซึ่ง g_1 เป็น Constraint ที่กำหนดโดย Stress ขณะที่รูปที่ 13 แสดง Contour Plot ของ Von Mises Stress และ Deflection ของคำตอบที่ได้ เมื่อพิจารณา Bending Moment (M) ช่วงที่เป็นสี่เหลี่ยมคางหมู มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตลอด

ช่วงความยาว 460 mm โดย $M = 500,000$ Nmm สูงสุดที่ตำแหน่ง Fixed ($x = 0$) ลดลงแบบเป็นเชิงเส้นที่ตำแหน่งสิ้นสุดสี่เหลี่ยมคางหมู ที่ $x = 460$ mm จะมี $M = 40,000$ Nmm เนื่องจากว่าคานมีความหนาคงที่ $h = 20$ mm สิ่งที่มีผลต่อค่า I ก็คือ b_i และ b_j ซึ่งเพื่อลด Objective f (น้ำหนักคาน) ก็ต้องออกแบบให้รับ Stress ได้อย่างสม่ำเสมอตลอดคาน เนื่องจากว่า Stress แปรผันโดยตรงกับ M และความกว้าง b ที่ x ใด ๆ b_i/b_j ควรเท่ากับ $500,000/40,000 = 12.5$ ซึ่งจากคำตอบกรณีที่ 1 ในตารางที่ 7 จะได้ว่า $b_i/b_j = 12.04$ ซึ่งก็ใกล้เคียงกัน เนื่องจากตำแหน่ง $x = 460$ mm เป็นช่วงเปลี่ยนหน้าตัดอาจจะมี Stress Concentration ค่า b_j ที่สูงขึ้นเพื่อรองรับ Stress Concentration ที่เกิดขึ้น จึงทำให้ค่า b_i/b_j ต่ำกว่าสัดส่วน Moment เล็กน้อย ส่วนกรณีที่ 2 ค่า $\sigma_{v,all}$ เพิ่มขึ้นจาก 75 MPa เป็น 150 MPa ขณะที่ δ_{all} ลดลงจาก 15 mm เป็น 7.5 mm ซึ่งเป็นการลด Impact ของ g_1 แต่เพิ่ม Impact ของ g_2 โดย Generated Solution และ Constraint และ Objective แต่ละครั้งของ SMO แสดงดังรูปที่ 14 และ รูปที่ 15 โดย $x_1, x_2, x_3, g_1, g_2, f$ ดูเข้าสู่ค่าที่

เหมาะสมค่าหนึ่ง โดยที่ g_2 อยู่เข้าสู่ศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า g_2 มีผลต่อการค้นหาคำตอบมากกว่า g_1 โดยหากเทียบกับ กรณีที่ 1 เพื่อลด Deflection คานจึงต้องมี b_f ที่หนาขึ้น โดยคำตอบของกรณีที่ 2 มี $b_f/b_f = 8.86$ ขณะที่เนื่องด้วย $\sigma_{v,all}$ สูงขึ้นจึงสามารถลดค่า b_f ลงได้ หากเปรียบเทียบ Contour Plot ของ Von Mises Stress กรณีที่ 1 และ 2 ดัง รูปที่ 13 ซ้าย และ รูปที่ 16 ซ้าย ตามลำดับ พบว่าการกระจายของ Stress ผิวบนคานช่วงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณีที่ 1 สม่าเสมอว่ากรณีที่ 2 ซึ่งส่วนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ก็คือตำแหน่งที่ใกล้ $x = 460$ mm จากผลการทดสอบที่ได้ จึงถือได้ว่าคำตอบโดย SMO เชื่อถือได้ทั้ง 2 กรณี

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการหาค่าเหมาะที่สุดแบบจำลองตัวแทน (SMO) เพื่อการออกแบบทางด้านวิศวกรรม โดยใช้เทคนิค ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ของเครื่องแบบการถดถอย (Machine Learning Regression, MLR) ร่วมกับขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งก็คือ ซึ่งเทคนิค MLR ที่เลือกพิจารณาได้แก่ GPR, SVR และ ANN โดย Optimization Algorithm ที่ใช้คือ PSO จากหลังจากการทดสอบด้วยปัญหาฟังก์ชันมาตรฐานพบว่า SMO ที่ใช้ GPR ร่วมกับ PSO ให้ผลดีกว่า SMO ที่ใช้ MLR ตัวอื่น ร่วมกับ PSO รวมถึง SMO ที่ใช้ GPR ร่วมกับ PSO ก็ให้ผลที่ดีกว่าวิธีมาตรฐานอย่าง Taguchi Method สำหรับ SMO ที่ใช้ GPR ร่วมกับ PSO สามารถแก้ไขปัญหการออกแบบทางด้านวิศวกรรมมาตรฐานและปัญหการออกแบบคำนวณโดย Solidworks ได้อย่างดี ทั้งนี้เนื่องด้วยว่า SMO ที่นำเสนอมีกระบวนการที่ใช้คำตอบน้อย รวมถึงมีการปรับสเกลของตัวแปรซึ่งในบทความนี้ใช้ Z-score โดย SMO ใช้ 25 คำตอบสำหรับฟังก์ชันมาตรฐานที่มี 2 ตัวแปร ขณะที่ปัญหการออกแบบทางด้านวิศวกรรมมาตรฐานที่มี 3 ตัวแปร, 4 ตัวแปร และปัญหาที่คำนวณโดย FEM ที่มี 4 ตัวแปร SMO ใช้ 50, 150 และ 50 คำตอบตามลำดับ ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ SMO

ทางด้าน FEM-Based Engineering Design ก่อนหน้านี้เช่น [19] 2,100 คำตอบเพื่อทำการหาค่าเหมาะที่สุดที่มี 4 ตัวแปรออกแบบ ขณะที่ [20] ใช้ 1,600 คำตอบสำหรับหา 5 ตัวแปรออกแบบเหมาะที่สุด แม้ว่าปัญหาทดสอบแตกต่างกัน แต่ก็ถือได้ว่า SMO ที่นำเสนอในบทความนี้สามารถลดจำนวนการคำนวณ Objective หรือ FEM ได้

นอกจากนี้ควรพัฒนาโดยศึกษาผลของจำนวนคำตอบต่อการเข้าสู่ของ SMO การเพิ่มกระบวนการสร้างความหลากหลายของคำตอบ ผลของค่าสเกลอื่นเช่น Min-Max Scaler นอกจากนี้ควรมีการศึกษการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรเช่นศึกษาความไวของตัวแปร c_1, c_2, w ใน PSO รวมทั้ง C, ϵ และ เช่น γ ใน RBF Kernel ของ SVR ในส่วนของ GPR ควรมีการวิเคราะห์ความไวต่อ Kernel ที่ใช้ในประมาณ Covariance นอกจากนี้ควรนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_p ของตำแหน่งทำนายมาพิจารณาถึงความน่าเชื่อถือของตำแหน่งดังกล่าวด้วย รวมถึงควรประยุกต์ใช้ SMO กับปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่มีรูปร่างซับซ้อนขึ้น ปัญหาการออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ รวมถึงศึกษาปัญหาที่มีหลายตัวแปรออกแบบ ทั้งนี้เนื่องจากจำเป็นต้องใช้หลายคำตอบสำหรับ Optimization แต่เนื่องด้วย GPR มีข้อจำกัด หากใช้หลายคำตอบเนื่องจากต้องคำนวณหาอินเวอร์สของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมขอคำตอบ ซึ่งควรมีงานวิจัยในอนาคตที่ศึกษาผลของเวลาภายใน GPR เมื่อจำนวนคำตอบที่ใช้มากเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Zhu, Z. Zhou, M. Wang, X. Yu, Y. Wu. C. Chen, and J. Qiao, "Integrated Design Optimization Method for Pavement Structure and Materials Based on Further Development of Finite Element and Particle Swarm Optimization Algorithm," Construction and Building Materials, vol. 426, 136080, 2024.

- [2] X. Li., H. Su., J. Yang, G. Gao, and Y. Wang, “NURBS- boundary- based Quadtree Scaled Boundary Finite Element Method Study for Irregular Design Domain,” *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 159, pp. 418-433, February 2024.
- [3] S. Zhang, C. Deng, F. Wei, J. Li, X. Luo, and J. Ma, “Efficient Structure Optimization of Downhole Thermal Management System via Transfer Learning Surrogate Modeling,” *Journal of Energy Storage*, vol. 151, 120543, 2026.
- [4] R. Dai, J. Jie, Z. Wang, H. Zheng, and W. Wang, “Automated Surrogate- assisted Particle Swarm Optimizer With an Adaptive Parental Guidance Strategy for Expensive Engineering Optimization Problems,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 145- 183, March 2025.
- [5] P. Manmatharasan, G. Bitsuamlak, and K. Grolinger, “AI- driven Design Optimization for Sustainable Buildings: A Systematic Review,” *Energy and Buildings*, vol. 332, 115440, April 2025.
- [6] C. Yang, J. Yang, and Y. Qin, “Research on Comparative of Multi-surrogate Models to Optimize Complex Truss Structures,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 2268-2278, 2024.
- [7] H. Xie, T. Wang, D. Meng, W. Zeng, and L. Guo, “Efficient Optimization of Noise-reducing Orifice Plates in Nature Gas Pressure Regulators Based on Adaptive Multi- scale Sampling- kriging Model,” *Scientific Reports*, vol. 16, 5872, 2026.
- [8] T. Kohno, N. Funayama, L. Xiao, S. Yamaguchi, and S. Imazato, “Predicting and Optimizing Viscosity of Dental Resin Composites With Gaussian Process Regression and Bayesian Optimization,” *Dental Materials*, vol. 42, no. 7, pp. 1112-1119, 2026.
- [9] J. J. Dang, S. Park, Y. Kim, “Design Optimization of Half- wave Resonator (Hwr) With a Machine Learning-based Framework Using Gaussian Process Regression and Multi- objective Genetic Algorithms,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 58, no. 9, 104393, 2026.
- [10] Y. Yang, X. Song, Z. Deng, and J. Yu, “Gaussian Process Regression- Based Optimization of Fan- Shaped Film Cooling Holes on Concave Walls,” *Fluid Dynamics and Materials Processing*, vol. 22, no. 1, 9, 2026.
- [11] Z. Zheng, Q. Xu, Y. Feng, Y. Dai, Z. Chen, and Y. Wu, “Optimization Design of a Pre-swirl Duct for a Container Ship: A Simulation-based Design Method Integrating a Support Vector Regression Surrogate Model,” *Ocean Engineering*, vol. 352, part 1, 124574, 2026.
- [12] E. Mohammadipour, F. Adib, and M. Ghorbani, “Machine Learning–guided Optimization of PEO Coating Parameters Using Support Vector Regression for Enhanced Corrosion Resistance of AZ31 Magnesium Alloy,” *Results in Engineering*, vol. 29, 109408, 2026.
- [13] Z. Wang, C. Zheng, J. A. Mulyanto, Y. Wu, M. Chen, G. Yang, “Artificial Neural Network Surrogate Modeling and NSGA-II Algorithm-driven Aerodynamic Optimization for Wind-resilient and Sustainable Supertall Buildings,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 69, part D, 104047, 2026.

- [14] A. Allouhi, M. B. Amine, K. A. T. Aoul, “Metaheuristic Multi-objective Optimization With Artificial Neural Networks Surrogate Modeling for Optimal Energy- economic Performance for CSP Technology,” *Energy and AI*, vol. 20, 100488, 2025.
- [15] J. Kennedy, R. Eberhart, R. “Particle Swarm Optimization”. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp.1942–1948, 1995.
- [16] F. Ülker, S. Emiroglu, and Y. Uyaroglu, “A Combined Double Chaotic Maps and Subswarm Based Enhanced Particle Swarm Optimization for Global Optimization and Engineering Design Problems,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 142, pp. 91-113. April 2026.
- [17] K. Djermouni, S. Tamalouzt, A. Berboucha, K. F. Sayeh, L. Abad, Y. Belkhier, M. Benbouzid, “Improving Real-time Photovoltaic Power Delivery Through Integrated Advanced Fault Localization and Particle Swarm Optimization,” *Applied Energy*, vol. 414, 127786, 2026.
- [18] W. C. Weng, F. Yang, and A. Elsherbeni, “Electromagnetics and Antenna Optimization Using Taguchi’s Method,” *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 2, no 1, pp.1-94, 2007.
- [19] C. Lyu, Y. Song, D. Yang, W. Wang, S. Zhu, Y. Ge, L. Wang, “Surrogate Model of Liquid Cooling System for Lithium- Ion Battery Using Extreme Gradient Boosting,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 213, 118675, 2022.
- [20] M. Matsunaga, C. Fujio, H. Ogawa, Y. Higa, and T. Handa, “Nozzle Design Optimization for Supersonic Wind Tunnel by Using Surrogate- Assisted Evolutionary Algorithms,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 130, 107879, 2022.
- [21] L. Mustapha, H. Thorel, and Y., E. Herpe, “Design of Experiments to Assess the Effect of Culture Components on Metabolism Expression and Albumin Secretion in Heparg Cell Line,” *Pharmacological Research - Reports*, vol. 5, 100084, 2026.
- [22] A. R. Parkinson, R. J. Balling, and J. D. Hedengren *Optimization Methods for Engineering Design*, Brigham Young University Press, 2013.

ประวัติผู้ประพันธ์



ผศ.ดร.พุฒา จินท้าว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: ไตรโบโลยี การ
สั่นสะเทือนเชิงกล, การออกแบบเครื่องจักรกล



นันทวัฒน์ วีระยุทธ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี

งานวิจัยที่สนใจ: การหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการ
ออกแบบเชิงสหวิทยาการ, การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยาการหุ่นยนต์และแมคคาทรอนิกส์



ผศ.ดร.สุกัญญา เจียมวรรณันท์กุล
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและ
ความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมและวิทยาศาสตร์เคมี



ผศ.ดร.พรเทพ ชมชื่น
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและ
ความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

งานวิจัยที่สนใจ: เทคโนโลยีชีวภาพแบบสะอาด



รศ.ดร.กิตติพงษ์ บุญโล่ง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: การหาค่าเหมาะที่สุด

การต้นสะพานเชิงกล, การเรียนรู้ของเครื่อง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ของกลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อน หลายลิงก์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์ขา Multi-Objective Optimization of a Multi-Link Slider-Crank Mechanism for Vertical Motion Generation in Legged Robots

กิตติพงษ์ บุญโล่ง¹, พุทธา จินครวั¹, นัฐพล ศรีรัตนศักดิ์¹, และ นันทวัฒน์ วีระยุทธ^{2*}

Kittipong Boonlong¹, Puttha Jeenkour¹, Natthapol Sriratanasak¹, Nantawatana Weerayuth^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมือง
จ.ชลบุรี ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 หมู่ 4 ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : nantawatana.w@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 28 เมษายน 2569 / วันที่แก้ไขบทความ: 4 มิถุนายน 2569 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 25 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบกลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนหลายลิงก์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งในหุ่นยนต์ขา โดยกำหนดปัญหาเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization: MOO) ที่ประกอบด้วย 2 วัตถุประสงค์ ได้แก่ (1) การเพิ่มช่วงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งให้ครอบคลุมช่วงเป้าหมาย และ (2) การลดการเบี่ยงเบนในแนวนอนของจุดศูนย์กลางมวล ทั้งนี้ได้พิจารณาผลรวมความยาวลิงก์เพื่อป้องกันการได้เปรียบของกลไกที่มีขนาดใหญ่ MOO ได้ใช้ขั้นตอนวิธี Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) เพื่อให้ได้กลุ่มคำตอบแบบพารето (Pareto Optimal Solutions) NSGA-II ให้ชุดคำตอบแบบพารетоที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 508 คำตอบ โดยร้อยละ 40.35 ของคำตอบมีค่าการเบี่ยงเบนในแนวนอนต่ำกว่า 1 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับ (Single-objective Optimization: SOO) พบว่าคำตอบหนึ่งที่ได้จากกลุ่มคำตอบโดย MOO สามารถลดขนาดความยาวรวมของลิงก์ในกลไกได้มากกว่าร้อยละ 30 ขณะที่ยังคงให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่ดีและมีการเบี่ยงเบนในแนวนอนต่ำ ดังนั้นคำตอบจาก MOO สามารถให้กลไกที่มีความกะทัดรัดมากกว่า SOO ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้ MOO ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการเลือกแบบและเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในหุ่นยนต์เคลื่อนที่

คำสำคัญ : การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์, กลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนหลายลิงก์, การออกแบบกลไก, ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม, หุ่นยนต์ขา

Abstract: This study presents the design of a multi-link slider-crank mechanism for generating vertical motion in legged robots. The design problem is formulated as a problem of multi-objective optimization (MOO) with two primary objectives: (1) maximizing the vertical motion range to cover a specified target interval, and (2) minimizing horizontal deviation of the center of mass during motion. To prevent bias toward oversized mechanisms, the total link length is incorporated into the formulation. The MOO employs the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) to obtain Pareto optimal solutions. NSGA-II yields 508 Pareto-optimal solutions, notably, 40.35% of the solutions achieve horizontal deviation below 1 mm. Compared to single-objective optimization (SOO), a specific solution obtained from the MOO solution set achieved a reduction in total link length of over 30% while maintaining high vertical motion efficiency and low horizontal deviation. Consequently, the solutions obtained from MOO offer more compact mechanisms than those from SOO. These findings highlight the effectiveness of the MOO framework in providing design flexibility and practical suitability for implementation in mobile robotic systems.

Keywords: Multi-Objective Optimization, Multi-link slider-crank Mechanism, Mechanism Design, Genetic Algorithm, Legged Robot

1. บทนำ

หุ่นยนต์ชนิดขาใช้งานได้หลากหลายในชีวิตจริง เนื่องจากมีความสามารถในการเคลื่อนที่บนพื้นที่ซับซ้อนหรือไม่เรียบได้ดีกว่าหุ่นยนต์ล้อทั่วไป เช่น การเดินขึ้นลงบันได การเคลื่อนที่ในพื้นที่ขรุขระ หรือการเข้าถึงพื้นที่แคบและพื้นที่อันตราย จึงเหมาะสำหรับงานด้านการสำรวจ งานกู้ภัย งานอุตสาหกรรม งานทางการแพทย์ ตลอดจนงานบริการและการช่วยเหลือผู้สูงอายุหรือผู้พิการ การออกแบบกลไกที่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพและควบคุมได้ขณะเดียวกันยังคงความเสถียรของระบบ ถือเป็นความท้าทายสำคัญในงานหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ความสามารถในการปรับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity: CG) ในแนวตั้งมีบทบาทสำคัญต่อการฟื้นตัวจากการเสียสมดุล โดยหากตำแหน่ง C.G. อยู่สูงเหนือแกนล้อยมาก จะทำให้เกิดโมเมนต์จากแรงโน้มถ่วงสูงเมื่อเกิดการเอียง ในทางกลับกัน หากตำแหน่ง C.G. อยู่ต่ำใกล้แกนล้อยมาก จะช่วยลดโมเมนต์การล้ม ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเชิงสถิติน่า

ขึ้น ใช้แรงบิดในการรักษาสมดุลน้อยลง และสามารถฟื้นตัวจากการรบกวนได้ง่ายกว่า

ในส่วนของ การปรับตัวต่อสภาพพื้นผิว และประสิทธิภาพด้านพลังงาน วิธีการแบบดั้งเดิมมักอาศัยข้อต่อเชิงเส้นหรือระบบขับเคลื่อนที่ซับซ้อน [1,2] ซึ่งทำให้ระบบมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ต้นทุนสูงขึ้น และควบคุมได้ยาก ดังนั้นจึงมีความสนใจเพิ่มขึ้นในการใช้กลไกเชิงระนาบ เช่น กลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อน เพื่อสร้างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งจากอินพุตแบบหมุน [3]

กลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนเป็นกลไกพื้นฐานที่สามารถแปลงการเคลื่อนที่แบบหมุนให้เป็นเชิงเส้น และถูกนำไปใช้ในหลากหลายงาน ตั้งแต่เครื่องยนต์ไปจนถึงตัวกระตุ้นในหุ่นยนต์ [4] ตัวอย่างการประยุกต์ในหุ่นยนต์สมัยใหม่คือหุ่นยนต์สองล้อ Ascento [5] ซึ่งใช้กลไกดังกล่าวในการสร้างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการกระโดด ส่งผลให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างพลวัตในขณะที่ยังคงโครงสร้างที่เรียบง่าย อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของกลไกนี้คือการเคลื่อนที่ในแนวอนของตัวเลื่อน ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างของ CG ที่ไม่พึง

ประสงค์ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดนี้ นักวิจัยได้พัฒนากลไก คัดแปลง เช่น การเพิ่มจำนวนลิงก์หรือการใช้ข้อจำกัด เชิงคิเนแมติก เพื่อให้ได้การเคลื่อนที่ใกล้เคียงเส้นตรงมากขึ้น กลไกอย่าง Peaucellier–Lipkin linkage [6] และ Watt's linkage [7] แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้างเส้นทาง เกือบเป็นเส้นตรงได้โดยไม่ต้องใช้ข้อต่อเชิงเส้น แนวคิด ดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการออกแบบหุ่นยนต์ที่ต้องการ ความกะทัดรัดและประสิทธิภาพ

ความท้าทายล่าสุดในหุ่นยนต์แบบมีขาเน้นถึง ความสำคัญของเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลาง มวลต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพ งานของ Raibert [8] แสดงให้เห็นว่าการสั่นในแนวดิ่งมีบทบาทต่อการ แลกเปลี่ยนพลังงานและการควบคุมสมดุล ซึ่งยังคงถูก ศึกษาในงานวิจัยสมัยใหม่ [9,10] สำหรับหุ่นยนต์สองล้อ แบบทรงตัวเอง การปรับ CG ในแนวดิ่งช่วยเพิ่ม ความสามารถในการต้านทานการรบกวน และเพิ่มความ แข็งแรงของระบบควบคุม โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับตัว ควบคุมแบบ Linear Quadratic Regulator (LQR) หรือ Model Predictive Control (MPC) [11,12] ดังนั้น การ ออกแบบกลไกที่ให้การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสูงและลดการ เคลื่อนที่ในแนวนอนจึงเป็นเป้าหมายสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การออกแบบกลไกดังกล่าวยังคงมี ความซับซ้อน เนื่องจากข้อจำกัดทางคิเนแมติกที่ไม่เชิง เส้นและความสัมพันธ์กัน เมื่อพัฒนาเป็น โครงสร้าง หลายลิงก์ จะเกิดตัวแปรการออกแบบเพิ่มขึ้น เช่น ความ ยาวลิงก์ ตำแหน่งจุดหมุน และรัศมีข้อเหวี่ยง ซึ่งล้วน ส่งผลต่อเส้นทางของ CG ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีแนวทาง เชิงระบบในการค้นหาที่เหมาะสม

ทั้งนี้ปัญหาการออกแบบกลไกไม่จำเป็นต้องมี วัตถุประสงค์เดียวกับการพิจารณา เนื่องด้วยว่าต้องการ กลไกที่เพิ่มการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของ CG และลดการ เคลื่อนที่ในแนวนอน ซึ่งเป็น 2 วัตถุประสงค์ที่อาจมี บางส่วนขัดแย้งกัน เป้าหมายของงานวิจัยนี้จึงต้องการใช้ การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOO) โดย

การหาค่าเหมาะที่สุดแบบพารето (Pareto Optimization) รวมถึงได้เพิ่มความยาวรวมลิงก์ในกลไกมาพิจารณาใน การหาค่าเหมาะที่สุดดังกล่าว ด้วยการรวมสมการคิเน แมติกเข้ากับกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อประเมิน ความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนของข้อเหวี่ยงและเส้นทาง ของ CG แนวทางนี้ช่วยพัฒนากลไกที่มีความกะทัดรัด มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมต่อการใช้งาน รวมถึงมีการ เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการหาค่าเหมาะที่สุดแบบ วัตถุประสงค์เดียวด้วย

การที่หุ่นยนต์มีขนาดเล็กลงจะช่วยเพิ่มความ สะดวกในสำหรับผู้ใช้งานในการใช้และเคลื่อนย้าย โดย สามารถใช้งานภายในอาคารหรือพื้นที่จำกัดได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานร่วมกับมนุษย์ เนื่องจากหุ่นยนต์ที่มีน้ำหนักและขนาดลดลงจะสร้างแรง กระแทกน้อยกว่าเมื่อเกิดการชนหรือความผิดพลาด ระหว่างการทำงาน นอกจากนี้ หุ่นยนต์ขนาดเล็กยังใช้ พลังงานน้อยลง ทำให้สามารถทำงานได้ต่อเนื่องยาวนาน ขึ้นและลดภาระในการชาร์จพลังงาน การลดขนาดของ กลไกส่งผลโดยตรงผู้ผลิต ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง เนื่องจากใช้วัสดุและชิ้นส่วนทางกลน้อยลง รวมถึง สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและราคาต่ำลง เช่น มอเตอร์ แบตเตอรี่ และระบบส่งกำลัง นอกจากนี้ หุ่นยนต์ ที่มีขนาดกะทัดรัดยังมีโอกาสในการต่อขยายพารามิเตอร์ ได้มากขึ้น เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงได้ง่าย ราคามี แนวโน้มลดลง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ หลากหลายสภาพแวดล้อม ส่งผลให้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ ชนิดขามีศักยภาพในการใช้งานจริงและแพร่หลายมากขึ้น ในอนาคต

2. การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

ในหัวข้อนี้จะเริ่มต้นด้วยนิยามของปัญหาการหา ค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ต่อด้วยวิธีการใน การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ จากนั้นก็จะ

อธิบายขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ใช้

2.1 ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization Problem, MOOP) จะมีวัตถุประสงค์จำนวนหนึ่งที่ต้องการให้หาค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุด โดย MOOP อธิบายอยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize/Maximize } f_m(\mathbf{x}), m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

$$\text{Subject to } g_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, J$$

$$\text{and } h_k(\mathbf{x}) \geq 0 \text{ or } \leq 0, k = 1, 2, \dots, K$$

คำตอบ $\mathbf{x}$ เป็นเวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยจำนวนตัวแปรตัดสินใจ n ตัว จะได้ว่า $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ โดยมี M วัตถุประสงค์แทนด้วยเวกเตอร์ $\mathbf{f} = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_M(\mathbf{x})\}$ แต่ละวัตถุประสงค์ต้องการให้เป็นค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุด สำหรับกลุ่มของเงื่อนไขบังคับแบบเท่ากัน J เงื่อนไข และเงื่อนไขบังคับ K เงื่อนไข โดย $g_j(\mathbf{x})$ และ $h_k(\mathbf{x})$ เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขแบบเท่ากับและไม่เท่ากับ

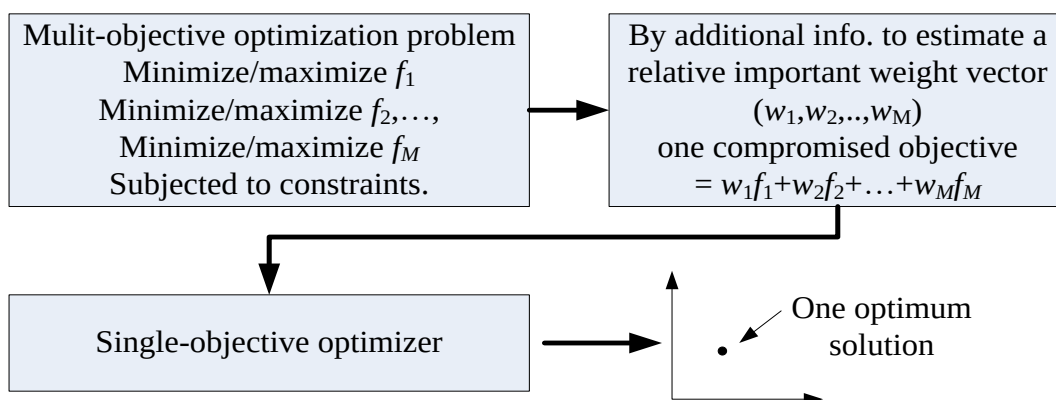
ตามลำดับ ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัวแปรตัดสินใจ x_i มีค่าอยู่ระหว่าง ขอบล่าง x_{li} และขอบบน x_{ui} ตามลำดับ

2.2 วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลาย

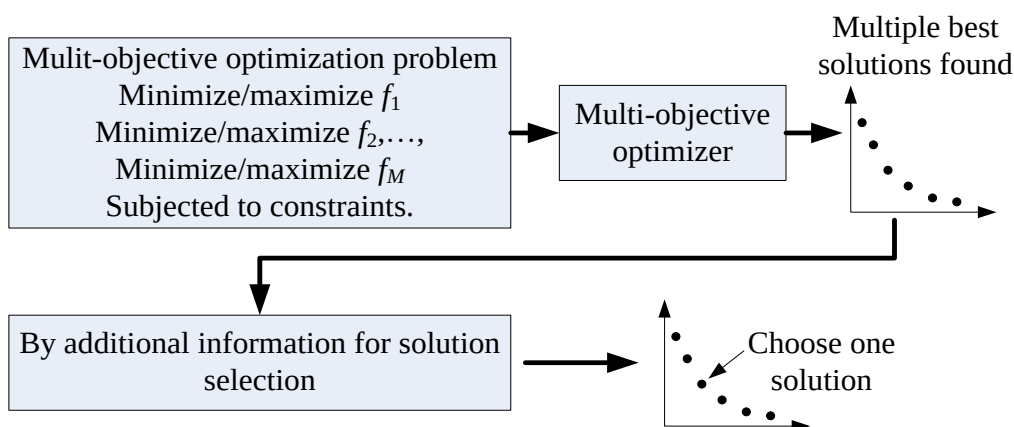
วัตถุประสงค์

สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ 2 วิธีหลักที่ใช้ คือ วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weighted-sum Approach) และวิธีพื้นฐานพาเรโต (Pareto-based Approach) สำหรับวิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (

รูปที่ 1) ซึ่งเป็นวิธีหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์แบบดั้งเดิม ทุกวัตถุประสงค์มารวมกันโดยถ่วงน้ำหนักจนเหลือเพียงวัตถุประสงค์เดียว หลังจากนั้นก็ใช้ตัวหาค่าเหมาะที่สุดวัตถุประสงค์เดียวในการหาคำตอบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ก็จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงคำตอบเดียว แต่ก็จะเป็นคำตอบที่ขึ้นอยู่กับความคิดเห็นของผู้ใช้เนื่องจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก แม้ว่าจะมีคำตอบแบบประนีประนอม (Compromised Solution) ดีที่สุดเพียงคำตอบเดียว เทคนิคนี้ก็ค่อนข้างเป็นที่นิยมเนื่องจากง่ายในการใช้ แต่คำตอบจะขึ้นกับค่าถ่วงน้ำหนักที่เลือก และไม่เหมาะกับปัญหาบางประเภทเช่นปัญหาที่มี Non-convex True Pareto Front [13] เป็นต้น



รูปที่ 1 วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 2 วิธีพื้นฐานพารето

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้จะมีเพียงคำตอบเดียวที่ให้วัตถุประสงคดียุติสุดพร้อมกันทุกวัตถุประสงคดียุติสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงคดียุติ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหานี้คือคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solutions) เมื่อเปรียบเทียบคำตอบทั้งหมดในปริภูมิค้นหาหรือผลเฉลยพารетоที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal Solutions) ซึ่งคำตอบนี้สามารถหาได้โดยวิธีแบบพารетоซึ่งเป็นวิธีแบบที่ 2 (รูปที่ 2) ซึ่งใช้หลักการของการครอบงำแบบพารето (Pareto Domination) ซึ่งเป็นค่านิยมที่ 1

นิยามที่ 1 Pareto Domination

คำตอบ x ใด ๆ ครอบงำ (Dominate) หรือดีกว่าคำตอบ y ถ้าเงื่อนไขทั้งสองข้อต่อไปนี้ เป็นความจริง

- ไม่มีวัตถุประสงคดียุติ ที่คำตอบ x แย่กว่าคำตอบ y
- มีอย่างน้อย 1 วัตถุประสงคดียุติ ที่คำตอบ x ดีกว่าคำตอบ y

ในกลุ่มคำตอบจำนวนหนึ่ง หลังจากทำการเปรียบเทียบด้วย Pareto Domination คำตอบที่ดีที่สุดของกลุ่มคำตอบนี้จะมีจำนวนหนึ่ง ก็คือคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่น หรือคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดที่ดีกว่าตัวเอง ซึ่งกลุ่มคำตอบนี้จะเรียกว่า Non-dominated Solutions ซึ่ง Output ที่ได้ของวิธีพื้นฐานพารетоจะเป็น

กลุ่มคำตอบที่เป็น Non-dominated Solutions จำนวนหนึ่ง ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีพื้นฐานพารетоสำหรับการหาคำตอบ โดยขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Algorithm) ที่ใช้คือ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.3 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) โดย Deb [14] ซึ่งเป็น Multi-objective Optimizer ที่งานวิจัยนิยมใช้กันดังเช่น [15-17] ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II เป็นดังต่อไปนี้

- 1) สร้างประชากร (กลุ่มคำตอบ) P_0 ที่มีขนาด N ดังที่กำหนดไว้ โดยการสุ่ม เริ่มต้น $t = 0$
- 2) กำหนดลำดับชั้น (Rank) ของคำตอบแต่ละตัวใน P_t
- 3) คำนวณระยะห่างแออัด (Crowding Distance) ของคำตอบในแต่ละ Rank โดยที่ Crowding Distance บ่งชี้ความหลากหลายของคำตอบนั้น
- 4) เลือกประชากรรุ่นพ่อแม่ (A_t) จากประชากรปัจจุบัน P_t ด้วยการเลือกแบบไบนารี (Binary Selection) ซึ่งจะตัดสินด้วยอันดับและ Crowding Distance ในแต่ละครั้งของ Binary Selection คำตอบจะถูกสุ่มเลือกสองคำตอบ หากอันดับของคำตอบไม่เท่ากัน คำตอบที่มีอันดับสูงกว่า

จะถูกเลือก หากอันดับของคำตอบจะเท่ากัน เพื่อความหลากหลาย คำตอบที่มี Crowding Distance มากกว่าจะถูกเลือก

5) ใช้ตัวดำเนินการทาง GA ซึ่งก็คือการสลับสายพันธุ์และการกลายพันธุ์ (Mutation) กับ A_i เพื่อให้ได้กลุ่มคำตอบหรือประชากรรุ่นลูก (Offspring Population) Q_i ที่มีขนาดเท่ากับ N

การสลับสายพันธุ์ (Crossover) หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอนการคัดเลือกมาแล้วจะทำการส่งผ่านสมาชิกของประชากรกลุ่มใหม่มาซึ่งตัวดำเนินการอีกตัวที่เรียกว่า การสลับสายพันธุ์ ซึ่งวิธีของการสลับสายพันธุ์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ โดยเริ่มต้นจากการสุ่มเลือกสมาชิกของประชากรที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วจำนวน 2 ตัว และกำหนดให้เป็นสมาชิกพ่อแม่ (Parent Individual) จากนั้นทำการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างสมาชิกพ่อแม่กับสมาชิกแม่ ทำให้เกิดเป็นสมาชิกรุ่นลูก (Offspring Individuals) ขึ้นมาสองตัว ซึ่งสมาชิกรุ่นนี้จะถูกนำไปเป็นสมาชิกของประชากรรุ่นถัดไป โดยทั่วไปแล้วการสลับสายพันธุ์ไม่จำเป็นที่จะเกิดขึ้นกับสมาชิกของประชากรทั้งหมด เพราะโอกาสในการสุ่มเลือกสมาชิกพ่อแม่มาทำการสลับสายพันธุ์จะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการสลับสายพันธุ์ (Crossover Probability)

การกลายพันธุ์ (Mutation) การกลายพันธุ์เป็นอีกตัวดำเนินการหนึ่งในการสร้างสมาชิกรุ่นลูก ซึ่งจะทำให้หน้าที่ในการแลกเปลี่ยนยีนภายในสมาชิกแต่ละตัวเท่านั้นเช่นเดียวกับการสลับสายพันธุ์ โดยปกติแล้วการกลายพันธุ์จะไม่เกิดขึ้นกับสมาชิกทั้งหมด โอกาสที่จะทำการสุ่มเลือกสมาชิกพ่อแม่เพื่อนำเข้าสู่การกลายพันธุ์จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation Probability)

6) รวมประชากรหรือกลุ่มคำตอบปัจจุบัน P_i กับประชากรรุ่นลูก Q_i เพื่อได้เป็นประชากรรวม (Merged Population) R_i ที่มีขนาด $2N$

7) กำหนด Rank และ Crowding Distance ให้แต่ละคำตอบใน R_i

8) หากกลุ่มคำตอบหรือประชากรใหม่ P_{i+1} ขนาด N จาก R_i ที่มีขนาด $2N$ ด้วยการตัดทอนแบบ NSGA-II (NSGA-II truncation)

9) ตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุด หากตรงตามเงื่อนไขขั้นตอนวิธีจะหยุด คำตอบที่ไม่ได้ถูกรอรับของประชากรสุดท้าย P_{i+1} คือเอาต์พุตของขั้นตอนวิธี หากยังไม่ตรงตามเงื่อนไขหยุด ให้เพิ่ม i เป็น $i+1$ และกลับไปขั้นตอนที่ 2)

NSGA-II มี 3 กระบวนการเฉพาะที่สำคัญ ได้แก่ Rank Assignment, Crowding Distance, และ Truncation โดยจะอธิบายในหัวข้อตามลำดับต่อไปนี้

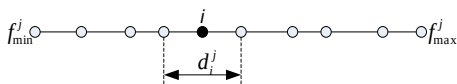
1) Rank Assignment

ตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ Rank Assignment ของ NSGA-II เหมือนกับของขั้นตอนวิธีเดิม NSGA [18] จากกลุ่มคำตอบ ที่มีขนาด P, N Non-dominated Solution จะมีลำดับชั้น (Rank) สูงสุด (Rank = 1) จากนั้นลบ Non-dominated Solution ดังกล่าวออกจากชุดคำตอบ ต่อจากนั้น Non-dominated Solution ของชุดที่เหลือจะได้รับอันดับถัดไปหรืออันดับ 2 และถูกลบออกจากชุดคำตอบขณะนั้นอีกครั้ง กระบวนการจัดอันดับจะทำซ้ำอีกครั้งจนกว่าหมดคำตอบ

2) Crowding Distance

NSGA-II นำเสนอ Crowding Distance เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ความหลากหลายของคำตอบในประชากร Sharing ที่ใช้ใน NSGA [18] ถูกแทนด้วยระเบียบวิธีเปรียบเทียบความแน่น (Crowd Comparison Method) ซึ่งเรียงคำตอบตาม Crowding Distance ของ Objective Value ในการคำนวณ Crowding Distance คำตอบในแต่ละ Objective j ต้องถูกเรียงกันจากน้อยไปมากดังรูปที่ 3 โดยที่ cd_i^j คือ Crowding Distance ของ i ต่อ Objective j ซึ่งสามารถคำนวณได้จากดังสมการที่ (2) โดยหาก i เป็นค่า minimum และ maximum, cd_i^j จะถูกกำหนดให้เป็น

Infinity โดย Crowding Distance ของคำตอบ i เท่ากับผลรวมของ cd_i^j ดังสมการที่ (3)



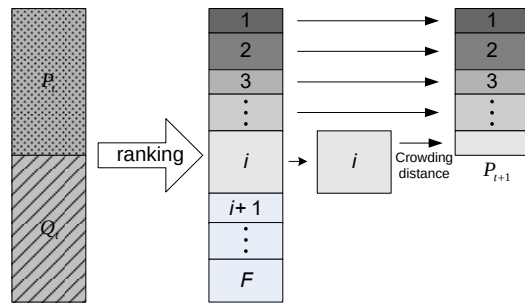
รูปที่ 3 Crowding distance สำหรับ objective j .

$$cd_i^j = \frac{d_i^j}{(f_{max}^j - f_{min}^j)} \quad (2)$$

$$cd_i = \sum_{j=1}^M cd_i^j \quad (3)$$

3) Truncation

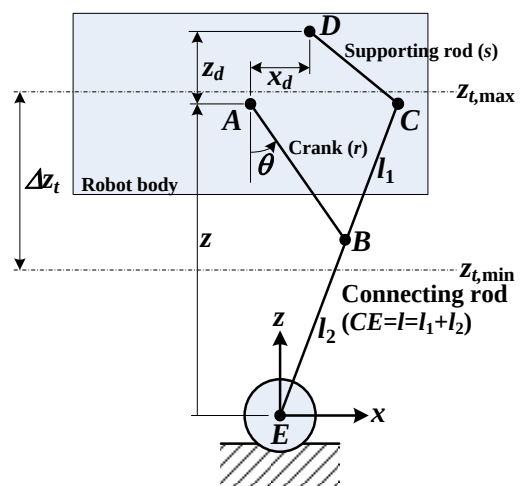
หลังจากการรวมประชากรปัจจุบัน P_t และประชากรรุ่นลูก Q_t ประชากรใหม่ P_{t+1} ขนาด N จะถูกเลือกออกจากประชากรรวม R_t ขนาด $2N$ โดย NSGA-II Truncation ตอนเริ่มต้น คำตอบใน R_t จะถูกจัดเรียงตามลำดับชั้น (Rank) ของพวกเขาจากอันดับบนสุด (Rank = 1) ไปจนถึงอันดับต่ำสุด หลังจากนั้น P_{t+1} จะถูกสร้างขึ้น หากจำนวนสมาชิกในอันดับ 1 น้อยกว่า N สมาชิกทั้งหมดในอันดับจะถูกจัดอยู่ใน P_{t+1} จากนั้นสมาชิกในอันดับถัดไปคืออันดับ 2 จะถือว่าได้รับเลือกใน P_{t+1} การพิจารณาจะคล้ายกับอันดับ 1 หากจำนวนสมาชิกของอันดับ 1 และอันดับ 2 รวมกันน้อยกว่า N สมาชิกทั้งหมดในทั้ง 2 อันดับจะถูกเลือก จากนั้นจะพิจารณาสมาชิกในอันดับถัดไป กระบวนการนี้ทำซ้ำจนกระทั่งในอันดับ i จนจำนวนสมาชิกสะสมของอันดับ 1 ถึงอันดับ i มากกว่าหรือเท่ากับ N ถ้าจำนวนเท่ากับ N ถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ แต่ถ้าจำนวนมากกว่า N สมาชิกกลุ่มแรกจำนวน N -จำนวนสมาชิกสะสม ที่มี Crowding Distance มากที่สุดจะได้เลือกไปเป็นสมาชิกของ P_{t+1} และสิ้นสุดกระบวนการ ขั้นตอนการตัดทอน NSGA-II ยังอธิบายไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 NSGA-II truncation

3. กลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนหลายลิงก์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่แนวตั้งในหุ่นยนต์ขา

กลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนหลายลิงก์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่แนวตั้งในหุ่นยนต์ขาเคลื่อนที่ในแนวระนาบ x - z ดังรูปที่ 5 จุด A ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์และจุด D เป็นจุดที่อยู่บนตัวหุ่น โดยจุด D มีระยะห่างจากจุด A ในแนวแกน x และ z เท่ากับ x_D, z_D ตามลำดับ จุด E เป็นตำแหน่งของล้อที่อยู่หนึ่ง ข้อเหวี่ยง (Crank, $\overline{AB}$) ยาว r หมุนทำให้ Support Rod ($\overline{CD}$) ยาว s และ Connecting Rod ($\overline{CE}$) ยาว l หมุนตาม โดยที่ $l = l_1 + l_2$ และทำให้จุด A เคลื่อนที่ขึ้นลง โดยที่ z คือตำแหน่งของจุด A เทียบจุดหมุนที่อยู่หนึ่ง E ในทิศทางแกน z



รูปที่ 5 กลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนหลายลิงก์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่แนวตั้งในหุ่นยนต์ขา

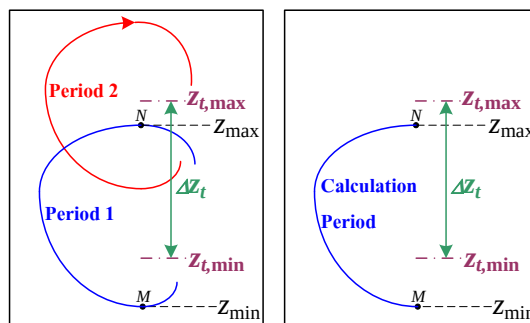
ตัวแปรออกแบบ (Design Variable) ได้แก่ $r, s, l_1, l_2, x_D,$ และ z_D เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ขณะที่เป้าหมายของการออกแบบคือการออกกลไกนี้ก็คือเพื่อให้จุด A เคลื่อนที่ขึ้นลงระหว่างช่วงเป้าหมาย (Target) ของ $z_{\min}$ ($z_{t,\min}$) ไปสู่เป้าหมายของ $z_{\max}$ ($z_{t,\max}$) ด้วยแนวทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นแนวตั้ง โดยในบทความนี้กำหนดให้ $z_{t,\min}$ และ $z_{t,\max}$ คือ 130 และ 330 มม. ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ระยะชัก (Stroke) ของช่วงเป้าหมาย $\Delta z_t = 200$ มม. ขณะที่ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของตัวแปรออกแบบ

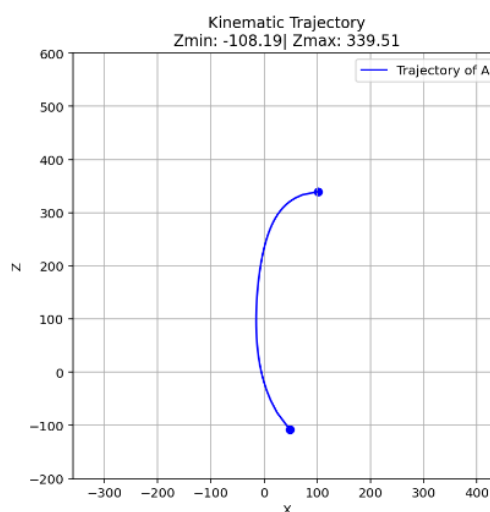
ตัวแปร	ค่าต่ำสุด (มม.)	ค่าสูงสุด (มม.)
r	50	300
s	20	100
l_1	100	400
l_2	100	400
x_D	0	200
z_D	0	200

ทั้งนี้กลไกดังกล่าวอาจไม่สามารถเคลื่อนที่ตลอดทุกมุม Crank แต่เนื่องจากลักษณะการใช้งานกลไกไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ต่อเนื่องตลอด ดังตัวอย่างหากช่วงการเคลื่อนที่ต่อเนื่องของจุด A ของกลไกแสดงดังรูปที่ 6 ซ้าย ซึ่งมี 2 ช่วงต่อเนื่องของกลไกแสดงโดยเส้นสีน้ำเงินและสีแดง ตามลำดับ ในการตัดสินใจเลือกช่วงใดมาใช้ก็จะเลือกช่วงที่ได้การเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงช่วงเป้าหมาย $z_{t,\min}$ และ $z_{t,\max}$ มากที่สุด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างช่วงที่ (Period) 1 และ 2 ก็พบว่าช่วง $z_{\min}$ และ $z_{\max}$ ของช่วงที่ 1 มีความใกล้เคียงกับเป้าหมายมากกว่า จึงพิจารณาเลือกช่วงที่ 1 โดยจะใช้เฉพาะข้อมูลตำแหน่งที่จุด A เคลื่อนที่จากจุดต่ำสุด M ของพิกัด $z_{\min}$ เคลื่อนที่ไปยังจุดสูงสุด N ของช่วงที่ 1 ซึ่งในที่นี่จะให้ $z_{\max}$ ดังแสดงในรูป ทั้งนี้แม้ว่าในความเป็นจริงแล้วจะมีตำแหน่งสูงสุดของกลไกในช่วงที่ 2 แต่กลไกไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างช่วงทั้ง

สองได้เพราะข้อจำกัดทางด้านขนาดและรูปร่าง ดังนั้นช่วงคำนวณ (Calculation Period) ก็คือช่วงข้อมูลพิกัดจากจุด M ไป N ดังรูปที่ 6 ขวา รูปที่ 7 แสดงช่วงตำแหน่งของจุด A ที่ใช้ในการคำนวณที่มี $z_{\min} = -108.91$ มม. และ $z_{\max} = 339.51$ มม. สำหรับกลไกตัวอย่างมีค่า $r = 185$ มม., $l_1 = 50$ มม., $l_2 = 190$ มม., $s = 200$ มม., $x_D = 100$ มม., และ $z_D = 100$ มม. ทั้งนี้ในการหาตำแหน่งของจุด A ได้ทำโดยปรับเปลี่ยนมุมของข้อเหวี่ยง (θ) ดังแสดงในรูปที่ 5 ด้วยการใช้ค่ามุม 360 ค่า ซึ่งจะได้ว่า $\theta = 0^\circ, 1^\circ, \dots, 358^\circ, 359^\circ$ โดยจะใช้ค่ามุมข้อเหวี่ยงเช่นนี้ตลอดทุกการคำนวณในบทความนี้

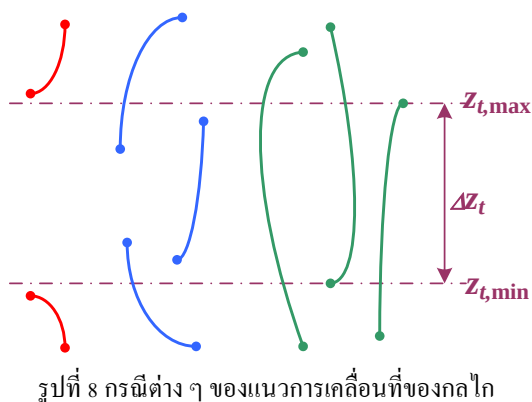


รูปที่ 6 ช่วงการเคลื่อนที่ต่อเนื่องที่แตกต่างกันของจุด A และช่วงที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 7 ช่วงที่ใช้ในการคำนวณสำหรับกลไกตัวอย่าง

เมื่อได้ช่วงที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละกลไกแล้ว ก็สามารถแบ่งการเคลื่อนที่ของกลไกช่วงที่ใช้ในการคำนวณได้ 3 กรณีดังแสดงด้วยเส้นแนวการเคลื่อนที่ของจุด A ด้วยสีที่แตกต่างกันดังรูปที่ 8 โดยกรณีแรก จุด A ไม่ผ่านช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ เลยซึ่งแสดงด้วยเส้นสีแดงซึ่งแนวการเคลื่อนที่อาจจะเส้นแดงบนซึ่ง $z_i > z_{t,max}$ หรือเป็นแบบเส้นล่าง $z_i < z_{t,min}$ ขณะที่กรณีที่ 2 กรณีที่จุด A ผ่านบางส่วนของ $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ แสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน ซึ่งแนวการเคลื่อนที่อาจจะเส้นน้ำเงินบนซึ่งแนวการเคลื่อนที่ผ่าน $z_{t,max}$ แต่ไม่ผ่าน $z_{t,min}$ หรือเป็นแบบเส้นน้ำเงินล่าง ไม่ผ่าน $z_{t,max}$ แต่ผ่าน $z_{t,min}$ หรือเป็นแบบเส้นน้ำเงินกลางอยู่ภายในระหว่าง $z_{t,min}$ และ $z_{t,max}$ ส่วนกรณีที่ 3 กลไกมีจุด A ผ่านทั้งหมดของช่วงเป้าหมายแสดงด้วยเส้นแนวการเคลื่อนที่สีเขียว เช่นเดียวกับกลไกตัวอย่างในรูปที่ 7



ทั้งนี้หากจะพิจารณาการออกแบบนี้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดวัตถุประสงค์เดียว (Single-objective Optimization Problem) โดยให้ตัวชี้วัดที่แสดงแนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นแนวตั้งเป็น Objective มีเงื่อนไขบังคับ (Constraint) คือการเคลื่อนที่ขึ้นผ่านช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ ซึ่งหากกำหนดปัญหาเป็นแบบนี้กลไกที่เกิดจากตัวแปรออกแบบที่มีค่าสูงจะได้เปรียบกว่ากลไกที่เกิดจากตัวแปรออกแบบค่าต่ำๆ เพราะมีโอกาสเคลื่อนที่ขึ้นผ่านช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ มากกว่ารวมถึงมีโอกาสเคลื่อนที่เป็นเส้นแนวตั้ง

ในช่วงดังกล่าวมากกว่า หลังจากการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) ก็จะทำได้กลไกที่มีลักษณะใหญ่อาจจะไม่ตรงกับความต้องการของงานที่ต้องการกลไกที่มีความกะทัดรัดและเคลื่อนที่ได้ดังที่ต้องการ

ทั้งนี้จึงควรกำหนดการออกแบบเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ที่มีจำนวนวัตถุประสงค์ (M) เท่ากับ 2 โดยวัตถุประสงค์ (Objective) คือ J_1 และ J_2 โดย วัตถุประสงค์แรก J_1 แสดงความกว้างของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งผ่านช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ ขณะที่วัตถุประสงค์ที่สอง J_2 แสดงระยะที่เบี่ยงเบนในแนวนอนของการเคลื่อนที่ช่วงที่พิจารณา ทั้งนี้จะต้องมีการกำหนด Objective เพื่อป้องกันการได้เปรียบของคำตอบที่มีค่าตัวแปรออกแบบสูงๆ ซึ่งทำให้ได้กลไกที่มีขนาดใหญ่ทำให้มีการเคลื่อนที่ในขอบเขตที่กว้างกว่ากลไกที่กะทัดรัดกว่า

สำหรับวัตถุประสงค์แรก J_1 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาค่าสูงสุด (Maximized Objective) ที่แสดงความกว้างของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งผ่านช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ จะลบด้วยค่าตัวแปรหนึ่งเพื่อป้องกันการได้เปรียบดังกล่าวโดยการคำนวณ J_1 จะแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

- กรณีที่ 1 หากจุด A ไม่ผ่านช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ J_1 ก็จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่าลบของระยะไกลที่สุดของพิกัด z_{min} , z_{max} กับ $z_{t,min}$, $z_{t,max}$ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ (4)

$$J_1 = -\min(|z_{max} - z_{t,min}|, |z_{min} - z_{t,max}|) \quad (4)$$

ตัวอย่างเช่นหากกลไกแรกมี z_{min} และ z_{max} เท่ากับ 400 และ 600 ตามลำดับ พิกัดที่ใกล้เคียงคือ $z_{min} = 400$ และ $z_{t,max} = 330$ ดังนั้น $J_1 = -70$ ขณะที่กลไกที่สอง มี z_{min} และ z_{max} เท่ากับ -400 และ 100 จะได้ว่า $J_1 = -30$ ซึ่งแม้ว่าทั้ง 2 กลไกไม่เคลื่อนที่ผ่านช่วงเป้าหมายแต่กลไกที่สองเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงเป้าหมายกว่าจึงทำให้มีค่า J_1 ที่ดีกว่า

- กรณีที่ 2 หากจุด A ผ่านบางส่วนหรือทั้งหมดของช่วง $z_{t,min}$ ถึง $z_{t,max}$ เบื้องต้นจะกำหนดค่าเบื้องต้น J_{10} โดยสมการที่ (5)

$$J_{10} = \min(z_{max}, z_{t,max}) - \max(z_{min}, z_{t,min}) \quad (5)$$

ซึ่งจากสมการที่ (5) J_{10} แสดงระยะในแนวแกน z ที่จุด A ผ่านช่วงเป้าหมาย แต่หากให้ J_1 เท่ากันกับ J_{10} ก็จะทำให้กลไกที่มีลักษณะใหญ่ได้เปรียบเพื่อข้อได้เปรียบนี้จึงจะกำหนดวัตถุประสงค์รอง (Minor Objective) สำหรับ Objective หลัก J_1 ก็คือต้องการออกแบบกลไกให้ผลรวมความยาวลิงค์ $\sum L_i = r+s+l_1+l_2$ น้อย โดยผลรวมความยาวถูกเติมเข้าไปโดยจะเป็นค่าที่ลบออกจาก J_{10} ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$J_1 = J_{10} - c_1 \frac{(r+s+l_1+l_2)}{r_u+s_u+l_{1u}+l_{2u}} \quad (6)$$

โดยที่ $c_1 \rightarrow 0$ ทั้งนี้ขึ้นกับการกำหนดขึ้นกับหน่วยที่ใช้ด้วย โดยในบทความนี้ใช้ $c_1 = 0.2$ ขณะที่ r_u, s_u, l_{1u}, l_{2u} ขอบเขตบนของ r, s, l_1, l_2 ตามลำดับ จากตารางที่ 1 จะได้ว่า $r_u+s_u+l_{1u}+l_{2u} = 1200$ มม. โดยหลักแล้วส่วนที่เติมเข้าไปจะมีผลกับกรณีที่เกิดกลไกที่จุด A ผ่านทั้งหมดของช่วงเป้าหมาย ซึ่งแบบนี้ $J_{10} = \Delta z_r = 200$ มม. ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของ J_{10} ส่วนที่เติมเข้ามาจะไปทำให้ J_1 ลดลงจาก J_{10} เล็กน้อย โดยหากกลไกที่มีความยาวลิงค์รวมมากกว่าจะทำให้ได้ J_1 ที่ต่ำกว่ากลไกที่มีความยาวลิงค์รวมน้อยกว่า ส่วนเหตุผลที่กำหนด c_1 ให้มีค่าน้อยเพราะเพื่อไม่ทำคุณลักษณะของ Objective คลาดเคลื่อนมากเกินไป จากสมการก็จะสังเกตได้ว่าหาก J_1 น้อยกว่า J_{10} สูงสุดเพียงแค่ c_1 มม. เท่านั้นซึ่งเป็นกรณีที่ r, s, l_1, l_2 เท่ากับขอบเขตบน r_u, s_u, l_{1u}, l_{2u} ตามลำดับ

สำหรับวัตถุประสงค์ที่สอง J_2 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาค่าต่ำสุด (Minimized Objective) ซึ่งแสดงระยะที่เบี่ยงเบนในแนวอนของการเคลื่อนที่ช่วงที่พิจารณา ซึ่งอธิบายได้ดัง 2 สมการต่อไปนี้

$$J_{20} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \text{ where } \bar{x} = \frac{\sum_i^N x_i}{N} \quad (7)$$

$$J_2 = J_{20} + c_2 \quad (8)$$

จากสมการดังกล่าว ทั้งนี้ช่วงที่พิจารณาซึ่งก็คือช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณก็จะแยกคิดเป็นกรณีที่แตกต่าง

กันเช่นเดียวกับค่า c_2 โดยค่า c_2 ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อให้เกิดความแตกต่างของ J_2 แต่ละกรณี ในส่วนของการคิดช่วงที่พิจารณาจะไม่ได้พิจารณาเฉพาะข้อมูลช่วงที่เกิดจุด A ผ่านช่วงเป้าหมายเท่านั้นเพราะหากพิจารณาแบบนี้อาจจะทำให้บางกลไกอาจจะมีข้อมูลช่วงนั้นน้อย เมื่อนำไปคำนวณ J_2 ก็อาจจะไม่ได้บ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนที่มีต่อ J_2 นัก เพื่อให้จำนวนผลของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณใกล้เคียงกัน จะใช้พิกัด z เป็นเกณฑ์ในการหาช่วงที่พิจารณาโดยจะกำหนดให้ช่วงที่พิจารณามีระยะ Stroke เท่ากับระยะ Stroke ของเป้าหมาย Δz_r

สำหรับกรณีจุด A ไม่ผ่านช่วง $z_{i,\min}$ ถึง $z_{i,\max}$ ซึ่งจะมี 2 กรณีย่อย โดยกรณีย่อยแรก $z_{\max} < z_{i,\min}$ ซึ่งจะได้ตำแหน่ง $z_{\max}$ คือพิกัดที่ใกล้กับพิกัดเป้าหมายช่วง $z_{i,\min}$ ถึง $z_{i,\max}$ โดยช่วงข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาคำนวณ J_2 คือช่วงข้อมูลที่พิกัด $z \in [z_{\max} - \Delta z_r, z_{\max}]$ ส่วนกรณีย่อยที่ 2 $z_{\min} > z_{i,\max}$ ในทำนองคล้ายกันช่วงข้อมูลในการคำนวณคือช่วงข้อมูลที่พิกัด $z \in [z_{\min} - z_{\min} + \Delta z_r]$ ส่วนกรณีที่จุด A ผ่านบางส่วนของ $z_{i,\min}$ ถึง $z_{i,\max}$ ทำนองเดียวกันก็จะมี 2 กรณีย่อย โดยกรณีย่อยแรก $z_{\max} \in [z_{i,\min}, z_{i,\max}]$ ช่วงข้อมูลที่ใช้คือช่วงที่พิกัด $z \in [z_{\max} - \Delta z_r, z_{\max}]$ ขณะที่อีกกรณีคือ $z_{\min} \in [z_{i,\min}, z_{i,\max}]$ ช่วงข้อมูลที่ใช้คือช่วงที่ $z \in [z_{\min} - z_{\min} + \Delta z_r]$ สุดท้ายสำหรับกรณีที่จุด A ผ่านตลอดช่วงเป้าหมาย ข้อมูลที่ใช้คือช่วงที่ $z \in [z_{i,\min}, z_{i,\max}]$

ในส่วนการกำหนดค่า c_2 จะพิจารณาโดยหากกรณีกลไกที่จุด A ผ่านตลอดช่วงเป้าหมาย ก็กำหนดให้ c_2 เท่ากับ 0 ขณะที่กลไกที่จุด A ผ่านบางส่วนของ $z_{i,\min}$ ถึง $z_{i,\max}$ ก็กำหนดให้ c_2 เป็นค่าบวกค่าหนึ่งซึ่งในบทความนี้ให้เท่ากับ 100 มม. สำหรับกรณีจุด A ไม่ผ่านช่วง $z_{i,\min}$ ถึง $z_{i,\max}$ เลย ก็จะกำหนดให้ c_2 มีค่ามากกว่ากรณีผ่านบางส่วนของ โดยกำหนดให้เท่ากับ 200 มม. ทั้งนี้การกำหนด c_2 ก็จะขึ้นกับหน่วยที่ใช้ด้วย โดยตัวเลขที่กำหนด ควรให้แน่ชัดว่า J_2 ของกรณีกลไกที่จุด A ผ่านตลอดช่วงเป้าหมายต้องน้อยกว่ากรณีกลไกที่จุด A ผ่านบางส่วนของหรือไม่ผ่านช่วงเป้าหมายดังกล่าว รวมทั้ง J_2 ของกรณีกลไกที่จุด A ผ่าน

บางส่วนของช่วงเป้าหมายก็จะน้อยกว่ากลไกกรณีจุด A ไม่ผ่านช่วงเป้าหมายเลย โดยหากกลไกมีจุด A เคลื่อนที่ผ่านช่วงเป้าหมาย และช่วงที่ผ่านดังกล่าว ข้อมูลจำนวน N เคลื่อนที่ในแนวตั้งแบบสมมาตรซึ่งก็คือฟังก์ชัน x_i คงที่ตลอด J_2 ก็จะเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ของ J_2

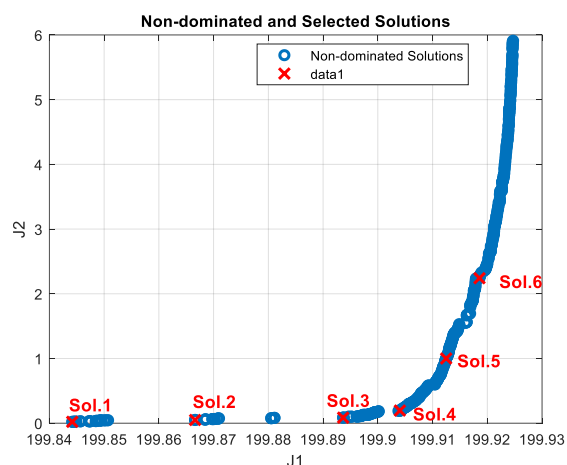
4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว การออกแบบนี้สามารถกำหนดให้เป็น Multi-objective Optimization Problem, MOOP ที่มี 2 Objective f_1 และ f_2 ในการทำ Optimization ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$\text{Maximize } f_1 = J_1 \text{ และ Minimize } f_2 = J_2 \quad (9)$$

โดยมี 6 ตัวแปรออกแบบ (Design Variable) ซึ่งแสดงก่อนหน้านี้นี้ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม Python สำหรับคำนวณและหาคำตอบ NSGA-II จะถูกใช้ผ่าน Library ที่ชื่อ “pymoo” โดยคำสั่งย่อย “NSGA2” ด้วยการใช้ Population ขนาด 500, จำนวน Generation = 2000, คำตอบถูกเข้ารหัสเป็นเลขจำนวนจริง กระบวนการภายใน NSGA-II จะใช้ Simulated Binary Crossover (SBX) ด้วยความน่าจะเป็น 1.0 และ $\eta_c = 15$ โดยคำสั่งย่อย “SBX” ใน pymoo, Polynomial Mutation (PM) ด้วยความน่าจะเป็น 1/จำนวนตัวแปรออกแบบ (=1/6) และ $\eta_m = 20$ โดยคำสั่งย่อย “PM” ของ pymoo, โดยมีการค้นหาคำตอบซ้ำ 5 ครั้ง ด้วยคอมพิวเตอร์ CPU คือ Intel(R) Core(TM) i9-10900, Ram ขนาด 32.0 GB, และ Hardisc ขนาด 2.73 TB เวลาเฉลี่ยต่อครั้งเท่ากับ 1114.38 วินาที หลังจากนั้นนำกลุ่มคำตอบลัพธ์ในแต่ละครั้งมารวมกันและเปรียบเทียบกันเพื่อหากลุ่มคำตอบที่เป็น Non-dominated Solutions ซึ่งจะเป็นผลลัพธ์ของการค้นหาคำตอบนี้ โดยผลลัพธ์ดังกล่าวและ 6 คำตอบที่จะเลือกมาเป็นตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9 โดยพิจารณาเลือกคำตอบที่กระจายทั่วแนวคำตอบแต่ไม่พิจารณาเลือกคำตอบที่มี J_2

มากกว่า 2.5 ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับคำตอบอื่น รวมถึงช่วงที่ J_2 มากกว่า 2.5 มีอัตราการเพิ่มขึ้น (แอ่ง) ของ J_2 ต่อการเพิ่มขึ้น (ดีขึ้น) ของ J_1 ที่ชันมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่น ซึ่งลักษณะที่ชันมากแบบนี้ หากวิเคราะห์โดยมุมมองที่นอกเหนือจาก MOO อาจกล่าวได้ว่าคำตอบแอ่งหากเทียบกับช่วงอื่น ทั้งนี้ Non-dominated Solutions มีทั้งหมด 508 คำตอบ โดยพบว่ามีคำตอบที่ให้ J_2 น้อยกว่า 1.00 มม. จำนวน 205 คำตอบ ซึ่งคิดเป็น 40.35%



รูปที่ 9 Non-dominated Solutions และคำตอบตัวอย่าง

ทั้งนี้ผลของผลรวมความยาวลิงค์ (Sum of Link Length) คือ Objective J_1 และ J_2 ของ Non-dominated Solutions ที่ได้แสดงดัง

รูปที่ 10 และ

รูปที่ 11 โดย ผลรวมความยาวลิงค์ $= \sum L_i = r+s+l_1+l_2$ ซึ่งจาก

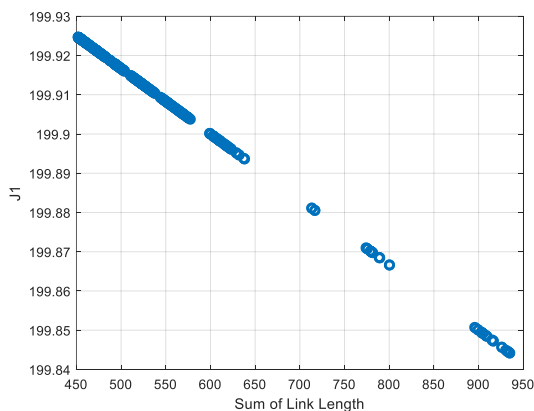
รูปที่ 10 และ

รูปที่ 11 พบว่าผลรวมความยาวลิงค์ที่เพิ่มมีแนวโน้มจะทำให้ค่า Maximized Objective J_1 แอ่ง (ลดลง) อย่างเป็นเชิงเส้น และ Objective J_1 มีค่าน้อยกว่า $\Delta z_r = 200$ มม. เล็กน้อย จึงทำให้ทราบว่า กลไกที่เกิดจาก Non-dominated Solutions ทุกตัวมีจุด A ผ่านช่วงเป้าหมาย

ทั้งหมด เนื่องจากว่าส่วนที่ลบออกจาก J_{10} ในสมการที่ (5) มีค่าแปรผันโดยตรงกับ $\sum L_i$ ค่า J_1 มีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อผลรวมความยาวลิงก์มากขึ้นดัง

รูปที่ 10 ขณะที่ผลรวมความยาวลิงก์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ Minimized Objective J_2 ดีขึ้น (ลดลง) โดยผลรวมความยาวลิงก์จะมีผลต่อ J_2 มากกว่า เพราะ J_2 ลดลง (ดีขึ้น) อย่างมากเมื่อผลรวมความยาวลิงก์มากขึ้นดัง

รูปที่ 11 ซึ่งจะเป็นลักษณะตรงข้ามกับ J_1 หากพิจารณาเฉพาะ J_2 ในการเลือกคำตอบ ก็จะได้กลไกที่มีขนาดใหญ่ซึ่งตรงข้ามกับการใช้งานจริงที่ควรเลือกกลไกที่มีความกะทัดรัด

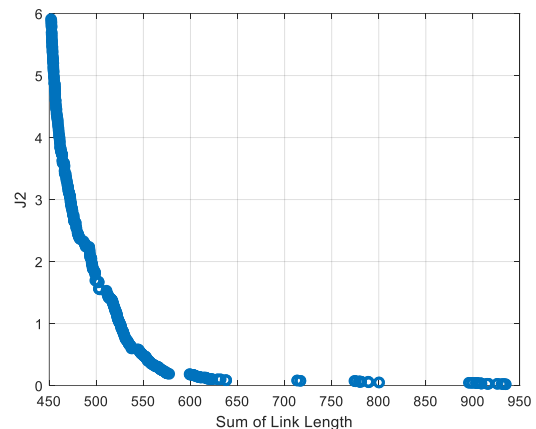


รูปที่ 10 ผลรวมความยาวลิงก์ต่อ Objective J_1 ของ

ผลลัพธ์ Non-dominated Solutions

ตารางที่ 2 รายละเอียดของคำตอบตัวอย่างเลือกจาก Non-dominated Solutions

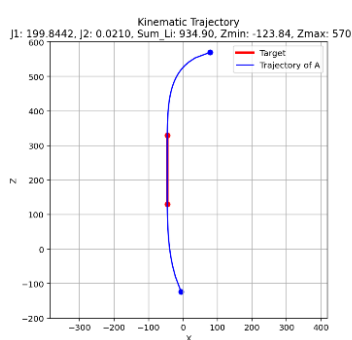
Sol.	$\{r, s, l_1, l_2, x_D, z_D\}$	$\{J_1, J_2\}$	$\sum L_i$	$\{z_{\min}, z_{\max}\}$	$\{\theta_{z,\min}, \theta_{z,\max}\}$
1	{288.55, 95.48, 326.99, 223.88, 189.96, 65.95}	{199.8442, 0.0210}	934.90	{-123.84, 570.19}	{24, 86}
2	{243.31, 63.23, 241.14, 252.63, 99.20, 91.72}	{199.8666, 0.0494}	800.30	{-62.54, 464.49}	{30, 86}
3	{117.27, 20.97, 371.72, 128.03, 25.78, 24.94}	{199.8937, 0.0856}	637.99	{-153.57, 447.35}	{23, 81}
4	{111.46, 20.00, 315.77, 128.61, 23.29, 30.86}	{199.9040, 0.1951}	575.83	{-141.39, 386.27}	{346, 69}
5	{99.87, 20.06, 285.35, 119.88, 21.50, 34.05}	{199.9125, 0.9997}	525.15	{-121.50, 336.36}	{342, 67}
6	{118.01, 24.87, 238.36, 107.35, 28.19, 18.79}	{199.9186, 2.2408}	488.59	{129.99, 349.52}	{335, 69}



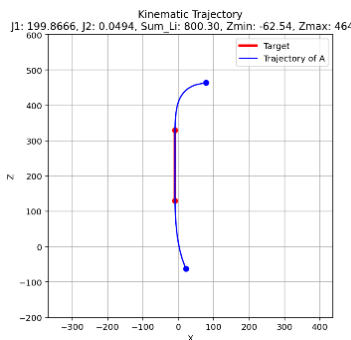
รูปที่ 11 ผลรวมความยาวลิงก์ต่อ Objective J_2 ของ

ผลลัพธ์ Non-dominated Solutions

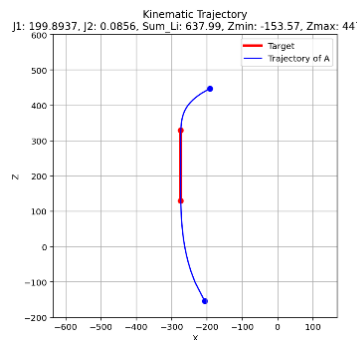
รายละเอียดของคำตอบตัวอย่างทั้ง 6 คำตอบที่เลือกจาก Non-dominated Solutions ดังแสดงในรูปที่ 9 ได้แสดงตารางที่ 2 ประกอบด้วยค่าตัวแปรออกแบบ Objective $\{J_1, J_2\}$ ผลรวมความยาวลิงก์, $\{z_{\min}, z_{\max}\}$ และมุมข้อเหวี่ยง $(\theta_{z,\min}, \theta_{z,\max})$ ของตำแหน่ง $\{z_{\min}, z_{\max}\}$ ขณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด A ของกลไกที่เกิดจากคำตอบตัวอย่างแสดงในรูปที่ 12 โดยหน่วยที่แสดงในตารางและรูปดังกล่าวเป็น มม. ทั้งหมด



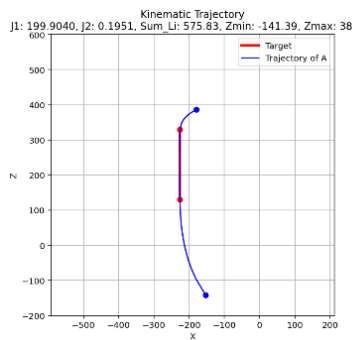
(ก) คำตอบถูกเลือกที่ 1



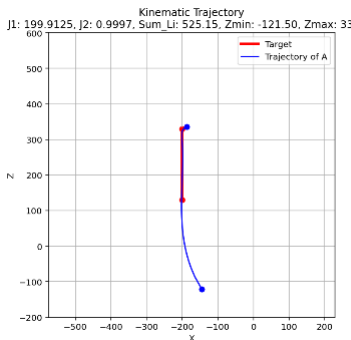
(ข) คำตอบถูกเลือกที่ 2



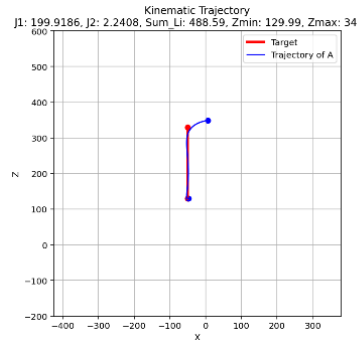
(ค) คำตอบถูกเลือกที่ 3



(ง) คำตอบถูกเลือกที่ 4



(จ) คำตอบถูกเลือกที่ 5

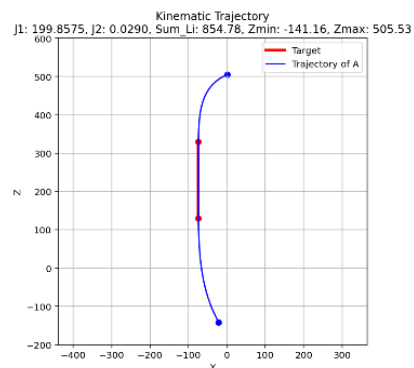


(ฉ) คำตอบถูกเลือกที่ 6

รูปที่ 12 เส้นทางเคลื่อนที่ของจุด A ของกลไกที่เกิดจากคำตอบตัวอย่าง

เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้มา บทความนี้ได้ทำการจำลองการออกแบบกลไกให้เป็น Single-objective Optimization Problem (SOOP) โดยให้ J_2 เป็น Optimized Objective ขณะที่เงื่อนไขข้อบังคับ (Constraint) กำหนดให้กลไกมีจุด A ผ่านทั้งหมดของช่วง $z_{i,\min}$ ถึง $z_{i,\max}$ จากนั้นใช้ Optimization Algorithm สำหรับ SOOP ซึ่งได้ใช้ Particle Swarm Optimization (PSO) ด้วยการใส่ Population ขนาด 500, จำนวน Generation = 2000, โดยใช้ Library “pyswarm” ด้วยคำสั่ง “pso” และค้นหาคำตอบซ้ำ 5 ครั้งด้วยคอมพิวเตอร์เดิม เวลาเฉลี่ยต่อครั้งเท่ากับ 943.94 วินาที จากนั้นนำคำตอบแต่ละครั้งมาเปรียบเทียบกันแล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งได้คือ $\{r, s, l_1, l_2, x_D, z_D\} = \{238.17, 87.14, 303.63, 225.84, 144.89, 89.98\}$ โดย $J_2 = 0.0290$, $\sum L_i = 854.78$, $z_{\min} = -141.16$, $z_{\max} = 505.53$

เส้นทางเคลื่อนที่ของจุด A ของกลไกที่ได้คำตอบนี้แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 13 เส้นทางเคลื่อนที่ของจุด A ของกลไกที่ได้จาก Single-objective Optimization โดย PSO

เมื่อเปรียบเทียบคำตอบตัวอย่างที่ 1 โดย NSGA-II ซึ่งเป็นคำตอบที่มี J_2 ดีที่สุดเทียบกับคำตอบเดี่ยวที่ได้

จาก SOO โดย PSO ซึ่งใช้ J_2 เป็น Optimized Objective ก็พบว่าคำตอบตัวอย่างที่ 1 จาก MOO โดย NSGA-II ให้ค่า J_2 ต่ำกว่าเล็กน้อย (0.0210 กับ 0.0290 มม.) แต่คำตอบตัวอย่างที่ 1 จาก MOO ก็อาจจะไม่ค่อยเหมาะสมเพราะ $\sum L_i$ ก่อนข้างสูงซึ่งเท่ากับ 934.90 มม. นอกจากนี้เมื่อนำคำตอบโดย SOO ที่มีผลรวมความยาวลิงค์เท่ากับ 854.78 มม. เปรียบเทียบคำตอบตัวอย่างที่ 2-4 โดย MOO ที่มีผลรวมความยาวลิงค์เท่ากับ 800.30, 637.99, 575.83 มม. ซึ่งน้อยกว่าคำตอบโดย PSO แม้ว่าคำตอบโดย MOO ทั้ง 3 นี้จะมี J_2 ที่ต่ำกว่าคำตอบโดย SOO แต่เนื่องด้วย J_2 ซึ่งแสดงการเบี่ยงเบนในแนวแกน x ที่มีค่าน้อยกว่า 1 มม. ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงเป้าหมายการเคลื่อนที่ $\Delta z_i = 200$ มม. ในแนวแกน z โดยหากเทียบแล้วสามารถลดผลรวมความยาวลิงค์ได้ 6.37%, 25.36%, 32.63% ตามลำดับ ซึ่งจะทำได้กลไกที่กะทัดรัดขึ้นกว่าคำตอบจาก SOO ขณะที่คำตอบที่ 4 มีความยาว r, s, l_2, x_D , และ z_D , ลดลง 53.2%, 77.0%, 43.1%, 83.9% และ 65.7% ขณะที่ความยาว l_1 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย 4.0% เมื่อเทียบคำตอบจาก SOO ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ Optimization สามารถช่วยลดขนาดของชิ้นส่วนกลไกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะ r, s, l_2, x_D , และ z_D ซึ่งมีอัตราการลดลงสูงมากกว่า 40% ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น แม้ว่า x_D , และ z_D ไม่มีผลต่อผลรวมความยาวลิงค์ การลดลงของตัวแปรทั้ง 5 ทำให้มวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบลดลง รวมถึงทำให้ตำแหน่ง C.G. อยู่ต่ำใกล้แกนล้อมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดโมเมนต์การล้ม ซึ่งอาจส่งผลดีต่อการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ และประสิทธิภาพในการควบคุมของกลไกในภาพรวม คำตอบตัวอย่างที่ 4 จึงเป็นคำตอบที่น่าสนใจในการพิจารณาเลือกใช้

คำตอบตัวอย่างที่ 5 และ 6 โดย MOO เป็นคำตอบที่มีผลรวมความยาวลิงค์น้อย จากข้อมูล $o_{z,min}, o_{z,max}$ ในตารางที่ 2 พบว่าช่วงการเคลื่อนที่ไปมาต่อเนื่องของกลไกสำหรับคำตอบที่ 5 ระหว่างมุมข้อเหวี่ยง -18° (342°) กับ 67°

ขณะที่กลไกของคำตอบที่ 6 เคลื่อนที่ไปมาระหว่างมุมข้อเหวี่ยง -25° (342°) กับ 67° ดังที่กล่าวก่อนหน้านี้กลไกอาจไม่สามารถเคลื่อนที่ตลอดทุกมุม Crank โดย z_{max} ของคำตอบที่ 5 ใกล้กับตำแหน่งเป้าหมาย $z_{t,max}$ มาก ขณะที่ z_{min} ของคำตอบที่ 6 ก็เกือบจะเท่ากับ $z_{t,min}$ ทั้งนี้ตำแหน่งที่ใกล้เคียง $z_{t,min}$ และ $z_{t,max}$ ดังกล่าว อาจจะทำให้กลไกจากคำตอบนี้เคลื่อนที่ยากในทางปฏิบัติ รวมถึงเกิดแรงสูงตรงจุดต่อระหว่างลิงค์ที่ต่อกันได้เนื่องจากเป็นตำแหน่งใกล้กับขอบเขตเคลื่อนที่ไม่ได้ ซึ่งคำตอบทั้งสองนี้อาจจะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ รวมถึงเมื่อทำชิ้นงานจริง ความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยของความยาวลิงค์ในกลไกเนื่องจากกระบวนการผลิตอาจจะทำให้ z_{min}, z_{max} เปลี่ยนแปลงไปแม้เพียงเล็กน้อย แต่อาจจะทำให้กลไกไม่สามารถเคลื่อนที่ตามเป้าหมายได้ นอกจากนั้นการเลือกคำตอบจาก MOO ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน รวมถึงปัจจัยอื่นจากกระบวนการเพิ่มเติมต่อจาก Optimization นี้ เป็นต้น

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบกลไกข้อเหวี่ยงตัวเลื่อนหลายลิงค์สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่แนวตั้งในหุ่นยนต์ขา ต้องการออกแบบกลไกที่ให้การเคลื่อนที่ในแนวตั้งผ่านตำแหน่งเป้าหมาย และลดการเคลื่อนที่ในแนวนอน ด้วยกำหนดให้การออกแบบให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOOP) ที่มี 2 วัตถุประสงค์ J_1 และ J_2 โดยใช้ MOO ในการค้นหาคำตอบ รวมถึงมีการเพิ่มผลของความยาวรวมของลิงค์เข้ามาพิจารณาในวัตถุประสงค์ J_1 เพื่อให้ได้กลไกที่มีความยาวรวมของลิงค์น้อยได้มี J_1 ที่ดี โดยผลลัพธ์ของ MOO คือกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนหนึ่งเรียกว่า Non-dominated Solutions ซึ่งได้คำตอบที่มีระยะการเคลื่อนที่ในแนวช่วงตำแหน่งเป้าหมายน้อยกว่า 1.00 มม. จำนวน 205 คำตอบ ซึ่งคิดเป็น 40.35% จากคำตอบลัพธ์โดย MOO จากคำตอบที่ได้พบว่ามีจำนวนมากที่ทำให้ได้กลไกกะทัดรัดขึ้นกว่าคำตอบที่ได้จาก SOO ด้วยซึ่งการที่ MOO ให้คำตอบ

จำนวนหนึ่งก็จะเป็นสิ่งที่ดีสำหรับการเลือกใช้งานได้หลากหลาย ขณะที่ SOO ให้คำตอบเพียงหนึ่งเดียวเท่านั้น แม้ว่าผลการจำลองที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านกระบวนการ Optimization สามารถช่วยลดขนาดของกลไกและทำให้กลไกเคลื่อนที่ตามต้องการ ก่อนนำไปใช้งานจริง ยังจำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง เช่นการออกแบบรูปร่างชิ้นส่วน การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์และความแข็งแรงของชิ้นส่วน รวมถึงการประเมินเสถียรภาพของระบบระหว่างการเคลื่อนที่จริง จากนั้นพัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบและทำการทดสอบร่วมกับระบบควบคุมจริง เช่น การทรงตัว การเดิน การตอบสนองต่อแรงรบกวน และการเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่แตกต่างกัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Yoshimoto, J. Watanabe, K. Kitagawa and H. Muramatsu, “A prismatic joint mechanism for high payload capacity of hybrid mobile robots,” *Advanced Robotics*, vol. 39, no. 21, pp. 1346–1359, 2025.
- [2] S. Mohamed, H. Q. Le, Y. Kim and B. Shin, “Design and modeling of hexapod robot using telescopic legs connected to pivot joints at the hips,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 238, no. 8, pp. 3480–3497, 2024.
- [3] A. G. Erdman, G. N. Sandor and S. Kota, *Mechanism Design: Analysis and Synthesis*, Prentice Hall, 2001.
- [4] R. L. Norton, *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms*, 6th ed., 2020.
- [5] V. Klemm et al., “Ascento: A two-wheeled jumping robot,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, 2019.
- [6] P. Rajesh, R. Rajendra and P. G. Rao, “Development and evaluation of a versatile control system in an adaptable multi- legged robot using a modified Peaucellier- Lipkin mechanism,” *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, vol. 19, no. 11, 2024.
- [7] J. Zhou, H. Yu, M. He, Y. Zhang, X. Luan and Y. Liu, “ Application- oriented classification and performance analysis of precision linear feed mechanisms for machine tools,” *Science Progress*, vol. 109, no. 1, 2026.
- [8] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, MIT Press, 1986.
- [9] C. Li, Y. Ding and H. W. Park, “Centroidal-momentum-based trajectory generation for legged locomotion,” *Mechatronics*, vol. 68, p. 102364, 2020.
- [10] Z. Xie, Y. Wang, X. Luo, P. Arpent, F. Ruggiero and B. Siciliano, “Three-dimensional variable center of mass height biped walking using a new model and nonlinear model predictive control,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 197, p. 105651, 2024.
- [11] X. Feng, S. Liu, Q. Yuan, J. Xiao and D. Zhao, “Research on wheel-legged robot based on LQR and ADRC,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 15122, 2023.
- [12] H. Zhang and N. Mohamad Nor, “Control strategies for two- wheeled self- balancing robotic systems: A comprehensive review,” *Robotics*, vol. 14, no. 8, p. 101, 2025.

- [13] K. Deb, Multi- Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, John Wiley and sons, 2001.
- [14] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002.
- [15] A. Xu, Z. Wan, X. Wang, X. Zhang, and C. Yang, "Helicopter power and vibration reduction by segment control of active twist rotor," Aerospace Science and Technology, vol. 168, Part F, 111207, 2026.
- [16] F. Weng, M. Su, P. Hajek, M. Z. Abedin, "A multi-objective framework for predicting public opinion trends on infectious diseases using NSGA- II and interval predictions," Expert Systems with Applications, vol. 298, Part B, 129583, 2026.
- [17] V. H. Truong, T. C. Cao, S. Tangaramvong, "A robust machine learning- based framework for handling time- consuming constraints for bi-objective optimization of nonlinear steel structures," Structures, vol 62, 106226, 2024.
- [18] N. Srinivas and K. Deb, "Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms," Evolutionary Computation, vol. 2, no. 3, pp. 221–248, 1995.

ประวัติผู้ประพันธ์



รศ.ดร.กิตติพงษ์ บุญโหล่ง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: การหาค่าเหมาะที่สุด
การสันสะเทือนเชิงกล, การเรียนรู้ของเครื่อง



ผศ.ดร.พuthา จินท้าว
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: ไตรโบโลยี การ
สันสะเทือนเชิงกล, การออกแบบเครื่องจักรกล



ดร.นัฐพล ศรีรัตนศักดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบควบคุม

พลศาสตร์ หุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติ



ผศ.ดร.นันทวัฒน์ วีระยุทธ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี

งานวิจัยที่สนใจ: การหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการ
ออกแบบเชิงสหวิทยาการ, การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยาการหุ่นยนต์และเมคคาทรอนิกส์

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ
SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2569

ชื่อ – นามสกุล

ต้นสังกัด

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา สงวนสัตย์

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา นาโ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา แดงวีไลลักษณ์

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาที ร.ต.ดร.ไพฑูรย์ ไชยวงศา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตสกลนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีติ

มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมสุข เสพศิริสุข

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ฉิมเรศ

มหาวิทยาลัยทักษิณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐกิต เบญจเลิศยานนท์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ จาตุณิตานนท์

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY ตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ โดยมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ในวารสารนี้จะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในการพิจารณาของวารสารอื่นๆ เรื่องที่จะตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 คน กองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้นและทรงไว้ซึ่งสิทธิ์ในการคัดลอกตีพิมพ์หรือไม่ก็ได้

ประเภทผลงานที่ตีพิมพ์

1. บทความวิจัย (Research articles) เป็นผลงานที่เตรียมจากข้อมูลของผู้เขียน หรือทีมงานผู้เขียนได้ค้นคว้าวิจัยด้วยตนเอง
2. บทความวิชาการ (Academic articles) อาจแยกเป็นบทความปริทรรศน์ (Review articles) บทความเทคนิค (Technical article) เรียบเรียงจากการสืบค้น ตรวจสอบเอกสารวิชาการในสาขานั้นๆ และบทความพิเศษ (Special articles) เสนอความรู้ทั่วไปในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การเตรียมต้นฉบับบทความ

บทความหรือผลงานวิจัยที่นำเสนออาจอยู่ในรูปแบบภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดยจัดพิมพ์ด้วยโปรแกรมเวิร์ดโปรเซสเซอร์ ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ สำหรับตาราง แผนภาพและภาพประกอบในส่วน of ต้นฉบับจะต้องตามรูปแบบที่กำหนดเพื่อให้พร้อมตีพิมพ์ได้ทันที (Camera ready) ต้นแบบสำหรับบทความสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ saujournalst.sau.ac.th

การส่งบทความ

ส่ง “ต้นฉบับบทความ” โดยไม่ต้องระบุชื่อที่อยู่และประวัติของผู้ประพันธ์และทีมงานและส่ง “ใบรับรองบทความ” ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล PDF และ ไฟล์ Doc ส่งผ่านระบบ Thaijo ได้ที่ วารสาร SAUJOURNALST

บทความทุกบทความที่เสนอมายังวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้ทรงคุณวุฒิ หากมีการแก้ไขหรือตอบรับการตีพิมพ์ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล PDF และ DOC ของบทความที่แก้ไข สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

โทรศัพท์ : 0-2807-4500-27 # 404 โทรสาร: 0-2807-4528

e-mail : saujournalst@sau.ac.th

ต้นฉบับสำหรับบทความที่เขียนเป็นภาษาไทยสำหรับวารสาร

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ชื่อบทความ

Title of the Paper

ชื่อ-นามสกุล ผู้ประพันธ์ (ภาษาไทย)

ชื่อ-นามสกุล ผู้ประพันธ์ (ภาษาอังกฤษ)

ภาค/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย

ที่อยู่/ประเทศ

ผู้พิมพ์ประสานงาน : Your email address

วันที่รับบทความ: / วันที่แก้ไขบทความ: / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์:

บทคัดย่อ นี่คือนิตยสารต้นฉบับสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows โดยจัดระยะขอบบน 3.0 ซม. ระยะขอบขวา ขอบซ้ายและขอบล่าง 2.5 ซม. โดยมีการตั้งค่าขนาดของกระดาษ Custom size (19 ซม.x26.5 ซม.) หลัง “คำสำคัญ:” ให้กำหนดรูปแบบเป็น 2 สดมภ์ ด้วยความกว้าง 6.73 ซม. และระยะห่างสดมภ์ 0.5 ซม. พิมพ์บทความด้วยอักษร Angsana New ขนาด 13pt ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า และสำหรับคำ **บทคัดย่อ คำสำคัญ** และ**เอกสารอ้างอิง** ให้กำหนดเป็นตัวเข้ม-เอียงด้วยอักษร Angsana New ขนาด 14pt

คำสำคัญ : เว้น 1 บรรทัดหลังจากบทคัดย่อ แล้วพิมพ์คำสำคัญของบทความ (4-5 คำ)

Abstract This is a template of your full paper for publishing on SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY. Use Microsoft Word for Windows. Leave 3.0 cm. margins from the top, 2.5 cm. from the right side, left side and bottom. Please adjust the page setup to custom size (19 cm.x26.5 cm.) sheet. Use double-column format width of 6.73 cm. with a space of 0.5 cm. between columns after the keywords. Use 11 point Times New Roman font in typing the abstract. The length of paper should not be longer than 15 pages. For the headings, such as **Abstract**, **Keywords** and **References** use 12 point Times New Roman bold-Italic.

Keywords: Please leave one blank line after the *Abstract* and write your keywords (4-5 words).

1. บทนำ

ชื่อบทความภาษาไทย (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 20pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) ตามด้วยชื่อบทความภาษาอังกฤษ (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 16pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) จากนั้นเว้น 1 บรรทัด ตามด้วยชื่อผู้ประพันธ์ (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt ตัวเข้มกลางหน้ากระดาษ) ภาควิชา/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) และที่อยู่/ประเทศ(ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) จากนั้นระบุ email address ของผู้พิมพ์/ประสานงาน (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 10pt กลางหน้า) หัวข้อเรื่องแต่ละข้อ (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 15pt หน้าชิดขอบซ้าย) โดยใช้หมายเลขแบบอินดู อารบิก (1, 2, 3,...) ไม่ใช่แบบเลขโรมัน (I, II, III, ...).

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สรุปอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์และมีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับคนอื่นๆ ที่จะสามารถที่จะทำให้เกิดการทดลองซ้ำได้

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับชื่อหัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 15pt, ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย เรียงลำดับหัวข้อด้วย 1, 2, 3,... (ไม่ใช่ I, II, III,...) การขึ้นหัวข้อใหม่แต่ละครั้งให้เว้น 1 บรรทัด สำหรับสมการคณิตศาสตร์ให้จัดเรียงด้วย (1), (2), (3),...

3.1 หัวข้อย่อยลำดับที่ 1

หัวข้อข้อย่อยลำดับที่ 1 ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย

3.1.1 หัวข้อย่อยลำดับที่ 2

หัวข้อข้อย่อยลำดับที่ 2 ใช้ตัวอักษร Angsana

New ขนาด 13pt ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย

3.2 ตาราง รูป และการอ้างอิง

สำหรับรูปภาพตารางและการอ้างอิงตัวเลขควรเป็นเลขดังนี้ รูปที่ 1 รูปที่ 2, ... ฯลฯ (ที่กึ่งกลาง) และตารางควรจะเป็นเลขดังนี้ Table1, Table2 ... ฯลฯ (ที่ด้านซ้าย) การอ้างอิงในบทความให้ใช้เครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม เช่น [2] จะต้องเรียงลำดับหมายเลขอ้างอิงจากหมายเลขน้อยไปสู่หมายเลขมากให้ถูกต้อง การอ้างอิงหมายเลขที่มีลำดับติดต่อกัน ตัวอย่างเช่น[1-5]

4. สรุปผล

เพื่อให้ทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์มีรูปแบบที่ตรงกัน ผู้ประพันธ์จะต้องจัดทำบทความตามต้นแบบ ไม่เช่นนั้นบทความของท่านจะถูกส่งคืนเพื่อปรับปรุงรูปแบบให้ตรงกับต้นแบบนี้ขอขอบคุณท่านสำหรับการให้ความร่วมมือ

5. กิตติกรรมประกาศ

ในส่วนนี้ไม่จำเป็นต้องมี แต่ท่านสามารถใช้ส่วนนี้ในการนำเสนอให้ทราบถึงผู้ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยของท่าน เช่น นักศึกษาที่มีส่วนร่วม ผู้ที่มีส่วนร่วมจากภายในหรือภายนอก หรือองค์กรที่ให้ทุนสนับสนุน

6. หลักเกณฑ์ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงกำหนดให้ใช้ ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt และเขียนตามตัวอย่างของเอกสารอ้างอิงในแม่แบบนี้ กรณีที่เป็น

เอกสารอ้างอิง [1] หมายถึง “หนังสือ”

เอกสารอ้างอิง [2] หมายถึง “รายงาน”

เอกสารอ้างอิง [3] หมายถึง “วารสาร”

เอกสารอ้างอิง [4] หมายถึง “ประชุมวิชาการ”

เอกสารอ้างอิง [5] หมายถึง “มาตรฐาน”

เอกสารอ้างอิง [6] หมายถึง “เว็บไซต์”

เอกสารอ้างอิง [7] หมายถึง “ปริญญาโท”

เอกสารอ้างอิง [8] หมายถึง “วิทยานิพนธ์”

เอกสารอ้างอิง [9] หมายถึง “คุณวุฒิบัตร”

โดยในกรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทยให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

เอกสารอ้างอิง

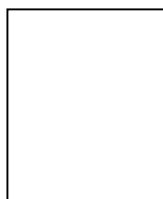
- [1] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, Power Electronic, John Wiley and sons, 1995.
- [2] The Federation of Thai Industries, Executive Summary: Eco-industrial development under the cost to develop green industry, 2013(in Thai).
- [3] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot-spot temperature,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, no.3, pp.1257-1264, Jul. 2009.
- [4] C. Tangsiriworakul, S. Tadsuan, “A Comparison of iron losses and acoustic noise supplied by pwm inverter of dm and spwm techniques,” in *Proc. International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2009)*, China, 8-11Aug. 2009, pp. 105-110.
- [5] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65°C or 55°C average winding rise, ANSI/IEEE C57.91-1981.
- [6] Wikipedia. (2010, Jun. 28). “Biodiesel” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- [7] K. Khianjutturut, W. Chaingam, S. Damrongnavavith, S. Nitcumharn, and A. Duangin, “The software implement for electric energy data logger of single-phase kilowatt-hour meter

with image signal processing,” Student’s Project, Dep. Elec. Eng., Southeast Asia Univ., 2014 (in Thai).

- [8] C. Bundanphrai, “A comparison of electric power and temperature on three- phase induction motor by varying wind flow with damper and pwm inverter supply,” M.S. Thesis, Southeast Asia Univ., 2014 (in Thai).
- [9] V. Kinnares, “Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in pwm feed induction motors,” Ph.D. Dissertations, Univ., Nottingham, 1997.

หมายเหตุ กรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

ประวัติผู้ประพันธ์ :



ผู้ประพันธ์ระบุประวัติโดยย่อของตนเอง ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับประวัติศึกษาตำแหน่ง สถานที่ทำงาน และงานวิจัยที่สนใจ พร้อม

รูปถ่าย ขนาด 2 ซม. x 2.4 ซม.

Guidelines for Contributors

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is published two-annually by Southeast Asia University. All articles are considered for publication in this journal will have to follow the following conditions, 1) they have not been published elsewhere and 2) they are not currently being submitted for consideration in any other journals. All articles are independently assessed (peer reviewed) by at least three specialists in their relevant fields. The editor board reserves a privilege to ask the authors to improve their articles, and to decide whether submitted articles should be published or not.

Types of work published

1. Research articles by individual or team researchers.
2. Academic articles include review articles, technical articles, and special articles on science and technology.

Manuscripts

Manuscripts must be prepared to meet professional standards using word processors on Windows. The table, diagrams and illustrations in the contributed manuscripts should be in a camera-ready format. For the template article can be downloaded from the website <http://saujournalst.sau.ac.th>

Submission

The manuscripts of the prospective contributors should be submitted to the editor-in-chief. Authors must submit manuscript (without name, address and authors, biography notifications) with electronic file (PDF) and "Copyright Transfer Form".

- Directly to the editor-in-chief of SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Faculty of Engineering, Southeast Asia University.

- By mail to the editor-in-chief of SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Faculty of Engineering, Southeast Asia University, 19 / 1, Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand.

- By online at Website saujournalst.sau.ac.th

All papers submitted to SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY are subject to peer review. If revised or accepted of article should be submitted the manuscript (PDF and DOC) to the editor-in-chief. You may contact us using the information listed at Southeast Asia University, Tel.#: 0-2807-4500-27 EXT 331, FAX : 0-2807-4528 19/1, Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand; Email address : SAUJournalST@sau.ac.th

Manuscripts of paper writing as english language for SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Title of the Paper

Author's Names

Department, University

Address, (country)

Corresponding author : e-mail address

Received: / Revised: / Accepted:.....

บทคัดย่อ นี้คือต้นแบบสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows โดยจัดระยะขอบบน 3.0 ซม. ระยะขอบขวา ขอบซ้ายและขอบล่าง 2.5 ซม. โดยมีการตั้งค่าขนาดของกระดาษ Custom size (19 ซม.x26.5 ซม.) หลัง “คำสำคัญ :” ให้กำหนดรูปแบบเป็น 2 สดมภ์ ด้วยความกว้าง 6.73 ซม. และระยะห่างสดมภ์ 0.5 ซม. พิมพ์บทความด้วยอักษร Angsana New ขนาด 13pt ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า และสำหรับคำบทคัดย่อ คำสำคัญ และ**เอกสารอ้างอิง** ให้กำหนดเป็นตัวเข้ม-เอียงด้วยอักษร Angsana New ขนาด 14pt

คำสำคัญ : เว้น 1 บรรทัดหลังจากบทคัดย่อ แล้วพิมพ์คำสำคัญของบทความ (4-5 คำ)

Abstract This is a template of your full paper for publishing on SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY. Use Microsoft Word for Windows. Leave 3.0 cm. margins from the top, 2.5 cm. from the right side, left side and bottom. Please adjust the page setup to custom size (19 cm.x26.5 cm.) sheet. Use double-column format width of 6.73 cm. with a space of 0.5 cm. between columns. Use 11 point Times New Roman font in typing the abstract. The length of paper should not be longer than 15 pages. For the headings, such as **Abstract**, **Keywords** and **References** use 12 point Times New Roman bold-Italic.

Keywords : Please leave one blank line after the Abstract and write your keywords (4-5 words).

1. Introduction

The title of the paper you must use 16 point Times New Roman in Bold at the center of the page. Leave one blank line and type the authors' names, department and country in capital letters with 11 point Times New Roman in Bold and centered. For the corresponding author, use 11 point Times New Roman centered. The heading of each section should be printed in small 12 point, left justified, bold Times New Roman font. Use Hindu-Arabic number (1, 2, 3,...) for the section's numbering and not the Roman Numerals (I, II, III, ...).

2. Materials and Methods

Brief description of the experimental procedure and analysis and sufficient information for others to be able to reproduce the experiments.

3. Results and Discussion

For section heading, use 12 point left justified Times New Roman in bold, numbered as follows : 1, 2, 3,... (not I, II, III,...). Please leave one blank spaces between successive sections. Mathematical equations must be numbered as follows : (1), (2), (3)....

3.1 Subsection

For subsection heading, use 11 point left justified Times New Roman in bold.

3.1.1 Sub-subsection

When including a sub-subsection, use 11 point left justified Times New Roman in bold.

3.2 Figures, Tables and Reference

Figures should be numbered as follows: Fig.1, Fig.2, ... etc.(at center) and Tables should be numbered as follows: Table.1, Table.2, ... etc.(at Left). Type the corresponding number of references in square brackets.

4. Conclusion

Please follow our instructions faithfully, otherwise, you have to resubmit your paper. This will enable us to maintain uniformity in the journal. Thank you for your cooperation.

5. Acknowledgement

This section is optional. You can use this section to acknowledge support you have had for your research from your colleagues, student's participation, internal or external partners' contribution or funding organization.

6. Rules for writing reference

The letter, in 11 point Times New Roman, will be used for writing reference and the reference in this template being subject to the condition as below :

Ref. [1] stand for "Book"

Ref. [2] stand for "Report"

Ref. [3] stand for "Journal"

Ref. [4] stand for “Conference”

Ref. [5] stand for “Standard”

Ref. [6] stand for “Website”

Ref. [7] stand for “Student’ Project”

Ref. [8] stand for “Thesis”

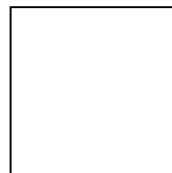
Ref. [9] stand for “Dissertation”

In case of reference written in Thai being used. It need to be translated to English and put the word “(in Thai)” at the back of reference.

References

- [1] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, Power Electronic, John Wiley and sons, 1995.
- [2] The Federation of Thai Industries, Executive Summary: Eco- industrial development under the cost to develop green industry, 2013. (in Thai)
- [3] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot- spot temperature,” IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 24, no.3, pp. 1257-1264, Jul. 2009.
- [4] C. Tangsiriworakul, S. Tadsuan, “A Comparison of iron losses and acoustic noise supplied by pwm inverter of dm and spwm techniques,” in Proc. International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2009), China, 8-11 Aug. 2009, pp. 105-110.
- [5] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65 °C or 55 °C average winding rise, ANSI/ IEEE C57.91-1981.
- [6] Wikipedia. (2010, Jun. 28). “Biodiesel” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- [7] K. Khianjutturut, W. Chaingam, S. Damrongnavavith, S. Nitcumharn, and A. Duangin, “The software implement for electric energy data logger of single-phase kilowatt-hour meter with image signal processing,” Student’s Project, Dep. Elec. Eng., Southeast Asia Univ., 2014. (in Thai)
- [8] C. Bundanphrai, “A comparison of electric power and temperature on three-phase induction motor by varying wind flow with damper and pwm inverter supply,” M.S. Thesis, Southeast Asia Univ., 2014. (in Thai)
- [9] Kinnares, “Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in pwm feed induction motors,” Ph. D. Dissertations, Univ., Nottingham, 1997.

Authors’ Biography:



The author should include a brief introduction about his/ her interest in the research topic and a scanned 2 cm. x 2.4 cm.

photo attached the original manuscript



หมายเลขบทความ
(เฉพาะเจ้าหน้าที่กรอก)

แบบฟอร์มใบรับรองบทความ SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

1. ประเภทของบทความ (Article type)

☐ วิจัย (Research) ☐ วิชาการ (Academic)

2. สาขาบทความที่ส่ง

☐ Electrical Engineering ☐ Electronic & communication Engineering ☐ Industrial Engineering
☐ Civil Engineering ☐ Computer Science & Engineering ☐ Mechanical Engineering
☐ Agricultural Engineering ☐ Occupational Health & Safety ☐ Environment Engineering
☐ Energy ☐ Etc..

3. ชื่อบทความ (Article title)

ภาษาไทย :

English :

4. ชื่อ-สกุลของผู้รับผิดชอบประสานงาน (Name-Family name of corresponding author):

:

5. สถานที่ติดต่อของผู้รับผิดชอบประสานงาน (Contact location of corresponding author)

ที่อยู่ (Address):

.....

โทรศัพท์ (Tel.) โทรสาร (Fax) E-mail:

6. รายชื่อและที่อยู่ของเจ้าของบทความทั้งหมด (List of names and addresses of all article authors)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	Name-Family name. (Scripted)	หน่วยงาน (Affiliation)	โทรศัพท์ (Tel.)	E-mail
1.				
2.				
3.				

7. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน (Proposed a list of reviewers/evaluators)

ชื่อ-สกุล (Name-Family name)	หน่วยงาน (Affiliation)	โทรศัพท์ (Tel.)	E-mail
1.			
2.			
3.			
4.			

8. การรับรองบทความ (Certification of article)

☐ ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

(I certify that this original article has not been previously published or submitted in any other journal.)

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ (I hereby certify that the above statement is true in all respects.)

ลงชื่อ (Sign).....ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author)

()

วัน (date)..... เดือน (month)..... พ.ศ. (year).....

หมายเหตุ ส่งแบบฟอร์มนี้มาพร้อมกับบทความตามช่องทางในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน (การส่งบทความ)

Note: Submit this form with your article according to the instructions for authors. (Article submission)



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิก SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรสาร E-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

☐ ปี (2 ฉบับ/ปี)

500 บาท

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงิน(ตัวอักษร)

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเสร็จการจ่ายเงินมาที่ E-mail Address : saujournalst@sau.ac.th

พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

สำนักวิจัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ 0-2807-4500-27 ต่อ 404 โทรสาร 0-2807-4528 E-mail Address : saujournalst@sau.ac.th

สาขาวิชาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เปิดสอน
ปริญญาเอก

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (ปร.ด)

ปริญญาโท

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.ม.)

สาขาวิชาบริหารงานวิศวกรรมการก่อสร้าง (วศ.ม.)

ปริญญาตรี

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (IoT) (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (วศ.บ.)

สาขาวิชาดิจิทัลมีเดีย (วท.บ.)

สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรม (วท.บ.)



มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
**SOUTHEAST ASIA
UNIVERSITY**

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม 106 หนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ 02-807-4500-27 ต่อ 404

Email : saujournalst@sau.ac.th

