Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.14 No.2
May – August 2026

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2569

ISSN 2774-0617 (Online)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2569 Vol. 14 No. 2 May – August 2026

ISSN (Online) 2774–0617

ความเป็นมา

ด้วยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีนโยบายสนับสนุนการเผยแพร่บทความจากผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาความรู้แก่สังคม โดยเฉพาะภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำวารสารวิชาการ คือ วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (เดิมชื่อ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์รังสรรค์ เลิศในสัตย์

ขอบเขตเนื้อหา

บทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีวิศวกรรม เทคโนโลยีอุตสาหกรรม เทคโนโลยีมัลติมีเดีย เทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์เคมี และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน (ปีละ 3 ฉบับ)

- ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน
- ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม
- ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม

เจ้าของ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น (Thai-Nichi Institute of Technology : TNI)

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ก้องกิจ วรพุทธพร สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

1. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหฌนัดกิจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครวัต ศิริสุข จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. รองศาสตราจารย์ ดร.จีรนุช เสงี่ยมศักดิ์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
7. ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหรู สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
8. ศาสตราจารย์ ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9. รองศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
10. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
11. รองศาสตราจารย์ ดร.พยุง มีสัจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิรดล ศิริธร มหาวิทยาลัยมหิดล
13. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ นักวิชาการอิสระ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิฐิณัฐ ภัคพรหมินทร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

คณะกรรมการดำเนินงาน

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รชตะ รุ่งตระกูลชัย
3. อาจารย์ ดร.สวรรยา สุวรรณวงศ์
4. อาจารย์ ดร.อภิชญา นิ้มคุ้มภัย
5. อาจารย์ ดร.ภาสกร อภิรักษ์วรพินิต
6. อาจารย์ ดร.เพ็ญพิมล วิไลรัตน์
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมราวดี ทัพพุน
8. นางสาวสุพิศ บายคายคม
9. นางสาวใกล้รุ่ง หมายชื่น
10. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒนกุล
11. นางสาวอาริสา จิระเวชถาวร
12. นางสาวยศวดี ใจดี

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Tel. 0-2763-2600 (Ext. 2704, 2752, 2782)

Website : https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน

กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

ในยุคที่เทคโนโลยีดิจิทัลก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและอุตสาหกรรมทั่วโลกกำลังเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบอัจฉริยะ วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) ยังคงมุ่งมั่นทำหน้าที่เป็นเวทีทางวิชาการที่สนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัยเชิงลึกด้านวิศวกรรมและนวัตกรรมดิจิทัล งานวิจัยร่วมสมัยในสาขานี้มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอัจฉริยะ การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต และการยกระดับความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมในระดับโลก

วารสารJEDTให้ความสำคัญกับงานวิจัยที่ตอบโจทย์ความท้าทายใหม่ของภาคอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาระบบอัตโนมัติขั้นสูง การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในสายการผลิต การออกแบบระบบควบคุมที่มีความยืดหยุ่นสูง รวมถึงการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลที่รองรับการเชื่อมต่อข้อมูลแบบเรียลไทม์ งานวิจัยหลายชิ้นยังนำเสนอแนวทางใหม่ด้านวิศวกรรมข้อมูล ระบบไซเบอร์กายภาพ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม4.0 ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาโรงงานอัจฉริยะในอนาคต

บทความทุกเรื่องผ่านการประเมินอย่างเข้มงวดโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อให้มั่นใจว่าผลงานมีคุณภาพเชิงวิชาการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ทั้งในภาคการผลิต ภาคบริการ และการพัฒนาระบบดิจิทัลระดับองค์กร กองบรรณาธิการเชื่อว่าผลงานในฉบับนี้จะช่วยขยายองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัลให้ก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง และเป็นประโยชน์ต่อทั้งนักวิจัย ผู้ปฏิบัติงาน และผู้พัฒนาเทคโนโลยีในสาขาที่เกี่ยวข้อง

กองบรรณาธิการขอเชิญชวนนักวิจัยร่วมส่งผลงานในฉบับต่อไป เพื่อร่วมกันผลักดันการพัฒนานวัตกรรมด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีดิจิทัลให้เติบโตอย่างยั่งยืน และมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมในอนาคต

อาจารย์ ดร.ก้องกิจ วรพุทธพร

บรรณาธิการ

Editorial Message

In an era defined by rapid advancements in digital technologies and the global transition toward intelligent industrial systems, the Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT) remains committed to its role as a scholarly platform for disseminating in-depth research in engineering and digital innovation. Contemporary research in these fields plays a crucial role in the development of smart infrastructure, the enhancement of production efficiency, and the strengthening of industrial competitiveness on a global scale.

JEDT places particular emphasis on research that addresses emerging industrial challenges, including advanced automation, the application of artificial intelligence in manufacturing processes, the design of highly adaptable control systems, and the development of digital platforms capable of real-time data integration. Several studies featured in this issue also introduce new approaches in data engineering, cyber-physical systems, and Industry 4.0 technologies—key foundations for the evolution of future smart factories.

All articles in this issue have undergone rigorous peer review by experts in relevant fields to ensure academic quality and practical applicability across manufacturing, service sectors, and enterprise-level digital development. The editorial board is confident that these contributions will advance knowledge in engineering and digital technologies, offering meaningful insights for researchers, practitioners, and technology developers.

The editorial board warmly invites scholars to submit their work for future issues, contributing to the ongoing advancement of engineering and digital innovation and supporting the sustainable development of future industrial systems.

Kongkij Voraputhaporn, Ph.D.
Editor-in-Chief

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

สารบัญ

1 **Development of Decision Support System Using ATP-DSS Techniques to Reduce Delays and Efficiency Improvement in the Order Promising Process with Make-to-Order Manufacturing Case study: An Electronics Manufacturer**

Phimon Yensom, Detcharat Sumrit

20 **Parameter Identification for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors in Air Conditioners Emphasis on the Effects of Magnetic Cross-Coupling and Induced Electromotive Force Harmonics**

Jadsadakorn Thitipumdacha, Surapong Suwankawin

39 **Design and Construction of an Automation System for Battery Drop Test Machine**

Tharadol Muyota, Tassama Mongkoldee, Shutchon Premchaisawatt

53 **A Machine Learning Approach for Predicting Thermal Comfort in a Bangkok Academic Library: Integrating Logit and Random Forest Models**

Wipawadee Wongsuwan, Pornchai Triracheewin

66 **Application of Microbubble Technology for Improved Efficiency and Reduction in Treatment Time of 1-Methylcyclopropene for Postharvest Ripening Delay of Banana**

Hafnee Lateh, Prathan Srichai, Parinya Panich, Prapaipis Tawonsri

77 **Enhancing Accessibility for Visually Impaired Users through a Hybrid Real-Time Multi-Object Recognition System**

Pitiphat Joembunthanaphong, Kritsada Kaewwadpring

100 **Thai Antipyretic Medicinal Plant Recognition Using CNNs Integrated into a Line Chatbot**

Walairach Nunsong, Surasit Sakda, Taravichet Titijaroonroj, Donyarut Kakanopas

114 **Development of an n8n-Based Automated Framework for Penetration Testing Using Large Language Models and Structured Evidence**

Annop Monsakul

การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สำหรับลดความล่าช้าและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อภายใต้การผลิตแบบตามสั่ง กรณีศึกษาบริษัทผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์

พิมล เย็นสม[1*] เดชรัตน์ สัมฤทธิ์[2]

[1,2]กลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม, ประเทศไทย*

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: phimon.phromsolod@sony.com

รับต้นฉบับ: 15 ธันวาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 16 พฤษภาคม 2569; ตอบรับบทความ: 18 พฤษภาคม 2569
เผยแพร่ออนไลน์: 27 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

สภาพปัจจุบันของบริษัทผู้ผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์กำลังเผชิญปัญหาความล่าช้าในการตอบกลับปริมาณที่ให้สัญญาได้กับลูกค้าจากกลยุทธ์การผลิตแบบทำตามสั่ง มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการให้บริการลูกค้าและขีดความสามารถทางการแข่งขัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ซึ่งเป็นหลักการของการนำระบบสารสนเทศที่ช่วยในการตัดสินใจมาใช้บริหารจัดการงานสินค้าคงคลัง สำหรับแก้ไขปัญหาความล่าช้าในการตอบกลับปริมาณชิ้นส่วนที่พร้อมให้สัญญาได้ซึ่งเกิน 24 ชั่วโมง ของกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อของบริษัทผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ โดยมุ่งเน้นการลดข้อบกพร่องและความแปรปรวนของกระบวนการดังกล่าว การศึกษาได้พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบทันที โดยบูรณาการเทคนิคการจัดการปริมาณที่ให้สัญญาได้ หลักการหกซิกมา การประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน และแนวทางการปรับรื้อกระบวนการทางธุรกิจ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการประเมินระดับสินค้าคงคลัง กำลังการผลิต และความพร้อมของชิ้นส่วนจากผู้ส่งมอบชิ้นส่วนแบบเรียลไทม์ ผลการวิจัยพบว่า ระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สามารถลดเวลาในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อได้โดยเฉลี่ย 22.23 นาทีต่อคำสั่งซื้อ หรือร้อยละ 84.62 และเพิ่มอัตราการตอบกลับภายใน 24 ชั่วโมง ได้เฉลี่ยร้อยละ 69.71 นอกจากนี้ ยังสามารถลดข้อบกพร่องได้ร้อยละ 100 หรือขจัดข้อผิดพลาดจนหมดสิ้น และทำให้ความแปรปรวนของกระบวนการมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยค่าความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการ (Cpk) เพิ่มขึ้นจาก 0.95 เป็น 1.37 และผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า กิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม (VA) เพิ่มขึ้น 7 ขั้นตอน หรือร้อยละ 100 ในขณะที่กิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น (NNVA) ลดลง 7 ขั้นตอน หรือร้อยละ 87.50

คำสำคัญ: ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ การจัดการปริมาณที่ให้สัญญาได้ การปรับรื้อกระบวนการทางธุรกิจ การผลิตแบบลีน หกซิกมา

Development of Decision Support System Using ATP-DSS Techniques to Reduce Delays and Efficiency Improvement in the Order Promising Process with Make-to-Order Manufacturing: Case Study of an Electronics Manufacturer

Phimon Yensom[1*] Detcharat Sumrit[2]

[1*,2]*Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand*

*Corresponding author e-mail: phimon.phromsolod@sony.com

Received: 15 December 2025; Revised: 16 May 2026; Accepted: 18 May 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

The case study company's current situation, which is an electronic components manufacturer, who is facing a delay of an available-to-promise (ATP) response times from make-to-order (MTO) production, and the impact of customers service efficiency and competitiveness. This research addressed the development of decision support systems using ATP-DSS techniques which is a principle of applying the information system to manage the inventory for prolonged available-to-promise response times, exceeding 24 hours, within an electronics manufacturer's order promising process (OPP), aiming to reduce delay defects and variability. A Real-Time Decision Support System was developed, integrating ATP-DSS techniques, Six Sigma principles, Lean methodologies (ECRS), and Business Process Reengineering (BPR). This integration facilitated enhanced, real-time assessments of inventory levels, production capacity, and supplier part availability. Results demonstrated a significant OPP reduction average 22.23 minutes per order, or 84.62%, with OPP response times within 24 hours improving by an average of 69.71%. Defect rates were eliminated, achieving a 100% reduction or zero mistakes, and process variability stabilized, with the Process Capability Index (Cpk) increasing from 0.95 to 1.37. Moreover, the value-added (VA) activities increased by 7 steps (100%), and necessary but non-value-added (NNVA) activities decreased by 7 steps (87.50%).

***Keywords*:** A decision support system, Available-to-promise, Business process reengineering, Lean manufacturing, Six sigma

บทนำ

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยกำลังเผชิญกับแนวโน้มการแข่งขันที่รุนแรง ภายใต้แรงกดดันอย่างหนักของตลาดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากความต้องการของลูกค้าที่ผันผวน ทั้งด้านการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงด้วยความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนนี้จำเป็นต้องมีห่วงโซ่อุปทานที่คล่องตัวและตอบสนองความต้องการได้ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการยกระดับอุตสาหกรรมไปสู่ความเป็นเลิศในยุคถัดไป [1] โดยเฉพาะการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาบูรณาการร่วมกับแนวคิด Lean Six Sigma เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน [2] หากมีการส่งมอบสินค้าล่าช้ากว่าระยะเวลาที่กำหนด ความล้มเหลวนี้อาจนำไปสู่การผิดสัญญาซื้อขาย เกิดค่าปรับที่บริษัทต้องจ่ายในจำนวนเงินที่สูง หรือก่อให้เกิดความไม่พึงพอใจของลูกค้าได้ ซึ่งการบูรณาการแนวคิดลีน (lean) และหกซิกมา (six sigma) เข้าด้วยกัน [3] ถือเป็นกลยุทธ์สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและสร้างความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมการบริการและการผลิต [4] จากกรณีศึกษาซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กลยุทธ์การผลิตตามคำสั่งซื้อ (Make-to-Order: MTO) ร่วมกับการวางแผนทรัพยากรองค์กร (Enterprise Resource Planning: ERP) สำหรับสัญญาการสั่งซื้อ ซึ่งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเซมิคอนดักเตอร์นั้น ระบบการจัดการปริมาณที่ให้สัญญาได้ ถือเป็นกลไกสำคัญในการบริหารจัดการความต้องการของลูกค้าภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากร [5] ซึ่งนโยบายการให้สัญญาคำสั่งซื้อนี้ต้องอาศัยการวางแผนที่มีประสิทธิภาพ [6] โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนของรายการชิ้นส่วน (Bill of Materials: BOM) สูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว BOM ของแต่ละรายผลิตภัณฑ์มีชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 900 ชิ้นส่วน และในบางชิ้นส่วนประกอบใช้ BOM ร่วมกันกับอีกหลาย ๆ ผลิตภัณฑ์ ซึ่งเน้นย้ำถึงความซับซ้อนของผลิตภัณฑ์ โดยไม่มีสินค้าคงคลังระหว่างดำเนินการ (Work in Process: WIP) และสินค้าสำเร็จรูป (finished goods) แผนกจัดซื้อมีหน้าที่ตรวจสอบความพร้อมของปริมาณชิ้นส่วนประกอบทั้งหมดเพื่อกำหนดการตอบกลับคำสั่งซื้อและวันที่ส่งมอบที่แม่นยำ โดยการกำหนดว่าสามารถยอมรับคำสั่งซื้อของลูกค้าได้หรือไม่ หากยอมรับได้จะกำหนดวันที่เริ่มการผลิต จากนั้นแผนกวางแผนการผลิตจะใช้จำนวนชิ้นส่วนประกอบที่ได้จากแผนกจัดซื้อมากำหนดแผนการผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ให้กับฝ่ายผลิตและกำหนดวันที่ส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายการให้สัญญาคำสั่งซื้อที่ต้องอาศัยการวางแผนกำลังการผลิตที่มีประสิทธิภาพ [7] ทั้งนี้ตามข้อมูลคำสั่งซื้อจากลูกค้าและสถานะการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้าในระหว่างช่วงปี พ.ศ. 2563–2566 ของบริษัทกรณีศึกษารายละเอียดตามตารางที่ 1

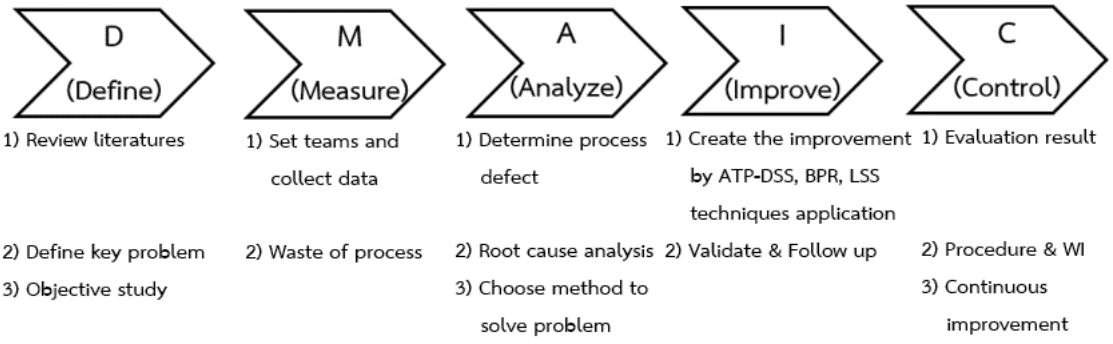
ตารางที่ 1: ข้อมูลคำสั่งซื้อจากลูกค้าและสถานะการตอบกลับคำสั่งซื้อของลูกค้าช่วงปี พ.ศ. 2563–2566 ของบริษัทกรณีศึกษา

Year (B.E.)	Order Promised (≤ 24 hrs)	Order Promised (> 24 to 48 hrs)	Order Non-Promise	Total Order Intake
2563	22,262	9,541	1,667	33,470
2564	21,864	11,773	2,266	35,903
2565	21,332	14,222	4,474	40,028
2566	23,720	14,847	4,329	42,923
Average	**22,295**	**12,603**	**3,184**	**38,081**

แหล่งที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา

จากตารางที่ 1 พบว่า บริษัทกรณีศึกษาได้รับคำสั่งซื้อจากลูกค้าโดยเฉลี่ยรวม 38,081 รายการต่อปี ในจำนวนนี้มีคำสั่งซื้อเฉลี่ยถึง 3,184 รายการต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 8.40 ของคำสั่งซื้อทั้งหมดที่ตอบกลับล่าช้าเกินกว่าระยะเวลาที่กำหนด แม้จะมีระบบ ERP แต่บริษัทก็ยังประสบปัญหาในการดำเนินการตามคำสั่งซื้อ เหตุเพราะผู้ส่งมอบชิ้นส่วนมีข้อจำกัดในการส่งมอบวัตถุดิบไม่ตรงเวลา โดยปัญหาสำคัญ คือ อัตราคำสั่งซื้อที่ได้รับการยืนยันร้อยละ 56.53 (เฉลี่ย 12,603 รายการต่อปี) มีเวลาตอบสนองของลูกค้าเกินกว่า 24 ชั่วโมง โดยการเจรจาต่อรองแบบรายวัน ซึ่งส่งผลกระทบเชิงกลยุทธ์ต่อองค์กรทั้งการขาดโอกาสทางการเติบโตและการสร้างผลกำไรของภาคธุรกิจ รวมถึงการสูญเสียความได้เปรียบทางการแข่งขันให้กับคู่แข่งทางธุรกิจอีกด้วย

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สำหรับการแก้ไขปัญหาความล่าช้า (delay) ข้อบกพร่อง (defect) และความแปรปรวน (deviation) ในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ (Order Promising Process: OPP) ของชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ โดยพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support Systems: DSS) ซึ่งระบบสนับสนุนการตัดสินใจถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการจัดการข้อมูลที่ซับซ้อนภายใต้ยุคเทคโนโลยีอุบัติใหม่ [8] โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ ให้กับฝ่ายจัดซื้อด้วยเทคนิคการจัดการปริมาณที่พร้อมให้สัญญาได้ (Available-to-Promise: ATP) ร่วมกับบูรณาการหลักการของ Six sigma และการประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน (Lean ECRS) ซึ่งเป็นแนวทางสากลในการลดข้อบกพร่องและเพิ่มศักยภาพการดำเนินงานของกระบวนการ OPP ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการปรับปรุงประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [9] และการปรับรื้อกระบวนการทางธุรกิจ (Business Process Reengineering: BPR) [10] โดยการเลือกบูรณาการเครื่องมือเหล่านี้ร่วมกันเป็นการผสมผสานเชิงกลยุทธ์ที่ช่วยให้องค์กรเปลี่ยนจากการดำเนินงานแบบตั้งรับเป็นเชิงรุกมากขึ้น ซึ่งแต่ละเครื่องมือจะอุดช่องโหว่ของกันและกัน เช่น ATP-based DSS ช่วยอุดช่องโหว่ด้านการส่งมอบ การจัดการด้านฐานข้อมูลสารสนเทศ และการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจเชิงปริมาณ ขณะที่ BPR ใช้ปรับปรุงเชิงโครงสร้างในกระบวนการที่ล่าช้า และ Lean Six Sigma ช่วยลดความล่าช้า ความแปรปรวน และข้อบกพร่องในการปฏิบัติงานของพนักงาน ทั้งนี้การศึกษาวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาจริงที่ให้มุมมองใหม่ด้านการจัดการคำสั่งซื้อเชิงระบบ อีกทั้งยังเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการประเมินระดับสินค้าคงคลัง กำลังการผลิต และความพร้อมของชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์จากผู้ส่งมอบชิ้นส่วนแบบทันทีตรงเวลา ช่วยให้บริษัทประเมินความสามารถในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างแม่นยำและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดการวิจัย (conceptual framework) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1: กรอบแนวคิดการวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการวิจัย ใช้หลักการของ Six sigma ในการศึกษาสภาพปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง และความแปรปรวน ของกระบวนการ OPP ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับในการลดความสูญเสีย [11] และเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมในปัจจุบัน [12] การเก็บข้อมูลด้านระยะเวลาในการตรวจสอบความพร้อมของปริมาณชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถให้สัญญาได้โดยกำหนดขั้นตอนที่ใช้เวลานานและขาดประสิทธิภาพ วิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกระบวนการ OPP เพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับการลดเวลาความสูญเสียในกระบวนการผลิตเพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการดำเนินงาน การออกแบบพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการตอบกลับสัญญาการสั่งซื้อของฝ่ายจัดซื้อตามหลักการระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการประยุกต์ใช้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ในยุคดิจิทัล [13] มาแก้ไขระบบการประเมินผล [14] เปรียบเทียบผลการดำเนินงาน และสรุปผลการใช้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ในการบริหารจัดการชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์คงคลังให้สอดคล้องกับความต้องการและเงื่อนไขการสั่งซื้อของลูกค้า ในการวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดวิธีวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอนตามหลัก Six sigma ที่ใช้ปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น

โดยการใช้แนวทาง Lean Six Sigma นี้เป็นเครื่องมือสากลที่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อยกระดับคุณภาพได้ในหลากหลายองค์กร โดยประยุกต์ใช้แนวทางกระบวนการ DMAIC [15] ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ กำหนดปัญหา (Define: D), การวัด (Measure: M), วิเคราะห์ (Analyze: A), ปรับปรุง (Improve: I) และควบคุม (Control: C) ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างหลักในการบริหารจัดการโครงการเพื่อมุ่งเน้นการลดความสูญเปล่าและเพิ่มประสิทธิภาพอย่างเป็นระบบ รวมถึงการลดข้อบกพร่องและเพิ่มประสิทธิภาพตามแนวทางบริหารจัดการอุตสาหกรรม ดังนี้

1. ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการ OPP และนิยามปัญหา (Define Step: D)

1.1 ศึกษาขั้นตอนการทำงานและเก็บรวบรวมข้อมูล: เป็นการศึกษากระบวนการและเวลาการทำงานของผู้ปฏิบัติงานในฝ่ายจัดซื้อโดยอาศัยหลักการศึกษางานอุตสาหกรรม [16] เพื่อพิจารณาขั้นตอนในกระบวนการ OPP ปัจจุบัน เวลาการปฏิบัติงานของพนักงานฝ่ายจัดซื้อรายบุคคล จำนวน 27 คน และเวลาการปฏิบัติงานรวมทั้งหมดในทุกขั้นตอนของกระบวนการ OPP โดยผู้วิจัยกำหนดระยะเวลาของการศึกษา ช่วงก่อนการปรับปรุง (As-Is) คือ ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2567 และช่วงหลังการปรับปรุง (To-Be) คือ ตั้งแต่เดือนกันยายนถึงธันวาคม พ.ศ. 2567 ขณะที่ด้านความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูล (data validation) ได้ผ่านการตรวจสอบและทวนสอบโดยผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านของบริษัทกรณีศึกษา

1.2 จัดทำแผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP: เป็นขั้นตอนในการจัดทำแผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP พร้อมแสดงรายละเอียดกิจกรรมและเวลาที่ใช้ ด้วยสัญลักษณ์มาตรฐาน 5 แบบ ซึ่งกำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลแห่งอเมริกา (The American Society of Mechanical Engineers: ASME) และหลักการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมอุตสาหการ ประกอบด้วย การปฏิบัติการ (O) การตรวจสอบ (□) การเคลื่อนย้ายหรือขนถ่าย (⇨) การรอคอย (D) และการจัดเก็บ (▽) และวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกระบวนการ OPP โดยจำแนกเป็น 3 กิจกรรม ประกอบด้วย กิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม (Value Added Activities: VA) กิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่ม (Non-Value Added Activities: NVA) และกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น (Necessary but Non-Value Added Activities: NNVA) [17] ซึ่งการระบุความสูญเสียเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการทำงานให้รวดเร็วยิ่งขึ้น [18]

1.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล: เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลสัดส่วนของปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อที่ตอบกลับล่าช้าเกิน 24 ชั่วโมง และปัญหาในแต่ละขั้นตอน เพื่อนำไปจำแนกปัญหาด้วยแผนภูมิพาเรโต

2. การวัดสภาพปัญหา (Measure Step: M)

ในขั้นตอนนี้จะคำนวณหาค่าเฉลี่ยเวลาทำงานทั้งหมด 16 ขั้นตอน ของผู้ปฏิบัติงานฝ่ายจัดซื้อจำนวน 27 คน แล้วสรุปเวลารวมทั้งหมดของกระบวนการ OPP แล้วคำนวณเทียบสัดส่วนปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อของลูกค้า (order enquiry) ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง กับปริมาณคำสั่งซื้อที่ตอบกลับล่าช้าเกิน 24 ชั่วโมงในปัจจุบัน จากนั้นนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับระดับซิกมา (sigma level) จากความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการ (Cpk)

3. การวิเคราะห์ปัญหา (Analysis Step: A)

ในขั้นตอนนี้ใช้การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ความล่าช้า ข้อบกพร่อง และความแปรปรวนของกระบวนการ OPP ซึ่งทำให้เกิดการตอบกลับคำสั่งซื้อที่ไม่ทันตามความต้องการของลูกค้า ด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผล (cause and effect diagram) หรือแผนผังก้างปลา (fishbone diagram) แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุปัญหาทั้งหมด 5 ขั้นตอน คือ (1) กำหนดประเด็นปัญหา (2) กำหนดกลุ่มปัจจัยหลักของปัญหานั้น ๆ (3) หาสาเหตุของปัญหาของผู้ปฏิบัติงานฝ่ายจัดซื้อ (4) จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุปัญหาด้วยแผนภูมิพาเรโต และ (5) ใช้แนวทางการปรับปรุงปัญหาที่มีผลกระทบสูง

4. การปรับปรุง (Improve Step: I)

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดการแก้ไขปัญหาโดยประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน ในการขจัดความสูญเปล่าซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพองค์กร รวมถึงการบูรณาการเทคนิค Lean Six Sigma เข้ากับการทำงานของระบบอัตโนมัติเพื่อปรับปรุงกระบวนการในธุรกิจบริการและอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและใช้ BPR เพื่อปรับปรุงห่วงโซ่อุปทานให้มีความคล่องตัวมากขึ้นร่วมกับการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สำหรับการแก้ไขปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง และความแปรปรวน ในกระบวนการ OPP ของชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งระบบสนับสนุนการตัดสินใจถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการช่วยบริหารจัดการข้อมูลที่ซับซ้อนภายใต้ยุคเทคโนโลยีอุบัติใหม่ โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบ DSS ให้กับฝ่ายจัดซื้อด้วยเทคนิคการจัดการปริมาณที่พร้อมให้สัญญาได้เพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดในระบบ ERP ซึ่งระบบดังกล่าวถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจและลดความเสี่ยงในการดำเนินงาน โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการพร้อมให้สัญญาการสั่งซื้อหรือ ATP ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในการเพิ่มความสามารถการตอบสนองคำสั่งซื้อในอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนสูง [19] สำหรับการสร้างแนวคิดแบบจำลองเชิงตรรกะ (logic model) ของระบบซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการจัดการคำสั่งซื้อขั้นสูงที่ต้องมีการจำแนกวิธีการและข้อกำหนดที่ชัดเจนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้วิธีการคำนวณโดยตรวจสอบสถานะของปริมาณชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาได้ในคลังสินค้าที่มีอยู่ปัจจุบัน ปริมาณชิ้นส่วนที่กำลังจะเข้ามาเติมจากผู้ส่งมอบชิ้นส่วนและปริมาณชิ้นส่วนที่คาดว่าจะได้รับในอนาคต หักลบด้วยปริมาณชิ้นส่วนที่ให้สัญญาได้แต่ยังไม่ได้ผลิตหรือส่งมอบให้กับลูกค้า รวมถึงปริมาณความต้องการชิ้นส่วนที่สอบถามคำสั่งซื้อใหม่ หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณปริมาณชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาได้และปริมาณสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบกลับคำสั่งซื้อกับลูกค้าได้ทันที ภายใต้แบบจำลองที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของทรัพยากรและการจองทรัพยากรแบบไดนามิก โดยแบบจำลองเชิงตรรกะของระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS นี้ อ้างอิงจากสมการ (1) ดังนี้

$$\text{ATP-DSS} = [\text{CINV}+\text{GPCS}] - [\text{GWDL}+\text{NFC}] \quad (1)$$

ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณปริมาณชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถให้สัญญาได้ ของระบบสนับสนุนการตัดสินใจจะพิจารณาจากตัวแปรดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: ตัวแปรที่เกี่ยวข้องและความหมาย

ตัวแปร	ความหมาย
ATP-DSS	ปริมาณชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาได้
CINV	ปริมาณชิ้นส่วนคงคลัง ณ เวลาปัจจุบัน
GPCS	ปริมาณชิ้นส่วนที่สั่งซื้อเข้ามาใหม่หรือที่คาดการณ์ว่าจะได้รับจากการสั่งซื้อ
GWDL	ปริมาณชิ้นส่วนที่ให้สัญญาแล้วแต่ยังไม่ได้ผลิตและส่งมอบให้กับลูกค้า
NFC	แนวโน้มคำสั่งซื้อใหม่หรือปริมาณสินค้าที่ลูกค้าต้องการตรวจสอบก่อนสั่งซื้อจริง

5. การควบคุม (Control Step: C)

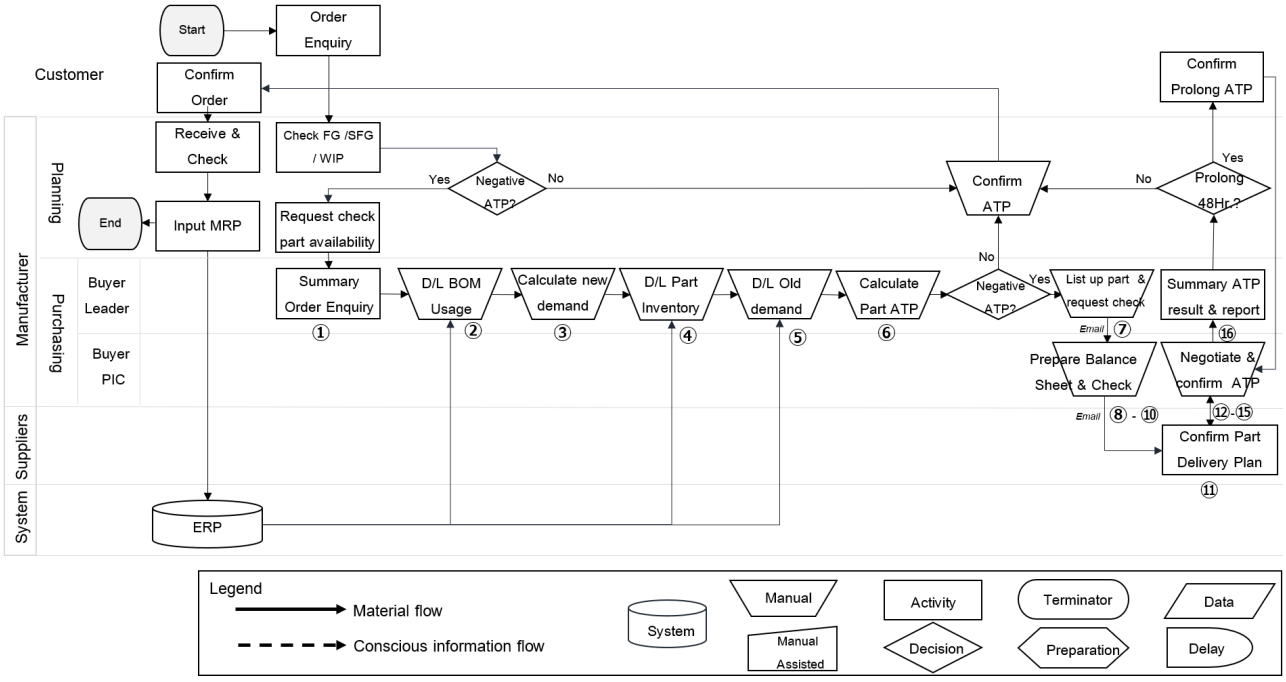
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการควบคุมให้การปรับปรุงเป็นไปตามแผนงานที่กำหนด พร้อมทั้งติดตามและประเมินผลอย่างเป็นระบบ โดยสรุปผลการดำเนินงานผ่านตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ เวลารวมโดยเฉลี่ยของกระบวนการ OPP ต่อคำสั่งซื้อ, ปริมาณสัญญาการสั่งซื้อที่ตอบกลับลูกค้าภายใน 24 ชั่วโมง, อัตราการตอบกลับคำสั่งซื้อ, จำนวนข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดในกระบวนการ, ประสิทธิภาพของกระบวนการ OPP ซึ่งพิจารณาจากระดับซิกมาที่เพิ่มขึ้น, จำนวนกิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม, จำนวนกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่า และจำนวนกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สำหรับการแก้ไขปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง และความแปรปรวน ในกระบวนการ OPP ของชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน ในการขจัดความสูญเปล่า, แนวทางการปรับรื้อกระบวนการทางธุรกิจ รวมถึงการนำเทคนิคของ Six Sigma มาใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการจัดการโครงการแบบลีนโดยใช้โครงสร้าง DMAIC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในองค์กร และการออกแบบพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS เพื่อลดความล่าช้าในกระบวนการ OPP ลดข้อบกพร่องในการทำงาน ลดการทำงานที่ไม่มีความจำเป็นและไม่เกิดประโยชน์ออกจากกระบวนการทำงานเดิม และเพิ่มประสิทธิภาพการตอบกลับคำสั่งซื้อให้กับลูกค้าได้ภายใน 24 ชั่วโมง โดยแบ่งผลการวิจัยและการอภิปรายผล ดังนี้

1. ผลการวิจัย

1.1 ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ (Define Step: D): ผลการศึกษารายละเอียดการปฏิบัติงาน พบว่ามีขั้นตอนในกระบวนการ OPP จำนวน 16 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2: ขั้นตอนในกระบวนการ OPP ของบริษัทกรณีศึกษา

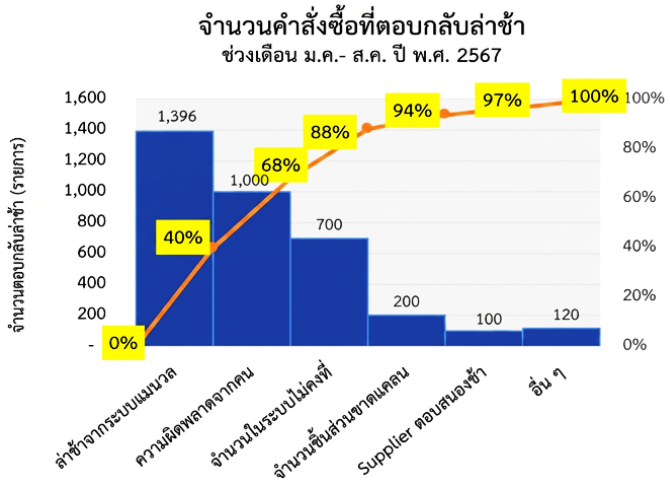
จากรูปที่ 1 พบว่า กระบวนการ OPP ของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นผู้ผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 16 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 รับและสรุปรายการชิ้นส่วนที่สอบถามที่พร้อมตอบกลับคำสั่งซื้อได้ ขั้นตอนที่ 2 สรุปยอดรวมปริมาณชิ้นส่วนตามรายการที่สอบถาม ขั้นตอนที่ 3 ดาวน์โหลด BOM ขั้นตอนที่ 4 ดาวน์โหลดสต๊อกชิ้นส่วน ขั้นตอนที่ 5 ดาวน์โหลดปริมาณชิ้นส่วนที่ตอบกลับคำสั่งซื้อแล้ว ขั้นตอนที่ 6 คำนวณความต้องการชิ้นส่วนที่ให้สัญญาใหม่ ขั้นตอนที่ 7 คำนวณปริมาณชิ้นส่วนที่พร้อมตอบกลับคำสั่งซื้อ ขั้นตอนที่ 8 สรุปปริมาณชิ้นส่วนที่ตอบกลับคำสั่งซื้อไม่ได้ ขั้นตอนที่ 9 จัดทำไฟล์ Balance ทุกรหัสชิ้นส่วนในขั้นตอนที่ 8 ขั้นตอนที่ 10 ส่งไฟล์รายการชิ้นส่วนให้ผู้ส่งมอบชิ้นส่วน (supplier) เพื่อตรวจสอบสต๊อก ขั้นตอนที่ 11 รอผู้ส่งมอบชิ้นส่วนตอบกลับ ขั้นตอนที่ 12 ตรวจสอบและสรุปผล (OK, NG) ขั้นตอนที่ 13 แยกผล NG ไว้ในไฟล์เดียวกัน ขั้นตอนที่ 14 นำผล NG ตามข้อ 13 ใส่รวมในไฟล์ตามขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนที่ 15 สรุปปริมาณชิ้นส่วนทั้งที่พร้อมตอบกลับคำสั่งซื้อได้และไม่ได้ และขั้นตอนที่ 16 ยืนยันหรือปฏิเสธปริมาณสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตอบกลับคำสั่งซื้อได้กับลูกค้า

1.2 ผลการศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ (Measure Step: M): ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP เวลาทำงานเฉลี่ย (As-Is) ของทั้ง 16 ขั้นตอนตามหลักการวิเคราะห์กระบวนการทำงาน และกิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม จำนวนกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่า และกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 ด้านล่าง ผลการศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP ซึ่งแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับกิจกรรมและเวลาที่ใช้ของแต่ละขั้นตอน ด้วยสัญลักษณ์มาตรฐาน 5 แบบ ประกอบด้วย การปฏิบัติการ (O) การตรวจสอบ (□) การเคลื่อนย้ายหรือขนถ่าย (⇨) การรอคอย (D) และการจัดเก็บ (▽) และผลการวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกระบวนการ OPP พร้อมจำแนกเป็นกิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม จำนวน 7 ขั้นตอน กิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่ม จำนวน 1 ขั้นตอน และกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น จำนวน 8 ขั้นตอน อีกทั้งผลการศึกษายังพบว่า ข้อมูลสัดส่วนของปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อที่ตอบกลับล่าช้าเกิน 24 ชั่วโมง โดยจำแนกปัญหาด้วยแผนภูมิพาเรโตเพื่อระบุสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการมากที่สุด สรุปได้ว่า ข้อบกพร่องของความล่าช้าจากกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคน (manual) มากสุดเป็นอันดับแรก คิดเป็นร้อยละ 40 รองลงมาคือ ข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดจากคน (human error) คิดเป็นร้อยละ 28 อันดับถัดมาคือ ปัญหาปริมาณคำสั่งซื้อในระบบไม่คงที่ คิดเป็นร้อยละ 20 ปัญหาจำนวนชิ้นส่วนขาดแคลน (part shortage) คิดเป็นร้อยละ 6 ปัญหาผู้ส่งมอบชิ้นส่วนตอบสนองช้า (supplier slow response) คิดเป็นร้อยละ 3 และอันดับสุดท้ายคือ ปัญหาอื่น ๆ เช่น ระบบประมวลผลนาน คิดเป็นร้อยละ 3 ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 3:แผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP

FLOW PROCESS CHART											
Flow Chart No. 001, Sheet 1/1			Summarize								
Tracking chart			Activity							As-Is	
Product/Material			○ Operation							14	
People/Employees			⇨ Movement							4	
			D Wait							1	
Process Name: Order Promising Process (OPP)			□ Inspection							3	
Process As-Is ■ Improved □			▽ Storage							13	
Research participants			Aver. OPP LT /Part							0.97 Min.	
- Purchasing Department total 26prs. (age.18 years up)			Aver. Part check/Order							27 items	
Recorded by Ms. Phimon Yensom			Aver. OPP LT /Order							26.27 Mins.	
Date Recorded: December 1, 2023			Aver. Error							13 causes	
Description of Workstation Steps	LT/Part (Min.)	LT/Order (Min.)	Symbol							Note	Error
			○	⇨	D	□	▽				
1. Summarize order inquiry no.	0.006	0.162	●	⇨	D	□	▽			VA	0
2. Summarize total order inquiry qty	0.010	0.270	●	⇨	D	■	▽			VA	0
3. Download BOM Usage	0.144	3.888	●	⇨	D	□	▽			NNVA	0
4. Download parts stock	0.006	0.162	●	⇨	D	□	▽			NNVA	0
5. Download total promised parts	0.006	0.162	●	⇨	D	□	▽			NNVA	0
6. Calculate new parts demand	0.170	4.590	●	⇨	D	□	▽			VA	4
7. Calculate part availability	0.240	6.480	●	■	D	□	▽			VA	4
8. SUM part availability NG resulted	0.026	0.702	●	⇨	D	■	▽			VA	0
9. Create Balance follow NG parts	0.006	0.162	●	⇨	D	□	▽			NNVA	0
10. Send file to check stock	0.007	0.189	○	■	D	□	▽			NNVA	1
11. Wait for supplier response	0.009	0.243	○	⇨	●	□	▽			NVA	-
12. Check results (OK/NG)	0.175	4.725	●	⇨	D	■	▽			NNVA	0
13. Summary final NG results	0.051	1.377	●	⇨	D	□	▽			NNVA	0
14. Put NG results into file step 1	0.052	1.404	●	■	D	□	▽			NNVA	4
15. SUM, the qty of parts that can and cannot be promised	0.052	1.404	●	⇨	D	□	▽			VA	0
16. Confirm/Deny the order promise	0.013	0.351	●	■	D	□	▽			VA	0



รูปที่ 3: แผนภูมิพาเรโตแสดงการจำแนกปัญหาในกระบวนการ OPP

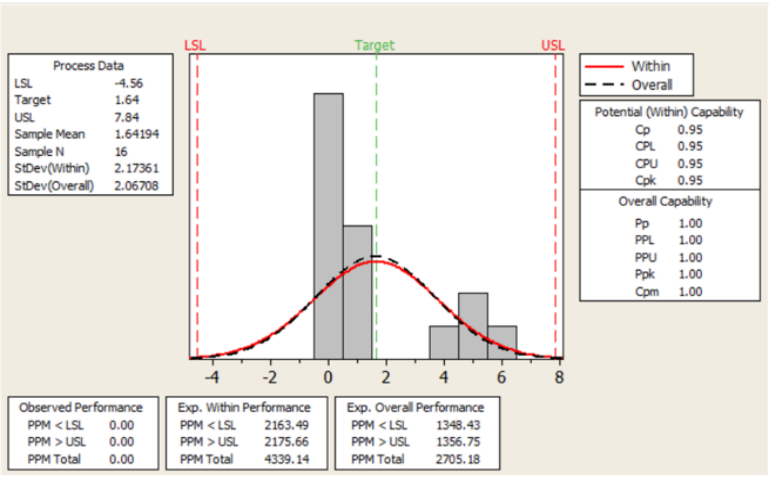
1.2.1 ผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเวลาทำงาน: จากตารางที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า ผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเวลาทำงานของผู้ปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอนทั้ง 16 ขั้นตอน จากผู้ปฏิบัติงานของแผนกจัดซื้อทั้งหมด 27 คน ซึ่งสรุปเวลารวมทั้งหมดของกระบวนการ OPP เท่ากับ 26.27 นาทีต่อคำสั่งซื้อ เกิดข้อผิดพลาดจำนวน 13 ครั้ง และปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้าภายใน 24 ชั่วโมง โดยเฉลี่ยต่อเดือนในช่วงก่อนการปรับปรุง ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2567 อยู่ที่ 1,154 รายการหรือคิดเป็นร้อยละ 45.25 ของปริมาณคำสั่งซื้อโดยเฉลี่ยทั้งหมดต่อเดือน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4: ปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อภายใน 24 ชั่วโมง โดยเฉลี่ยต่อเดือน ในช่วงเดือนพฤษภาคม–สิงหาคม พ.ศ. 2567 (As-Is)

ปริมาณคำสั่งซื้อทั้งหมด เฉลี่ยต่อเดือน (รายการ)	ปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อ ≤ 24 ชม. (รายการ)	ปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อ > 24 ชม. (รายการ)	คิดเป็นสัดส่วน (ร้อยละ)
2,550	1,154	1,396	45.25

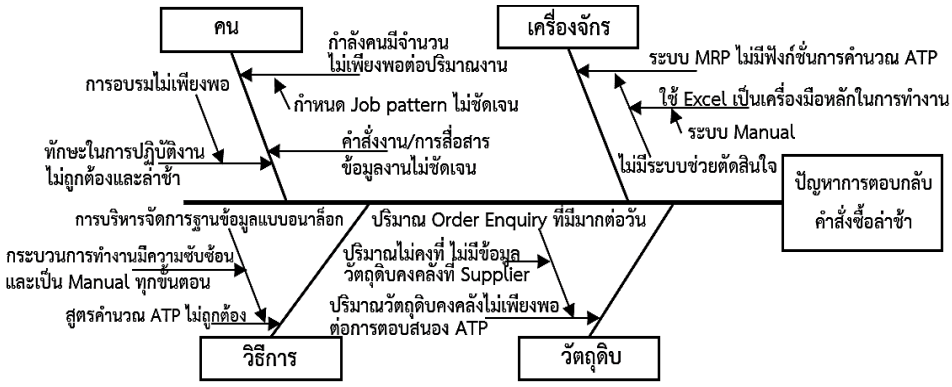
แหล่งที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา

1.2.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความสามารถของกระบวนการ: ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความสามารถของกระบวนการหรือระดับซิกมาก่อนปรับปรุง พบว่า ด้านเวลาปฏิบัติงานเฉลี่ยของทั้ง 16 ขั้นตอน จากจำนวนพนักงานแผนกจัดซื้อ 27 คน มีค่า Cpk เท่ากับ 0.95 ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4: ค่าความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการ

1.3 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อก่อนปรับปรุง (Analysis Step: A): ผลการวิเคราะห์หารากสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง ปริมาณคำสั่งซื้อในระบบไม่คงที่ และความแปรปรวนของกระบวนการ OPP ซึ่งก่อให้เกิดการตอบกลับคำสั่งซื้อที่ไม่ทันตามความต้องการของลูกค้า ด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผลหรือแผนผังก้างปลา ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยประเด็นปัญหาสำคัญเกิดจาก 3 ส่วน คือ (1) ส่วนของเครื่องจักร (machine) มีสาเหตุมาจากไม่มีระบบช่วยตัดสินใจเนื่องจากใช้เครื่องมือ Excel ในการบันทึกและคำนวณ ซึ่งไม่มีฟังก์ชันการคำนวณ ATP-DSS (2) ส่วนของวิธีการ (method) มีสาเหตุมาจากขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อนเป็นกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคนในทุกขั้นตอน และสูตรการคำนวณ ATP-DSS ไม่ถูกต้อง ทำให้ข้อมูลปริมาณชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่แสดงผลในระบบ ERP ไม่เป็นปัจจุบัน เกิดปัญหาการสั่งซื้อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ไปยังผู้ส่งมอบชิ้นส่วนไม่ใช่ปริมาณที่แท้จริง ซึ่งส่งผลต่อวัตถุดิบไม่เพียงพอ เนื่องจากมีการส่งมอบล่าช้าจากผู้ส่งมอบชิ้นส่วน และ (3) ส่วนของคน (man) สาเหตุจากคำสั่งงานหรือการสื่อสารที่ไม่ชัดเจน ทักษะการปฏิบัติงานไม่ถูกต้อง/ล่าช้า เนื่องจากขาดการอบรมที่เพียงพอ รายละเอียดดังรูปที่ 5



รูปที่ 5: แผนผังแสดงสาเหตุและผลของความล่าช้าในการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้าล่าช้า (ใช้เวลานานเกิน 24 ชม.)

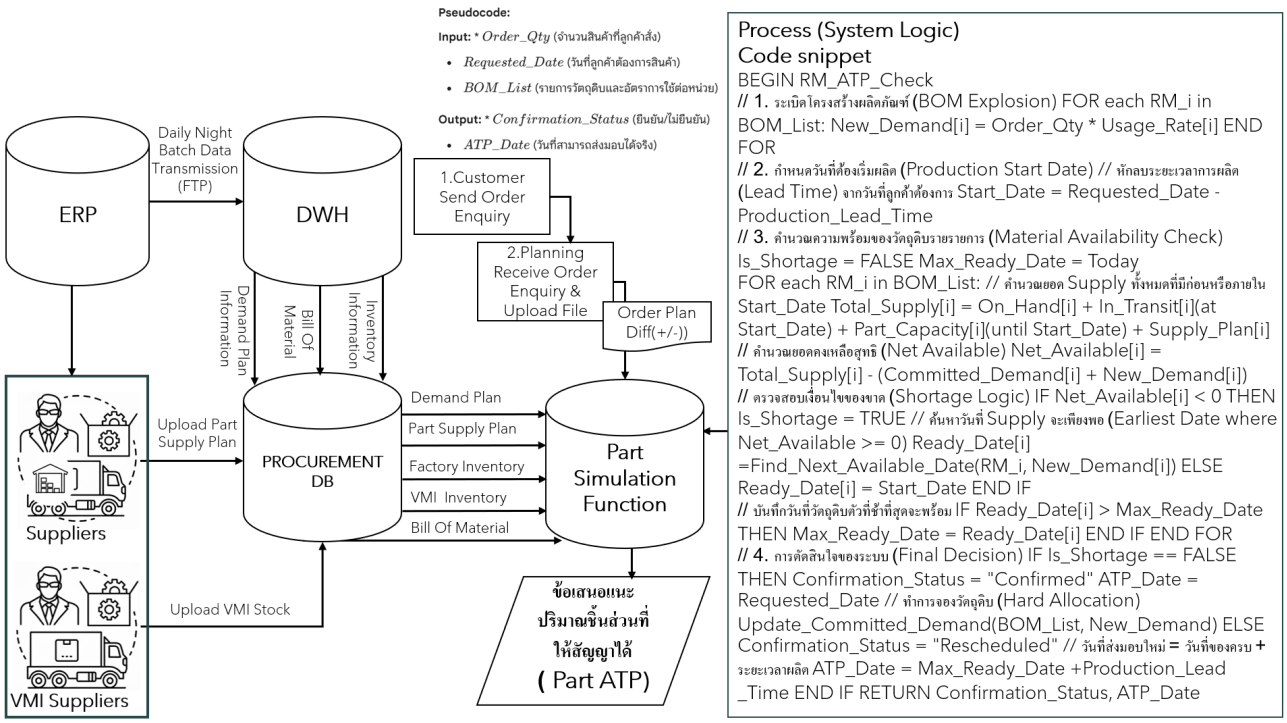
จากรูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง ปริมาณคำสั่งซื้อในระบบไม่คงที่ และความแปรปรวนของกระบวนการ OPP ก่อนปรับปรุง ด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผลหรือแผนผังก้างปลา สรุปได้ดังตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 5: สรุปผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง จำนวนในระบบไม่คงที่ และความแปรปรวนของกระบวนการ OPP ก่อนปรับปรุง

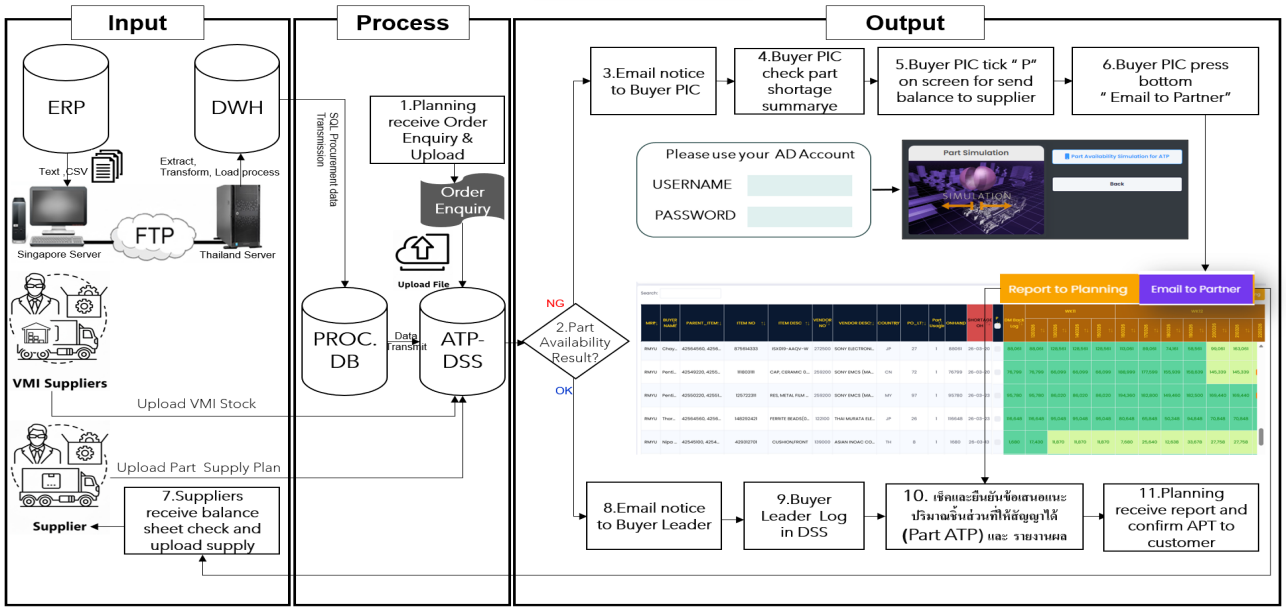
ปัญหา	สาเหตุ (4M)	การวิเคราะห์หารากสาเหตุที่แท้จริง
ปัญหาความล่าช้า ข้อบกพร่อง จำนวนในระบบไม่คงที่ และความแปรปรวนของกระบวนการ OPP	คน (Man)	Job pattern ไม่ชัดเจน, คำสั่งหรือการสื่อสารไม่ชัดเจน, การอบรมไม่เพียงพอ
	เครื่องจักร (Machine)	ระบบการทำงานปัจจุบันเป็นกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคน, ไม่มีระบบช่วยคำนวณและช่วยตัดสินใจ
	วิธีการ (Method)	กระบวนการทำงานมีความซับซ้อนและเป็นกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคนทุกขั้นตอน, การบริหารจัดการฐานข้อมูลเป็นแบบอนาล็อก
	วัตถุดิบ (Material)	ปริมาณชิ้นส่วนไม่คงที่, ไม่มีข้อมูลวัตถุดิบคงคลังของ Supplier, ปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้ามีจำนวนมากต่อวัน

1.4 แนวทางการแก้ไขปัญหาและการปรับปรุง (Improve step: I): ในกิจกรรมการแก้ไขปัญหาและการปรับปรุงนั้น ได้มีการจัดตั้งทีมผู้ปฏิบัติงาน ประกอบด้วย ฝ่ายจัดซื้อ ฝ่ายวางแผน ฝ่ายผลิต ฝ่าย IT และผู้ส่งมอบชิ้นส่วน ด้วยข้อกำจัดในด้านทรัพยากรและเวลาทางทีมงานจึงเลือกปรับปรุงจากข้อบกพร่องที่มีสัดส่วนปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อที่ตอบกลับล่าช้ามากที่สุดใน 3 ลำดับแรก ได้แก่ ปัญหาความล่าช้าจากกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคน ข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดจากคน และปัญหาปริมาณคำสั่งซื้อในระบบไม่คงที่ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการแก้ไขและปรับปรุงปัญหาด้วยการประยุกต์ใช้แนวทางของ BPR ในทบทวนกระบวนการทำงาน

ใหม่ และการประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน มากำจัดวิธีการทำงานที่ไม่จำเป็น การรวมงานเข้าด้วยกัน การจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ให้เหมาะสมและการทำให้ง่ายขึ้น ด้วยการออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ ในการตรวจสอบปริมาณสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดในระบบ ERP และการตอบกลับคำสั่งซื้อให้กับลูกค้าด้วยเทคนิค ATP-DSS รายละเอียดดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ด้านล่าง

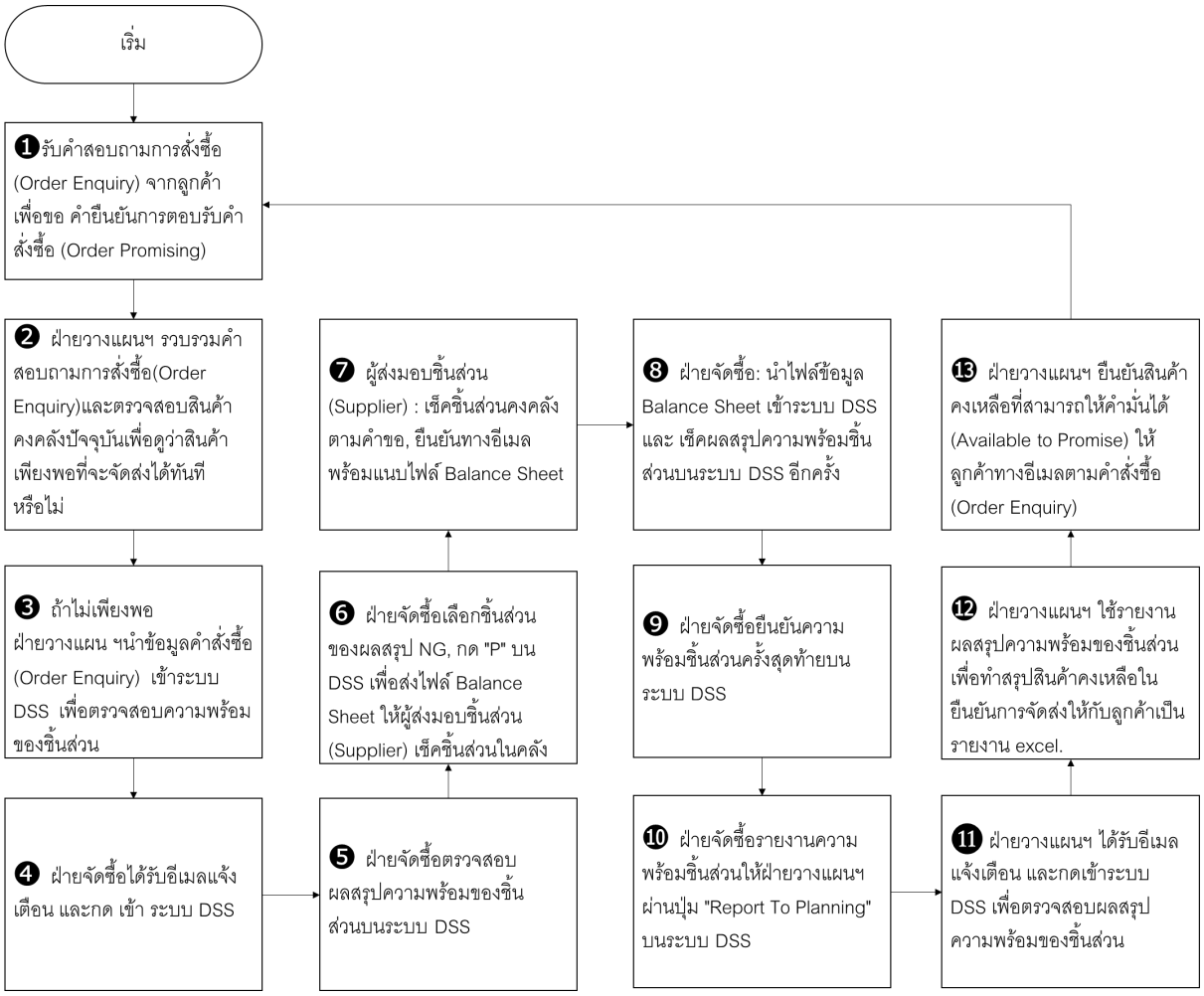


รูปที่ 6: System Logic จากเทคนิค ATP-DSS ในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ



รูปที่ 7: แผนผังกระบวนการ OPP และรูปแบบโปรแกรม ที่มีการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS

1.5 ผลการควบคุมกระบวนการ (Control step: C): ในตอนท้ายของการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ถอดบทเรียนการเรียนรู้และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง รวมถึงข้อจำกัดของการวิจัยที่กำหนดไว้เพื่อให้สามารถวางแผนโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และแสดงให้เห็นถึงคู่มือการทำงาน (Work Instruction: WI) ของระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS รายละเอียดตามรูปที่ 8



รูปที่ 8: การจัดทำมาตรฐานหรือคู่มือการทำงานของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการ OPP

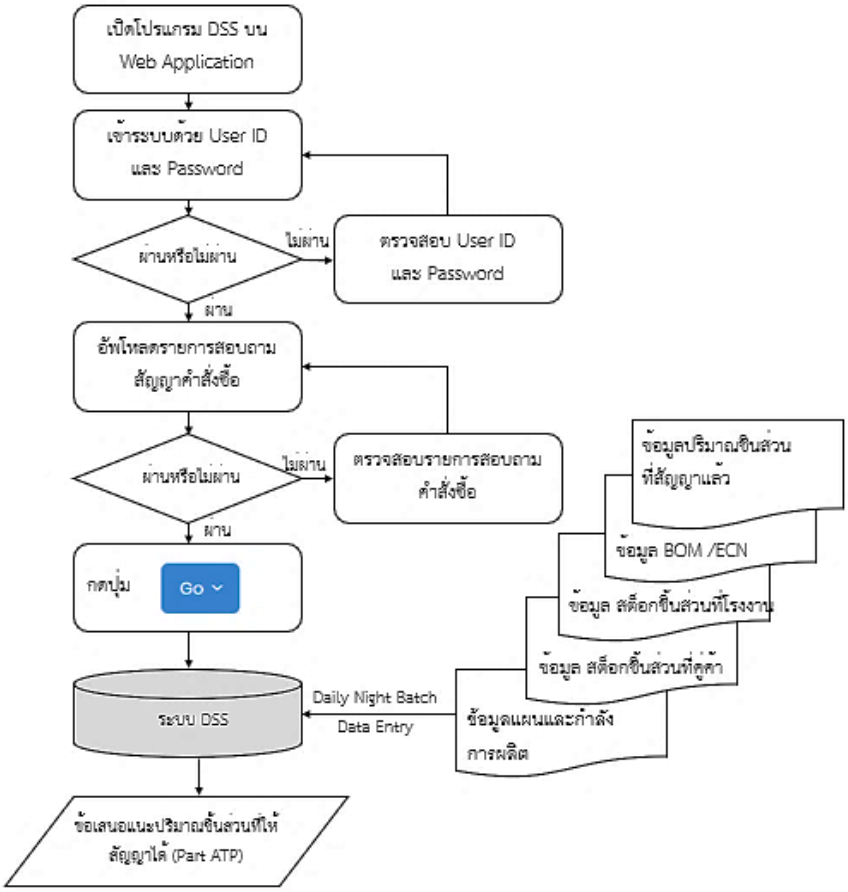
2. การอภิปรายผล

การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สำหรับลดความล่าช้าและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อภายใต้การผลิตแบบตามสั่ง กรณีศึกษาบริษัทผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน ในการขจัดความสูญเปล่าของกระบวนการ OPP และแนวทางของ BPR ในทบทวนปรับรื้อกระบวนการทำงานใหม่ รวมถึงการนำเทคนิคของ Six Sigma มาใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการ และการออกแบบพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ในการตอบกลับคำสั่งซื้อให้กับลูกค้า ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่เน้นการบูรณาการข้อมูลเชิงลึกเพื่อช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจในกระบวนการที่ซับซ้อนให้มีความแม่นยำสูงขึ้น [20] สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

2.1 การปรับรื้อกระบวนการ OPP ใหม่: ผลการศึกษาออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ในกระบวนการ OPP แบบใหม่ของบริษัทกรณีศึกษา สามารถสรุปเป็นขั้นตอนปฏิบัติการ ดังรูปที่ 9

2.2 แผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP หลังปรับปรุง (To-Be): ภายหลังการดำเนินการแก้ไขปรับปรุงความล่าช้า ข้อบกพร่องและความแปรปรวนของกระบวนการ OPP ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน และกระบวนการ BPR เพื่อนำไปสู่การออกแบบและ

พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ในการตรวจสอบปริมาณชิ้นส่วนประกอบและปริมาณสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดในระบบ ERP และการตอบกลับคำสั่งซื้อให้กับลูกค้าแล้ว ผู้วิจัยจึงได้เก็บรวบรวมข้อมูลด้านเวลาการปฏิบัติงาน โดยบันทึกในรูปของแผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP หลังการปรับปรุง ดังตารางที่ 6



รูปที่ 9: ขั้นตอนปฏิบัติการของระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS หลังการปรับปรุง

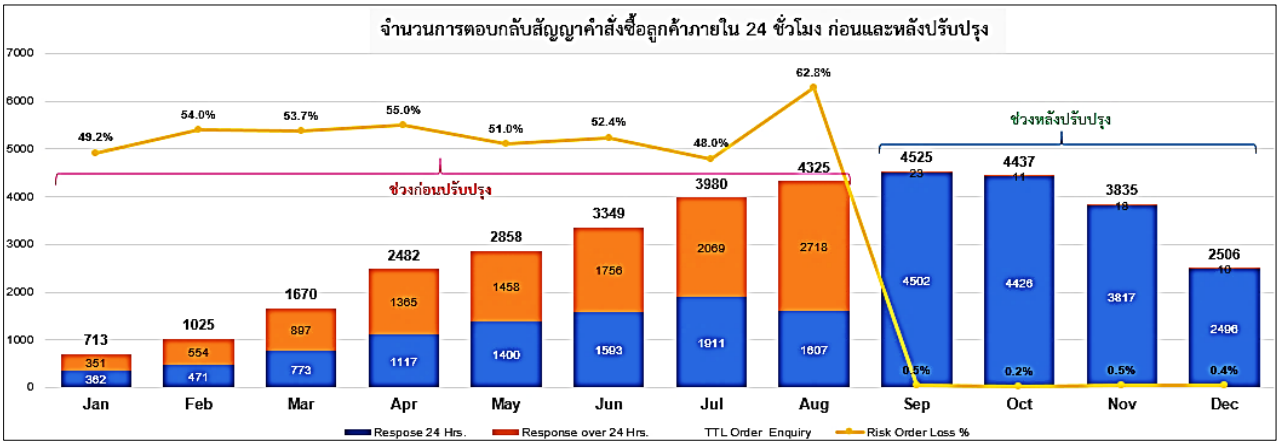
จากตารางที่ 6 ด้านล่าง ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยเวลาปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอนทั้ง 16 ขั้นตอน จากผู้ปฏิบัติงานของฝ่ายจัดซื้อทั้งหมด 27 คน ซึ่งสรุปเวลารวมทั้งหมดของกระบวนการ OPP หลังการปรับปรุง โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.04 นาทีต่อคำสั่งซื้อ หากเทียบกับก่อนปรับปรุง พบว่า เวลาปฏิบัติงานรวมลดลงเฉลี่ย 22.23 นาทีต่อคำสั่งซื้อ หรือลดลงถึงร้อยละ 84.62 ด้วยประสิทธิภาพของระบบ ATP-DSS นี้ สามารถช่วยลดเวลาในกระบวนการ OPP ได้มากอย่างมีนัยสำคัญ เหตุปัจจัยหลักมาจากกระบวนการปฏิบัติงานที่เปลี่ยนจากแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคนไปสู่การประเมินด้วยข้อมูลชุดคำสั่งแบบอัตโนมัติ และการใช้อัลกอริทึมคำนวณปริมาณชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่มีความซับซ้อนในระบบ ERP จนได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ (จากเดิมใช้แรงงานคนทั้งหมด หลังปรับปรุงมีสถานีงานแบบอัตโนมัติถึง 8 จากทั้งหมด 16 สถานี) อีกทั้ง ระบบ ATP-DSS ยังทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมแบบ MTO ที่การคาดการณ์ระยะเวลาในการปฏิบัติงานมีความแม่นยำสูงกว่าวิธีการเดิม นอกจากนี้ ความสามารถของการลดเวลาในการผลิตแบบ MTO ไม่เพียงแต่ช่วยให้การทำงานเร็วขึ้น แต่เป็นการเปลี่ยนจากการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อเป็นการคาดการณ์และเตรียมพร้อม แม้จะเป็นการผลิตภายใต้ระบบ MTO ก็ตาม ส่วนการลดข้อผิดพลาดจากการปฏิบัติงานยังลดลง 13 ครั้ง เหลือ 0 ครั้ง หรือข้อผิดพลาดเป็นศูนย์ หรือคิดเป็นร้อยละ 100 สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาการลดเวลานำในการตรวจผลิตภัณฑ์ก่อนส่งมอบ ซึ่งกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนแม่เหล็กในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [21] เช่นเดียวกันผลการศึกษายังพบว่า ระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS นี้ยังทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมแบบ MTO เนื่องจากข้อมูลปริมาณสินค้าคง

คลังมีการปรับปรุงให้เป็นปัจจุบันแบบทันที (real time) โดยอัตโนมัติ มีความถูกต้องและแม่นยำในปริมาณสินค้าคงคลังในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของ MTO หรือการผลิตตามคำสั่งซื้อ ซึ่งไม่ต้องการสำรองปริมาณสินค้าคงคลังเพื่อลดต้นทุนการผลิต

2.3 ปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้า (Order Enquiry) ภายใน 24 ชั่วโมง: ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้าภายใน 24 ชั่วโมง โดยเฉลี่ยต่อเดือนช่วงหลังการปรับปรุง (ก.ย.–ธ.ค. พ.ศ. 2567) อยู่ที่ 3,810 รายการ หรือคิดเป็นร้อยละ 99.58 ของปริมาณคำสั่งซื้อเฉลี่ยทั้งหมดต่อเดือน รายละเอียด ดังรูปที่ 10 (ด้านล่าง)

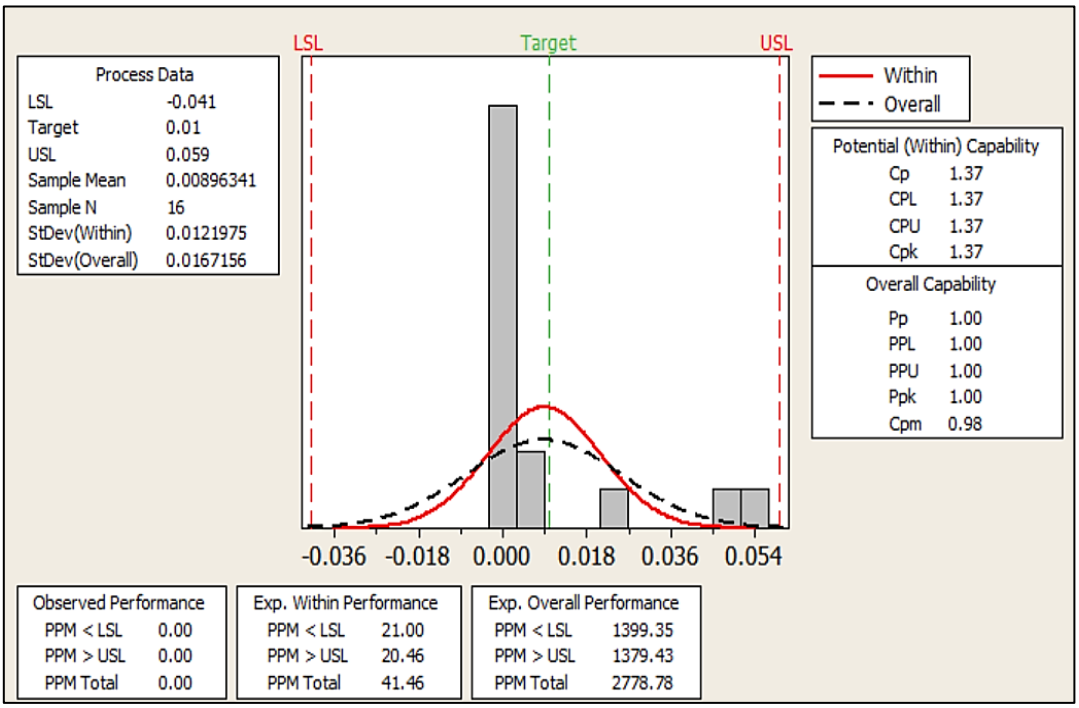
ตารางที่ 6: แผนภูมิการไหลของกระบวนการ OPP หลังปรับปรุง

FLOW PROCESS CHART				
Flow Chart No. 001, Sheet 1/1			Summarize	
Tracking chart Product/Material People/Employees			Activity	To-Be
			Operation	4
			Movement	2
			Wait	1
Process Name: Order Promising Process (OPP)			Inspection	1
Process As-Is Improved			Storage	2
Research participants			Aver. OPP LT /Part	0.15 Min.
- Purchasing Department total 26prs. (age.18 years up)			Aver. Part check/Order	27 items
Recorded by Ms. Phimon Yensom			Aver. OPP LT /Order	4.04 Min.
Date Recorded: December 1, 2023			Aver. Error	0 causes
Description of Workstation Steps	LT/Part (Min.)	LT/Order (Min.)	Symbol	Note / Error
1. Summarize order inquiry no.	0.003	0.071		VA 0
2. Summarize total order inquiry qty.	0.003	0.071		VA 0
3. Download BOM Usage	0	0		VA 0
4. Download parts stock	0	0		VA 0
5. Download total promised parts	0	0		VA 0
6. Calculate new parts demand	0	0		VA 0
7. Calculate part availability	0	0		VA 0
8. SUM. part availability NG resulted	0.018	0.463		VA 0
9.Create Balance follow NG parts	0	0		VA 0
10. Send file to check stock	0.002	0.048		NNVA 0
11. Wait for supplier response	0.009	0.238		NVA 0
12. Check results (OK/NG)	0	0		VA 0
13. Summary final NG results	0	0		VA 0
14. Put NG results into file step 1	0.050	1.349		VA 0
15. SUM, the qty. of parts that can and cannot be promised	0.052	1.396		VA 0
16. Confirm/Deny the order promise	0.013	0.349		VA 0



รูปที่ 10: ผลแนวโน้มปริมาณการตอบกลับคำสั่งซื้อลูกค้าก่อนและหลังการปรับปรุง

2.4 ความสามารถด้านประสิทธิภาพของกระบวนการ (Cpk): สรุปผลการเปรียบเทียบระดับซิกมาจากค่าความสามารถด้านประสิทธิภาพของกระบวนการ OPP ก่อนและหลังการปรับปรุง สรุปได้ว่า ค่า Cpk ปรับเพิ่มขึ้นจากเดิมก่อนปรับปรุงอยู่ที่ 0.95 (Cpk = 0.95) และหลังปรับปรุงเป็น 1.37 (Cpk = 1.37) ซึ่งหากเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่ค่า Cpk ≥ 1.33 กล่าวคือ กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงและตรงตามข้อกำหนดอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11: ความสามารถด้านประสิทธิภาพของกระบวนการ หลังการปรับปรุง

จากผลการศึกษาข้างต้น สามารถสรุปผลลัพธ์เปรียบเทียบผลก่อน และหลังปรับปรุง ดังตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7: ผลลัพธ์ (Key performance improvement summary) เปรียบเทียบเวลาปฏิบัติงานรวม และผลการวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกระบวนการ OPP ก่อนและหลังการปรับปรุง

การเปรียบเทียบผลการศึกษา	ก่อน (As-Is)	หลัง (To-Be)	ผลต่าง
1. เวลารวมเฉลี่ยต่อออเดอร์ (นาที)	26.27	4.04	ลดลง 22.23 (ลดลงร้อยละ 84.62)
2. จำนวนออเดอร์ที่ตอบกลับภายใน 24 ชม. เฉลี่ยต่อเดือน (ออเดอร์)	1,154	3,810	เพิ่มขึ้น 2,656 (เพิ่มขึ้นร้อยละ 69.70)
3. ประสิทธิภาพการตอบกลับสัญญาคำสั่งซื้อได้ ≤ 24 ชม. (ร้อยละ)	45.25	99.58	เพิ่มขึ้นร้อยละ 54.33
4. ประสิทธิภาพการตอบกลับสัญญาคำสั่งซื้อได้ > 24 ชม. (ร้อยละ)	54.75	0.41	ลดลงร้อยละ 54.34
5. ประสิทธิภาพความสามารถของกระบวนการ (Cpk)	0.95	1.37	เพิ่มขึ้น 0.42 หรือ ค่า Cpk > เกณฑ์ 1.33
6. ข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดในกระบวนการ (ครั้ง)	13	0	ลดลง 13 ขั้นตอน (ลดลงร้อยละ 100.00)
7. จำนวนขั้นตอนการปฏิบัติงาน (O)	14	4	ลดลง 10 ขั้นตอน (ลดลงร้อยละ 71.40)
8. จำนวนขั้นตอนการเคลื่อนย้าย (⇨)	4	2	ลดลง 2 ขั้นตอน (ลดลงร้อยละ 50.00)
9. จำนวนขั้นตอนการรอคอย (D)	1	1	เท่าเดิมที่ 1 ขั้นตอน
10. จำนวนขั้นตอนการตรวจสอบ (□)	3	2	ลดลง 1 ขั้นตอน (ลดลงร้อยละ 66.70)
11. จำนวนขั้นตอนการจัดเก็บ (▽)	13	2	ลดลง 11 ขั้นตอน (ลดลงร้อยละ 84.60)
12. กิจกรรมที่สร้างคุณค่าเพิ่ม (VA)	7	14	เพิ่มขึ้น 7 กิจกรรม (เพิ่มขึ้นร้อยละ 100.00)
13. กิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่าเพิ่ม (NVA)	1	1	เท่าเดิมที่ 1 กิจกรรม
14. กิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่าเพิ่ม แต่จำเป็นต้องทำ (NNVA)	8	1	ลดลง 7 กิจกรรม (ลดลงร้อยละ 87.50)

สรุปผล

เมื่อฐานข้อมูลของระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ทำการเชื่อมต่อและรับข้อมูล (data interface) จากการวางแผนทรัพยากรองค์กร ซึ่งเป็นข้อมูลของปริมาณชิ้นส่วนประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาแล้วแต่ยังไม่ได้ผลิตและส่งมอบให้กับลูกค้า สูตรการผลิต (BOM) ปริมาณชิ้นส่วนคงคลัง ณ เวลาปัจจุบัน ปริมาณชิ้นส่วนที่สั่งซื้อเข้ามาใหม่หรือปริมาณชิ้นส่วนที่คาดว่าจะได้รับจากการสั่งซื้อ แผนการผลิต และกำลังการผลิต ตามขั้นตอนปฏิบัติการจากการออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS ดังนี้

1. ระบบปฏิบัติการ

ระบบปฏิบัติการจากเดิมเป็นกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคน ทำให้การคำนวณปริมาณสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่พร้อมตอบกลับคำสั่งซื้อกับลูกค้าเกิดความล่าช้า มีข้อบกพร่องและความแปรปรวน ผลจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS สามารถลดความล่าช้า เพิ่มความแม่นยำและเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินระดับสินค้าคงคลัง กำลังการผลิต และความพร้อมของชิ้นส่วนประกอบซึ่งเป็นการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่มีความยืดหยุ่นต่อความผันผวนของคำสั่งซื้อ รวมถึงปริมาณสินค้าอิเล็กทรอนิกส์จากผู้ส่งมอบชิ้นส่วนได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งการใช้การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพยากรณ์และระบบควบคุมสินค้าคงคลังที่มีประสิทธิภาพถือเป็นกุญแจสำคัญในการจัดการกลุ่มผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ [22]

2. ความล่าช้าในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ

ความล่าช้าในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ จากเดิมใช้เวลารวมเฉลี่ย 26.27 นาทีต่อคำสั่งซื้อ ผลจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS พบว่า เวลารวมโดยเฉลี่ยหลังปรับปรุงอยู่ที่ 4.04 นาทีต่อคำสั่งซื้อ สามารถลดเวลารวมโดยเฉลี่ยได้ถึง 22.23 นาทีต่อคำสั่งซื้อ หรือลดลงได้ร้อยละ 84.62

3. การตอบกลับปริมาณคำสั่งซื้อได้ภายใน 24 ชั่วโมง

การตอบกลับปริมาณคำสั่งซื้อได้ภายใน 24 ชั่วโมง จากเดิมช่วงก่อนการปรับปรุง (ข้อมูลเดือน พ.ค.–ส.ค. พ.ศ. 2567) อยู่ที่ 1,154 คำสั่งซื้อ ผลจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS พบว่า หลังการปรับปรุง (ข้อมูลเดือน ก.ย.–ธ.ค. พ.ศ. 2567) สามารถตอบกลับปริมาณคำสั่งซื้อได้ภายใน 24 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นที่ 3,810 คำสั่งซื้อ หรือเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยร้อยละ 69.71

4. ข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดในกระบวนการ

ข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดในกระบวนการ จากเดิมก่อนปรับปรุงอยู่ที่ 13 ครั้ง ผลจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS พบว่า หลังการปรับปรุงไม่พบข้อผิดพลาดเกิดขึ้นในกระบวนการ หรือสามารถลดข้อบกพร่องได้ถึงร้อยละ 100 หรือข้อผิดพลาดเป็นศูนย์

5. ความแปรปรวนในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ

ความแปรปรวนในกระบวนการตอบกลับคำสั่งซื้อ จากเดิมก่อนปรับปรุง ค่าความสามารถด้านประสิทธิภาพของกระบวนการ อยู่ที่ 0.95 ผลจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS พบว่า หลังการปรับปรุงค่าความสามารถด้านประสิทธิภาพของกระบวนการมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น โดยค่า Cpk เพิ่มจาก 0.95 เป็น 1.37 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับตามค่ามาตรฐาน คือ Cpk ≥ 1.33

6. กิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม (VA)

กิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม (VA) จากเดิมก่อนปรับปรุงมีจำนวน 7 ขั้นตอน ส่วนกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่ม (NVA) จากเดิมมีจำนวน 1 ขั้นตอน และกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น (NNVA) จากเดิมมีจำนวน 8 ขั้นตอน ตามหลักการวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่า ผลจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS พบว่า หลังการปรับปรุง กิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มมีจำนวนเพิ่มขึ้น 14 ขั้นตอน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 100 ส่วนกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มมีจำนวนเท่าเดิม คือ 1 ขั้นตอน และกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็น (NNVA) มีจำนวนลดลงเหลือเพียง 1 ขั้นตอน หรือลดลงร้อยละ 87.50

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย: ความล่าช้า ความบกพร่อง และความแปรปรวนในกระบวนการ OPP ส่วนหนึ่งมาจากข้อมูลปริมาณชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ไม่เป็นปัจจุบันแบบทันที โดยจะต้องทำการศึกษาร่วมกับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องหลายหน่วยงานทั้งฝ่ายขาย ฝ่ายจัดซื้อ ฝ่าย IT และผู้ส่งมอบชิ้นส่วน เพื่อศึกษาทั้งผลดีและผลเสียที่อาจเกิดขึ้น ความล่าช้า, ความบกพร่อง, และความแปรปรวนในกระบวนการ OPP จะต้องไม่ส่งผลเสียให้กับหน่วยงานอื่น ๆ ทั้งการรอคอยหรือการเพิ่มงานให้กับหน่วยงานอื่น ๆ และข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย คือ ภาครัฐและภาคเอกชนควรปรับปรุงระบบสารสนเทศให้มีความทันสมัย เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีแบบพลิกผัน (technology disruption)

7.2 ข้อจำกัดจากการวิจัย: ระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้วยเทคนิค ATP-DSS เป็นระบบที่พัฒนามาใช้เฉพาะกับการศึกษาครั้งนี้ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งฝ่ายจัดซื้อ และฝ่าย IT ควรมีแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของระบบ (preventive maintenance) และการทวนสอบความเสถียรของระบบ เพื่อประสิทธิภาพและความแม่นยำในการใช้งานอย่างต่อเนื่อง

7.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งถัดไป: งานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อกลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แบบผลิตตามคำสั่งซื้อ ที่ประสบปัญหาคล้ายคลึงกัน การศึกษาครั้งถัดไปควรขยายขอบเขตการศึกษาไปยังอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะสามารถนำกรอบแนวคิดของ ATP-DSS ในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการปริมาณสินค้าคงคลัง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลที่สนับสนุนด้านวิชาการและบริษัทกรณีศึกษาที่อำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

REFERENCES

[1] SCB EIC, “SCB EIC Industry Insight: Electrical Appliances and Electronics,” (in Thai), SCB Econ. Intell. Center, Bangkok, Thailand, Oct. 2024. Accessed: Dec. 1, 2025. [Online]. Available: https://www.scbeic.com/th/detail/file/product/9634/h1ctuj8u6l/Industry-insight-EE-20241031.pdf

[2] G. Arcidiacono, A. Antonacci, and J. Antony, “The r-evolution of lean six sigma from industry 4.0 to society 5.0: excellence 5.0,” *Int. J. Qual. Rel. Manage.,* vol. 42, no. 8, pp. 2328–2349, 2025.

[3] T. Pongboonchai-Empl, J. Antony, J. A. Garza-Reyes, T. Komkowski, and G. L. Tortorella, “Integration of Industry 4.0 technologies into Lean Six Sigma DMAIC: A systematic review,” *Prod. Planning Control,* vol. 35, no. 12, pp. 1403–1428, 2024.

[4] R. Caiado, D. Nascimento, O. Quelhas, G. Tortorella, and L. Rangel, “Towards sustainability through Green, Lean and Six Sigma integration at service industry: Review and framework,” *Technol. Econ. Dev. Econ.,* vol. 24, no. 4, pp. 1659–1678, 2018.

[5] J. M. Framinan and P. Perez-Gonzalez, “Available-to-promise systems in the semiconductor industry: A review of contributions and a preliminary experiment,” in *Proc. Winter Simul. Conf. (WSC),* Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 2652–2663.

[6] C.-Y. Chen, Z. Zhao, and M. O. Ball, “A model for batch advanced available-to-promise,” *Prod. Oper. Manage*., vol. 11, no. 4, pp. 424–440, 2002.

[7] J. Chen and M. Dong, “Available-to-promise-based flexible order allocation in ATO supply chains,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 22, pp. 6717–6738, 2014.

[8] E. H. Shortliffe and M. J. Sepúlveda, “Clinical decision support in the era of artificial intelligence,” *JAMA*, vol. 320, no. 21, pp. 2199–2200, 2018.

[9] M. A. M. Khan and A. A. R. Tonoy, “Lean Six Sigma applications in electrical equipment manufacturing: A systematic literature review,” *Amer. J. Interdisciplinary Stud.,* vol. 5, no. 2, pp. 31–64, 2024.

[10] S. Somabutr, “Enhancing supply chain efficiency through business process re-engineering: A case study of the Pak Thong Chai noodle factory, Northeastern Thailand,” in *Proc. World Conf. Inf. Syst. Bus. Manage. (ISBM)*, Bangkok, Thailand, Sep. 2024, pp. 303–313.

[11] A. Jeamsanga, P. Phiphopaekasit, S. Anunthawichak, and A. Thamchalai, “Reducing defects and increasing efficiency of the encapsulation production process in the industrial paint of a factory in Prachin Buri Province,” (in Thai), *J. King Mongkut’s Univ. Technol. North Bangkok,* vol. 33, no. 1, pp. 43–55, 2023.

[12] P. Rungruengkultorn, “Warehouse processes improvement using Lean Six Sigma and RFID technology,” (in Thai), M.S. thesis, Dept. Math. Comput. Sci., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2021.

[13] R. T. Sutton, D. Pincock, D. C. Baumgart, D. C. Sadowski, R. N. Fedorak, and K. I. Kroeker, “An overview of clinical decision support systems: Benefits, risks, and strategies for success,” *npj Digit. Med.,* vol. 3, Feb. 2020, Art. no. 17.

[14] M. Alemany, A. Ortiz, and V. S. Fuertes-Miquel, “A decision support tool for the order promising process with product homogeneity requirements in hybrid make-to-stock and make-to-order environments. Application to a ceramic tile company,” *Comput. Ind. Eng.,* vol. 122, pp. 219–234, 2018.

[15] J. Antony, T. Scheumann, V. Sunder M., E. Cudney, B. Rodgers, and N. P. Grigg, “Using Six Sigma DMAIC for Lean project management in education: a case study in a German kindergarten,” *Total Qual. Manage. Bus. Excellence,* vol. 33, no. 13–14, pp. 1489–1509, 2022.

[16] A. H. Gomaa, “Improving supply chain management using Lean Six Sigma: A case study,” *Int. J. Appl. Physical Sci*., vol. 9, pp. 9–25, 2023.

[17] O. Phokawattana, K. Jinachan, and T. Wattanayotin, “The value stream of Turmeric Curry NongHong community enterprise,” (in Thai), *RMUTL Eng. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 28–37, 2021.

[18] P. Boonma, S. Theerathammakorn, and S. Chianrabutra, “Setup time reduction of four corner folding paperboard box process by quick changeover technique,” (in Thai), *J. King Mongkut’s Univ. Technol. North Bangkok,* vol. 33, no. 1, pp. 56–68, 2023.

[19] W. Qin, Z. Zhuang, Y. Sun, Y. Liu, and M. Yang, “An available-to-promise stochastic model for order promising based on dynamic resource reservation policy,” *Int. J. Prod. Res.,* vol. 61, no. 16, pp. 5525–5542, 2023.

[20] P. I. Schwantz, L. L. Klein, and E. de Oliveira Simonetto, “The relationship between lean practices and organizational performance: An analysis of operations management in a public institution,” *Logistics,* vol. 7, no. 3, Aug. 2023, Art. no. 52.

[21] N. Sawajan, “Lead time reduction of products outgoing inspection,” (in Thai), M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Thammasat Univ., Pathum Thani, Thailand, 2017.

[22] A. Kleppe et al., “A clinical decision support system optimising adjuvant chemotherapy for colorectal cancers by integrating deep learning and pathological staging markers: a development and validation study,” *Lancet Oncol.,* vol. 23, no. 9, pp. 1221–1232, 2022.

การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศที่เน้นผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เจษฎากร ฐิติภูมิเดชา[1*] สุรพงศ์ สุวรรณกวิน[2]

[1*,2]*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย*

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: 6770023821@student.chula.ac.th

รับต้นฉบับ: 15 ธันวาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 13 มิถุนายน 2569; ตอบรับบทความ: 15 มิถุนายน 2569
เผยแพร่ออนไลน์: 27 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในเครื่องปรับอากาศ การปรับความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์จะอาศัยอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง โดยสมรรถนะของการควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ อย่างไรก็ดีข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตมอเตอร์เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นซึ่งยังขาดความแม่นยำเพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์ใหม่เพื่อลดต้นทุน สถานการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กได้ง่ายขึ้น จึงมีความต้องการค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่แม่นยำที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย บทความนี้นำเสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่เน้นผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะนำเสนอกระบวนการหาพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบ ที่ช่วยลดระยะเวลาของขั้นตอนการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการทดสอบและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้จริงในภาคปฏิบัติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีความแม่นยำมากกว่าข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตมอเตอร์ และทำให้ระบบขับเคลื่อนเครื่องปรับอากาศมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีครอบคลุมตลอดช่วงการทำงานของคอมเพรสเซอร์ อีกทั้งยังสามารถลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ลงได้สูงสุดถึงร้อยละ 52

***คำสำคัญ*:** ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในเครื่องปรับอากาศ ฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน ผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก การหาพารามิเตอร์

Parameter Identification for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors in Air Conditioners Emphasis on the Effects of Magnetic Cross-Coupling and Induced Electromotive Force Harmonics

Jadsadakorn Thitipumdacha[1*] Surapong Suwankawin[2]

[1*,2]*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding author e-mail: 6770023821@student.chula.ac.th

Received: 15 December 2025; Revised: 13 June 2026; Accepted: 15 June 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

Interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) are widely used in air conditioners. The compressor speed is controlled by inverter using sensorless control in which the performance depends mainly on motor parameters. However, the parameters provided by motor manufacturers are preliminary and often insufficiently accurate, especially when the motor structures are redesigned to reduce cost. Such circumstances can easily cause the saturation of iron core and lead to the necessity for accurate identification of motor parameters that should take the effects of magnetic cross-coupling and induced electromotive force harmonics into consideration. This article proposes a systematic procedure for parameter identification for IPMSMs that emphasizes the effects of magnetic cross-coupling and induced electromotive force harmonics. The proposed scheme can optimize the duration of parameters' fine tuning in the testing process and can be practically applied in product development. Experimental results show that the parameters obtained by the proposed method are more accurate than those provided by motor manufacturers. Consequently, the control performance of the drive system of air conditioners can be improved across the entire operating range of compressors, while the rotor position estimation error can be reduced by up to 52 percent.

***Keywords*:** Air-conditioning motor drives, Induced electromotive force harmonics, Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSMs), Magnetic cross coupling effect, Parameter identification

บทนำ

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSMs) นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เนื่องจากลักษณะของมอเตอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นกำลังสูง (high power density) เมื่อเทียบกับขนาดของมอเตอร์ [1] อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการควบคุมมอเตอร์นั้น จำเป็นที่จะต้องมีข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์ โดยปกติแล้วจะมีการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อที่จะตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ อย่างไรก็ตาม การติดตั้งเซนเซอร์ในมอเตอร์นั้นทำให้ต้นทุนสูงขึ้น อีกทั้งในการใช้งานมอเตอร์ชนิดนี้ในบางผลิตภัณฑ์ เช่น มอเตอร์ที่ติดตั้งในคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในระบบเครื่องปรับอากาศ ไม่สามารถติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ได้ เนื่องจากการใช้งานมีสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิที่สูง ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมมอเตอร์โดยเทคนิคการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่จำเป็นจะต้องมีการใช้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องในการคำนวณ เพื่อให้การควบคุมมอเตอร์มีความแม่นยำ สามารถทำงานในจุดโหลดการทำงานที่ต้องการและมีประสิทธิภาพที่สูง

เนื่องจากแนวโน้มของการออกแบบผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมมีการแข่งขันในด้านราคาเพิ่มมากขึ้น ทำให้มอเตอร์ที่ใช้งานมีการลดต้นทุนในด้านวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นการลดปริมาณการใช้งานของแม่เหล็กถาวรโดยการลดความหนาของการซ้อนกันของแม่เหล็กถาวร (stack length) การลดปริมาณของขดลวดที่ใช้พันมอเตอร์โดยการลดจำนวนรอบในการพันขดลวด การออกแบบคอมเพรสเซอร์ให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น อีกทั้งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น จึงมีการออกแบบขอบเขตย่านการทำงานมอเตอร์ให้ขยายเพิ่มมากขึ้น จากสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ตามมาดังต่อไปนี้

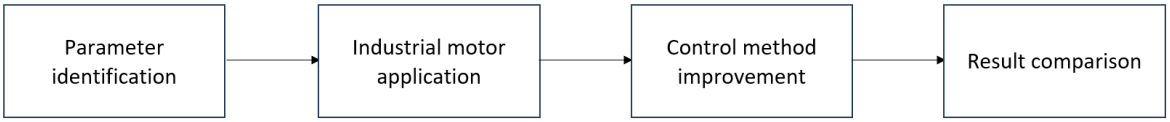
1) ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ ณ ที่จุดโหลดทำงานสูงสุดเกิดการอิ่มตัวมาก
2) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบร่วม

จากสาเหตุข้างต้น จะสามารถพิจารณาได้ว่าการที่ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ ณ ที่จุดโหลดทำงานเกิดการอิ่มตัวมากทำให้ค่าความเหนี่ยวนำได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กระหว่างแกน d และแกน q ที่มากยิ่งขึ้น [2] ทำให้ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความเหนี่ยวนำที่ได้รับจากผู้ผลิต กับค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การคำนวณการควบคุมมอเตอร์เกิดความผิดพลาดที่สูงขึ้น อีกทั้งจากการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบร่วมด้วย ทำให้เกิดระลอกแรงบิดที่สูง ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้การออกแบบการควบคุมมอเตอร์โดยใช้พารามิเตอร์พื้นฐานของมอเตอร์ที่ได้รับมาจากผู้ผลิตมีสมรรถนะในการควบคุมไม่เพียงพอ และทำให้เกิดปัญหาที่ไม่สามารถควบคุมมอเตอร์ ณ จุดโหลดทำงานที่ต้องการได้

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง จะนำเสนอการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก โดยจะทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์จากการจำลองมอเตอร์ด้วยวิธี Finite Element Analysis (FEA) [3], [4], [5] ซึ่งต้องพึ่งพาข้อมูลเชิงลึกจากผู้ผลิตมอเตอร์ ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการขอข้อมูลและทำการจำลอง อีกทั้งบางข้อมูลยังเป็นความลับของผู้ผลิต ทำให้การปฏิบัติจริงในอุตสาหกรรมทำได้ยาก นอกจากนี้ถึงแม้ว่าวิธีการและขั้นตอนในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหล่านี้จะมีการเผยแพร่ทางวิชาการอย่างแพร่หลาย [2], [6] แต่ในบริบทของการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง จะต้องมีการพัฒนากระบวนการทดสอบหรือขั้นตอนการทดลองจริงในทางปฏิบัติที่ชัดเจน เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถนำขั้นตอนไปประยุกต์ใช้ได้จริงอย่างเป็นระบบ ถึงแม้จะมีงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ในอุตสาหกรรม [7], [8] แต่ว่าในงานวิจัย Yin et al. [7] ไม่ได้กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองอย่างเป็นระบบและแสดงรายละเอียดขั้นตอนการทดลอง รวมทั้งไม่ได้กล่าวถึงการนำผลลัพธ์การทดลองไปประยุกต์การใช้งาน นอกจากนี้ในงานวิจัย [8] ถึงแม้จะมีการกล่าวถึงการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในอุตสาหกรรม แต่ว่าในงานวิจัยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก อีกทั้งงานวิจัยในอดีต [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] ไม่ได้กล่าวถึงเกณฑ์ (criteria) ที่ใช้ในการตัดสินอย่างเป็นขั้นตอนและเป็นรูปธรรม เพื่อกำหนดว่าคุณลักษณะใดของมอเตอร์ที่ควรจะทำการพิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะเสนอกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์เพื่อใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในโดยพิจารณาผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะนำเสนอกระบวนการหาพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบ ที่ช่วยลดระยะเวลาของขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการทดสอบ และเพื่อเป็นส่วนช่วยสำคัญในการนำไป

ประยุกต์ใช้ในกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้จริงในภาคปฏิบัติ โดยจะตรวจสอบผลลัพธ์จากการนำพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบไปปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับระบบเครื่องปรับอากาศ และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับระบบที่ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยตรงจากผู้ผลิต โดยสามารถเขียนเป็นแผนภาพแนวคิดการวิจัยได้ดังรูปที่ 1 และตารางการเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมในอดีตกับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 1: แผนภาพแนวคิดการวิจัย

ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมในอดีตกับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย

วิธีการ	ค่าพารามิเตอร์	ค่าความเหนี่ยวนำพิจารณาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก		แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำพิจารณาส่วนประกอบฮาร์มอนิก	
		หาค่าพารามิเตอร์	ประยุกต์ใช้ในสมการควบคุม	หาค่าพารามิเตอร์	ประยุกต์ใช้ในสมการควบคุม
วิธีเดิมในอุตสาหกรรม	ได้รับจากผู้ผลิตมอเตอร์	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [2], [6], [7]	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [3], [4]	จำลอง (simulation)	พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [5]	จำลอง (simulation)	พิจารณา	พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา
วิธีเดิมในงานวิจัยอดีต [9], [10]	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	ไม่ได้พิจารณา	ไม่ได้พิจารณา	พิจารณา	พิจารณา
วิธีที่นำเสนอ	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	พิจารณา	พิจารณา	พิจารณา	พิจารณา

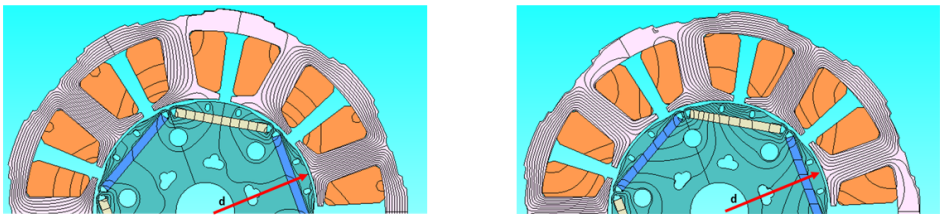
ระเบียบวิธีวิจัย

1. กระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์

1.1 การตรวจสอบหาค่าความเหนี่ยวนำที่คำนึงถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก

โดยปกติแล้วการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรอบอ้างอิงหมุนแบบ 2 มิติ (แกน d, q) จะสามารถพิจารณาได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำของแกน d และแกน q นั้นเป็นอิสระต่อกันเพื่อความง่ายในการคำนวณ แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าความเหนี่ยวนำของแกน d และแกน q นั้นมีผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กซึ่งกันและกันอยู่ จากรูปที่ 2 จะแสดงได้ว่าเมื่อพิจารณาฟลักซ์แม่เหล็กบนแกน d ที่กระแส i_d มีค่าคงที่ (i_d มีค่า -10A) เส้นแรงฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนไป เมื่อกระแส i_q มีค่าเพิ่มมากขึ้น (i_q เพิ่มขึ้นจาก 0A เป็น 10A)

โดยผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำงาน ณ ที่จุดโหลดทำงานที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กอย่างมาก [2] ซึ่งมอเตอร์ที่มีค่า L_d, L_q ที่ใกล้เคียงกัน หรือข้อมูลค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากผู้ผลิต มีจุดทำงานที่ L_q มีค่าน้อยกว่า L_d จะได้รับผลกระทบสูง เนื่องจากการคำนวณแรงบิดที่เกิดจากความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance torque) ในมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน จะพิจารณาถึงค่าความเป็นขั้วยื่น ($L_q - L_d$) ดังนั้นถ้าจุดทำงานที่ L_q มีค่าน้อยกว่า L_d และไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก จะทำให้ค่าผิดพลาดของการควบคุมมอเตอร์มีค่ามาก



ก) เงื่อนไข i_d = -10A และ i_q = 0A ข) เงื่อนไข i_d = -10A และ i_q = 10A

รูปที่ 2: ฟลักซ์แม่เหล็กบนแกน d พิจารณาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก

ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q (L_d, L_q) ที่คำนึงถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

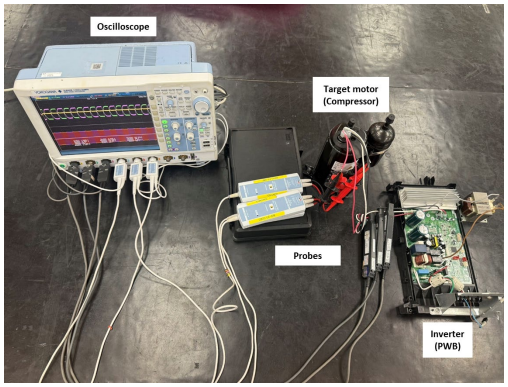
$$L_q(i_d, i_q)i_q = L_{qq}(0, i_q)i_q + L_{qd}(i_d, i_q)i_d \quad (1)$$

$$L_d(i_d, i_q)i_d = L_{dd}(i_d, 0)i_d + L_{dq}(i_d, i_q)i_q \quad (2)$$

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่จะนิยมหาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q (L_d, L_q) โดยวิธีการจำลองมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ด้วยวิธี Finite Element Analysis (FEA) [3], [4], [5] แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาใช้งานต่อ อย่างไรก็ดี วิธีการจำลองมอเตอร์นั้นทำได้ยากในอุตสาหกรรมซึ่งต้องพึ่งพาข้อมูลเชิงลึกจากผู้ผลิตมอเตอร์ อีกทั้งบางข้อมูลยังเป็นความลับของผู้ผลิต งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการทดสอบหาค่ากระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q จาก [2], [6] มาประยุกต์ใช้

ในการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q (L_d, L_q) ที่มีผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กนั้น จะทำได้โดยใช้อุปกรณ์และการติดตั้งการทดสอบดังรูปที่ 3 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

กรณีหาค่าผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กจากแกน d ที่มีต่อความเหนี่ยวนำแกน q (L_{qd})



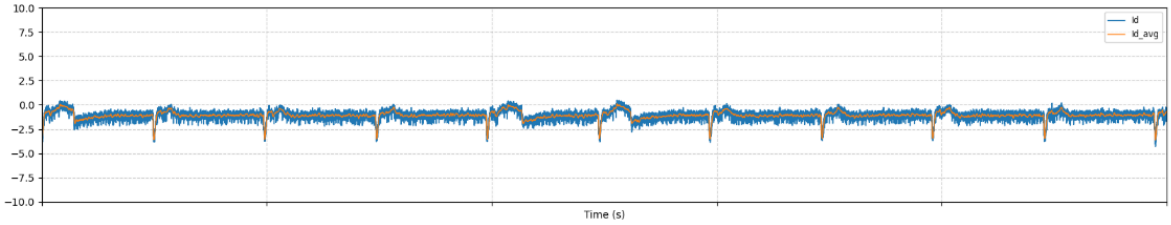
รูปที่ 3: อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์

1) ทำการล็อกโรเตอร์เข้าที่มุมใด ๆ และเลือกค่ามุมในขั้นตอนแปลงแกนระหว่าง 2 มิติ d, q และแกน 3 มิติ u, v, w ให้ตรงกับมุมที่ทำการล็อกโรเตอร์ (เช่น มุม 0 องศา เทียบกับขดลวดแกน u) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4: ตัวอย่างการล็อกโรเตอร์ที่มุม 0 องศา (ทำการเชื่อมยึดติดแกนโรเตอร์เข้ากับฐาน)

2) เลือกจ่ายกระแสคำสั่งแกน d ($i_d{}^*$) -1A ผ่านการควบคุมแบบย้อนกลับเฉพาะแกน d ดังรูปที่ 5

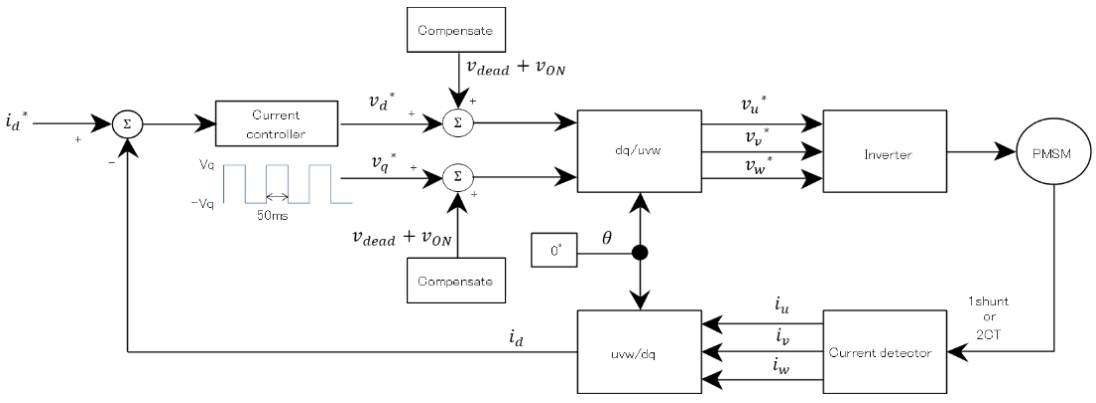


รูปที่ 5: กราฟแสดงผลลัพธ์จ่ายกระแสคำสั่งแกน d ($i_d{}^*$) -1A

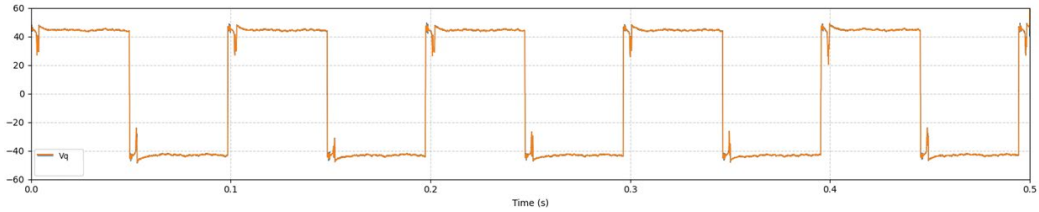
3) เลือกจ่ายแรงดันคำสั่งแกน q ($v_q{}^*$) ที่มีสัญญาณเป็นพัลส์ฝั่งบวกและฝั่งลบ โดยเลือกขนาดแรงดันให้ครอบคลุมกระแสแกน q สูงสุดที่มีการใช้งาน สามารถคำนวณ $v_q{}^*$ คร่าว ๆ ได้จากสมการที่ (3)

$$v_q{}^* = i_{q,max} \times R_s \tag{3}$$

โดยในขั้นตอนการคำนวณหา $v_d{}^*, v_q{}^*$ สำหรับจ่ายให้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ในระบบควบคุม จำเป็นที่จะต้องทำการชดเชยแรงดันที่ได้รับผลกระทบจากเวลาเว้นว่าง (dead time) ของอินเวอร์เตอร์ และผลกระทบจากแรงดันตกคร่อมที่สูญเสียที่อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ v_d, v_q ที่เกิดขึ้นบนขดลวดมอเตอร์ มีค่าตรงกับแรงดันคำสั่ง $v_d{}^*, v_q{}^*$ ที่ต้องการ จะได้ระบบควบคุมสำหรับทดสอบดังรูปที่ 6 และได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6: ระบบควบคุมที่ใช้สำหรับทดสอบหาค่า L_{qd}

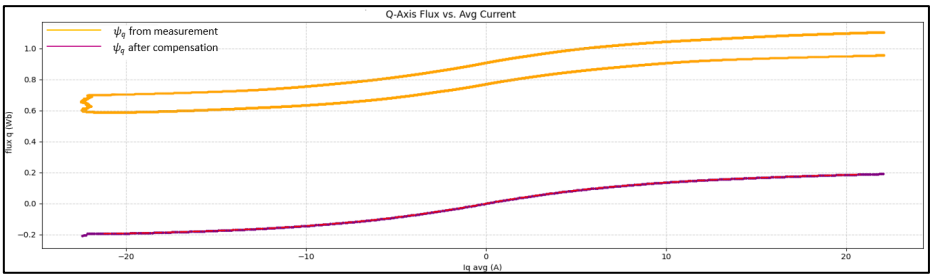


รูปที่ 7: กราฟแสดงผลลัพธ์จ่ายแรงดันคำสั่งแกน q ($v_q{}^*$) 45V

4) ขณะที่จ่ายแรงดันไปยังมอเตอร์ เนื่องจากโรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้ ($\omega = 0$) ทำให้เราสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกน q (ψ_q) ได้ดังสมการที่ (4)

$$\psi_q(\tau) = \int_0^t \left(v_q(\tau) - Ri_q(\tau)\right) d\tau \tag{4}$$

5) นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 มาพล็อตกราฟระหว่าง ψ_q และ i_q โดยเลือกข้อมูลมา 1 รอบวัฏจักรแม่เหล็ก โดยที่นำข้อมูล ψ_q ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยที่กระแส i_q เดียวกัน และเนื่องจากระหว่างการทดสอบอาจจะมีฟลักซ์ตกค้างอยู่ด้วย จึงทำการชดเชยกราฟ ψ_q ให้จุดที่ $i_q = 0$ มีค่าเฉลี่ยของ $\psi_q = 0$ ตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8: ตัวอย่างกราฟระหว่าง ψ_q และ i_q

6) คำนวณหาค่า L_q ที่สัมพันธ์กับค่า i_q ในรูปของ $L_q(i_d, i_q)$ ดังสมการที่ (5)

$$L_q(-1, i_q) = \frac{\psi_q}{i_q} \tag{5}$$

7) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 จนถึงขั้นตอนที่ 6 โดยที่เปลี่ยนค่า $i_d{}^*$ ทีละค่าให้ครอบคลุมตั้งแต่กระแสน้อยที่สุด ไปจนถึงกระแสสูงสุดที่มีการใช้งาน (อาทิเช่น $i_d{}^*$ = -14A, ..., -1A, 0A, 1A, ..., 5A สำหรับมอเตอร์ที่มีการใช้งานกระแสแกน d ตั้งแต่ -14A ไปจนถึง 5A)

8) สามารถหาค่า L_{qd} ได้ดังสมการที่ (6) โดยใช้ค่า L_q จากสมการที่ (5) และค่า L_{qq} คำนวณจากกรณีที่ $i_d = 0$

$$L_{qd}(i_d, i_q) = \frac{L_q(i_d, i_q)i_q - L_{qq}(0, i_q)i_q}{i_d} \tag{6}$$

โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: สรุปขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอน	วิธีการ	ผลลัพธ์
1	ทำการล็อคตำแหน่งของโรเตอร์	โรเตอร์ไม่สามารถขยับได้ (ไม่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ)
2	จ่ายกระแสคำสั่งแกน d ($i_d{}^*$)	ได้กระแสแกน d ที่เป็นค่าคงที่
3	จ่ายแรงดันคำสั่งแกน q ($v_q{}^*$) เป็นพัลส์ฝั่งบวก และฝั่งลบ	ได้กระแสแกน q สลับฝั่งบวกและลบซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ กระแสแกน d ค่าคงที่
4	คำนวณหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กแกน q	ได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กแกน q ที่ขึ้นอยู่กับ i_d และ i_q
5	พล็อตกราฟระหว่าง ψ_q และ i_q	ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ψ_q และ i_q ณ กระแสแกน d ค่าคงที่
6	คำนวณหาค่า L_q	ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง L_q และ i_q ณ กระแสแกน d ค่าคงที่
7	ซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2-6 โดยเปลี่ยนค่ากระแสคำสั่งแกน d ($i_d{}^*$)	ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง L_q และ i_q ณ กระแสแกน d ของแต่ละค่าคงที่
8	คำนวณหาค่า L_{qd}	ได้ค่า L_{qd} ของแต่ละกระแส i_d และ i_q

กรณีหาค่าผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กจากแกน q ที่มีต่อความเหนี่ยวนำแกน d (L_{dq})

ขั้นตอนในการหา L_{dq} นั้นให้ทำเหมือนกรณีหาค่า L_{qd} แต่เปลี่ยนจากจ่ายกระแสคำสั่งแกน d ($i_d{}^*$) และแรงดันคำสั่งแกน q ($v_q{}^*$) ไปเป็นจ่ายกระแสคำสั่งแกน q ($i_q{}^*$) และแรงดันคำสั่งแกน d ($v_d{}^*$) แทน จะสามารถหาค่า L_{dq} ได้ ดังสมการที่ (7)

$$L_{dq}(i_d, i_q) = \frac{L_d(i_d, i_q) i_d - L_{dd}(i_d, 0) i_d}{i_q} \tag{7}$$

อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ $L_q, L_d, L_{qq}, L_{dd}, L_{qd}, L_{dq}$ ได้จากกระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ที่ได้เสนอไปนั้นมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ เนื่องจากพารามิเตอร์มีจำนวนมาก และการทำข้อมูลแบบตารางค้นหา (lookup table) ไม่สามารถใช้งานได้กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม ซึ่งมีข้อจำกัดด้านหน่วยความจำ จึงจำเป็นต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ L_q, L_d, L_{qq}, L_{dd} ด้วยการประมาณพหุนามแบบสไปลน์ 3 มิติ และจะทำการลดความละเอียดของการประมาณพหุนามแบบสไปลน์ 3 มิติลง โดยที่ค่าประมาณที่คำนวณได้ ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และจำนวนเซตของค่าสัมประสิทธิ์มีจำนวนไม่มากเกินไป งานวิจัยนี้จึงเลือกค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้ผ่านเงื่อนไขทางสถิติของค่าความผันแปรของตัวแปร (R-squared) > 0.95 ค่าความแปรปรวน (variance) < 1×10^{-6} และมีค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าไม่เกิน 1mH โดยทุกค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากพหุนามแบบสไปลน์ 3 มิติแบบลดความละเอียดจะต้องผ่านเงื่อนไขทั้งสามข้อข้างต้น แล้วจึงนำค่า สัมประสิทธิ์ไปใช้ในการคำนวณความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ในการควบคุม ดังสมการที่ (8) และ (9) แล้วจึงไปหาค่า L_{qd}, L_{dq} ด้วยสมการที่ (6) และ (7) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

$$L_q(i_d, i_q) = \mathrm{A}_{00} + \mathrm{A}_{10} i_d + \mathrm{A}_{01} i_q + \mathrm{A}_{20} {i_d}^2 + \mathrm{A}_{11} i_d i_q + \mathrm{A}_{02} {i_q}^2 \tag{8}$$

$$L_d(i_d, i_q) = \mathrm{B}_{00} + \mathrm{B}_{10} i_d + \mathrm{B}_{01} i_q + \mathrm{B}_{20} {i_d}^2 + \mathrm{B}_{11} i_d i_q + \mathrm{B}_{02} {i_q}^2 \tag{9}$$

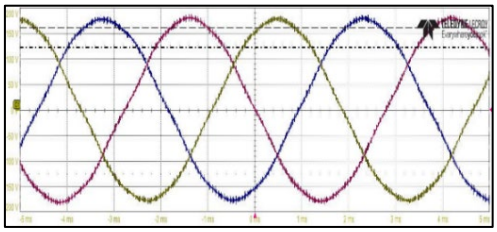
เมื่อ $\mathrm{A}_{00}, \mathrm{A}_{10}, \mathrm{A}_{01}, \mathrm{A}_{20}, \mathrm{A}_{11}, \mathrm{A}_{02}$ คือค่าสัมประสิทธ์ของ L_q ในแต่ละเงื่อนไข i_d, i_q

และ $\mathrm{B}_{00}, \mathrm{B}_{10}, \mathrm{B}_{01}, \mathrm{B}_{20}, \mathrm{B}_{11}, \mathrm{B}_{02}$ คือค่าสัมประสิทธ์ของ L_d ในแต่ละเงื่อนไข i_d, i_q

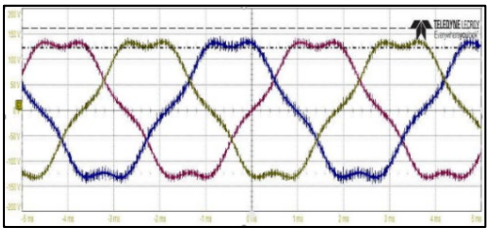
1.2 การตรวจสอบหาฟลักซ์แม่เหล็กที่คำนึงถึงผลกระทบจากการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบ

โดยปกติแล้วมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในจะมีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างเป็นไซน์ หรือมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกให้น้อยที่สุด ดังรูปที่ 9 เพื่อทำให้แรงบิดที่เกิดจากกระแสของสเตเตอร์ที่มีรูปร่างเป็นไซน์ กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่านิ่ง อย่างไรก็ตามแนวโน้มในปัจจุบัน ผู้ผลิตมอเตอร์ได้มีการเสนอมอเตอร์ที่มีลักษณะของ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างไม่เป็นไซน์ ดังรูปที่ 10 เพื่อให้ได้ราคาต้นทุนที่ถูกลง และได้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งการควบคุมมอเตอร์แบบนี้ด้วยระบบการควบคุมแบบเดิมที่มีการป้อนแค่กระแสสเตเตอร์รูปร่างเป็นไซน์ จะทำให้เกิดระลอกแรงบิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องนำสัญญาณของมอเตอร์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 10 มาหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อจะชดเชยระลอกแรงบิดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่อไปได้

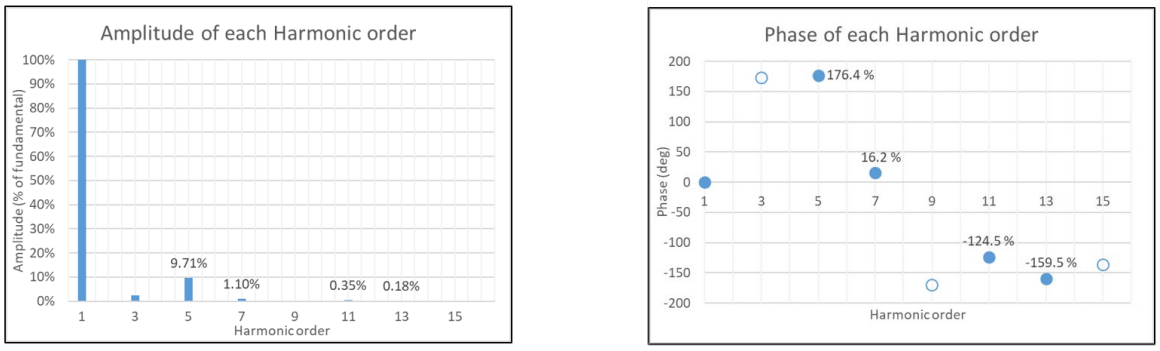


รูปที่ 9: มอเตอร์ที่มีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างเป็นไซน์



รูปที่ 10: มอเตอร์ที่มีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างไม่เป็นไซน์ และมีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบ

จากข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปร่างไม่เป็นไซน์ที่ได้มาจากผู้ผลิตดังรูปที่ 10 สามารถนำไปหาส่วนประกอบของฮาร์มอนิกได้โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งผลลัพธ์จะได้เป็นค่าแอมพลิจูดและมุมเลื่อนเฟสของฮาร์มอนิกแต่ละออเดอร์ดังรูปที่ 11 เนื่องจากฮาร์มอนิกออเดอร์ 3, 9, 15, ... ในระบบมอเตอร์ 3 เฟส 3 สายของแต่ละเฟส มีค่ารวมกันแล้วจะหักล้างกันเป็นศูนย์จึงไม่พิจารณา จากนั้นจะสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



ก) แอมพลิจูด ข) มุมเลื่อนเฟส

รูปที่ 11: ผลลัพธ์การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

จากรูปที่ 11 เนื่องจากแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกมีค่าที่เป็นนัยสำคัญคือฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และมุมเลื่อนเฟสของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าประมาณ 180 องศา ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน จึงนิยามฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u ดังสมการที่ (10)

$$\psi_u = \psi_1 \cos\theta + \psi_5 \cos 5\theta \tag{10}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการที่ (11) และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกดังสมการที่ (12)

$$E_u = \frac{d}{d_t}\psi_u \tag{11}$$

$$E_u = -\omega_e(\psi_1 \, sin\theta + 5\psi_5 \, sin5\theta) \tag{12}$$

ดังนั้นจากค่า ω_e ที่ได้มาจากข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้มาจากผู้ผลิต และ ψ_1 กับ ψ_5 จากผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว จึงสามารถนำไปคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (10) เพื่อหาฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u ที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกได้

2. การปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

2.1 สมการการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในเมื่อพิจารณาบนแกนหมุน แสดงได้ดังสมการ (13)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_a \end{bmatrix} \tag{13}$$

เนื่องจากแบบจำลองจากสมการ (13) มีความไม่สมมาตรกันของค่าเหนี่ยวนำบนแกน d และ q จึงจำเป็นต้องเขียนแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในเมื่อพิจารณาบนแกนหมุนใหม่ โดยใช้วิธี Extended back EMF [11] แสดงได้ดังสมการ (14)

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_d \\ \hat{v}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\imath}_d \\ \hat{\imath}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{E}_{ex,d} \\ \hat{E}_{ex,q} \end{bmatrix} \tag{14}$$

นิยาม

$$\begin{bmatrix} \hat{E}_{ex,d} \\ \hat{E}_{ex,q} \end{bmatrix} \triangleq E_{ex} \begin{bmatrix} \sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} + \Delta\omega L_d \begin{bmatrix} \hat{\imath}_q \\ -\hat{\imath}_d \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\Delta\omega$ คือค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของความเร็วของโรเตอร์ และปกติแล้วจะประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์

เมื่อนำความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนเหนี่ยวนำมาพิจารณา จะสามารถหาความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ได้ แสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$\Delta\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{E}_{ex,d}}{\hat{E}_{ex,q}}\right) \approx \frac{\hat{E}_{ex,d}}{\hat{E}_{ex,q}} \tag{15}$$

โดยปกติแล้วความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์จะมีการควบคุมแบบย้อนกลับให้ได้ค่าใกล้เคียงศูนย์ ทำให้สมการที่ (15) สามารถเขียนในรูปของพารามิเตอร์ที่อยู่ในแกน d, q ได้ดังสมการที่ (16)

$$\Delta\theta = \frac{v_d - R_s i_d + pL_d i_d + \omega_e L_q i_q}{v_q - R_s i_q + pL_d i_q - \omega_e L_q i_d} \tag{16}$$

อย่างไรก็ตามการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้วิธี Extended back-EMF [11] ไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากการที่แกนเหล็กอิ่มตัว และผลกระทบจากการเชื่อมโยมข้ามทางแม่เหล็กระหว่างแกน d และแกน q

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำที่คิดถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็ก จะเขียนได้ดังสมการที่ (17) และ (18)

$$\psi_d(i_d, i_q) = L_{dd}i_d + L_{dq}i_q + \psi_a \quad (17)$$

$$\psi_q(i_d, i_q) = L_{qq}i_q + L_{qd}i_d \quad (18)$$

ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความแม่นยำของการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ จึงจำเป็นที่จะต้องคิดถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้วิธี Extended back EMF [5] ดังแสดงในสมการที่ (19)

$$\Delta\theta = \frac{v_d - R_s i_d + pL_{dd}i_d + \omega_e L_{qq}i_q + \omega_e L_{qd}i_d}{v_q - R_s i_q + pL_{dd}i_q - \omega_e L_{qq}i_d + \omega_e L_{qd}i_q} \quad (19)$$

2.2 สมการการคำนวณแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน

จากสมการแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในทั่วไป (20)

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\ &= \frac{P}{2}(\psi_a i_q) + \frac{P}{2}(L_d - L_q) i_d i_q \triangleq T_{avg} \end{aligned} \quad (20)$$

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกกับกระแสสเตเตอร์ที่เป็นสัญญาณไซน์ ทำให้เกิดระลอกของแรงบิดที่ไม่ต้องการขึ้นมา ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพลดลง เกิดการสั่น และมีผลกระทบต่อการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง [9] นิยามฟลักซ์แม่เหล็กที่คำนึงถึงผลกระทบจากการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีส่วนผสมของฮาร์มอนิก จะเขียนได้ดังสมการที่ (21) และ (22)

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_a + \psi_{d,har} \quad (21)$$

$$\psi_q = L_q i_q + \psi_{q,har} \quad (22)$$

จากสมการข้างต้นจะสามารถหาสมการแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน กรณีที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกได้ดังสมการที่ (23)

$$T_e = \frac{P}{2}((\psi_a + \psi_{d,har}) i_q - \psi_{q,har} i_d) + \frac{P}{2}(L_d - L_q) i_d i_q \triangleq T_{avg} + \Delta T \quad (23)$$

เมื่อ ΔT คือระลอกของแรงบิด

งานวิจัยในอดีตพิจารณาการลดระลอกของแรงบิดโดยการป้อนกระแสฮาร์มอนิกเข้าไปยังกระแสคำสั่งโดยอาศัยการพิจารณาจากค่าฟลักซ์เชื่อมโยงที่มีส่วนผสมของฮาร์มอนิก [10] แต่ว่าสมการที่ใช้ในงานวิจัย มีการชดเชยทั้งกระแสคำสั่งแกน d ($i_{dh}{}^*$) และกระแสคำสั่งแกน q ($i_{qh}{}^*$) งานวิจัยนี้จะเสนอแนวคิดที่จะทำการชดเชยเฉพาะกระแสคำสั่งแกน q ($i_{qh}{}^*$) เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงกับการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ในอุตสาหกรรม

นิยามกระแสคำสั่งแกน q ($i_q{}^*$) รวมที่พิจารณากระแสคำสั่งชดเชย $i_{qh}{}^*$ ได้ดังสมการที่ (24)

$$i_q{}^* = i_{q0}{}^* + i_{qh}{}^* \quad (24)$$

และจากสมการที่ (10) เมื่อทำการแปลงแกนฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u, v, w ไปบนแกน d, q จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (25) และ (26)

$$\psi_{d,har} = \psi_5 \cos 6\theta \quad (25)$$

$$\psi_{q,har} = -\psi_5 \sin 6\theta \quad (26)$$

สามารถทำการหาค่ากระแสคำสั่งชดเชย $i_{qh}{}^*$ ที่ทำให้ระลอกของแรงบิด ΔT มีค่าเท่ากับศูนย์ ได้ดังสมการที่ (27)

$$i_{qh}{}^* = \frac{(-\psi_5 \cos 6\theta \times i_{q0}{}^* - \psi_5 \sin 6\theta \times i_{d0}{}^*)}{(L_d - L_q) i_{d0}{}^* + \psi_a} \tag{27}$$

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลลัพธ์ของกระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสำหรับการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ และผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ที่ได้มาเพื่อทดสอบการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง จะถูกตรวจสอบผลลัพธ์โดยการทดลองการทำงานของระบบที่ต่อเข้ากับมอเตอร์ตัวอย่างในคอมเพรสเซอร์ของผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศ ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง และมีพารามิเตอร์ที่ได้รับจากผู้ผลิตตามตารางที่ 3 และ 4

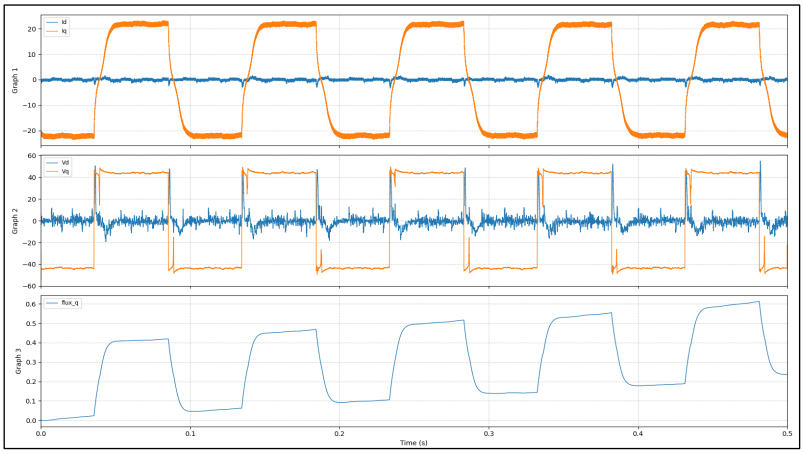
ตารางที่ 3: พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิต

จำนวนขั้ว	**วิธีการพันขดลวด**	**จำนวน slot**	$\boldsymbol{J}$
6	Concentrated winding	9	1.63[10^{-4}kg · m^2]
$\boldsymbol{\psi_a}$	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{N_{m,rated}}$	$\boldsymbol{V_{rated}}$
0.1496[Wb]	3.55[Ω]	10-120[rps]	380[V]

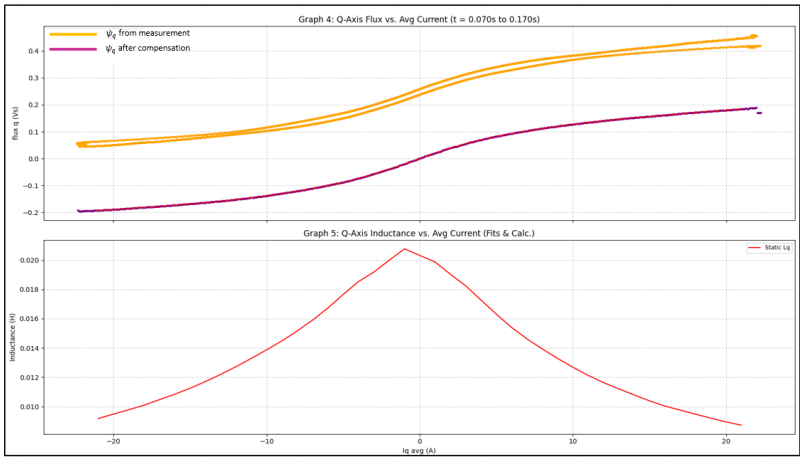
ตารางที่ 4: ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิต

พารามิเตอร์	**ข้อมูลพารามิเตอร์จากผู้ผลิต**									
I_d [A]	1.73	3.46	5.20	6.93	8.66	10.39	12.12	13.86	15.59	17.32
L_d [mH]	10.52	10.58	10.25	9.98	9.76	9.57	9.40	9.26	9.11	8.98
I_q [A]	1.73	3.46	5.20	6.93	8.66	10.39	12.12	13.86	15.59	17.32
L_q [mH]	17.88	17.10	16.32	15.46	14.59	13.77	12.98	12.14	11.38	10.71

ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยจะได้ผลลัพธ์สำหรับ $V_d, V_q, i_d, i_q, \psi_q$ เทียบกับเวลา และ ψ_q, L_q เทียบกับ i_q ของเงื่อนไขที่ครอบคลุมการใช้งานกระแสแกน d (i_d) ตั้งแต่ -14A ไปจนถึง 5A และได้ผลลัพธ์สำหรับ $V_d, V_q, i_d, i_q, \psi_d$ เทียบกับเวลา และ ψ_d, L_d เทียบกับ i_d ของเงื่อนไขที่ครอบคลุมการใช้งานกระแสแกน q (i_q) ตั้งแต่ -5A ไปจนถึง 20A โดยจะแสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ในรูปที่ 12 และ 13

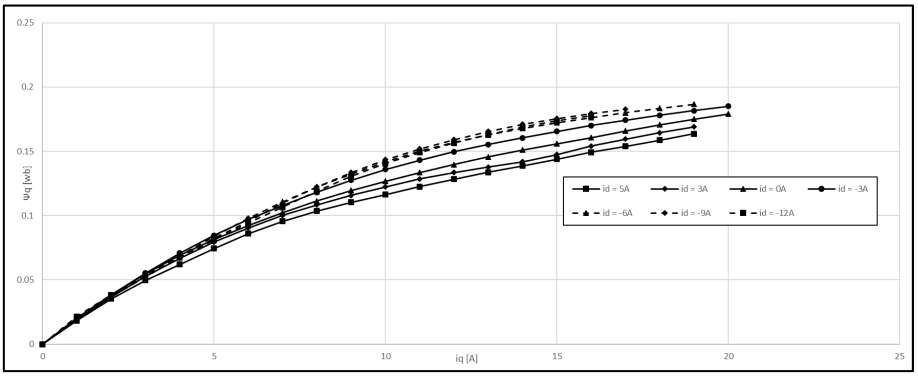


รูปที่ 12: ตัวอย่างผลการทดสอบของ $V_d, V_q, i_d, i_q, \psi_q$ เทียบกับเวลา สำหรับเงื่อนไข $i_d = 0$A

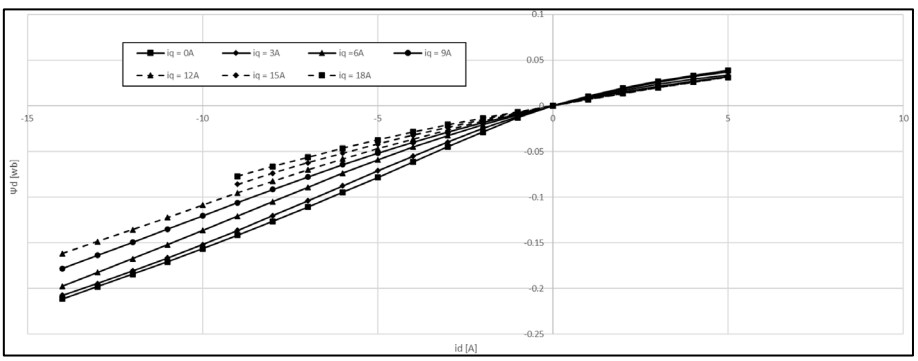


รูปที่ 13: ตัวอย่างผลการทดสอบของ ψ_q, L_q เทียบกับ i_q สำหรับเงื่อนไข $i_d = 0\text{A}$

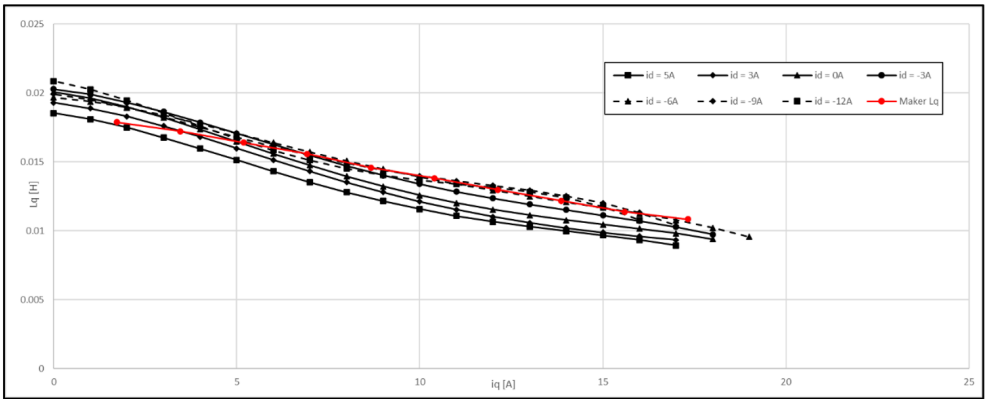
สรุปรวบรวมผลของฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก ได้ผลดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15 และผลของค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณหาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิต ดังรูปที่ 16 และ 17 จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ ที่พิจารณาถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก มีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากผู้ผลิตอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์รุ่นนี้ที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศได้รับผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก



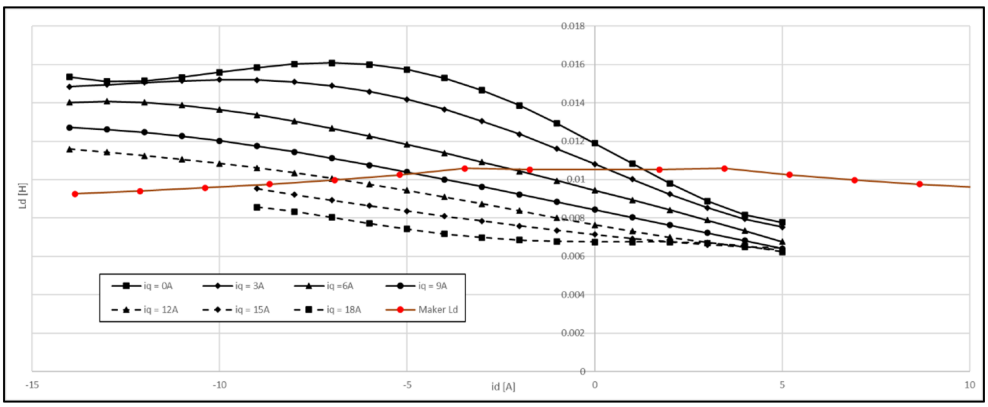
รูปที่ 14: สรุปผลการทดสอบของ ψ_q สำหรับเงื่อนไขแต่ละ i_d



รูปที่ 15: สรุปผลการทดสอบของ ψ_d สำหรับเงื่อนไขแต่ละ i_q

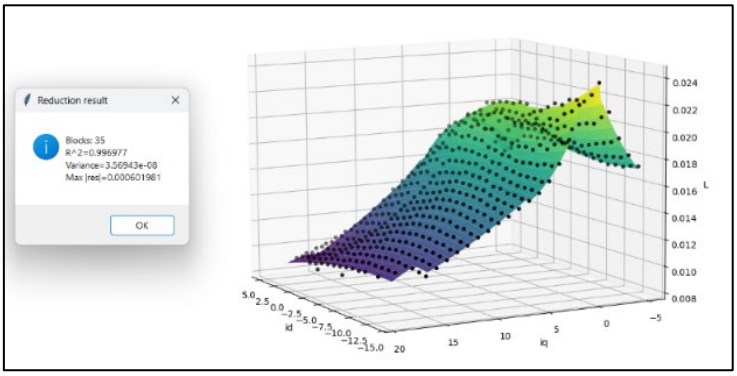


รูปที่ 16: ผลของ L_q ที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผู้ผลิต

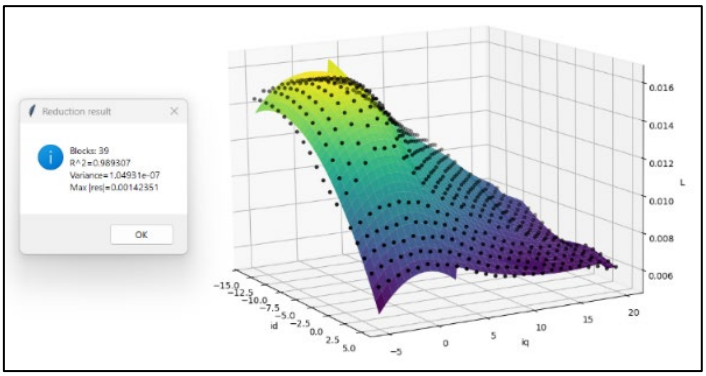


รูปที่ 17: ผลของ L_d ที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผู้ผลิต

ผลลัพธ์จากการทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ L_q และ L_d ด้วยวิธีการประมาณพหุนามแบบสไปลน์ 3 มิติ (แบบลดความละเอียด) เพื่อจะนำพารามิเตอร์ L_q และ L_d ที่ได้จากการทดสอบให้สามารถไปประยุกต์ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์ตัวอย่างในคอมเพรสเซอร์ของผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 18: ผลของ L_q ที่ได้จากการประมาณพหุนามแบบสไปลน์ 3 มิติ (แบบลดความละเอียด)



รูปที่ 19: ผลของ L_d ที่ได้จากการประมาณพหุนามแบบสไปลน์ 3 มิติ (แบบลดความละเอียด)

2. ผลลัพธ์ของการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

2.1 ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ค่าความเหนี่ยวนำในสมการการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผลการทดลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ค่าความเหนี่ยวนำจากผู้ผลิต กับระบบที่ใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง มาประยุกต์ใช้กับสมการการหาค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ ($\Delta\theta$) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากมีการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ด้วยกระบวนการที่ได้ทำการเสนอในงานวิจัยนี้ และทำการพิจารณาถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก จะทำให้การควบคุมมอเตอร์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ขอบเขตการทำงานของมอเตอร์กว้างมากขึ้น และสามารถทำงานที่จุดโหลดที่ต้องการทางด้านอุตสาหกรรมได้

ตารางที่ 5: ผลการทดลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ความเร็วรอบของมอเตอร์	**โหลดการทำงาน สูงสุดที่ต้องการ (แรงดันสูง/แรงดันต่ำ*)**	**โหลดการทำงานสูงสุดที่ทำได้ (แรงดันสูง/แรงดันต่ำ*) เมื่อใช้ค่า L จากการทดลอง**	**โหลดการทำงานสูงสุดที่ทำได้ (แรงดันสูง/แรงดันต่ำ*) เมื่อใช้ค่า L จากผู้ผลิต**
36rps	4.5MPa/1.8MPa	4.5MPa/1.8MPa	3.8MPa/1.4MPa
40rps	4.5MPa/1.8MPa	4.5MPa/1.8MPa	3.8MPa/1.4MPa
45rps	4.5MPa/1.8MPa	4.5MPa/1.8MPa	3.9MPa/1.4MPa

หมายเหตุ: โหลดการทำงานอ้างอิงแรงดันสูงของท่อ Discharge และแรงดันต่ำของท่อ Suction ของคอมเพรสเซอร์

2.2 ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ฟลักซ์แม่เหล็กในสมการการคำนวณแรงบิด

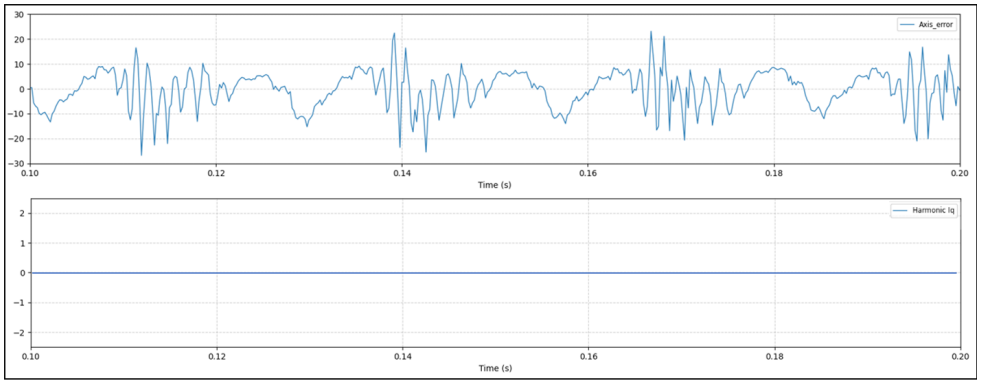
ผลลัพธ์จากการคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกโดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยใช้ข้อมูลจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากผู้ผลิต จะได้ผลลัพธ์ของแอมพลิจูดและมุมเลื่อนเฟส ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: สรุปค่าแอมพลิจูดและมุมเลื่อนเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแยกแต่ละฮาร์มอนิก

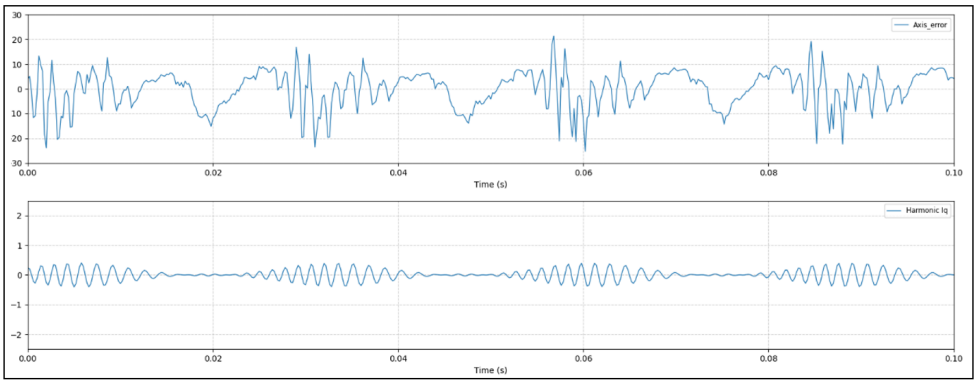
ลำดับของฮาร์มอนิก	**แอมพลิจูด**	**มุมเลื่อนเฟส**
ลำดับที่ 1 (1^{st})	135	0°
ลำดับที่ 3 (3^{rd})	3.164	172.9°
ลำดับที่ 5 (5^{th})	13.108	176.4°
ลำดับที่ 7 (7^{th})	1.476	16.2°

โดยจากผลลัพธ์ในตารางที่ 6 สามารถพิจารณาได้ว่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และเนื่องจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไม่มีผลกระทบต่อระลอกแรงบิด ดังนั้นสามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กเฟส u ได้จากสมการที่ (10)–(12) ผลลัพธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตารางที่ 6 และข้อมูล ψ_a ที่ได้จากผู้ผลิต (องค์ประกอบความถี่หลักมูลของฟลักซ์แม่เหล็ก) โดย $\psi_u = 0.1496\cos\theta - 0.002905\cos 5\theta$ และสามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กที่พิจารณาเฉพาะผลของฮาร์มอนิกบนแกน d และ q ได้เท่ากับ $\psi_{d,har} = -0.002905(\cos 6\theta)$ และ $\psi_{q,har} = -0.002905(\sin 6\theta)$

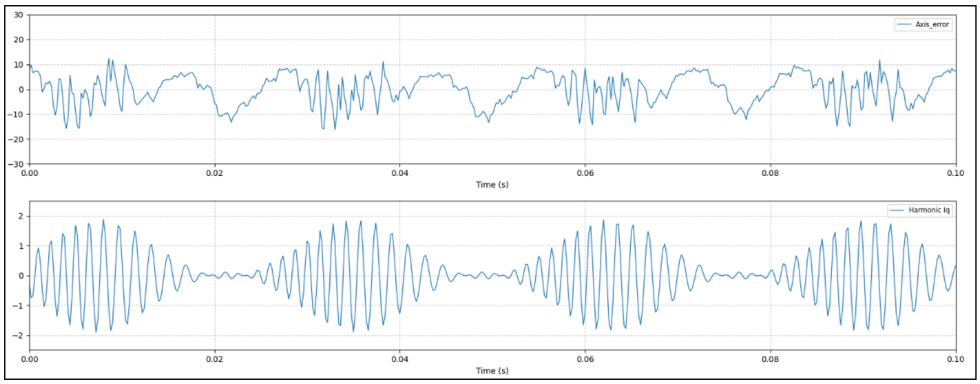
จากการนำค่า $\psi_{d,har}, \psi_{q,har}$ มาคำนวณกระแสชดเชยฮาร์มอนิกเพื่อทำการลดระลอกแรงบิด ได้ผลลัพธ์ของการทดลองได้เป็นดังรูปที่ 20 และรูปที่ 21 โดยจะพิจารณาจากระลอกของค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ ($\Delta\theta$) ที่สะท้อนมาจากระลอกแรงบิดของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ระลอกของ $\Delta\theta$ นั้นมีค่าไม่ต่างกันมาก เนื่องจากการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกอาจจะยังไม่เพียงพอ จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนของ $\psi_{d,har}, \psi_{q,har}$ ขึ้นไปเป็น 5 เท่า และทำการปรับมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิก จากมุมของตำแหน่งโรเตอร์ที่คำนวณได้เพื่อให้การชดเชยได้ผลลัพธ์ดีที่สุด โดยผลลัพธ์ของการทดลองได้เป็นดังรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่ามุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ให้ผลลัพธ์การชดเชยที่ดีที่สุดอยู่ที่มุม 90 องศา และระลอกของ $\Delta\theta$ มีค่าลดน้อยลง โดยจากเดิมที่มีค่าอยู่ที่ประมาณ +25 องศา ถึง -30 องศา ลดลงมาเหลือประมาณ +12 องศา ถึง -18 องศา หลังจากทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังรูปที่ 23 สะท้อนได้ว่าการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้อง สามารถทำให้ระลอกแรงบิดของมอเตอร์มีค่าลดลง



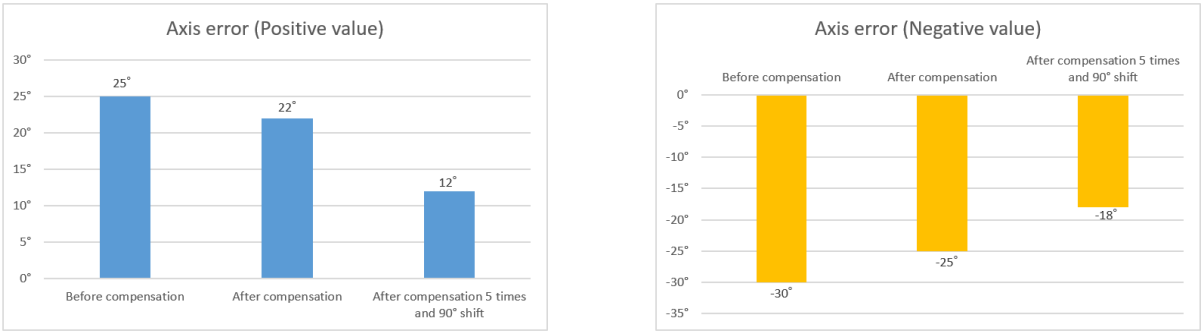
รูปที่ 20: ผลการทดลองกรณีไม่ชดเชยกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 21: ผลการทดลองกรณีชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยค่า $\psi_{d,har}, \psi_{q,har}$



รูปที่ 22: ผลการทดลองกรณีชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยอัตราส่วน 5 เท่าของ $\psi_{d,har}$, $\psi_{q,har}$ และปรับมุมเฟส 90 องศา



รูปที่ 23: กราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

สรุปผล

กระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำแกน d และ แกน q ที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก และสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่พิจารณาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกจากข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้รับจากผู้ผลิต

ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q ที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ เข้ากับสมการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งได้เป็นอย่างดี และทำให้ขอบเขตการใช้งานมอเตอร์ครอบคลุมโหลดการทำงานสูงสุดที่ต้องการของผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็ก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงของมอเตอร์ มากกว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตอย่างมีนัยสำคัญ และจากการพิจารณาถึงผลกระทบจากการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้วิธี Extended back EMF ด้วย

ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบหาพารามิเตอร์ เข้ากับสมการระลอกแรงบิด โดยการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่ได้นำเสนอในงานวิจัย สามารถปรับปรุงระลอกแรงบิดที่สะท้อนไปยังค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับค่าประมาณของตำแหน่งของโรเตอร์ ($\Delta\theta$) จากการที่สามารถลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ลงได้สูงสุดถึงร้อยละ 52 แต่ยังจำเป็นต้องมีการปรับจูนค่าอัตราส่วนและมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำการชดเชยเข้าไปในระบบ เพื่อให้ได้มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

งานวิจัยนี้เป็นผลงานสำคัญที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานในระบบอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดียิ่งขึ้น โดยกระบวนการที่นำเสนอเป็นระบบ ขั้นตอน สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการหาพารามิเตอร์ และนำไปใช้ได้จริงกับ

ระบบอุตสาหกรรม อีกทั้งยังสามารถมีส่วนช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ในระบบอุตสาหกรรมให้ดียิ่งขึ้น ครอบคลุมตลอดช่วงการใช้งานที่ต้องการ

อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรจะพิจารณาการหาค่าพารามิเตอร์แบบ Online identification เพิ่มเติมด้วย เพื่อให้สามารถหาค่าพามิเตอร์ที่สะท้อนผลจากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมอเตอร์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ถึงแม้งานวิจัยนี้จะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งได้ และสามารถประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ในอุตสาหกรรมได้จริงเมื่อเทียบกับงานวิจัยในอดีต แต่ควรจะมีการประยุกต์ใช้ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และแกน q ที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเชื่อมโยงข้ามทางแม่เหล็กที่ได้มาจากกระบวนการหาพารามิเตอร์ เข้ากับสมการอื่นที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ เช่น สมการการหากระแสคำสั่ง i_d^* และ i_q^* จากค่าแรงบิดที่ได้จากวงรอบป้อนกลับของความเร็วรอบ เพื่อจะได้ปรับปรุงจุดการทำงานของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิศวกรผู้ที่ทำงานเกี่ยวกับการออกแบบการควบคุมมอเตอร์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สามารถอ้างอิงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์และการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์สำหรับการควบคุมจากงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะสามารถลดระยะเวลาในการทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์ให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เจเนอรัล แอร์คอนดิชั่นนิ่ง อาร์แอนด์ดี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้เงินทุนในการศึกษา และให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

REFERENCES

[1] Z. Q. Zhu and X. M. Wu, *Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2023.

[2] B. Stumberger, G. Stumberger, D. Dolinar, A. Hamler, and M. Trlep, “Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor,” *IEEE Trans. Industry Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1264–1271, 2003.

[3] Z. Q. Zhu, Y. Li, D. Howe, C. M. Bingham, and D. Stone, “Influence of machine topology and cross-coupling magnetic saturation on rotor position estimation accuracy in extended back-EMF based sensorless PM brushless AC drives,” in *Proc. IEEE Industry Appl. Annu. Meeting*, New Orleans, LA, USA, Sep. 2007, pp. 2378–2385.

[4] K. Yamazaki and M. Kumagai, “Torque analysis of interior permanent-magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: variation in torque components with permanent-magnet configurations,” *IEEE Trans. Ind. Electron*., vol. 61, no. 7, pp. 3192–3201, 2014.

[5] Y. Li, Z. Q. Zhu, D. Howe, and C. M. Bingham, “Improved rotor position estimation in extended back-EMF based sensorless PM brushless AC drives with magnetic saliency,” in *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf. (IEMDC)*, Antalya, Turkey, May 2007, pp. 214–219.

[6] Z. Q. Zhu, K. Liu, and D. Liang, *Parameter Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines.* Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2025.

[7] C. Yin, Y. Liu, and F. Chen, “Motor parameter identification for compressors based on the improved DC transient method,” in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Image Process. Comput. Appl. (ICIPCA)*, Shenyang, China, Jun. 2025, pp. 92–97.

[8] T. Duraisingam, B. Li, and A. Sayed-Ahmed, “Offline self-commissioning method to estimate direct & quadrature axes inductance for IPM/SPM in industrial motor drive applications,” in *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf. (IEMDC)*, Houston, TX, USA, May 2025, pp. 329–335.

[9] H. Kim and S. Bhattacharya, “Improved rotor position estimation in extended back-EMF based position sensorless control for IPMSMs with non-sinusoidal back-EMF,” in *Proc. IEEE Industry Appl. Soc. Annu. Meeting*, Detroit, MI, USA, Oct. 2020, pp. 1–7.

[10] M. J. Nam, J. H. Kim, K.-Y. Cho, H.-W. Kim, and Y. Cho, "Torque ripple reduction of an interior PM synchronous motor by compensating harmonic currents based on flux linkage harmonics," *J. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 1223–1230, 2017.

[11] Z. Chen, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma, "An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 2, pp. 288–295, 2003.

Design and Construction of an Automation System for Battery Drop Test Machine

Tharadol Muyota[1] Tassama Mongkoldee[2] Shutchon Premchaisawatt[3*]

[1,2]*Battery and New Energy Science and Technology Factory, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand*
[3*]*Industrial Technology Program, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen, Thailand*

*Corresponding author e-mail: shutchon.pr@rmuti.ac.th

Received: 7 February 2026; Revised: 14 June 2026; Accepted: 15 June 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

This research presents the design and construction of an automated battery drop test machine developed to overcome the high costs of commercial equipment and the physical limitations of existing testers regarding large-scale battery research. The proposed system features an adjustable drop height ranging from 300 mm to 1500 mm and utilizes a stainless-steel hinge clamping mechanism for secure battery positioning. The control architecture is built upon a Siemens LOGO!8 PLC integrated with an HMI touchscreen, employing Finite State Machine (FSM) principles to ensure precise operation in both manual and automatic modes. To prioritize user safety, the machine is housed within a secure test chamber equipped with a CO_2 fire suppression system and water cooling to mitigate thermal runaway risks.

Experimental validation was conducted following the testing protocols outlined in the IEC 62133 and MIL-STD-810H standards, utilizing battery samples weighing up to 80 kg. Results confirmed the machine's ability to accurately release batteries in various orientations, including 6 surfaces, 12 edges, and 8 corners, with impacts consistently aligning with target positions. The system offers a flexible, cost-effective, and safe alternative for the continuous testing of diverse battery types, particularly those intended for electric vehicles and energy storage systems. Future work will focus on expanding compliance to include UN 38.3 and UL 2054 standards for international product certification.

***Keywords*:** Automated test machine, Battery drop test, Lithium-ion batteries, PLC control system, Product design

INTRODUCTION

Currently, battery production is crucial for global technological and economic development. This is because batteries are the primary energy storage for electronic devices like smartphones and laptops, as well as increasingly popular Electric Vehicles (EVs) and Renewable Energy Storage systems [1], [2], [3]. The demand for clean energy and reduced greenhouse gas emissions emphasizes the importance of battery research and development, especially for Lithium-ion (Li-ion) batteries, focusing on performance, safety, lifespan, and production costs [2].

Furthermore, battery production plays a significant role in the energy transition from fossil fuels to renewable energy sources, which have high production uncertainties. Effective energy storage systems enhance grid stability and support the expansion of renewable energy [3], [4]. Therefore, research and development in battery production innovation are essential for global energy security and environmental sustainability.

The drop test is a vital method for evaluating the safety and reliability of batteries, particularly Li-ion batteries widely used in electronics, EVs, and portable devices [5], [6]. This test simulates drops or impacts that may occur in daily life to assess the battery's structural integrity, as well as to prevent short circuits, electrolyte leakage, or even fire and explosion [6], [7].

Battery safety standards prioritize the drop test to define testing conditions that ensure batteries remain safe after severe impacts [7], [8]. Key standards include IEC 62133 (international safety requirements for portable lithium-ion batteries), UN 38.3 (certification required for the safe global transportation of lithium batteries), and UL 2054 (a standard assessing the safety of household and commercial batteries against fire and explosion risks). These test results provide critical information for product certification and build consumer confidence. A lack of proper drop testing can lead to safety risks to life, property, and the environment [7], [8]. Research shows that drop testing can reveal weaknesses in enclosure design, internal protection systems, and cell arrangement within the battery. This information helps developers improve designs to enhance battery safety and lifespan effectively [5], [7]. This highlights the significant importance of battery drop testing in battery development.

Currently, there are battery drop test machines available, such as figure 1 Amade-Tech IEC 62133 Battery Drop Tester (Amade-Tech, China) and DGBell BE-8108 (EMIN, Vietnam). Both are expensive and have fixed structures that cannot accommodate large batteries, which are necessary for certain types of development and research, such as tank batteries encased in large frames as illustrated in figure 2.



Figure 1: Amade-Tech Battery Impact Discharge Tester



Figure 2: Example of a battery for a tank

This research thus proposes the design and construction of a battery drop test machine for initial drop test data collection for research purposes. This machine can drop batteries from various positions to test multiple drop configurations, using affordable, basic equipment and incorporating automated safety features.

A battery drop test machine is essential for evaluating battery safety, especially for Li-ion batteries. These batteries must meet international standards, such as IEC 62133-2:2017 [8], [9], to ensure they can withstand impacts from dropping without becoming hazardous. Key features of such machines typically include:

Adjustable Drop Height: The machine allows for drop heights ranging from 300 mm to 1500 mm, simulating various drop scenarios (Guangdong Bell Experiment Equipment, China).

Pneumatic Gripping System: A pneumatic system secures the battery in place before release, ensuring precise and safe testing (Guangdong Bell Experiment Equipment, China).

Safe Test Chamber Structure: The test chamber is often constructed from high-quality stainless steel, featuring a safety glass door and an explosion-proof system for user protection [10].

PLC and Touchscreen Control: Users can configure test parameters and operate the machine via a touchscreen connected to a PLC system, which makes operation convenient and accurate (Guangdong Bell Experiment Equipment, China).

International Standard Compliance: Test machines are designed to comply with standards like IEC 62133, UL 2054, and UN 38.3. This ensures that batteries passing the tests are safe for use and transport [11].

The researchers will incorporate all these features into the design, except for the official equipment certification for IEC 62133, UL 2054, and UN 38.3 standards. Evaluating the machine for full compliance requires further testing, which is beyond the scope of the current research.

METHODS

The methodology follows Norton [12] for its systematic integration of design theory and practice. This approach ensures that critical safety and structural calculations are verified prior to construction, enabling precise refinements for testing heavy-duty batteries as illustrated in figure 3.

1. Specification Analysis

This involves identifying user requirements, including adjustable height, a pneumatic gripping system, a PLC system structure, a safe test chamber structure, the range of battery sizes to be tested, and the maximum supported battery weight.

2. Information Gathering & Conceptual Design

This step focuses on studying technical information related to pneumatic systems, PLCs, and touchscreen connectivity. It also involves researching impact-resistant and explosion-proof materials such as stainless steel and tempered glass. Additionally, existing battery drop test machines on the market are surveyed for comparative analysis.

3. Preliminary Design & Calculation

This stage includes calculating the impact force generated by batteries when dropped from various heights. The structural components are sized to withstand impact forces without deformation. Suitable materials are selected, including stainless steel 304 for the main structure, tempered glass for the test chamber door, and pneumatic cylinders for the gripping system.

4. Detailed Design

This stage involves creating 2D/3D drawings using CAD software. The drawings will illustrate the following details: the clamping mechanism, the lifting and dropping system, the touchscreen control panel, and safety systems (e.g., safety switches, door sensors).

5. Prototype & Testing

A prototype will be constructed to test the actual operation. This test will involve dropping batteries at specific positions as shown in figure 4, which include C: Corner, E: Edge, and S: Surface. The objective is to verify if the automated battery drop test machine can accurately drop batteries at the desired locations, ensure operational safety, and confirm compliance with relevant standards. Any identified issues will lead to design revisions.

6. Finalization

The design will be refined based on the test results. Subsequently, an operation and maintenance manual will be prepared.

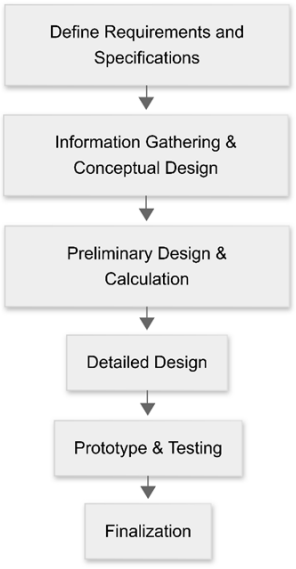


Figure 3: The development process for the automated battery drop test machine

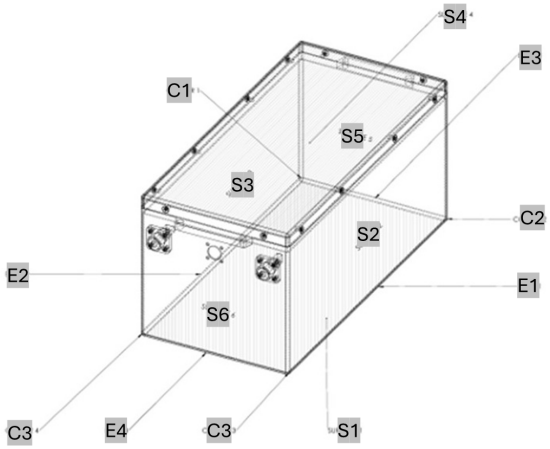


Figure 4: Battery drop location

RESULTS AND DISCUSSION

1. Result of Requirements and Specifications

The automated battery drop test machine features an adjustable drop height of 300–1500 mm. Batteries are secured by a bracket attached to stainless steel hinges, allowing them to drop onto a base below. The control system for the battery drop test machine and safety devices utilizes a PLC controlled by an HMI. The test chamber is constructed within a stainless-steel container and accommodates batteries up to 480 mm long (excluding handles and terminals), 235 mm wide, and 230 mm high, with a maximum weight capacity of 100 kg.

2. Result of Information Gathering and Conceptual Design

For the PLC control system, the Siemens LOGO!8 version 8.4 [13] was selected due to its industrial capabilities [14], [15], [16], [17] and cost-effectiveness compared to other brands in the same class. It allows for sufficient I/O expansion to meet requirements. The HMI chosen is the Samkoon SK-070QS-G, a touchscreen model with an Ethernet port for communication with the LOGO!8 via Modbus TCP [17], which is an industry standard. The structure of the automated battery drop test machine and safety systems, such as glass, fans, and lighting, are made from impact-resistant and explosion-proof materials.

Damaged batteries that may ignite or explode are managed by CO_2 suppression [18], [19], [20]. CO_2 is a non-flammable gas that can reduce oxygen in the affected area, thereby extinguishing flames. Large quantities of water are also used to reduce heat [21], [22], [23] from thermal runaway [24], preventing adjacent cells from being affected. Once the situation is stable, CO_2 is extracted by an exhaust fan, allowing safe access to retrieve the battery.

3. Result of Preliminary Design and Calculation

The size and power hoist for lifting the heaviest battery (100 kg), with a hoist radius of 20 cm were calculated using the torque equation, where *W* is the weight (in newton, N) representing the force exerted on an object due to gravity, *m* is the mass (in kilogram, kg) indicating the amount of matter in an object (In this case 100 kg), *g* is the acceleration due to gravity (in meter per second squared, m/s^2) which is a constant value, approximately 9.81 m/s^2 on Earth, **τ** is the torque (in newton-meter, Nm) representing a rotational force, F is the force (in newton, N) applied to create the torque (in this case, the weight, W, of the battery, which is 981 N), and r is the radius (in meter, m) of pulley hoist which lifts the battery, which is 0.2 m in this case.

$$W = m \times g \tag{1}$$

$$W = 100\ kg \times 9.81\ m/s^2 = 981\ N$$

$$\tau = F \times r \tag{2}$$

$$\tau = 981\ N \times 0.2\ m = 196.2\ Nm$$

Therefore, the motor driving the hoist must have a power greater than 196.2 Nm.

The impact force was calculated to determine the material for the drop base, with a maximum specified height (h) of 1.5 m. The calculation used the following equation, where *PE* is potential Energy (in joule, J) representing

the energy an object possesses due to its position or state, *h* is the height (in meter, m) which is the vertical distance from a reference point (1.5 m in this case).

$$PE = m \times g \times h \tag{3}$$
$$PE = 100\,kg \times 9.81\,m/s^2 \times 1.5\,m = 1471.5\,J$$

Assuming no air resistance, the potential energy (PE: 1,471.5 J) is entirely converted into kinetic energy (KE) upon impact with the ground, where KE is the kinetic energy (in joule, J) representing the energy an object possesses due to its motion, and v is the velocity (in meter per second, m/s) indicating the speed of the object in a given direction.

$$PE = KE \tag{4}$$
$$KE = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \tag{5}$$
$$1471.5\,J = \frac{1}{2} \times 100\,kg \times v^2$$
$$v = 5.42\,m/s$$

From (5), the obtained velocity is 5.42 m/s. Thus, the impact force depends on the stopping time or distance of the object (Δt or Δx). If the surface is hard, the stopping distance is short, and the force will be high. If the surface is soft, the stopping distance is long, and the force will be lower. Assuming the object stops within a distance of 2 cm (0.02 m), the Work-Energy theorem is applied, where d is the stopping Distance (in meter, m) representing the distance over which the object decelerates to a stop.

$$F \times d = \frac{1}{2} m \times v^2 \tag{6}$$
$$F \times 0.02\,m = 1471.5\,J$$
$$F = 73{,}575\,N$$

Thus, the impact force is 73,575 N. Suitable materials for the impact base include reinforced concrete or steel [25]. Therefore, these materials are used as a base to support the battery from being dropped.

The pneumatic system operates at a pressure of 5 bar, in accordance with industrial standards [26], to control the safety valves for water and CO_2.

Regarding control logic, the PLC control system [27] that operates the battery drop test machine and its safety system employs the finite state machine (FSM) principle [28]. FSM is a method used in designing sequential logic by considering changes in system states based on received inputs, commonly applied in industrial automation. This approach breaks down potential scenarios, defining when each scenario occurs and which devices are active during that scenario.

4. Result of Detailed Design

The automated battery drop test machine was designed using CAD software, as shown in figure 5. The test chamber's layout, including a rough sketch of its internal components, is presented in figure 6. Please note that these designs may undergo future modifications.

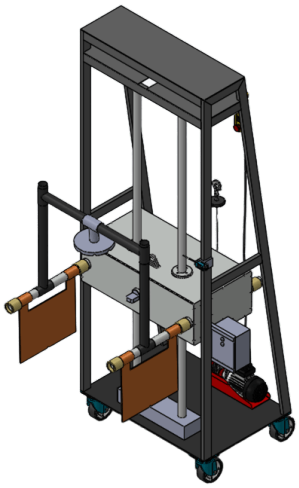


Figure 5: Automated battery drop test machine simulation model on CAD software

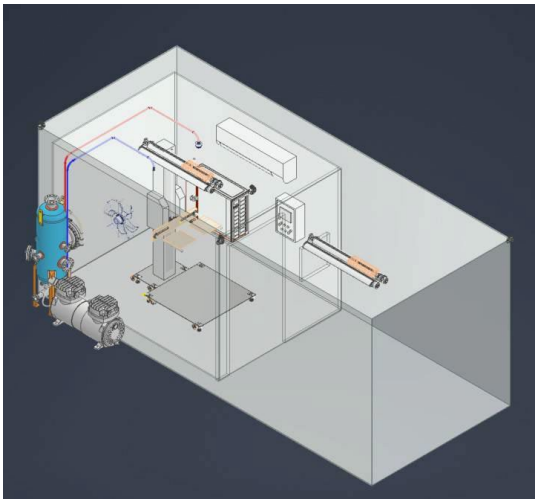


Figure 6: Test chamber diagram including safety devices

The control program, written according to the FSM design and utilizing Function Block Diagram (FBD) language, is presented in figure 7. FBD conforms to the IEC 61131-3 standard [29], [30] for industrial automation programming, allowing for language conversion. The automatic battery drop test system includes both manual and automatic control modes. Manual control is operated via the HMI touchscreen for individual devices, while automatic control is activated by a battery temperature sensor based on predefined conditions, as shown in figure 8.

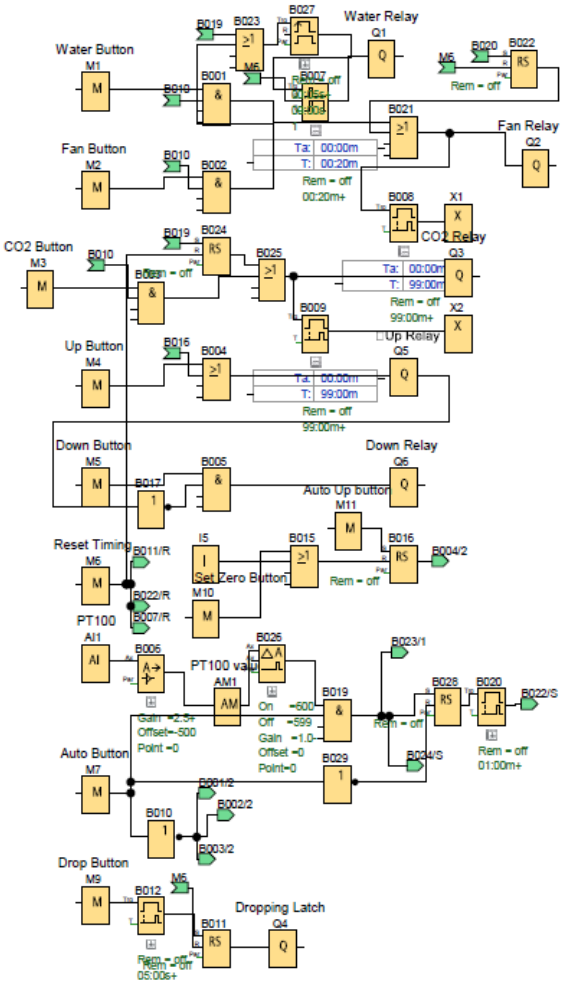


Figure 7: Automatic battery drop test system control program

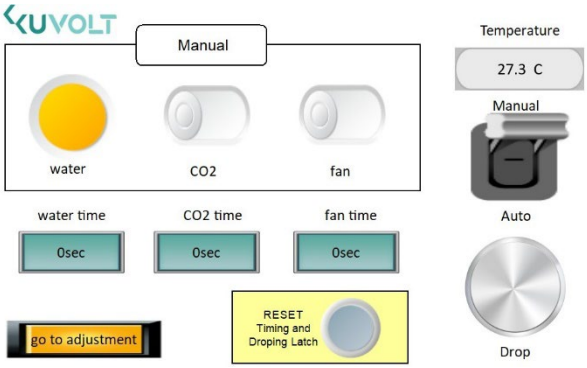


Figure 8: HMI screen used to control the entire system

5. Prototype & Testing

A prototype chamber was developed within a container measuring 2.5 × 6 × 2.6 meters, as shown in figure 9. For safety, Circuit Breakers independently control the power to each system.



Figure 9: External of test chamber

The interior is divided into a control and observation room, depicted in figure 10, and a testing room, shown in figure 11. The control cabinet will be relocated to the testing room, and observations will be made through safety glass. The automated battery drop test machine will be positioned in the testing area. An impact absorption base and integrated safety systems, as designed, will be present. Figure 11 illustrates the setup for testing all mechanisms and safety systems to ensure they function as designed.



Figure 10: Control and observation room



Figure 11: Impact battery test chamber

The system underwent actual testing to gather data for improvement. Drop tests were conducted according to IEC 62133 standards from a height of 1.0 m onto a concrete surface, and MIL-STD-810H [31] standards to assess environmental durability from a height of 1.22 m onto a concrete surface. Both tests involved dropping the battery in 6 different orientations (sides), 12 edges, and 8 corners.

Table 1: Result of battery drop via the proposed automated battery drop test machine

Sample No.	Orientation of testing	Number of tests (Times)	OCV before test (Vdc)	OCV after test (Vdc)	Battery Result	Target Position
1	S1	1	26.69	26.69	NF,NE	Yes
1	S2	1	26.69	26.69	NF,NE	Yes
1	S3	1	26.69	26.69	NF,NE	Yes
1	S4	1	26.69	26.69	NF,NE	Yes
1	S5	1	26.69	26.69	NE,NF	Yes
2	S1	2	26.38	26.38	NF,NE	Yes
2	S2	2	26.38	26.38	NF,NE	Yes
2	S3	1	26.37	26.37	NF,NE	Yes
2	S4	1	26.37	26.36	NF,NE	Yes
2	S5	1	26.36	26.36	NF,NE	Yes
2	E1	2	26.36	26.36	NE,NF	Yes
2	E2	2	26.36	26.36	NF,NE	Yes
2	E3	2	26.36	26.36	NF,NE	Yes
2	E4	2	26.36	26.36	NF,NE	Yes
3	S6	2	26.30	26.30	NF,NE	Yes
3	C1	1	26.30	26.30	NE,NE	Yes
3	C2	1	26.30	26.30	NF,NE	Yes
3	C3	1	26.30	26.30	NF,NE	Yes
3	C4	1	26.30	26.30	NF,NE	Yes

Note: The data presented in this table are partial results, representing a specific subset of the ongoing sequential testing process.

The battery being tested had a length of 480 mm (excluding handles and terminals), a width of 235 mm, a height of 230 mm, and weighed 80 kg. It was secured in various positions as illustrated in figure 4. An example of a test position is S5, shown in figure 12. After each drop, the battery was observed for 20 minutes before proceeding to the battery testing section. The results obtained from using the designed automated battery drop test machine are as follows in table 1, where Sample No. refers to the battery used in the automated battery drop test machine, Orientation of testing specifies the part of the battery subjected to the impact comprising S (surface), E (edge), and C (corner), Number of tests indicates the quantity of tests performed, OCV before test represents the open-circuit voltage of the battery prior to the impact, OCV after test represents the open-circuit voltage of the battery subsequent to the impact, Battery Result describes the condition of the battery following the impact (where NF or No Fire signifies the absence of ignition, and NE or No Explosion signifies the absence of an explosion), and Target Position indicates whether the battery impacted the intended point, verified through video analysis.



Figure 12: Battery drop test in case of S5 position

The automated battery drop test machine was observed to accurately position and release batteries from the specified heights for all test locations. The integrated automatic safety monitoring system enabled continuous experimentation. Each test required a minimum 20-minute observation period, but operators were not required to be present throughout this time.

Preliminary results indicate a high level of safety for batteries subjected to this drop test, as no ignition or explosion occurred. Furthermore, the potential difference (voltage) of most batteries remained at normal levels after testing. The constant OCV confirms that the internal structure of the battery cells, such as the electrodes and separator, did not suffer physical damage from the impact. This indicates that the battery's manufacturing standards are robust enough, allowing the external casing to provide adequate shock absorption to protect the internal electrochemical components.

CONCLUSION

This research focuses on the design and development of the automated battery drop test machine for battery research and development. The key objectives were to utilize inexpensive, fundamental components and to accommodate large-sized batteries, which addresses a limitation found in current commercial testing equipment.

The developed test machine successfully meets all specified requirements. These include an adjustable drop height ranging from 300 mm to 1,500 mm, a battery clamping system featuring a stainless-steel hinge mechanism, an automatic control system integrated with a Siemens LOGO!8 PLC and an HMI touchscreen, and a secure test chamber housed within a container with a CO_2 gas fire suppression system.

Testing conducted by simulating the conditions specified in the IEC 62133 and MIL-STD-810H standards demonstrated the machine's accurate and efficient performance. It can test batteries in various orientations (6

faces, 12 edges, 8 corners) and supports battery weights up to 80 kg. The drop impacts consistently align with the intended positions.

The developed system offers several advantages: operational flexibility, as it can accommodate a wide range of battery sizes, including large batteries for tanks; cost-effectiveness, due to its use of inexpensive basic components compared to commercial machines; high safety, with an automated safety system that minimizes risks to operators; and continuous operation, as its automation enables continuous testing without constant supervision. To emphasize the practical advantages of the proposed system, a comparison between the developed prototype and existing commercial equipment is provided. While commercial testers, such as those from Amade-Tech and DGBell, offer standardized testing environments, they often possess rigid structures that cannot accommodate large-scale batteries and are limited by low weight capacities. In contrast, the proposed machine provides a flexible and cost-effective solution specifically designed for large-frame batteries with a weight capacity of up to 100 kg. The detailed comparison is summarized in Table 2:

Table 2: Comparison of features between commercial testers and the proposed automated machine

Features	Commercial Testers (Amade-Tech, DGBell)	Proposed Automated Machine
Structural Design	Fixed and rigid; limited battery size	Flexible; accommodates large-scale frames
Max Battery Weight	Limited (e.g., 5 kg for BE-8108 model)	Up to 100 kg (Validated at 80 kg)
Drop Height Range	300 – 1500 mm	300 – 1500 mm
Control Interface	Proprietary manufacturer software	Industrial PLC (Siemens LOGO!8) + HMI
Safety Systems	Standard test chamber	Enhanced CO2 suppression and water cooling
Cost-Effectiveness	High acquisition cost	Low cost (utilizes basic components)

For future development, the test machine can be applied to the research and development of various batteries, particularly large batteries used in electric vehicles and energy storage systems. Future enhancements may include expanding its capability to support additional international standards, such as UN 38.3 and UL 2054, for product certification. This research demonstrates that developing testing equipment with an appropriate approach can create effective and cost-efficient alternatives for battery technology research and development in Thailand.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to UVolt Factory for their valuable support and collaboration throughout this project. Their expertise, resources, and commitment significantly contributed to the success of this work.

During the preparation of this manuscript, AI-based tools were employed to assist with grammar and language refinement. Specifically, grammar checking and stylistic suggestions were provided by an AI language model to enhance clarity and readability. All content was subsequently reviewed and edited by the authors to ensure accuracy and appropriateness.

REFERENCES

[1] J.-M. Tarascon and M. Armand, "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries," *Nature*, vol. 414, pp. 359–367, 2001, doi: 10.1038/35104644.

[2] J. B. Goodenough and K.-S. Park, "The Li-ion rechargeable battery: a perspective," *J. Amer. Chem. Soc.*, vol. 135, no. 4, pp. 1167–1176, 2013.

[3] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nature Climate Change*, vol. 5, pp. 329–332, 2015, doi: 10.1038/nclimate2564.

[4] B. Dunn, H. Kamath, and J.-M. Tarascon, "Electrical energy storage for the grid: a battery of choices," *Science*, vol. 334, no. 6058, pp. 928–935, 2011.

[5] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *J. Power Sources*, vol. 208, pp. 210–224, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.038.

[6] D. P. Finegan et al., "In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal runaway," *Nat. Commun.*, vol. 6, 2015, Art. no. 6924, doi: 10.1038/ncomms7924.

[7] R. Spotnitz and J. Franklin, "Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells," *J. Power Sources*, vol. 113, no. 1, pp. 81–100, 2003.

[8] *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications - Part 2: Lithium systems*, IEC 62133-2:2017, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2017.

[9] S. Hildebrand, A. Eddarir, and N. Lebedeva, "Overview of battery safety tests in standards for stationary battery energy storage systems," Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg, Tech. Rep. JRC135870, Feb. 2024. Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135870

[10] Torontech. "Explosion-Proof Test Chambers for Battery Testing." TORONTECH.com. Accessed: Feb. 28, 2026. [Online]. Available: https://torontech.com/explosion-proof-test-chambers-for-battery-testing/

[11] Ufine Battery. "UN 38.3 vs IEC 62133 Test Conditions: A Comparative Analysis of Lithium-ion Battery Safety Standards." UFINEBATTERY.com. Accessed: Mar. 10, 2026. [Online]. Available: https://www.ufinebattery.com/blog/comparing-un-38-3-and-iec-62133-test-conditions/

[12] R. L. Norton, *Machine Design: An Integrated Approach*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2013.

[13] *LOGO! 8.4 Basic Modules.* (2023). Siemens.

[14] S. V. Viraktamath, A. S. Umarfarooq, V. Yallappagoudar, and A. P. Hasankar, "Implementation of automated bottle filling system using PLC," in *Proc. 4th Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT),* Tamil Nadu, India, Apr. 2019, pp. 33–41.

[15] T. A. Alkaar, M. S. Daw, and A. F. Jamjom, "Automated parking system using PLC technology," *Int. J. Elect. Eng. Sustain.*, vol. 2, no. 3, pp. 35–46, 2024.

[16] E. Salazar-Jácome, W. Sánchez-Ocaña, J. De la Torre-Guzmán, and E. González-Malla, "IoT-based control systems with Siemens LOGO! and PC interface," in *Emerging Technologies in Applied Engineering and Education* (EAI/Springer Innovations in Communication and Computing), J. Buele, G. Palacios-Navarro, and F. Avilés-Castillo, Eds., Cham, Switzerland: Springer, 2026, pp. 15–28.

[17] M. Barton, R. Budjač, P. Tanuška, P. Schreiber, and T. Horák, "Industry communication based on TCP/IP protocol," *Res. Papers Fac. Mater. Sci. Technol. Slovak Univ. Technol. Trnava,* vol. 29, no. 49, pp. 59–66, 2021.

[18] R. T. Long, J. A. Sutula, and M. J. Kahn, "Lithium-Ion batteries hazard and use assessment phase IIB: Flammability characterization of Li-ion batteries for storage protection," Fire Protection Research Foundation (FPRF), Quincy, MA, USA, Apr. 29, 2013. Accessed: Feb. 28, 2026. [Online]. Available: https://content.nfpa.org/-/media/Project/Storefront/Catalog/Files/Research/Research-Foundation/Reports/Hazardous-materials/RFLithiumIonBatteriesIIB.pdf

[19] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén, and B.-E. Mellander, "Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests," *J. Power Sources*, vol. 271, pp. 414–420, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.08.027.

[20] European Union Aviation Safety Agency, "Passenger and crew awareness on the risks of lithium batteries," EASA, Cologne, Germany, EASA SIB No. 2025-03, May 27, 2025. Accessed: Mar. 10, 2026. [Online]. Available: https://ad.easa.europa.eu/ad/2025-03

[21] *Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems*, NFPA 855, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA, USA, Aug. 2023.

[22] UL Solutions. "Safety Guidelines for Large Lithium-ion Battery Systems." UL.com. Accessed: Mar. 10, 2026. [Online]. Available: https://www.ul.com/insights/safety-guidelines-large-lithium-ion-battery-systems

[23] *Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems*, UL 9540A, UL Standards & Engagement, Northbrook, IL, USA, 2025.

[24] X. Feng et al., "Key characteristics for thermal runaway of Li-ion batteries," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 4684–4689, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.736.

[25] W. Zhao and Q. Guo, "Experimental study on impact and post-impact behavior of steel-concrete composite panels," *Thin-Walled Struct.*, vol. 130, pp. 405–413, 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.06.012.

[26] *Compressed air — Part 1: Contaminants and purity classes*, ISO 8573-1:2010, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, Apr. 2010.

[27] J. W. Webb and R. A. Reis, *Programmable Logic Controllers: Principles and Applications*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.

[28] B. L. Kicklighter, "WIP: An advanced automation final project using a finite-state machine to automate motion control," in *Proc. ASEE Annu. Conf. Expo.*, Montreal, Canada, Jun. 2025, doi: 10.18260/1-2--57372.

[29] *Programmable controllers - Part 3: Programming languages*, IEC 61131-3:2013, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, Feb. 2013.

[30] K. H. John and M. Tiegelkamp, *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010.

[31] *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, MIL-STD-810H, U.S. Department of Defense, Washington, DC, USA, Jan. 2019.

A Machine Learning Approach for Predicting Thermal Comfort in a Bangkok Academic Library: Integrating Logit and Random Forest Models

Wipawadee Wongsuwan[1*] Pornchai Triracheewin[2]

[1*]*Master of Engineering Program in Engineering Management and Intelligent Technology, Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*
[2]*Faculty of Laws, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding author e-mail: wipawadee@tni.ac.th

Received: 16 February 2026; Revised: 26 June 2026; Accepted: 30 June 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

A study of thermal comfort was conducted in a 4-story academic library located in Bangkok, Thailand. Since limited thermal comfort studies have been conducted for academic libraries located in a tropical climate. The field measurements by a set of sensors and questionnaire surveys were conducted among 234 library occupants. The measurements led to the average air temperature, relative humidity, and air velocity of about 24.39°C, 55.39%, and 0.073 m/s, respectively. Hence, the thermal comfort was evaluated using the Predicted Mean Vote (PMV) and the Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) based on the ASHRAE 55 standard, and the Actual Mean Vote (AMV) from the occupants' perception. PMV and AMV were found to be -0.74 and -0.12, implying that the library environment was slightly cooled. Although the conventional standard PMV was widely used, it might not accurately represent real-time thermal preferences and cannot be practically integrated into the Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC) control. In addition to the conventional method, two Machine Learning (ML) models, Random Forest (RF) and Support Vector Machine (SVM), were investigated for their predictive performance. For the ML model development, five environmental variables (T_a, T_{mrt}, V_a, RH, and CLO) were used. It was found that the RF model performed well with an R-squared of about 0.9876, while SVM achieved only 0.8067. Therefore, the key findings support the application of the ML approach, especially RF, to enhance HVAC control for energy management strategies while maintaining the thermal comfort of library occupants in academic buildings located in tropical climates.

***Keywords*:** Academic library, Energy conservation, Logit regression, Random forest, Thermal comfort

INTRODUCTION

Thailand is located in a tropical zone with hot and humid climatic conditions. Thus, most of Thailand's academic library buildings were air-conditioned. The optimal indoor temperature and humidity should be maintained, corresponding with the ASHRAE standard and energy management measures [1], [2], [3]. Both undergraduate and graduate students normally spend several hours on self-study, doing homework and exercises, which require concentration to process complex information. Thermal comfort and discomfort could significantly affect their learning performance.

According to the ASHRAE Standard 55 [3], thermal comfort means the mental condition of the space occupants to express their satisfaction with the environment. Based on the heat balance model, to determine the thermal comfort indicators, Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), 6 factors are required for calculation: air temperature (T_a), relative humidity (RH), air velocity (V_a), mean radiant temperature (T_{mrt}), metabolic rate (MET), and clothing insulation (CLO) [4]. These inputs were obtained from spot measurements using a static set of sensors. The PMV and PPD were calculated manually; however, the static mathematical model was not practical to capture the dynamic thermal comfort perception of occupants. Through digital transformation from the static evaluation of PMV and PPD, the IoT-based monitoring system could enhance the understanding of the dynamics of the local occupant thermal perception, and also facilitate energy saving in smart buildings. The Machine Learning (ML) approaches, especially Random Forest (RF) and Support Vector Machines (SVM), were ready to be applied to reflect the occupant responses faster.

Based on the literature reviews, ML models were applied for the prediction of thermal comfort in public transportation and smart classrooms, with high accuracy [5], [6]. However, the international ASHRAE 55 standard may underestimate local thermal preferences within library environments in tropical climates. Therefore, it is necessary to develop region-specific predictive models [7]. This leads to the objective of this study to investigate thermal comfort in a university library located in central Bangkok, Thailand, and to examine whether ML models can improve the prediction of occupant thermal response under tropical conditions.

LITERATURE REVIEW

1. Theoretical Foundations of Thermal Comfort

The thermal comfort assessment has relied on the heat balance model [4]. This model uses both physical and physiological variables to determine the PMV and PPD. It has been adopted in accordance with ASHRAE 55 [3] and ISO 7730 [8]. The theoretical basis of the model is based on the principle of human thermal equilibrium. Thermal comfort would be achieved if the heat produced by the human body is balanced with the heat exchanged with the surrounding environment. The PMV was calculated by equation (1) as proposed in ASHRAE Standard 55.

$$PMV = (0.303(e^{-0.036M}) + 0.028)L \quad (1)$$

Where M is the metabolic rate in W/m^2 and L is the thermal load on the human body in W/m^2. According to the heat balance, the thermal load (L) is the difference between the body's internal heat production and the heat loss that the body experiences to maintain thermal equilibrium, computed by equation (2).

$$L = (M-W) - (3.05\times10^{-3})[5733 - 6.99(M-W) - P_a] - 0.42[(M-W) - 58.15] - (1.7\times10^{-5})M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - T_a) - (3.96\times10^{-8})f_{cl}[(T_{cl}+273.15)^4 - (T_{mrt}+273.15)^4] - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \quad (2)$$

Where:

M is metabolic rate (W/m^2), W is external work (W/m^2) that in this case is 0, P_a is water vapor partial pressure (Pa), T_a is air temperature (°C), T_{mrt} is mean radiant temperature (°C), T_{cl} is clothing surface temperature (°C), f_{cl} is the clothing area factor, h_c is the convective heat transfer coefficient (W/m^2.°C)

However, the static models, as in equations (1) and (2), cannot account for the "adaptive" nature of occupants in tropical climates. In addition, the higher thermal tolerance due to acclimatization and psychological factors leads to a difference between the PMV and the Actual Mean Vote (AMV) [9].

2. Thermal Comfort in Educational and Library Environments

Educational buildings have challenges for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC) management due to fluctuating occupancy density and diverse activity levels. The thermal satisfaction in academic libraries directly correlates with student productivity and cognitive performance. However, conventional HVAC control systems regularly maintain a constant temperature setpoint. This leads to both energy waste and discomfort, i.e., over-cooling. Identification of region-specific comfort zones in a recent evaluation of Southeast Asian university buildings suggested the optimization of occupant well-being and energy efficiency [7], which challenges the employment of the ML approach.

3. Machine Learning Applications in Thermal Prediction

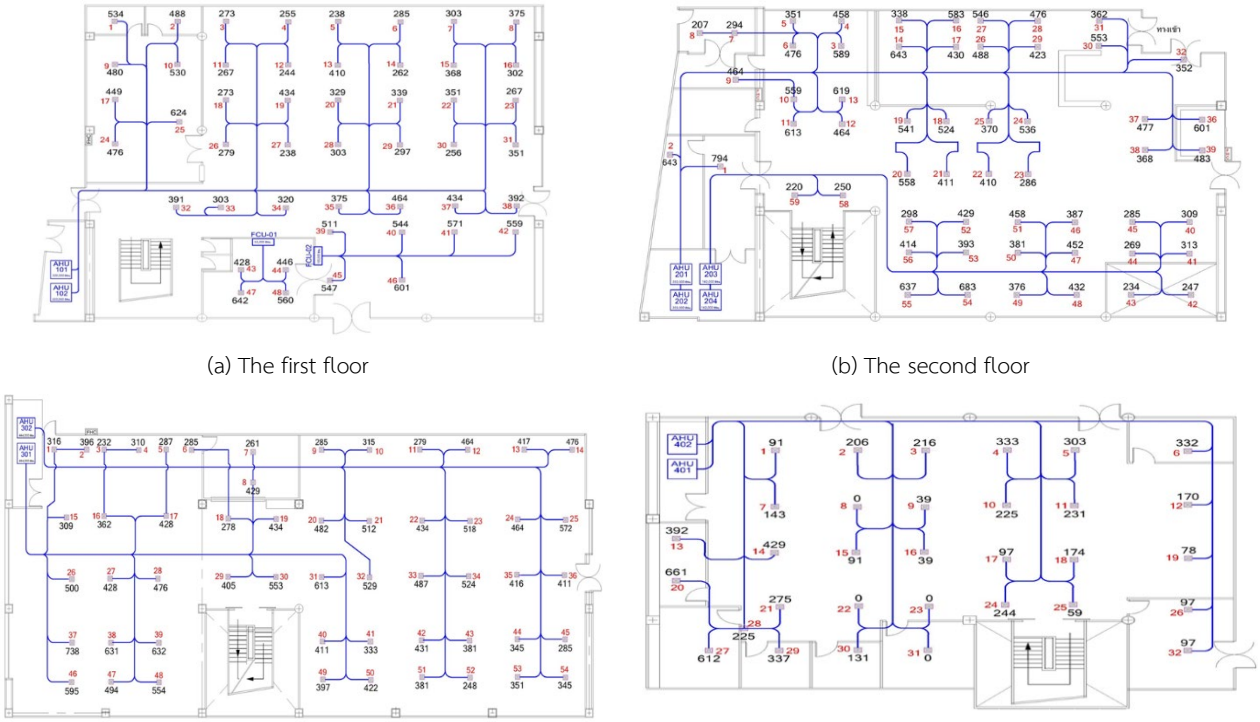
Since the traditional model was static and not able to handle non-linear human feedback, ML algorithms can process large datasets from IoT sensors to identify occupant preference patterns. The ML-driven predictive models enable HVAC adjustments. The transformation to smart environments would respond dynamically to occupant needs [10]. The effectiveness of SVM and RF algorithms is highlighted. SVMs could handle high-dimensional spaces, possibly used for the classification of thermal sensations with high precision [5]. RF, an ensemble learning method, has robustness against noise and can rank the importance of environmental features [5], [6]. In comparison, SVMs provide a solid baseline when dealing with heterogeneous data from field surveys, while RF achieves higher stability [5].

METHODS

The research methodology consists of 7 stages: field measurements to obtain five environmental variables (T_a, T_{mrt}, V_a, RH, and CLO), occupant surveys for subjective thermal sensation votes, PMV & PPD calculation based on the conventional standard, comparison of PMV and AMV, probability analysis of thermal acceptability by Logit regression analysis, ML model (RF and SVM) development from the dataset, and finally performance comparison of SVM and RF models for HVAC application suitability.

1. Site Description and System Configuration

The experimental site was a 4-story academic library, located in central Bangkok, with split-type air conditioners (AC) having 10 air-handling units (AHUs) to supply cold air to each floor [11]. The AC system was operated for 13 hours from 8:00 a.m. to 9:00 p.m. The air duct network from the AHUs supplied cold air to the conditioned space via the distributed air grille diffusers. Figure 1 shows the number of diffusers and volume flow rate in cfm (cubic feet per minute). The circulated air was discharged toward the walls and bookshelves instead of directly to the occupants' desks.



(a) The first floor

(b) The second floor

(c) The third floor

(d) The fourth floor

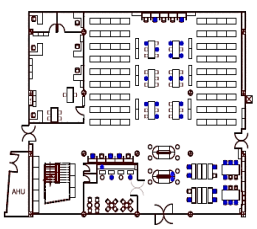
Figure 1: Air duct system of the library showing the number of air grille diffusers and volume flow rate in cfm

2. Instrumentation and Measurements

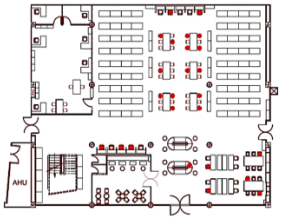
The indoor data were measured by a set of field instrumentation (Figure 2) placed on the table near the occupants' seats (Figure 3), while a field survey was conducted using a one-page questionnaire to collect data required by the static model. The measuring devices were composed of (1) a Benetech GM8903 hot-wire anemometer for air velocity measurement (accuracy ±3%), (2) a UNI-T UT333 thermo-hygrometer for air temperature and relative humidity (accuracy ±2°C and ±5% RH), and (3) a Lutron WBGT-2010SD for globe temperature measurement, which would be used to compute the Mean Radiant Temperature (accuracy ±0.6°C)

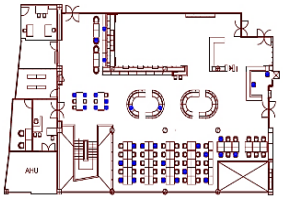


Figure 2: Setup of the measuring equipment

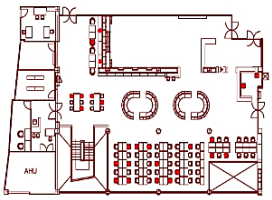


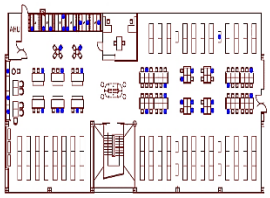
(a) 1st floor (left: January–February; right: April)



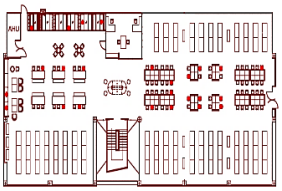


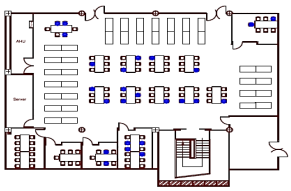
(b) 2nd floor (left: January–February; right: April)





(c) 3rd floor (left: January–February; right: April)





(d) 4th floor (left: January–February; right: April)

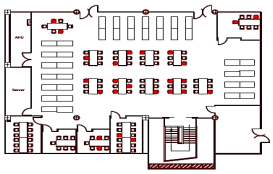


Figure 3: Location of the questionnaire's respondent seats (a) floor 1, (b) floor 2, (c) floor 3, and (d) floor 4 (left: January–February, right: April)

3. Subjective Survey and Data Collection

The questionnaire survey was conducted during two periods: the cool and dry season (January–February 2019), and the hot and humid season (April 2019). The questionnaire was designed based on the ASHRAE Standard 55 using a 7-point integer scale from -3 (cold) to +3 (hot). The occupants spent approximately 10 to 15 minutes answering the questionnaire to ensure their thoughtfulness. The CLO of occupants was obtained from the questionnaire survey, including a checklist of clothing items commonly worn by Thai university students, where

their responses were converted into clothing insulation values based on the ASHRAE 55 standard table. The 234 occupants' locations from all four floors of the library were depicted in Figure 3. In addition, a constant metabolic rate of 1.0 MET was assumed for all occupants because the activity of undergraduate and graduate students in the library was normally reading, studying, using computers, and doing assignments that are consistent with the activity level of seated and quiet office-type work in the standard. Therefore, the fixed 1.0 MET was reasonable and not included in the descriptive statistics or in Table 1.

Table 1: Descriptive statistics of ML input features

Inputs	T_a	T_{mrt}	V_a	RH	CLO
Count	234	234	234	234	234
Mean	24.39	24.31	0.07	55.69	0.48
Standard Deviation	0.94	0.97	0.14	5.75	0.10
Minimum	22.50	21.87	0.00	45.00	0.25
25%	23.70	23.78	0.00	51.30	0.43
50%	24.30	24.20	0.01	56.35	0.45
75%	25.10	24.94	0.08	60.50	0.52
Maximum	27.20	29.31	0.97	68.00	1.04

4. Predictive Modeling Framework

The predictive ML model used data from field measurements and surveys to predict the thermal comfort indices. Five input data (T_a, T_{mrt}, V_a, RH, CLO) were used for pre-processing, training, testing, and validation of two ML models: RF and SVM. Consequently, the PMV and PPD predicted by these two ML techniques were compared statistically against the traditional values. In addition, the Actual Mean Vote collected from the occupants was used to support the model training phase. The pseudocode of the thermal comfort prediction framework is as follows:

- Input: Environmental variables (T_a, T_{mrt}, V_a, RH), Personal variable (CLO), Target variable (PMV)
- Output: Predicted PMV, Model performance metrics (R-squared, MSE, MAE, RMSE, MBE)
- Step 1: Do physical measurements and collect questionnaire responses.
- Step 2: Calculate PMV and PPD according to ASHRAE Standard 55.
- Step 3: Construct the dataset consisting of: X = [T_a, T_{mrt}, V_a, RH, CLO] and y = PMV
- Step 4: Preprocess the dataset by removing incomplete records, normalizing variables for SVM, and splitting the data randomly into training and testing datasets.
- Step 5: Train the Random Forest (RF) model using the training dataset.
- Step 6: Train the Support Vector Machine (SVM) model using the training dataset.
- Step 7: Predict PMV values using both trained (RF and SVM) models.
- Step 8: Compare predicted PMV with actual PMV from the static model.
- Step 9: Evaluate ML model performance using R-squared, MSE, MAE, RMSE, and MBE.
- Step 10: Report and select the model with the best predictive performance.

4.1 Random Forest (RF): Random Forest is constructed from independent decision trees during the training phase and calculates the mean prediction of all trees to generate output [12]. Its advantage is the reduction of overfitting by using bootstrapping and selecting random features. For thermal comfort applications, RF could capture complex input features and provide stability in PMV prediction, which contains measurement noise.

4.2 Support Vector Machines (SVM): Support Vector Machines can do regression with high precision due to their robust class of supervised learning models [13]. It identifies an optimal hyperplane that approximates the five-input relationship and the PMV. Moreover, the SVMs used non-linear kernel functions called the Radial Basis Function (RBF) that effectively map the non-linear characteristics of the library occupants' perception.

4.3 Comparative Handling of the 5-Input Dataset: Machine learning has to handle the input dataset before the training process. In this research, both RF and SVM required pre-processing of the five-input dataset (T_a, T_{mrt}, V_a, RH, and CLO). In comparison, RF resulted in robustness and stability, while SVM provided sophisticated mathematical solutions. RF could identify non-linear interactions among input variables effectively without extensive data scaling. It prioritized the most important inputs: T_a, V_a, and T_{mrt}. On the other hand, the SVM used kernel tricks to capture the complexity and dynamics of the input; however, it was sensitive to the input scale. Therefore, the small range of V_a must be normalized alongside those of T_a and T_{mrt}.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Dataset Characteristics and Descriptive Statistics

The undergraduate and graduate students or respondents were mainly 20–25 years old, with the ratio of females to males about 72.8–27.2%. Table 1 shows the descriptive statistics of the five input features: air temperature (T_a), mean radiant temperature (T_{mrt}), air velocity (V_a), relative humidity (RH), and clothing insulation (CLO). The average values of air temperature and mean radiant temperature are 24.39°C (±0.94°C) and 24.31°C (±0.97°C), respectively.

The average globe temperatures (T_g) was 24.29°C (±0.91°C). Air velocity (V_a) was low, averaging 0.073 m/s ± 0.14 m/s. This reflects the stagnant air conditions regularly found in library settings. The calculated PMV averaged -0.74 ± 0.53, illustrating that the general thermal state was slightly cool in the region of the ASHRAE scale.

The mean radiant temperature (T_{mrt}) was calculated using the T_a, the T_g, and the V_a. The formula is presented in equation (3) below:

$$T_{mrt} = \left(\left(T_g + 273.15\right)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times {V_a}^{0.6}}{0.95 \times 100^{0.4}} \left(T_g - T_a\right) \right)^{0.25} - 273.15 \quad (3)$$

T_{mrt} typically exceeds T_a, however, the average T_{mrt} from this research was slightly lower than the average T_a. T_{mrt} exceeded T_a only 56% of the observations, resulting in a Mean Bias Error (MBE) of -0.186°C. This phenomenon could be attributed to the specific HVAC configuration described in the methodology. The cool air from the diffusers is directed toward the library walls or bookshelves before mixing with the ambient air. It therefore effectively lowers the surface temperatures of the building envelope.

The operative temperature represents the uniform temperature of an enclosure, where an occupant exchanges a similar amount of heat as the actual non-uniform environment. Consequently, based on linear regression, the relationship between air temperature (T_a) and operative temperature (T_o) was as follows in equation (4):

$$T_o = 1.009(T_a) - 0.0116 \quad (4)$$

2. Comparative Analysis of PMV and AMV

The thermal comfort assessment according to ASHRAE Standard 55 provided an average PMV of -0.18. This indicates a slightly cool sensation among occupants. Consistently, the PPD averaged 9.20%. This value is lower than 10%; therefore, classified as category A of the ASHRAE standard, which implies a high level of occupant satisfaction. The real occupant thermal perception is called the Actual Mean Vote (AMV). The average AMV obtained from questionnaires was -0.12, with a standard deviation of about 1.02. It was noted that the calculated PMV was -0.18, which is close to the respondent's average AMV. Using linear regression, the AMV and PMV are functions of the operative temperature (T_o), as illustrated in Figure 4 and Equations (5) and (6), which are functions of the ambient and mean radiant temperatures.

$$AMV = 0.2085(T_o) - 5.186 \quad (5)$$

$$PMV = 0.3706(T_o) - 9.2982 \quad (6)$$

Based on equations (5) and (6), the interception of AMV and PMV to the temperature axis gave the neutral operative temperature about 24.85°C and 25.10°C; therefore, PMV provided a slight overestimation. In comparison between PMV and AMV values, the Mean Bias Error (MBE) and Mean Absolute Error (MAE) were -0.186 and 0.342, respectively. This implied that PMV was normally lower than AMV, especially when T_o was lower than 25.2°C.

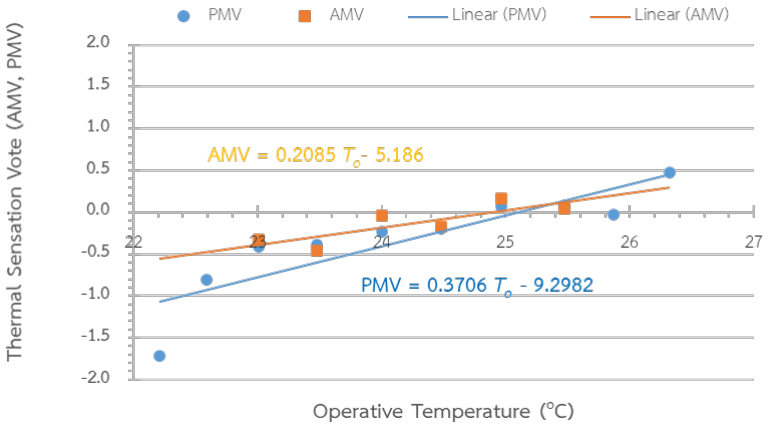


Figure 4: Relation between AMV and PMV with the operative temperature

3. Probabilistic Analysis of Thermal Acceptability

A binary logit regression was used to determine the operative temperature from the intersection of the fitted thermal preference probability curves. In Figure 5, the probability was the dependent variable, while the operative

temperature was the independent variable, creating two curves of thermal preference category. The neutral operative temperature was then identified statistically using logit regression [14] based on the intersection of two curves, the “cooler than neutral” and “warmer than neutral”.

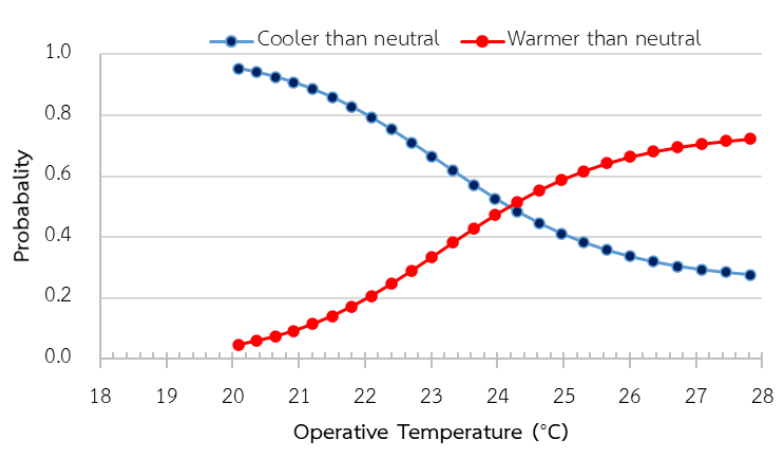


Figure 5: Probability of thermal acceptability based on the logit regression model of Actual Mean Vote (AMV).

At lower operative temperatures, there is a high probability that occupants will feel cooler than their comfort state. Between 21–26°C, the probability of “cooler than neutral” declines sharply. At temperatures above 26.8°C, the probability drops to below 0.3 but does not converge to zero. The reason is the limited density of AMV data points at higher thermal extremes. In contrast, the probability of occupants feeling “warmer than neutral” is low at lower operative temperatures. However, between 22–25°C, it increases significantly. Finally, this probability exceeds 0.7 at temperatures above 27°C.

The optimal thermal comfort temperature from Figure 5 was 24.29°C, at which the response rate was 0.5 (50%). It is found that this logit-derived optimal temperature is slightly lower than the 24.85°C from linear regression depicted in Figure 4. Therefore, it implies that library occupants in a tropical climate would prefer a cooler-than-neutral state during cognitive activities.

4. Machine Learning Performance and Feature Correlation

A correlation matrix was developed before training the ML, as illustrated in Figure 6. Air temperature (T_a) showed a moderate positive correlation with PMV (0.56). On the contrary, air velocity (V_a) showed a significant negative correlation with PMV (-0.68). It would confirm that the air temperature and air velocity are strong predictors of thermal sensation within the library environment. The ambient temperature was more important than the mean radiant temperature, influenced by direct cooling of the surrounding wall by cold air from diffusers. It is expected that the RF algorithm could quantify the importance of inputs, especially those that mostly influence the occupant’s thermal comfort.

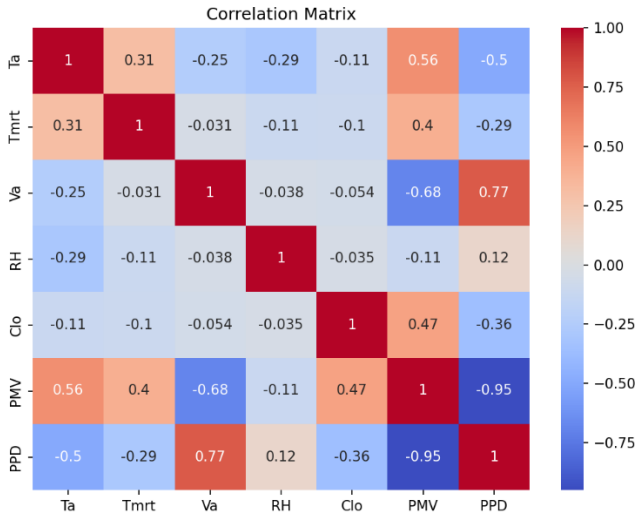
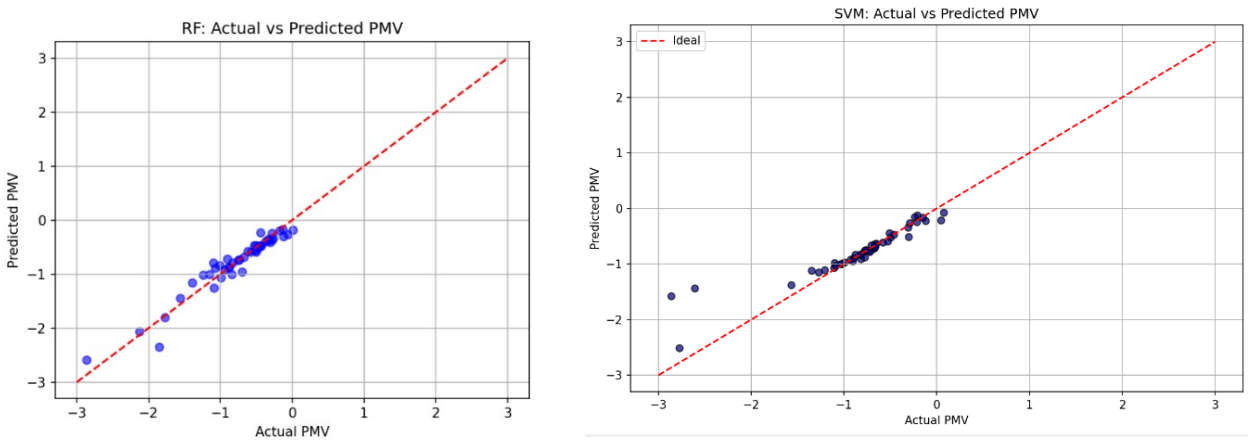


Figure 6: Correlation matrix

5. Machine Learning Model Performance and Comparison

For thermal comfort forecasting by ML, the input dataset is composed of five inputs: T_a, RH, V_a, T_{mrt}, and CLO, and one target output as PMV. It was used for training and validating both RF and SVM models. However, the metabolic rate can be assumed to be constant at 1.0 MET for practical implementation, given the typical, similar sedentary activities of the academic library occupants.

5.1 Actual vs. Predicted Performance and Comparison of RF and SVM: To evaluate the training algorithms, two scatter plots between the actual and predicted PMV using RF and SVM models were illustrated in Figure 7. RF provided good alignment with an R-square of about 0.9334, while SVM gave a lower R-square of about 0.8076 and performed well in the region of -1 to 0. To compare the performance of RF and SVM, five statistical indices were compared in Table 2. They are Mean Squared Error (MSE), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Bias Error (MBE), and Coefficient of Determination or R-squared. It was found that all MSE, MAE, and RMSE of SVM were higher than those of RF. The minimum prediction error was MBE from RF, which was only -0.0017.



(a) Random Forest (RF)

(b) Support Vector Machine (SVM)

Figure 7: Scatter plots of actual and predicted PMV (a) Random Forest, (b) Support Vector Machine

Table 2: Performance comparison of SVM and RF models

Type	Random Forest (RF) Model	Support Vector Machine (SVM) Model
Mean Squared Error (MSE)	0.0212	0.0731
Mean Absolute Error (MAE)	0.1042	0.1181
Root Mean Squared Error (RMSE)	0.1457	0.2704
Mean Bias Error (MBE)	-0.0017	0.0616
R-squared (R^2)	0.9334	0.8067

5.2 Model Suitability: The RF is more suitable for the PMV prediction since it handles non-linear relationships with reliability and adaptability. It was easier to integrate into the dynamic control strategy of the modernized HVAC. Using an ML-driven approach, the building manager will be able to personalize the HVAC system to comply with occupant feedback on comfort expectations. To simplify the HVAC control, while MET can be assumed constant, CLO might be calculated using an empirical function between CLO and the indoor temperature (T_a) and relative humidity (RH) derived from the historical questionnaire data; therefore, direct input of CLO into the ML model would not be needed. In addition, real-time adjustments could be done by adding an RF model to the IoT controller.

6. PPD Prediction

The PPD was calculated by the PMV using the non-linear function from the standard ISO 7730 [8], [15], [16] as in equation (7). The RF model gave good agreement between the actual PPD and the predicted PPD, with an R-squared of about 0.9876, while that of SVM was 0.6882. This strengthens the ability of RF over SVM in handling the non-linear term PMV^4, the tipping point of thermal dissatisfaction.

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.03353 \times PMV^4 - 0.2197 \times PMV^2) \quad (7)$$

In addition, the SVM depends on a geometric hyperplane that might struggle with this PMV^4 term; therefore, it has less resilience to this nonlinear term. This study focused on PMV prediction by an ML approach; however, PPD can be reported along with PMV to ensure whether the HVAC control can maintain the percentage of dissatisfied occupants below 10%.

7. Energy Strategies

The thermal comfort and energy strategy should be balanced. The findings for the case study academic library recommended the indoor temperature to be maintained within the narrow range 24.29–24.85°C. However, the cooling load caused by radiant surfaces could be reduced by simply adding solar films to the glass windows, since the peak T_{mrt} of about 29.31°C was addressed. The air velocity should be increased to enhance air circulation. This has the advantage of allowing a higher temperature setpoint with trade-off air velocity.

The ML algorithm could identify the discomfort thresholds before they occur [17], [18]. By introducing the RF model to the IoT controller of the HVAC system, the existing 10 AHUs could be managed in real time to enhance airflow modulation and minimize waste energy in those unoccupied zones.

8. Practical Implications and Limitations

The resulting RF model can be used to support thermal comfort prediction in academic libraries. The model could be practically integrated with an IoT-based HVAC control system having real-time measurement of T_a, RH, and V_a, while using constant MET due to the assumed sedentary activities of library occupants. However, CLO would be estimated using an empirical model from historical survey data.

This study has several limitations; the dataset was obtained from a single academic library in Bangkok that might not represent other building types or climates, and CLO values were obtained from questionnaires rather than automatic measurements. Therefore, future studies should include data collection from multiple buildings and estimate CLO using a practical method for real-time applications.

CONCLUSION

The research on machine learning model prediction for thermal comfort was conducted in a four-story academic library, gathering a dataset by field measurements and occupants' surveys by questionnaire. The PMV and PPD complied with the ASHRAE comfort criteria, although occupants felt slightly cooler than neutral. In comparison between two Machine Learning (ML) models trained by local data, Random Forrest (RF) and Support Vector Machine (SVM), the RF provided more accurate results for PMV and the corresponding PPD values. The research findings suggest that ML models developed by local data can complement the traditional PMV and enhance the modernized HVAC control strategy. Future work should explore the application of the proposed approach in other building types and climatic conditions.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to the Faculty of Law at Chulalongkorn University for their generous support in providing the space and equipment needed for our field measurements. Our thanks also go to the respondents whose essential feedback made the model development possible.

REFERENCES

[1] Thai Meteorological Department. "Thailand Weather." TMD.go.th. Accessed: Feb 24, 2026. [Online]. Available: www.tmd.go.th

[2] IPCC, "Climate change 2023: Synthesis report," Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, Mar. 19, 2023. Accessed: Feb. 1, 2026. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf

[3] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ANSI/ASHRAE Standard 55-2023, 2023.

[4] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 1970.

[5] N. Assymkhan and A. Kartbayev, "Advanced IoT-enabled indoor thermal comfort prediction using SVM and random forest models," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 8, pp. 1040–1050, 2024.

[6] Y. Boutahri and A. Tilioua, "Machine learning-based predictive model for thermal comfort and energy optimization in smart buildings," *Results Eng.*, vol. 22, Jun. 2024, Art. no. 102148.

[7] P. Pourabrishami, "Evaluation of thermal comfort in library buildings in the tropical climate of Ghana (Case Study: Balma Library, Accra, Ghana)," M.S. thesis, Dept. Architecture, Univ. Liverpool, Liverpool, U.K., 2024. [Online]. Available: https://livrepository.liverpool.ac.uk/3185189/1/201669519_Sep2024.pdf

[8] *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria,* ISO 7730:2005, 2005.

[9] R. J. de Dear and G. S. Brager, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference," presented at the ASHRAE Winter Meeting and AHR Expo, San Francisco, CA, USA, Jan. 1998.

[10] Z. Q. Fard, Z. S. Zomorodian, and S. S. Korsarvi, "Application of machine learning in thermal comfort studies: A review of methods, performance and challenges," *Energy Build.*, vol. 256, Feb. 2022, Art. no. 111771.

[11] P. Triracheewin, W. Wongsuwan, and P. Chaiwiwatworakul, "Evaluation of thermal comfort: case study of the Faculty of Law, Chulalongkorn University," in *Proc. 5th Thai-Nichi Inst. Technol. Academic Conf. (TNIAC)*, Bangkok, Thailand, May 2019, pp. 59–64.

[12] L. Breiman, "Random forests," *Mach. Learn.,* vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001.

[13] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Mach. Learn.*, vol. 20, pp. 273–297, Sep. 1995.

[14] J. S. Cramer, *Logit Models from Economics and Other Fields*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010.

[15] M. A. Humphreys and J. F. Nicol, "The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments," *Energy Build.*, vol. 34, no. 6, pp. 667–684, Jul. 2002.

[16] *EIT Air Conditioning and Ventilation Standard*, EIT Standard 3003-50, 2007.

[17] A. Aryal, P. Chaiwiwatworakul, and S. Chirarattananon, "An experimental study of thermal performance of the radiant ceiling cooling in office building in Thailand," *Energy Build.*, vol. 283, Mar. 2023, Art. no. 112849.

[18] H. Huang and B. R. Hughes, "Review of HVAC forecasting and control strategies for improved building performance," *Build. Environ.*, vol. 287, Jan. 2026, Art. no. 113797.

Application of Microbubble Technology for Improved Efficiency and Reduction in Treatment Time of 1-Methylcyclopropene for Postharvest Ripening Delay of Banana

Hafnee Lateh[1] Prathan Srichai[2] Parinya Panich[3] Prapaipis Tawonsri[4*]

[1,2,3,4*]*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, Thailand*

*Corresponding author e-mail: prapaipis.t@pnu.ac.th

Received: 13 March 2026; Revised: 20 June 2026; Accepted: 30 June 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

This research is aimed at evaluating feasibility of using 1-methylcyclopropene microbubbles (1-MCP-MBs) as an alternative postharvest treatment for delaying the ripening of bananas with performance comparison of treating bananas with gaseous fumigation using conventional treatments and without treatment. The effects of immersion time (5, 10, and 15 min), 1-MCP concentration (500, 1000, and 1500 ppb), and microbubble generation pressure (4, 5, and 6 kg/cm^2) were tested systematically for 10 days storage period. The results showed the high efficacy of 1-methylcyclopropene microbubbles (1-MCP-MBs) in control of fruit ripening and preventing weight loss when compared with the conventional fumigation with gaseous 1-MCP. The optimal conditions for treating were 1-MCP at 500 ppb, an immersion duration of 5 min, and a generation pressure of 5 kg/cm^2. These situations were able to create stable microbubble formation with a high specific surface area resulting in increased adhesion of 1-MCP to the fruit peel. The optimized storage condition resulted in weight loss of 1.68 ± 0.07% during storage for 10 days in comparison to the control weight loss of 3.14 ± 0.56%. Moreover, the treatment using the 1-MCP resulted in a good preservation of the chloroplast integrity and chlorophyll stability, and thus fruit freshness was maintained for over 10 days. Contrastingly, fruits in the control group experienced severe senescing and ripening in 6–8 days. The overall results indicated high potential for 1-MCP-MB technology to be applied as a postharvest technology that can increase competitiveness of banana exports in terms of cost, time, and reduced chemical usage by improved operational efficiency.

***Keywords*:** 1-MCP, Banana, Microbubble technology, Postharvest life, Ripening delay

INTRODUCTION

Thailand earns a large amount of revenue as a nation from export of agricultural goods such as rubber, vegetables and fruits [1]. Its strategic geographical position, as well as the well-developed transportation infrastructures, allows for the production and distribution of these products on a large scale and efficiently. Among these commodities, the banana is an economically important fruit crop with a significant contribution of both the domestic trade value and international export markets, especially to Japan and China [2].

Despite the commercial importance, the limited shelf life and rapid postharvest physiological deterioration of the fruit pose critical problems to obtain quality over long distance transportation. These limitations significantly reduce its potential for export and competitiveness in the market. Therefore, effective strategies to inhibit ripening are very important to preserve quality and extend marketable life of fruits. Several postharvest technologies have been developed to delay the process of ripening such as bagging of fruit, edible coatings and ethylene scavenging system [3], [4], [5], [6], [7]. Additionally, the use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) has been widely known as an efficient ethylene action inhibitor, which inhibits ethylene perception thereby retarding ripening while preserving postharvest quality over prolonged storage [8].

Fumigation using 1-MCP is very popular in agriculture to inhibit ethylene-induced ripening of agricultural produce [9]. As a nontoxic, colorless and odorless gas, 1-MCP is highly active even in low concentrations. However successful fumigation requires airtight chambers to prevent gas leakage and the exposure period is usually 1 to 24 hours. These operational constraints add extra costs because of the specialization of fumigation facilities, environmental controls and long processing times [10]. Although aqueous solutions of 1-MCP have been introduced for applications in immersing or spraying, this method requires the use of considerable volumes of water and chemical agents. At the commercial level, these requirements significantly increase the cost of operation, especially water supply infrastructure and wastewater treatment costs.

To overcome the limitations, present for the conventional application of 1-MCP, microbubbles (MBs) technology has been suggested as an alternative delivery platform through the production of 1-methylcyclopropene-microbubbles (1-MCP-MBs) [11], [12]. Microbubbles have unique physicochemical properties such as a high specific surface area and a long sticking time in the aqueous phase, which boosts the interfacial interactions of gases and liquids [13]. These attributes allow continuous and homogeneous contact between 1-MCP-MBs and the fruit surface, which could enhance the efficiency of the utilization of active compounds and reduce the amount of chemicals usage and the operating cost. Therefore, this research investigated the effects of 1-MCP-MBs on the inhibition of banana ripening compared to the conventional immersion and fumigation methods. While previous studies [14] showed the basic efficacy, the present study further examined important engineering factors, such as the pressure for generating bubbles and the immersion time. The combined effect of the concentration of 1-MCP, generation pressure and immersion time was systematically examined to determine the optimal operating conditions and enhance treatment efficiency.

LITERATURE REVIEW

1. Delaying Ripening in Agricultural Produce

Postharvest physiological activities in fresh produce, namely metabolic respiration and ethylene biosynthesis are the most important mechanism causing natural senescence and quality degradation. This phenomenon is sharply manifested in climacteric fruits such as bananas, mangoes and tomatoes. These species are characterized by the existence of a clear burst of respiration and a simultaneous increase of autocatalytic ethylene production throughout the ripening phase. As a master signaling hormone, ethylene is responsible for the regulation of genes associated with the ripening process, in which a cascade of biochemical and physical changes is triggered. These include degradation of chlorophyll, conversion of starch into soluble sugars by enzymatic action and the systematic reduction of textural firmness and pericarp color [15], [16]. Furthermore, ethylene as a key regulator of fruit transpiration and integrity as well as ripening. Ethylene induces increased activity of cell wall-degrading enzymes, including pectin methyl esterase (PME) and polygalacturonase (PG), which causes a breakdown of the cell wall, weakens the ability to hold water and promotes water loss [17], [18]. Moreover, high ethylene-induced respiration helps to accelerate weight loss by stimulating the metabolism of substrates and oxidizing carbon dioxide and water vapor. Consequently, treating fruits with 1-MCP, an ethylene perception inhibitor, delays ripening and also helps to maintain fruit surface integrity to minimize postharvest weight loss.

Current postharvest management strategies focus on the reduction of metabolic rates and the blocking of the molecular perception mechanisms of ethylene. Common interventions include the application of chemical inhibitors, temperature control, and the utilization of modified or controlled atmosphere storage [19]. Although, 1-methylcyclopropene (1-MCP) has become a leading antagonistic agent because the compound has a high affinity with ethylene receptors. By irreversibly combining with these receptors, 1-MCP manage to block the ethylene signal pathway effectively, therefore greatly reducing the internal respiration speed and endogenous ethylene evolution. Despite the efficacy of conventional gaseous 1-MCP fumigation it is limited by significant operational constraints. The process requires hermetically sealed spaces to avoid leakage of gases and takes a long time for exposure ranging between 12 to 24 hours. These requirements lead not only to an escalation of energy costs and logistical costs due to the need for temperature control housing, they also hamper the throughput efficiency of industrial scale supply chains. While the potential of aqueous delivery system (immersing or spraying) has been developed to replace it, they are frequently faced with challenges in terms of water consumption, high chemical discharge, and particularly, high complexities associated with wastewater remediation. Recent advancements have put forward the concept of combining 1-MCP with microbubble (MB) technology, both of which provide a novelty approach to postharvest preservation technology [14], [20], [21]. By capitalizing on the peculiarities of the interface properties and enhanced mass transfer possibilities of bubbles at the microscopic scale; it is expected with this hybrid technology to improve the storage life and to postpone the deterioration in quality more efficiently than with traditional methods.

2. Microbubble Generation

Microbubble (MB) technology has been receiving growing interest in a broad range of fields such as biomedical engineering, nanotechnology, advanced agriculture and industrial wastewater treatment. Normally in 50 to 200

micrometers in diameter, microbubbles have unique physicochemical properties that make them fundamentally different from conventional bubbles. These include high gas dissolution efficiency, high surface area to volume ratio and high residence time in the liquid phase due to low buoyant velocity. In postharvest application such features allow a platform for efficient gas delivery improving mass transfer of inhibitory compounds including 1-MCP and more uniform and sustainable adsorption on the fruit surface compared to more conventional fumigation or aqueous treatment. Microbubble generation technologies can be broadly divided into four main categories according to microbubble generation mechanisms, such as fluid flow induced fragmentation methods, ultrasonic cavitation, electrochemical generation and mechanical vibration [22], [23], [24]. Considering these, hydrodynamic or fluid flow systems are especially suitable for agricultural and industrial scale deployment, for their simplicity of operation, capacity for scalability and energy efficiency. Various designs have been developed to optimize the formation of bubbles, such as swirling flow systems based on of centrifugal shear [25], pressurized dissolution techniques based on the release of supersaturated gas-liquid mixtures [26] and ejector or venturi designs that utilize high-velocity flow and shear fragmentation of gas [27], [28]. In this study, the concept of a combination of venturi type generator with pressurized dissolution is proposed. The venturi type has the advantage of structural simplicity and constant system performance, working on the basis of fluid acceleration in a constricted throat with a consequent localization of pressure drop and extreme shear forces. These hydrodynamic conditions are very effective in fragmenting 1-MCP gas into a dense suspension of stable microbubbles. Coupled with the pressure regulation unit, the system increases the gas solubility and concentration in the bubbles. This design enhances the uniform distribution and surface interaction of 1-MCP throughout the banana peel. This approach minimizes chemical waste production and facilitates integration into a closed-loop water circulation system.

METHODS

1. Experimental Setup

The experimental design was determined to appreciate the effectiveness of the use of 1-MCP-MBs in delaying the ripening of bananas in terms of weight loss and physical changes. Three treatment groups were studied: (1) a control group that was not exposed to 1-MCP, (2) a conventional fumigation group that was exposed to gaseous 1-MCP for 24 hours, and (3) a microbubble assisted group that was exposed to 1-MCP-MBs immersion for different treatment times.

The configuration of the 1-MCP-MBs generation system is shown in figure 1. First, aqueous solutions with predetermined concentrations of 1-MCP were prepared. Compressed air was passed through a flow controller into a storage chamber to generate 1-MCP gas at the desired concentration. The produced gas was then fed into a microbubble generator (venturi-type) that was installed along the primary water line. Within the generator, hydrodynamic shear forces separated the gas stream into micro-scale bubbles to form 1-MCP-MBs. The gas-liquid mixture was then circulated through a pressure tank by a pump to stabilize the system before being released into the plastic tank. A recirculating water configuration was used to improve operational efficiency. Flow rates were controlled and monitored by control valves and rotameters, while a cooling unit was used to keep the water temperature constant during the experiment. The detailed operational parameters, in terms of 1-MCP concentration, immersion duration, and generation pressure, are shown in table 1. After treatment, the individual

bananas were placed in zip lock bags and left under ambient conditions. Physical attributes and differences in weight were measured every day for 10 days storage period.

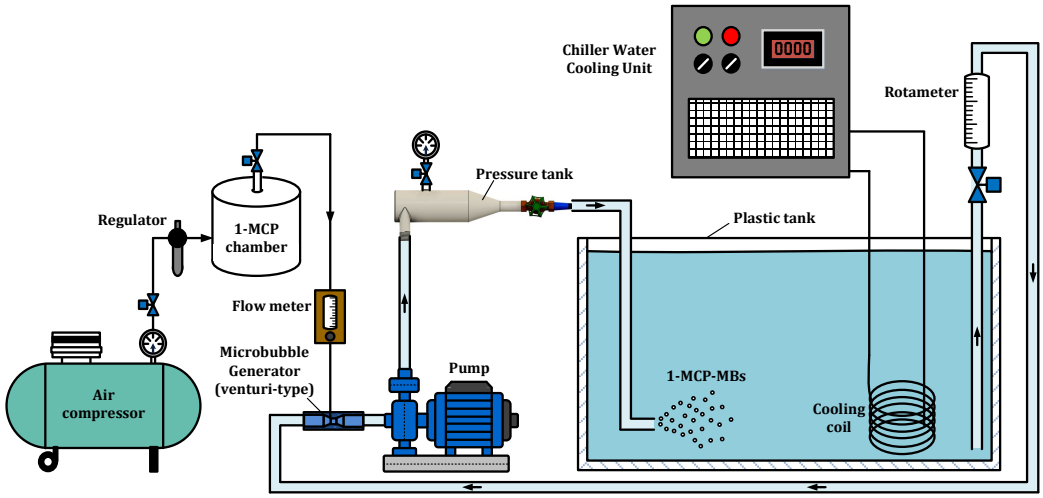


Figure 1: Schematic diagram of the experimental setup

Table 1: Experimental conditions

Parameters	Values
Water pressure	4, 5, and 6 kg/cm^2
Concentration of 1-MCP	500, 1000, and 1500 ppb
Duration of immersion in 1-MCP-MBs	5, 10, and 15 min
Storage duration	10 days
Storage conditions	Ambient temperature

2. Determination of Weight Loss

Changes in the weight of bananas were recorded using a high precision digital analytical balance. Weight loss was determined using the difference between the initial weight and the weight at each sampling interval. For standardized comparison, the starting weight of each sample was used as the reference of 100%, and the percentage of residual weight was calculated using the following equation (1):

$$Weight\ Loss\ (\%) = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

where W_o is the initial weight of the sample and W_t is recorded weight of the sample every 24-hour interval over the 10-day storage period. In addition, each measurement was repeated three times for each experimental condition, and the results are presented as mean ± standard deviation (SD).

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the variation in banana weight over 10 days of storage, keeping the starting weight at 100% (Day 0). The analysis includes an untreated control, 24 hours of 1-MCP gaseous fumigation, and 5 min 1-MCP-MBs immersion treatment at a concentration of 500 ppb.

A steady decline in weight was observed in all treatment groups throughout the storage period, primarily attributed to postharvest transpiration and respiration processes. However, the magnitude of weight loss varied significantly among treatments. The control samples showed the highest weight reduction, with the residual weight decreasing from 100% to 96.86%, representing a total weight loss of 3.14 ± 0.56% after 10 days of storage. This tendency suggests continued ripening in nature with a loss of moisture. Bananas that were subjected to 1-MCP for 24 hours showed a lower rate of weight loss compared to the control group. The inhibition of ethylene receptor activity by 1-MCP probably contributed to the decreased rate of respiration and moisture loss. Despite this effect, the weight gradually lowered to 97.52% at Day 10, indicating a reduction of 2.48 ± 0.30%. On the other hand, the 1-MCP-MBs immersion treatment (5 min) produced the best weight retention, showing a final weight measure of 98.32% and a weight loss of 1.68 ± 0.07%.

The superior performance of this treatment may be attributed to improved dispersion and contact efficiency of 1-MCP, facilitated by microbubble technology. The small bubble size and high interfacial area likely provide a more homogeneous contact between the active compound and the fruit surface, helping to counteract physiological water loss and ripening to a greater extent and for a longer time than commonly used fumigation, despite the much shorter exposure time. In conclusion, the present research findings highlight the potential of 1-MCP-MBs application as an efficient approach to extend the shelf life of bananas.

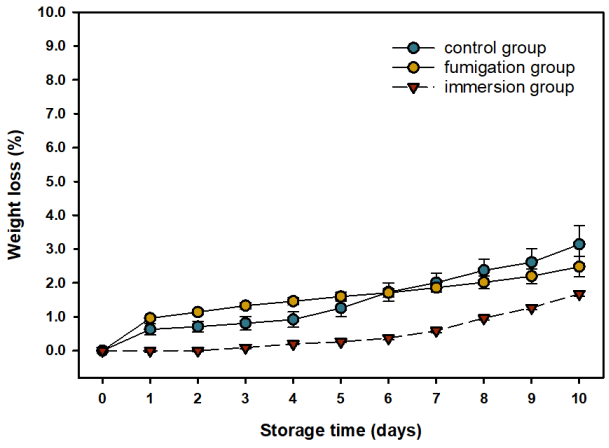


Figure 2: Weight loss of banana at different ripening delay methods

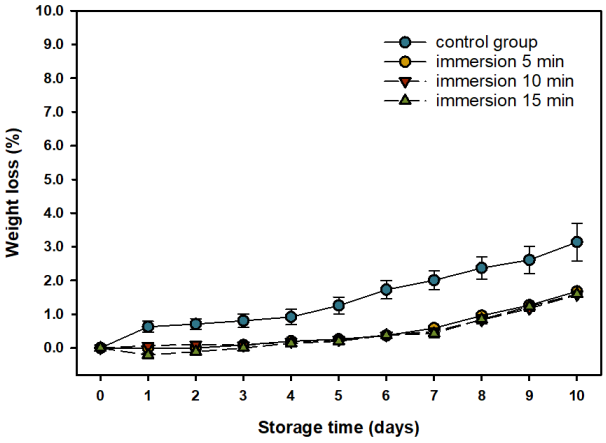


Figure 3: Weight loss of banana at different immersion time

From the comparative results of banana ripening inhibition, the immersion of 1-MCP-MBs showed better results. Consequently, the impact of the immersion time (5, 10, and 15 min) on weight change was studied to find the optimal processing time by using a constant 1-MCP concentration of 500 ppb and a generation pressure of 5 kg/cm^2.

As shown in figure 3, an increasing trend was noted in weight loss among experimental groups in terms of storage period, which conforms to the normal postharvest transpiration behavior. However, the results showed that bananas treated with 1-MCP-MBs for 5, 10, and 15 min have remarkably similar weight profiles over the 10 days interval. On the last day of storage, the weight loss recorded was 1.68 ± 0.07%, 1.58 ± 0.05%, and 1.60 ± 0.03% for 5-, 10-, and 15-min treatments, respectively. These results indicate that varying the immersion time in this range does not have a significant effect on the rate of weight loss. From engineering perspective, the time when immersion happens to obtain appropriate performance of the adhesion mechanism of microbubbles is rather short by 5 to 15 min for the immersion of 1-MCP on the surface of the fruit can be easily achieved. This indicates that the shorter time of 5 min is enough for the desired inhibitory effect with major advantages from the viewpoint of throughput and operational efficiency in industrial applications.

After determining that an immersion time of 5 to 15 min was the optimal range for delaying ripening, an immersion time of 5 min was chosen for subsequent experiments to optimize processing efficiency. This exposure time was then used to test the effect of different concentrations of 1-MCP: 500, 1000, and 1500 ppb on the suppression of the ripening process.

The changes in the weight of bananas stored for 10 days after immersion in 1-MCP-MBs at a generation pressure of 5 kg/cm^2 are shown in figure 4. A gradual increase in weight loss was observed in all groups over time, indicating normal postharvest water loss and respiratory activities. The control fruit showed the greatest increase in weight loss, reaching up to 3.14 ± 0.56% by Day 10, representing continuous ethylene-induced ripening. The application of 1-MCP through microbubble immersion reduced the degree of weight loss in all treated groups. Among the concentrations experimented, a concentration of 500 ppb resulted in the greatest retention (1.68 ± 0.07%), showing effective inhibition in the physiological response by ethylene. However, extending the concentration to 1000 or 1500 ppb did not yield any further improvement in weight retention. This observation suggests that under the current microbubble-assisted delivery conditions, a concentration of 500 ppb is sufficient to achieve functional saturation of the available ethylene receptors, and additional 1-MCP does not provide measurable additional benefits.

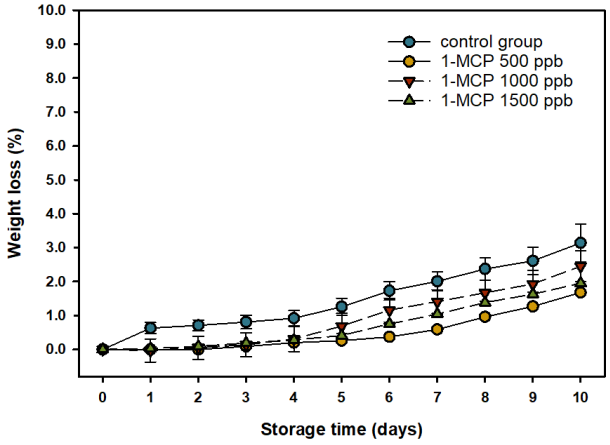


Figure 4: Weight loss of banana at different 1-MCP concentration

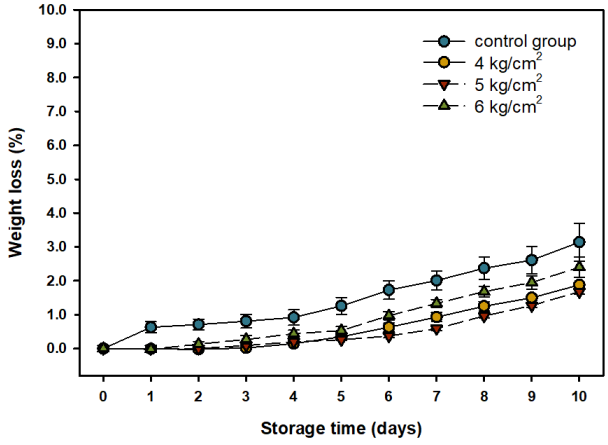


Figure 5: Weight loss of banana at different water pressure for microbubble generation

Following the identification of 500 ppb as an effective concentration of 1-MCP for limiting ripening and the occurrence of weight loss, the influence of water pressure during the generation of microbubbles was further studied at 4, 5, and 6 kg/cm^2, while other parameters were kept constant, and the immersion time was set to 5 min.

Figure 5 shows that weight loss increased at a progressive rate in all groups during the 10 days storage duration, which agrees with normal postharvest moisture evaporation and respiratory activities. Despite this general trend, the amount of weight reduction was a function of generation pressure. At Day 10 of storage, the group treated at 5 kg/cm^2 showed the lowest weight loss at 1.68 ± 0.07%, compared to 1.80 ± 0.08% and 2.40 ± 0.03% for the 4 and 6 kg/cm^2 groups, respectively. This intermediate pressure probably created favorable conditions of formation and dispersion of bubbles in the aqueous phase. Therefore, at 5 kg/cm^2 generation pressure, the parameters of bubbles size, distribution and stability provided the greatest gas–liquid interface, which facilitates the effective transfer of 1-MCP onto the banana peel. These resulted in an increased capacity to inhibit ethylene-induced physiological responses and consequently ripening was much more delayed than under other pressure conditions. From the results, it is concluded that this pressure created microbubbles that were stable and allowed for maximum adhesion of 1-MCP to the fruit peel, so 5 kg/cm^2 was identified as the optimal operating condition of the proposed delivery system.

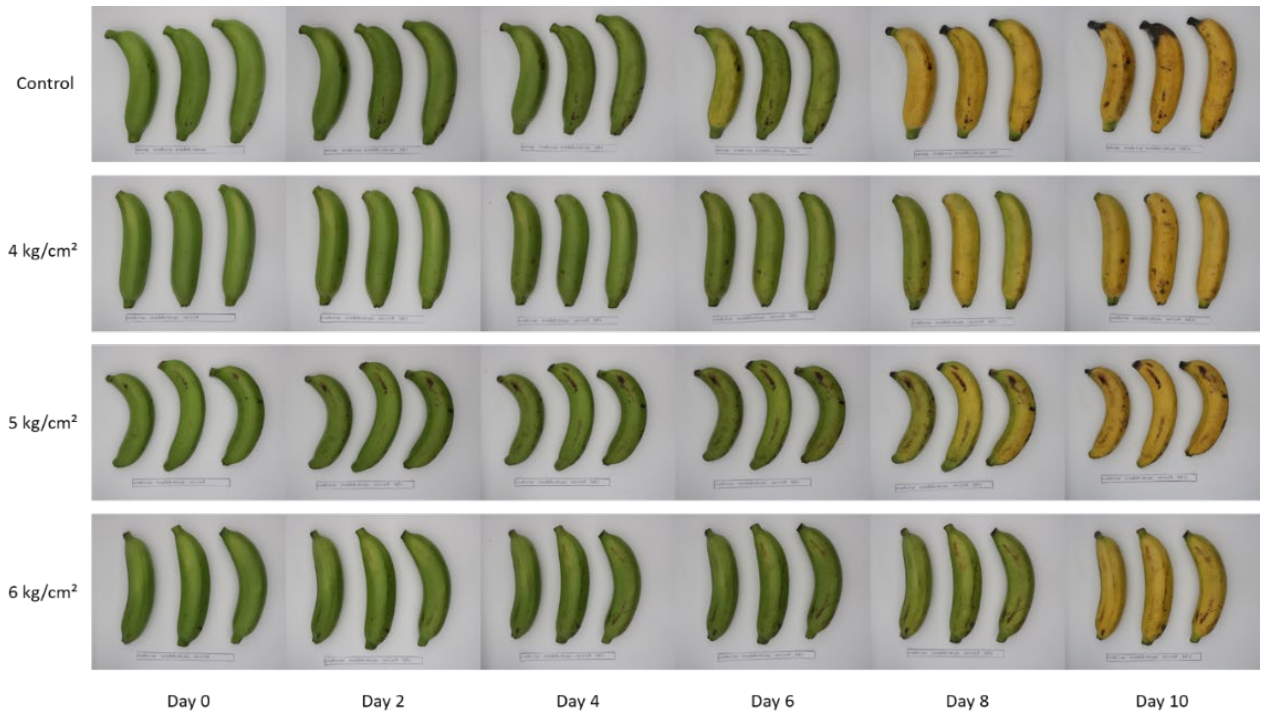


Figure 6: Change in peel color of banana during storage at room temperature for 10 days

Figure 6 shows the changes in peel color of bananas kept at ambient temperature for a period of 10 days. The analysis is based on both the untreated control and the immersion treatments (500 ppb concentration, 5 min) with 1-MCP-MBs at pressures of 4, 5, and 6 kg/cm^2. On Day 0, the peels of all samples were a uniform green, which is characteristic of the unripe stage. Throughout the storage period, the control fruit showed a significant color

change from green to yellow and the formation of brown spots between Days 8 and 10. The pattern observed is in line with the climacteric fruits increase in ethylene production and the triggering of a senescence response. On the other hand, bananas treated with 1-MCP-MBs showed a lower rate of degreening under all pressure conditions. It is interesting to note that the treatment given at 5 kg/cm^2 retained a green peel color for the longest period, showing little yellowing by Day 10. The slowed degradation of chlorophylls suggests the effective suppression of ethylene-mediated ripening, which agrees with the previously mentioned reduced weight loss. The higher response at 5 kg/cm^2 might be due to more favorable properties of bubble formation at this pressure. An intermediate operating pressure could facilitate the even dispersion of bubbles and provide sufficient gas-liquid interaction, which would enhance the interaction between 1-MCP and the fruit surface. This interaction may, in turn, be responsible for a much more consistent inhibition of ethylene perception and a slowed ripening process.

CONCLUSION

This study examined the use of 1-MCP-MBs as an alternative to delay postharvest ripening of bananas. By investigating treatment methods, immersion duration, 1-MCP concentration and microbubble generation pressure, practical operating conditions were found:

1. Immersion in 1-MCP-MBs resulted in a more consistent ripening progression and weight loss than the untreated control and conventional 24 hours gaseous fumigation. The presence of the microbubbles system seems to enhance contact between 1-MCP and the fruit surface to deliver effective treatment in a shorter exposure period.

2. A comparative analysis of immersion times (5, 10, and 15 min) showed no significant difference in weight loss prevention. Under the tested conditions, 5 min of treatment was sufficient to achieve the desired inhibitory effect while also reducing processing time.

3. A concentration of 500 ppb was sufficient to repress ripening-related responses. An increase in dosage to 1000 or 1500 ppb did not yield further measurable improvements, suggesting that the effective interaction between 1-MCP and ethylene receptors may be nearing the saturation point at 500 ppb under the management of microbubbles.

4. Of the different evaluated pressures, the pressure of 5 kg/cm^2 led to the most stable control of weight loss and peel color development. This condition must promote favorable bubble formation and dispersion characteristics, which help in the efficient gas and liquid interaction in the treatment process.

5. The combination of 500 ppb 1-MCP, immersion for 5 min, and generation of 5 kg/cm^2 pressure was correlated to delayed peel yellowing and reduced mass loss throughout 10 days of storage, while control fruit reached visible senescence between Day 6 and Day 8.

In summary, the application of 1-MCP with microbubbles is a time efficient alternative to conventional fumigation. The results offer a basis for further evaluation for commercial-scale post-harvest handling conditions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors sincerely appreciate the facility access provided by the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University.

REFERENCES

[1] Office of the National Economic and Social Development Council, "Gross domestic product of Thailand: Q3/2025," Nov. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.nesdc.go.th/wordpress/wp-content/uploads/2025/11/BookQGDP-3-2568-Eng.pdf

[2] P. Kulthanavit, "Thailand's banana exports to Japan," (in Thai), *BU Academic Rev.*, vol. 23, no. 2, pp. 181–206, 2024.

[3] M. H. Shinga, Y. Silue, and O. A. Fawole, "Recent advancements and trends in postharvest application of edible coatings on bananas: A comprehensive review," *Plants*, vol. 14, no. 4, 2025, Art no. 581.

[4] C. Sarpetch, M. Lanchai, P. Sanrucksa, N. Subpakhon, and K. Busarakum, "Efficiency of ethylene absorber paper containing activated carbon from banana sheath in prolonging storage life of 'Hom Thong' banana," (in Thai), *Thai J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 500–511, 2020.

[5] B. M. Abraham, B. K. Saleh, and D. Z. Zelelew, "Effect of post-harvest handling and ripening methods on quality and shelf-life of banana," *Amer. J. Plant Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 175–192, 2022.

[6] A. Maldonado et al., "Ethylene scavenging films based on ecofriendly plastic materials and nano-TiO_2: Preparation, characterization, and in vivo evaluation," *Polymers*, vol. 16, no. 6, 2024, Art no. 853.

[7] M. Palumbo et al., "Emerging postharvest technologies to enhance the shelf-life of fruit and vegetables: An overview," *Foods*, vol. 11, no. 23, 2022, Art no. 3925.

[8] C. B. Watkins, "The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables," *Biotechnol. Adv.*, vol. 24, no. 4, pp. 389–409, 2006.

[9] Y. Kartika, T. Srinon, N. Pongprasert, and P. Jitareerat, "Effect of 1-MCP fumigation for preserving the quality of 'Namwa' subcluster-isolated bananas for the retail markets," *Agricultural Sci. Innov. J.*, vol. 55, no. 1 (Suppl.), pp. 109–112, 2024.

[10] T. K. Satekge and L. S. Magwaza, "Postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on climacteric fruits: Factors affecting efficacy," *Int. J. Fruit Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 595–607, 2022.

[11] P. Promkaew, S. Kondo, N. Pongprasert, C. Wongs-Aree, S. Kaewsuksaeng, and V. Srilaong, "Application of AVG or 1-MCP-MBs on postharvest quality of Pummelo cv. "Tubtim Siam" (Citrus maxima Burm.)," *Food Appl. Bioscience J.*, vol. 7, no. 3 (Special Issue), pp. 55–71, 2019.

[12] L. P. L. Nguyen, T. Zsom, M. S. Dam, L. Baranyai, and G. Hitka, "Evaluation of the 1-MCP microbubbles treatment for shelf-life extension for melons," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 150, pp. 89–94, 2019, doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.12.017.

[13] A. Patil et al., "Advances in microbubble technologies for food sanitization: A comprehensive review," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 24, no. 4, 2025, Art no. e70230.

[14] N. Pongprasert and V. Srilaong, "A novel technique using 1-MCP microbubbles for delaying postharvest ripening of banana fruit," *Postharvest Biol. Technol*., vol. 95, pp. 42–45, 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.04.003.

[15] Y. Liu et al., "The molecular regulation of ethylene in fruit ripening," *Small Methods*, vol. 4, no. 8, 2020, Art no. 1900485.

[16] B. Cara and J. J. Giovannoni, "Molecular biology of ethylene during tomato fruit development and maturation," *Plant Sci.*, vol. 175, no. 1–2, pp. 106–113, 2008.

[17] S. Lohani, P. K. Trivedi, and P. Nath, "Changes in activities of cell wall hydrolases during ethylene-induced ripening in banana: Effect of 1-MCP, ABA and IAA," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 31, no. 2, pp.119–126, 2004.

[18] I. Lara, B. Belge, and L. F. Goulao, "The fruit cuticle as a modulator of postharvest quality," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 87, pp. 103–112, 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.08.012.

[19] R. Alonso-Salinas, S. López-Miranda, A. J. Pérez-López, and J. R. Acosta-Motos, "Strategies to delay ethylene-mediated ripening in climacteric fruits: Implications for shelf life extension and postharvest quality," *Horticulturae*, vol. 10, no. 8, 2024, Art no. 840.

[20] N. Pongprasert, S. Phornvillay, P. Lekkham, S. Yodsarn, and V. Srilaong, "1-MCP microbubbles reduce chlorophyll degradation and maintain the quality of Dendrobium cv. Burana Jade orchid flowers," *Scientia Horticulturae*, vol. 327, 2024, Art no. 112827, doi: 10.1016/j.scienta.2023.112827.

[21] J. Vera, N. Pongprasert, P. Jitareerat, P. Boonyaritthongchai, and V. Srilaong, "1-MCP microbubbles influence in fruit color and quality of dragon fruit," *Agricultural Sci. J.*, vol. 48, no. 3 (Suppl.), pp. 237–240, 2017.

[22] H. K. Malahlela, Z. A. Belay, R. R. Mphahlele, and O. J. Caleb, "Micro-nano bubble water technology: Sustainable solution for the postharvest quality and safety management of fresh fruits and vegetables – A review," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.,* vol. 94, 2024, Art no. 103665, doi: 10.1016/j.ifset.2024.103665.

[23] T. Temesgen, T. T. Bui, M. Han, T.-I. Kim, and H. Park, "Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review," *Adv. Colloid Interface Sci*., vol. 246, pp. 40–51, 2017, doi: 10.1016/j.cis.2017.06.011.

[24] J. Yu et al., "High-speed generation of microbubbles with constant cumulative production in a glass capillary microfluidic bubble generator," *Micromachines*, vol. 15, no. 6, 2024, Art no. 752.

[25] X. Hu, B. Zhang, C. Wu, X. Xu, M. Xue, and X. Zheng, "Numerical simulation and structural optimization of swirl flow micro-nano bubble generator," *Coatings*, vol. 13, no. 8, 2023, Art no. 1468.

[26] Y. Maeda, S. Hosokawa, Y. Baba, A. Tomiyama, and Y. Ito, "Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 60, pp. 201–207, 2015, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.09.010.

[27] I. G. N. B. Catrawedarma, S. Ton, D. D. Pranowo, and F. Surahmanto, "Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in water using an ejector-type bubble generator," *Case Stud. Chem. Environ. Eng*., vol. 11, 2025, Art no. 101043, doi: 10.1016/j.cscee.2024.101043.

[28] F. Roshanti, S. D. P. Sidhi, S. Kamal, Deendarlianto, and Indarto, "The performance of venturi microbubble generator type with a 60° twisted baffles," *Eng. Proc.,* vol. 37, no. 1, 2023, Art no. 116.

Enhancing Accessibility for Visually Impaired Users through a Hybrid Real-Time Multi-Object Recognition System

Pitiphat Joembunthanaphong[1*] Kritsada Kaewwadpring[2]

[1*,2]*Faculty of Information Technology and Digital Innovation, North Bangkok University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding author e-mail: Pitiphat.jo@northbkk.ac.th

Received: 2 April 2026; Revised: 17 August 2026; Accepted: 18 August 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

Visual impairment creates substantial challenges in performing object recognition tasks essential for independent living. Existing assistive vision systems typically rely on either classical computer vision techniques or deep learning models, limiting their robustness and practical applicability in real-world environments. To address these limitations, this study proposes a hybrid intelligent vision framework that integrates YOLOv8-based object detection for robust object localization, barcode recognition for reliable product verification, and ORB feature matching for fine-grained identification when barcode information is unavailable, thereby combining the complementary strengths of deep learning and classical computer vision. The dataset was designed to represent four common information-access tasks encountered by visually impaired individuals, including product labels, Thai banknotes, short shelf-life food products, and pharmaceutical items. An expanded dataset comprising 1,105 object classes and 7,927 images was constructed under diverse environmental conditions. The complete recognition pipeline was evaluated as an integrated mobile assistive system through both controlled and uncontrolled experiments to assess recognition accuracy, robustness, and the feasibility of practical deployment. Experimental results show that the proposed framework achieved 97.6% recognition accuracy, outperforming both the ORB–Barcode baseline (96.2%) and the standalone YOLOv8 model (97.0%), while maintaining near-real-time performance with an average processing time of 2.30 s per inference. User evaluation further demonstrated statistically significant improvements in task success rates among trained participants. The proposed framework improves recognition robustness while preserving computational efficiency on resource-constrained mobile devices, providing a practical, scalable, and user-validated assistive solution that enhances accessibility and supports independent living for visually impaired individuals.

***Keywords*:** Assistive technology, Computer vision, Mobile computing, Object recognition, Visually impaired

INTRODUCTION

Visual impairment remains a significant global challenge affecting independence, accessibility, and quality of life. According to the World Health Organization (WHO), millions of people worldwide experience blindness or moderate-to-severe vision impairment, creating barriers to information access, mobility, and participation in daily activities [1]. In Thailand, disability-inclusive development has become an important national priority, with recent reports emphasizing the need for technological solutions that support independent living, employment opportunities, and equitable access to services for persons with disabilities [2], [3]. These challenges highlight the growing demand for practical assistive technologies that provide reliable real-time information in everyday environments. Among the daily challenges faced by visually impaired individuals are identifying consumer products, recognizing banknotes, verifying food expiration dates, and distinguishing pharmaceutical products, all of which rely heavily on visual information.

Computer vision technologies have emerged as promising solutions for addressing these challenges. Traditional recognition systems employed handcrafted feature descriptors such as SIFT, SURF, and ORB for object identification and image matching [4], [5], [6]. Barcode-based approaches have also demonstrated effectiveness in assistive applications for product identification and information access [7], [8], [9]. More recently, deep learning–based object detection frameworks, including YOLO and transformer-based architectures, have significantly improved recognition performance under complex environmental conditions [10], [11], [12]. However, each approach exhibits inherent limitations. Feature-based methods are sensitive to occlusion and viewpoint variation, barcode recognition depends on visible machine-readable labels, and deep learning models may require additional verification mechanisms for fine-grained object identification. Consequently, integrating complementary recognition techniques offers a promising strategy for improving robustness without sacrificing computational efficiency on mobile platforms.

Recent studies have demonstrated the potential of computer vision technologies for supporting visually impaired individuals. Machine learning and deep learning–based assistive systems have been applied to object recognition and environmental awareness tasks [13], [14], [15], [16], while domain-specific solutions have been developed for Thai banknote recognition [17] and pharmaceutical identification [18]. Nevertheless, most existing studies address only a single recognition task or object category, limiting their applicability in realistic assistive scenarios where multiple object types must be recognized within a unified framework.

To address these limitations, this study extends the authors' previous ORB- and barcode-based assistive recognition system [19] by incorporating YOLOv8 as a robust object localization module while preserving the efficient fine-grained verification capabilities of barcode decoding and ORB feature matching. The proposed system integrates object detection, barcode decoding, and ORB feature matching to support robust multi-object recognition on mobile devices. The framework is designed to support four practical application domains: product label identification, Thai banknote recognition, expiration-date verification, and pharmaceutical product identification. Thai banknote recognition is based on the current banknotes series BE 2561 issued by the Bank of Thailand [20].

The main contributions of this study are threefold. First, a hybrid vision framework combining YOLOv8 object detection, barcode recognition, and ORB feature matching is proposed to improve recognition robustness under

practical operating conditions. Second, a multi-category dataset comprising 1,105 object classes and 7,927 images was constructed to support assistive recognition tasks. Third, the proposed framework was evaluated through both technical performance analysis and user-centered experimentation involving visually impaired participants under controlled and uncontrolled environments. The findings demonstrate that the proposed hybrid architecture effectively bridges deep learning–based object localization and classical fine-grained recognition, providing a scalable and practical assistive vision solution for real-world mobile applications.

LITERATURE REVIEW

1. Computer Vision-Based Recognition Technologies

Computer vision technologies have become increasingly important in assistive systems for visually impaired individuals because they enable automatic recognition and interpretation of objects within everyday environments. Traditional recognition approaches primarily rely on handcrafted local features, including Scale-Invariant Feature Transform (SIFT), Speeded-Up Robust Features (SURF), and Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB). Lowe [4] introduced SIFT to provide robust feature extraction under scale and rotation variations, while Bay et al. [5] improved computational efficiency through the SURF algorithm. Subsequently, Rublee et al. [6] proposed ORB, which combines FAST keypoint detection and BRIEF descriptors to achieve efficient feature matching suitable for real-time and resource-constrained applications. Although these techniques have demonstrated effectiveness in object recognition and image matching, their performance may deteriorate under severe occlusion, motion blur, complex backgrounds, and significant viewpoint variations, making them less suitable for robust assistive applications operating in unconstrained real-world environments.

Barcode-based recognition techniques have also been widely adopted in assistive applications because of their high accuracy and low computational requirements. Jethjarurach and Limpiyakorn [7] developed a mobile barcode reader to support product identification for visually impaired users, whereas Fernandcz et al. [8] proposed an image-based barcode detection and recognition framework capable of providing auditory feedback. In a comprehensive review, Pradhan et al. [9] highlighted the effectiveness of barcode recognition systems for real-time identification tasks and emphasized their suitability for deployment on mobile platforms. Despite these advantages, barcode-based methods remain dependent on the presence and visibility of machine-readable labels, making them vulnerable to label damage, occlusion, poor illumination, and unfavorable viewing angles. Consequently, barcode recognition alone cannot provide complete support for diverse real-world assistive scenarios.

Recent advances in deep learning have significantly improved object recognition and detection capabilities. Redmon et al. [10] introduced the YOLO framework, which reformulated object detection as a single-stage regression problem and enabled real-time object detection with competitive accuracy. He et al. [11] subsequently proposed deep residual networks (ResNet), facilitating the effective training of deep neural architectures and substantially improving image recognition performance. Carion et al. [12] further advanced object detection through the Detection Transformer (DETR), which integrates transformer architectures into an end-to-end detection framework. Building upon these developments, modern YOLO architectures have achieved an effective balance between detection accuracy, inference speed, and computational efficiency, making them particularly suitable for mobile and real-time applications. Nevertheless, category-level object detection alone may be insufficient for

assistive scenarios requiring fine-grained identification of visually similar products, medications, or currency denominations. Consequently, additional verification mechanisms are often necessary to improve recognition reliability in practical deployment environments. This limitation motivates the integration of complementary recognition techniques rather than relying solely on deep learning–based detection.

2. Assistive Technologies for Visually Impaired Individuals

Numerous assistive technologies have been developed to enhance independence and accessibility for visually impaired individuals. Recent studies have demonstrated the effectiveness of computer vision and machine learning techniques in supporting object recognition and environmental awareness. For example, Munia and Taher [13] applied machine learning–based object detection to assist visually impaired users in identifying surrounding objects, while Aduri and Naganjaneyulu [14] reviewed recent advancements in computer vision–based assistive technologies and highlighted their potential to improve accessibility and independent living. Similarly, Bhandari et al. [15] demonstrated that deep learning–based object recognition can provide accurate and efficient assistance for visually impaired individuals, whereas Sreenivasulu et al. [16] emphasized the importance of robust object detection systems capable of operating under diverse environmental conditions.

In addition to general object recognition, specialized assistive solutions have been developed for specific daily-life tasks. Hongboonmee and Sangtan [17] proposed a smartphone-based Thai banknote recognition application that provides voice feedback to support financial accessibility for blind users. Similarly, Ting et al. [18] developed a deep learning–based pharmaceutical identification model that achieved high recognition accuracy in medication classification tasks. Although these systems have demonstrated practical benefits, most focus on a single recognition task or application domain. Consequently, users often rely on multiple applications or assistive tools to support different daily activities, which may reduce usability and limit adoption in real-world environments. This fragmentation reduces usability and highlights the need for an integrated assistive framework capable of supporting multiple recognition tasks within a single application.

3. Domain-Specific Applications and Research Foundation

Several studies have investigated computer vision technologies for assistive applications involving object recognition and information accessibility. These applications include product identification, currency recognition, medication assistance, and other daily-life tasks that support independent living among visually impaired individuals [13], [18]. Such applications require reliable recognition performance under diverse environmental conditions and varying object characteristics. In particular, Ting et al. [18] demonstrated that deep learning–based image recognition can achieve high accuracy in pharmaceutical identification, highlighting the potential of computer vision technologies for medication-related assistive applications.

Previous work conducted by the authors demonstrated that integrating barcode recognition with ORB-based feature matching can improve recognition accuracy compared with using either technique independently [19]. However, the system remained dependent on handcrafted features and experienced performance degradation under challenging environmental conditions. The rapid development of deep learning–based object detection provides an opportunity to overcome these limitations. By combining the localization capability of modern object

detectors with the verification strengths of barcode decoding and feature matching techniques, a more robust recognition framework may be achieved. Such integration has the potential to enhance recognition reliability while preserving computational efficiency for deployment on mobile devices. This observation forms the technical foundation of the proposed hybrid framework presented in this study.

4. System Design and User-Centered Development

Beyond recognition accuracy, the effectiveness of assistive technologies depends heavily on usability, accessibility, and user-centered design principles. Previous research emphasizes the importance of developing systems that accommodate diverse user needs, provide intuitive interaction mechanisms, and operate effectively within real-world environments [19], [20]. Mobile platforms have emerged as particularly attractive deployment environments because of their widespread availability and integrated sensing capabilities. Consequently, assistive systems intended for daily use should prioritize real-time performance, ease of interaction, and adaptability to varying environmental conditions. These considerations extend beyond algorithmic accuracy and are essential for improving long-term adoption of assistive technologies by visually impaired users.

5. Research Gap and Motivation

Although substantial progress has been achieved in computer vision–based assistive technologies, several limitations remain. Traditional feature-based methods offer computational efficiency but are vulnerable to environmental variability, while barcode-based approaches require the presence of visible machine-readable markers. Conversely, deep learning models provide strong object detection performance but may lack reliable mechanisms for fine-grained object verification. Moreover, most existing assistive systems focus on individual recognition tasks rather than providing a unified solution capable of supporting multiple daily-life activities.

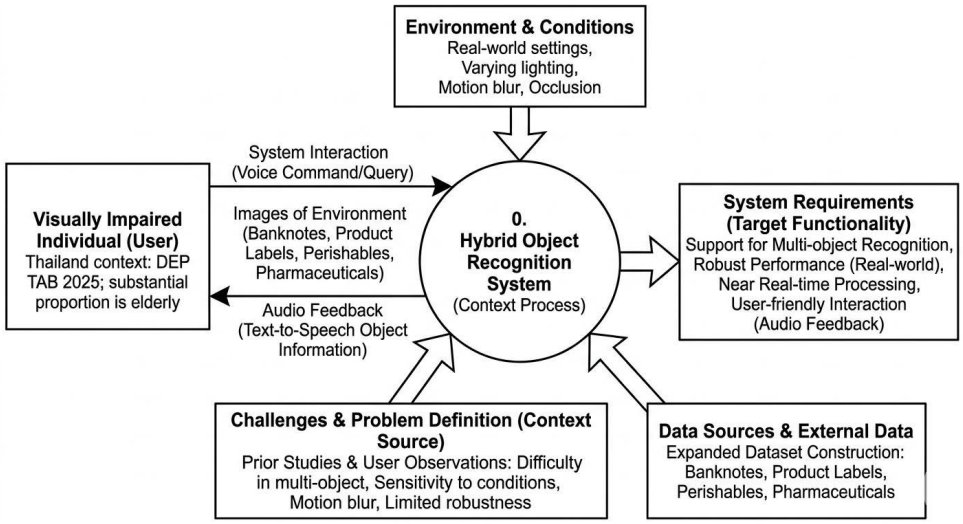
Despite the complementary strengths of these approaches, limited research has investigated the integration of deep learning–based object detection, barcode recognition, and feature-based verification within a single mobile framework designed specifically for visually impaired users. This gap motivates the development of the proposed Hybrid Vision Framework, which combines YOLOv8 object detection, barcode decoding, and ORB feature matching to provide robust, real-time, and multi-category object recognition under practical operating conditions. Accordingly, this study proposes a unified hybrid vision framework that addresses these limitations through hierarchical object localization and fine-grained verification within a single mobile assistive system.

METHODS

1. Problem Definition and System Requirements

Visual impairment significantly limits independent access to information required for daily activities, including product identification, currency recognition, medication verification, and food safety assessment [1], [2], [3]. Existing assistive vision systems typically address specific tasks such as barcode reading, banknote recognition, or object detection, limiting their effectiveness in real-world environments characterized by diverse object categories and dynamic visual conditions [13], [14], [15], [16]. To address these limitations, this study proposes a unified hybrid vision framework capable of recognizing multiple object categories commonly encountered by visually impaired

individuals. The framework is designed to operate under practical environmental variations, including illumination changes, viewpoint variations, motion blur, background clutter, and partial occlusion. As illustrated in Figure 1, the proposed framework was derived from four representative daily-life information-access tasks: product label identification, Thai banknote recognition, pharmaceutical identification, and expiration-date verification. These application domains were selected because they represent common situations requiring reliable object recognition to support independent living [2], [3].



.

Figure 1: Data flow-based problem analysis and solution requirements

Based on the identified challenges, the system was designed to satisfy four key requirements: (1) multi-category object recognition, (2) real-time operation on mobile devices, (3) robustness under uncontrolled environments, and (4) audio-based information delivery for non-visual interaction. These requirements guided the overall framework design and subsequent experimental evaluation.

2. Proposed Hybrid Vision Framework

To satisfy the identified requirements, a hybrid recognition framework integrating deep learning-based object detection, barcode decoding, and ORB feature matching was developed. The framework combines the localization capability of YOLO with the efficiency of classical feature descriptors to balance recognition accuracy, computational efficiency, and deployment feasibility on mobile platforms [6], [9], [16]. Figure 2 illustrates the overall architecture of the proposed framework, which consists of four sequential phases. Phase 1 (Data Acquisition and Pre-processing) acquires images using a smartphone camera and performs resizing, grayscale conversion, normalization, and data augmentation to improve data quality and model generalization under varying environmental conditions [21]. Phase 2 (Hybrid Recognition Core) performs hierarchical object recognition. YOLOv8 first detects candidate objects and extracts Regions of Interest (ROI), after which barcode decoding and ORB feature matching perform fine-grained verification. This hierarchical decision process improves recognition reliability by allowing one recognition pathway to compensate when another fails because of occlusion, motion blur, or missing barcode information [6], [7], [8], [9]. Phase 3 (System Integration) deploys the recognition engine within an Input–

Process–Output (IPO) architecture, integrating image acquisition, object detection, barcode decoding, feature matching, database retrieval, and decision fusion into a unified mobile application. Phase 4 (Output and Evaluation) converts recognition results into speech using a Text-to-Speech (TTS) module and evaluates the complete system through technical performance metrics and user-centered experiments under both controlled and uncontrolled environments.

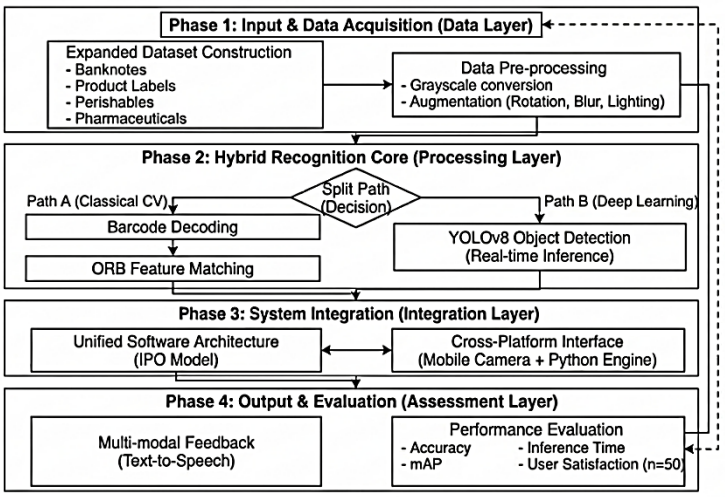


Figure 2: Proposed hybrid vision framework

This end-to-end framework enables reliable recognition of both barcode-supported objects and visually similar objects requiring feature-based verification while maintaining practical deployment feasibility on resource-constrained mobile devices.

3. Dataset Construction and Pre-processing

To evaluate the proposed framework under realistic operating conditions, a multi-domain dataset was constructed comprising 1,105 object classes and 7,927 images. The dataset was designed to represent daily tasks frequently encountered by visually impaired individuals and encompasses four application domains: product labels, Thai banknotes, short shelf-life food products, and pharmaceutical products. The overall dataset distribution is summarized in Table 1.

Table 1: Dataset distribution and data sources

Category	Classes	Images	Data Source
Product Labels	300	3,427	Collected from various consumer products in real-world environments
Thai Banknotes (BE 2561)	5	500	Bank of Thailand (Series BE 2561: 20, 50, 100, 500, 1,000 baht) [20]
Short Shelf-Life Foods	300	1,500	Collected from convenience stores and supermarkets
Pharmaceutical Products	500	2,500	Thai FDA drug database (Ministry of Public Health)

Representative examples of the four dataset categories are summarized in Table 2. These examples illustrate the diversity of objects and the corresponding recognition information used by the proposed framework. Each dataset category represents a practical assistive scenario, including product identification, financial transactions, food safety assessment, and medication verification. The banknote subset contains all circulating Thai banknotes from Series BE 2561 issued by the Bank of Thailand [20]. For training the YOLOv8 detector, all images were manually annotated using bounding-box labels following the YOLO object detection format. Each object instance was assigned its corresponding class identifier to support supervised object localization and multi-object recognition. Representative examples of all dataset categories are summarized in Table 2, whereas examples of Thai banknotes are illustrated in Figure 3 because currency recognition is one of the primary assistive tasks addressed in this study.

Table 2: Representative examples of the four dataset categories

Category	Representative Example	Key Recognition Information	Recognition Method
Product Labels	Instant noodles, bottled water, shampoo	Product name, brand, barcode	Barcode + ORB
Thai Banknotes	20, 50, 100, 500, 1,000 Baht	Denomination, portrait, security pattern	YOLOv8 + ORB
Short Shelf-Life Foods	Fresh milk, yogurt, sandwich, juice	Manufacturing date, expiration date	YOLOv8 + OCR
Pharmaceutical Products	Paracetamol, Ibuprofen, cough syrup	Drug name, dosage form, package label	YOLOv8 + ORB



(a) Example of a 20-Baht banknote

(b) Example of a 50-Baht banknote

(c) Example of a 100-Baht banknote

(d) Example of a 500-Baht banknote

(e) Example of a 20-Baht banknote

Figure 3: Examples of Thai banknotes from series BE 2561

Banknote recognition was incorporated into the proposed system because currency identification remains one of the most commonly reported challenges faced by visually impaired individuals during financial transactions [18]. To improve model robustness, images were collected under diverse acquisition conditions, including variations in illumination, viewing angle, object distance, background complexity, reflective surfaces, and partial occlusion [10], [12], [16]. Before model training, all images underwent a standardized pre-processing pipeline consisting of image

resizing, grayscale conversion where applicable, normalization, and quality verification. Data augmentation techniques, including rotation, scaling, brightness adjustment, horizontal flipping, and motion-blur simulation, were subsequently applied to increase sample diversity and reduce overfitting [21]. The dataset was then partitioned using a fixed 80:20 train–test split, as summarized in Table 3. The training subset was used for YOLOv8 model learning and ORB feature database construction, whereas the testing subset was reserved exclusively for performance evaluation. This partitioning ensures unbiased evaluation and fair comparison with the baseline methods.

Table 3: Dataset partitioning for training and testing

Category	Training (80%)	Testing (20%)	Rationale
Product Labels	2,742	685	General Accessibility
Thai Banknotes	400	100	Financial Independence
Perishable Foods	1,200	300	Food Safety
Pharmaceutical	2,000	500	Medical Safety
Total	**6,342**	**1,585**	

4. Hybrid Recognition Framework (YOLOv8 + ORB + Barcode)

The principal contribution of this study is a hybrid recognition framework that integrates YOLOv8-based object detection, barcode decoding, and ORB feature matching. Unlike conventional single-stage approaches, the proposed framework performs hierarchical recognition by first localizing candidate objects and subsequently applying fine-grained verification. This design combines the robustness of deep learning with the efficiency of classical computer vision techniques, improving recognition reliability under challenging real-world conditions [6], [9], [16].

4.1 YOLOv8-Based Object Detection: Object localization is performed using the YOLOv8n architecture, a lightweight one-stage detector optimized for real-time inference on resource-constrained devices [9]. Compared with traditional handcrafted feature approaches, YOLO-based detectors learn hierarchical visual representations directly from image data, enabling robust object detection under variations in illumination, viewpoint, and background complexity [10], [15], [16]. As shown in Figure 4. YOLOv8 Detection Pipeline, the input image is resized and processed through convolutional feature extraction layers, feature aggregation modules, and detection heads to generate object bounding boxes and confidence scores. The detected ROI are subsequently forwarded to the fine-grained recognition stage. The YOLOv8 model was trained using 640 × 640 input images to support multi-object recognition across all 1,105 object classes. The model was implemented using the Ultralytics YOLOv8 framework and trained locally on a workstation equipped with an NVIDIA RTX 40-series GPU. All training images were manually annotated using bounding-box labels in the standard YOLO format for supervised multi-class object detection.

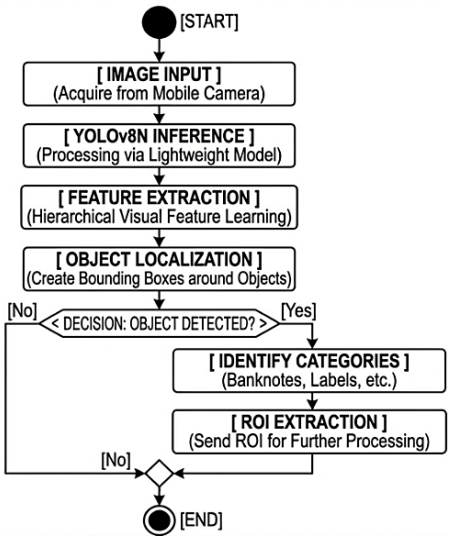


Figure 4: YOLOv8 detection pipeline

A practical example of simultaneous pharmaceutical detection is presented in Figure 5, demonstrating the capability of the framework to localize multiple objects before detailed identification.

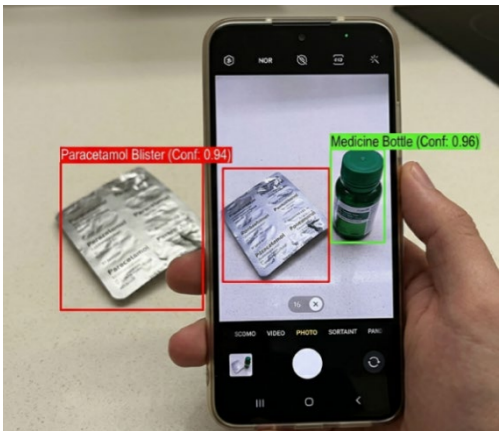


Figure 5: Real-time multi-object detection using YOLOv8 for pharmaceutical item identification

4.2 Barcode-Based Verification: Following ROI extraction, barcode decoding is performed as the primary verification mechanism because barcode information provides direct linkage to product databases and generally offers higher identification reliability than visual appearance alone [7], [8], [9]. Before decoding, each ROI undergoes grayscale conversion and image enhancement to improve barcode visibility. Barcode extraction is performed using the Pyzbar library, supporting automatic decoding of one- and two-dimensional barcode formats. When barcode decoding succeeds, product information is retrieved directly from the database without additional visual verification, reducing computational cost and recognition ambiguity.

4.3 ORB-Based Feature Matching: When barcode decoding fails because of occlusion, deformation, motion blur, poor image quality, or missing barcode patterns, the framework automatically switches to ORB-based feature matching as a secondary verification mechanism [6]. ORB combines FAST keypoint detection with BRIEF descriptors

to generate computationally efficient local feature representations suitable for real-time mobile applications. Feature correspondences are established using Hamming-distance matching and refined through geometric consistency verification to suppress false-positive matches. See Figure 6.

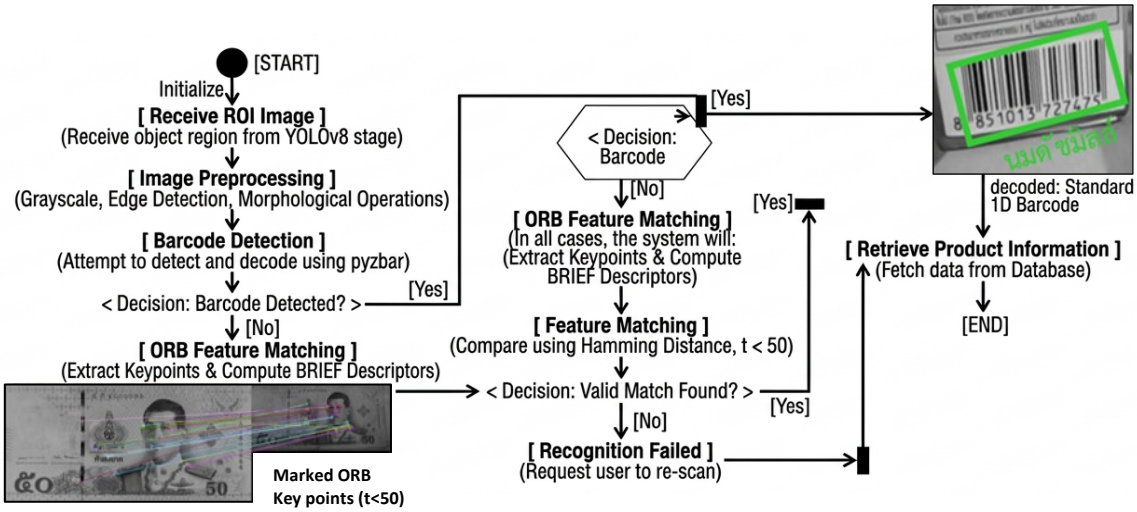


Figure 6: Fine-grained recognition logic

This complementary verification strategy improves recognition robustness by enabling reliable identification of visually similar objects when barcode information is unavailable. For expiration-date verification, Optical Character Recognition (OCR) is employed when manufacturing or expiration dates must be extracted directly from product packaging. The detected ROI is pre-processed before text extraction using Tesseract OCR [22], and the recognized date information is subsequently forwarded to the text-to-speech module for auditory feedback.

4.4 Text-to-Speech Feedback: After object identification, the recognition result is forwarded to the text-to-speech module, which converts textual information into synthesized speech. Depending on the recognized object category, the system announces product names, banknote denominations, medication names, or expiration dates, enabling visually impaired users to access recognition results through audio feedback and supporting independent daily use.

5. System Architecture and Operational Workflow

The proposed assistive system follows an Input–Process–Output architecture consistent with user-centered assistive technology design principles [23], [24], [25]. As illustrated in Figure 7, the input layer receives images from a smartphone camera, while the processing layer includes YOLOv8 detection, barcode decoding, ORB feature matching, database retrieval, and decision-making components. The decision module integrates recognition outputs from the barcode and ORB verification pathways to determine the final object identity before forwarding the result to the text-to-speech module. Recognition results are delivered through synthesized speech, enabling non-visual interaction.

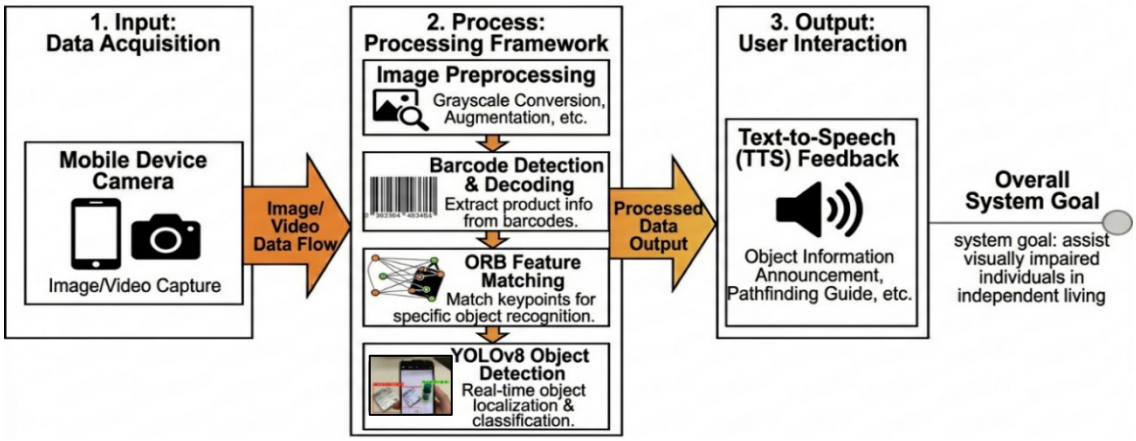


Figure 7: Unified system architecture

The operational workflow is illustrated in Figure 8. The process begins with image acquisition, followed by object detection, ROI extraction, fine-grained recognition, decision fusion, and audio output generation. Barcode decoding is performed first because it provides direct product identification. When barcode decoding fails, ORB-based feature matching is automatically activated as the secondary verification mechanism. This workflow supports continuous real-time interaction while maintaining low computational overhead on mobile devices. The modular architecture also facilitates future integration of additional recognition modules without modifying the overall system structure.

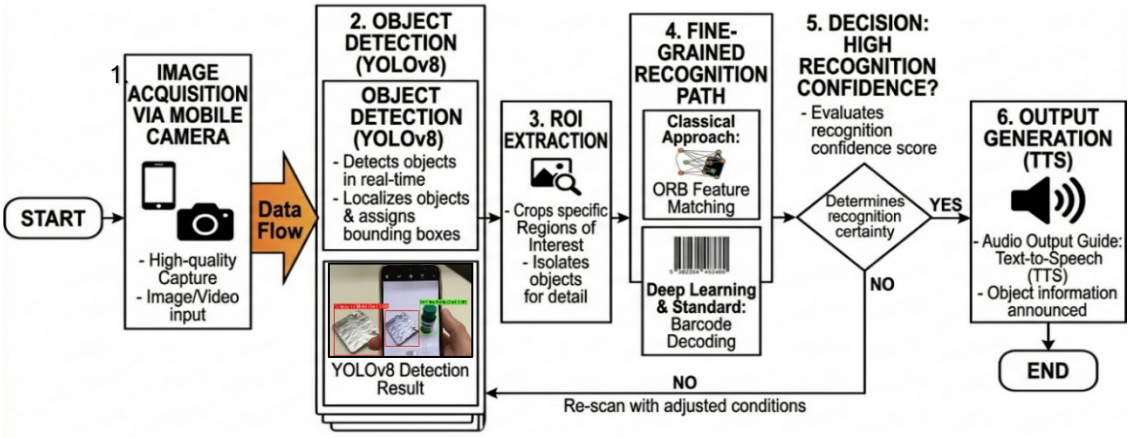


Figure 8: Recognition workflow sequence diagram

The recognition framework was developed using an iterative software engineering process that combines structured planning with incremental refinement to improve maintainability, scalability, and usability throughout development [23].

6. Experimental Configuration

6.1 Dataset Partitioning: The dataset summarized in Table 3 was divided using an 80:20 train–test split, yielding 6,342 training images and 1,585 testing images. The training subset was used to train the YOLOv8 model with the Ultralytics implementation and to construct the ORB feature database, whereas the testing subset was reserved exclusively for performance evaluation. To reflect practical deployment conditions, testing images included variations in illumination, viewing angle, object distance, motion blur, and background complexity. The same testing subset was subsequently used to evaluate the complete hybrid recognition pipeline, including YOLOv8 object detection, barcode decoding, ORB feature matching, and text-to-speech output under both controlled and uncontrolled environments.

6.2 Hardware and Software Environment: The proposed framework was implemented using Python 3.12.3. Computer vision operations were performed using OpenCV 4.10.0, barcode decoding was implemented with Pyzbar 0.1.9 [7], [8], [26], and OCR processing utilized Tesseract OCR [22]. YOLOv8n was trained locally using the Ultralytics framework with GPU acceleration. Model training was conducted on a workstation equipped with an NVIDIA GeForce RTX 4060 GPU (8 GB VRAM), Intel Core i7 processor, and 32 GB RAM, while deployment testing was performed on a Samsung Galaxy A54 5G smartphone (Exynos 1380, 8 GB RAM). MongoDB was used for data management [27], and the software architecture followed the Model–View–Controller (MVC) design pattern [25].

6.3 YOLOv8 Training Configuration: The YOLOv8n model was trained using 640 × 640 input images for 100 epochs. Training was performed using the Ultralytics YOLOv8 implementation with the Adam optimizer and an initial learning rate of 0.001. Data augmentation techniques, including rotation, scaling, brightness adjustment, and motion-blur simulation, were applied to improve model generalization under real-world conditions [21]. Model performance during training was monitored using Precision, Recall, mAP@0.50, and mAP@0.50:0.95, while the final system evaluation employed the classification metrics described in Section 8.6. The training parameters are summarized in Table 4.

Table 4: YOLOv8 training configuration

Parameter	Value
Model	YOLOv8n
Framework	Ultralytics YOLOv8
Input Resolution	640 × 640
Epochs	100
Optimizer	Adam
Initial Learning Rate	0.001
Batch Size	16–32
Data Augmentation	Rotation, Scaling, HSV, Blur
Confidence Threshold	0.25
IoU Threshold	0.45
Training Metrics	Precision, Recall, mAP@0.50, mAP@0.50:0.95

6.4 Baseline Methods: Two baseline configurations were selected for comparative evaluation. The first baseline, ORB + Barcode, represents the authors' previous recognition approach based on barcode decoding and ORB feature

matching [19]. The second baseline, YOLOv8-only, utilizes object detection without additional verification mechanisms. These baselines enable comparison between conventional, deep learning–based, and hybrid recognition approaches. All methods were evaluated using the same testing dataset and identical experimental conditions to ensure a fair comparison.

7. User-Centered Evaluation Protocol

7.1 Participant Recruitment: A purposive sample of 50 visually impaired participants was recruited to evaluate the usability and effectiveness of the proposed system. The cohort comprised 20 totally blind individuals (40%) and 30 individuals with low vision (60%), representing a diverse range of visual impairment conditions.

7.2 Evaluation Tasks: Participants were asked to perform four representative daily-life tasks: (1) product identification, (2) Thai banknote recognition, (3) expiration-date verification, and (4) pharmaceutical identification. These tasks were selected to reflect common assistive scenarios encountered by visually impaired individuals. For each task, participants independently captured images using the smartphone application and followed the complete recognition workflow. A task was considered successful when the system correctly recognized the target object and provided the corresponding auditory feedback through the text-to-speech module without requiring repeated image acquisition. Task completion time and recognition success were recorded for subsequent analysis.

7.3 Controlled and Uncontrolled Environments: Experiments were conducted under both controlled and uncontrolled conditions, as summarized in Table 5. The controlled environment employed fixed illumination, background, camera position, and viewing distance, whereas the uncontrolled environment introduced variations in lighting, background complexity, camera movement, and object distance. This protocol enabled evaluation of both baseline performance and real-world robustness. Each participant completed the same four evaluation tasks under both environmental conditions to ensure consistent comparison of recognition performance and usability.

Table 5: Experimental conditions

Condition	Controlled	Uncontrolled
Illumination	500 lux	100–1000 lux
Background	Plain	Cluttered
Camera Motion	Fixed	Handheld
Viewing Distance	Fixed	Variable

7.4 Ethical Considerations: All participants were informed of the study objectives and procedures before participation and provided written informed consent. Participant privacy and confidentiality were maintained through data anonymization, and all collected information was used solely for research purposes. The evaluation procedures were designed to ensure a safe and accessible testing environment for all participants.

8. Performance Evaluation Metrics

The effectiveness of the proposed framework is evaluated using standard classification metrics derived from True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN) outcomes [28], [29]. Performance is assessed using Accuracy, Precision, Recall, F1-score, and Specificity, as defined in (1)–(5). For evaluating the object

detection capability of the YOLOv8 model during training, Mean Average Precision (mAP) at IoU thresholds of 0.50 (mAP@0.50) and 0.50:0.95 (mAP@0.50:0.95) was additionally employed. In addition, Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis and confusion matrices are employed to evaluate discriminative performance across object categories.

8.1 Recognition accuracy: Measures the overall correctness of the system in classifying objects:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

8.2 Precision: Measures the proportion of correctly identified positive predictions among all predicted positive cases:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

8.3 Recall (sensitivity): Measures the proportion of actual positive cases that are correctly identified by the system:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

8.4 F1-Score: Measures the harmonic mean of precision and recall, serving as a balanced metric for class imbalance:

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

8.5 Specificity: Measures the proportion of actual negative cases that are correctly identified:

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (5)$$

8.6 Mean Average Precision (mAP): For evaluating the object detection performance of the YOLOv8 model, mAP was employed. The mAP@0.50 metric measures the average detection precision at an IoU threshold of 0.50, whereas mAP@0.50:0.95 reports the average precision across multiple IoU thresholds ranging from 0.50 to 0.95 in increments of 0.05. These metrics provide a comprehensive assessment of localization accuracy and detection robustness and are widely adopted for benchmarking modern object detection models.

In addition, ROC curves and Area Under the Curve (AUC) values were employed to evaluate classification reliability. Statistical significance between competing methods was assessed using one-way Analysis of Variance (ANOVA), with a significance threshold of $p < 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed hybrid vision framework for assistive object recognition. Performance was evaluated through quantitative recognition metrics, statistical reliability, computational efficiency, comparative analysis, and user-centered evaluation.

1. Recognition Performance Evaluation

The proposed framework was evaluated using a unified testing dataset covering four assistive tasks: product label identification, Thai banknote recognition, pharmaceutical identification, and expiration-date verification. All methods were evaluated under identical experimental conditions. Table 6 summarizes the overall performance.

Table 6: Overall performance comparison of recognition methods

Method	Accuracy (%)	Precision	Recall	F1-score	Processing Time (s)	Strength
ORB + Barcode	96.2	0.958	0.964	0.961	1.80	Efficient Precision
YOLOv8n	97.0	0.970	0.975	0.972	2.20	Robust multi-detection
Proposed Hybrid Framework	**97.6**	**0.976**	**0.981**	**0.978**	**2.30**	**Peak Robustness**

Recognition performance for each assistive application domain is presented in Table 7.

Table 7: Recognition performance across assistive application domains

Application Domain	Accuracy (%)	Precision	Recall	F1-score
Product Labels	97.3	0.972	0.975	0.973
Thai Banknotes	99.2	0.992	0.991	0.991
Pharmaceutical Products	97.8	0.978	0.982	0.980
Expiration-Date Verification	96.5	0.965	0.970	0.967
Overall	**97.6**	**0.976**	**0.981**	**0.978**

During YOLOv8 training, the detector achieved a mAP@0.50 of 98.6% and a mAP@0.50:0.95 of 93.8%, demonstrating accurate object localization across all object categories while maintaining computational efficiency suitable for mobile deployment. The proposed framework achieved the highest performance across all evaluation metrics, with 97.6% accuracy and an F1-score of 0.978. Compared with the previous ORB–Barcode framework [19], integrating YOLOv8 improved robustness under complex environmental conditions by localizing candidate objects before fine-grained recognition. This hierarchical strategy reduces false matches caused by background clutter, illumination variation, and viewpoint changes, which are common limitations of traditional feature-based methods [4], [5], [6]. As shown in Table 7, all assistive application domains achieved recognition accuracies above 96%. Thai banknotes achieved the highest accuracy (99.2%) because of their distinctive visual characteristics, whereas expiration-date verification showed relatively lower performance owing to variations in text appearance, printing quality, viewing angle, and illumination.

These results indicate that combining YOLOv8 object localization with barcode decoding and ORB feature matching provides a more reliable recognition framework than either approach alone. While YOLOv8 provides robust object localization [10], barcode decoding and ORB feature matching improve fine-grained verification for visually similar objects, enhancing overall recognition reliability.

2. Statistical Reliability Analysis

The confusion matrix is presented in Figure 9 and illustrates the classification performance of the proposed framework for Thai banknote recognition across the five Thai banknote denominations. The numerical values represent the number of testing samples assigned to each predicted class, while the accompanying percentages

indicate the proportion of correctly classified instances relative to the total samples within each actual class. Most samples are concentrated along the principal diagonal, indicating high classification consistency across all denominations.

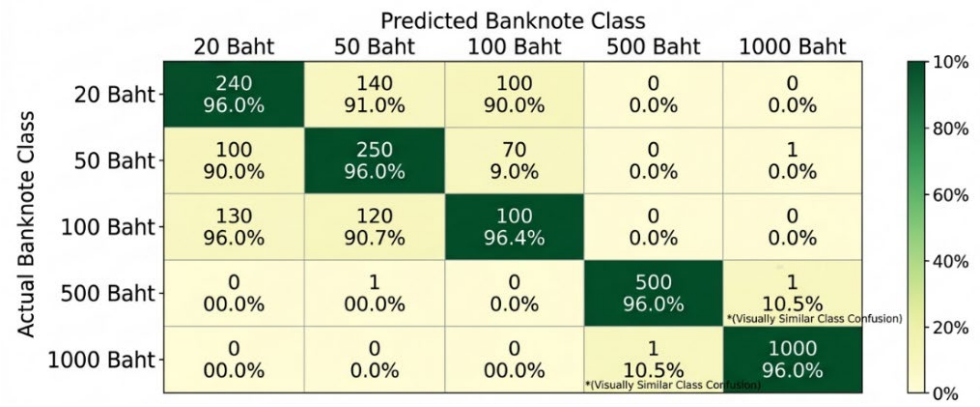


Figure 9: Confusion matrix for banknote recognition

As shown in Figure 9, only a small number of misclassifications occurred, primarily between high-value denominations exhibiting similar color characteristics under challenging illumination conditions. Such observations are consistent with previous findings that visual recognition performance may deteriorate under non-uniform lighting and environmental variability [14]. Despite these isolated errors, the confusion matrix demonstrates that all banknote denominations achieved consistently high classification accuracy, confirming the effectiveness of the proposed hybrid verification strategy for fine-grained currency recognition. Further reliability analysis was conducted using ROC curves. The ROC curve is shown in Figure 10. summarizes the discrimination capability of the proposed framework across all recognition classes and yields an AUC value of 0.97, indicating excellent discrimination capability between positive and negative classifications.

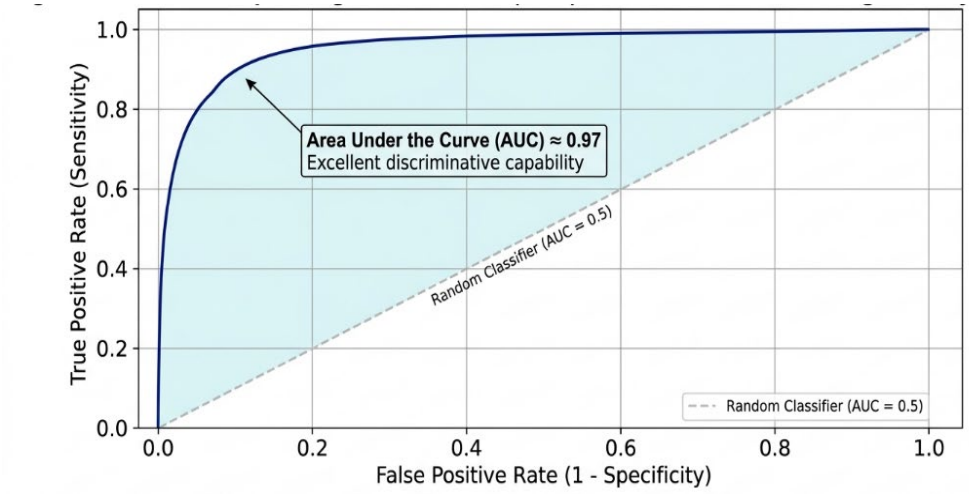


Figure 10: Receiver Operating Characteristic (ROC) curve for recognition system

The high ROC-AUC score confirms a strong balance between sensitivity and specificity. Combined with the results in Tables 6 and 7, these findings demonstrate that integrating YOLOv8 object localization with barcode decoding and ORB feature matching reduces classification uncertainty and provides robust recognition under both controlled and uncontrolled environments.

3. Computational Efficiency and Mobile Deployment Feasibility

In addition to recognition accuracy, computational efficiency is a critical requirement for assistive technologies intended for mobile deployment. The processing-time analysis shown in Figure11 illustrates the computational cost of each processing stage within the proposed hybrid recognition framework, demonstrating that the system maintains near-real-time performance despite integrating multiple recognition mechanisms.

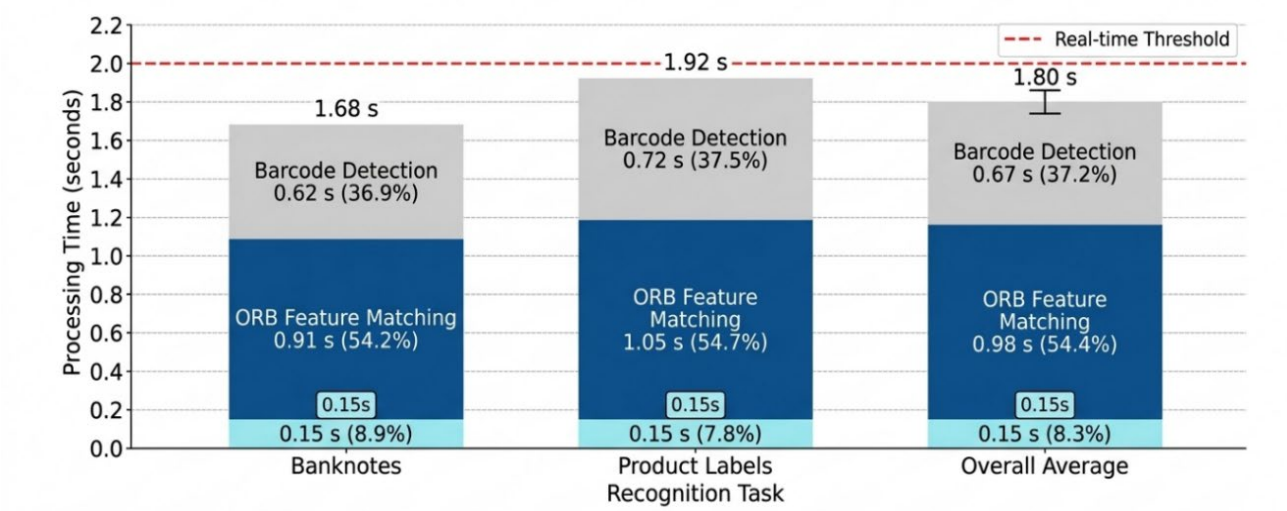


Figure 11: Processing-time distribution of the hybrid recognition framework

The average end-to-end processing time was approximately 2.30 s per recognition task. Although slightly higher than the previous ORB–Barcode system [19], the additional processing time is offset by improved recognition robustness and multi-object handling capability. ORB feature matching and barcode verification accounted for the largest proportion of computational cost, whereas YOLOv8 object detection introduced only a small computational overhead while providing robust object localization [10]. The measured latency is acceptable for assistive applications, where users typically perform intentional object recognition rather than continuous video analysis. Consequently, prioritizing recognition reliability over minimal latency represents an appropriate trade-off for practical deployment. Furthermore, all experiments were conducted on a commercial Android smartphone, demonstrating that the proposed framework can be deployed effectively without specialized computing hardware.

4. Comparison with Existing Recognition Approaches

To position the proposed framework within the current body of knowledge, a comparative analysis with representative recognition approaches is presented in Table 8. Because the reviewed studies employed different datasets, experimental protocols, and application domains, the comparison emphasizes methodological

capabilities rather than direct numerical performance. Unlike conventional approaches that rely on a single recognition paradigm, the proposed framework integrates YOLOv8 object detection, barcode decoding, and ORB feature matching within a unified mobile architecture.

Table 8: Comparison with existing recognition approaches

Study	Core Approach	Target Application	Multi-Object Detection	Real-Time Mobile Deployment	Main Limitation
Lowe [4]	SIFT	General object recognition	No	Limited	High computational complexity
Bay et al. [5]	SURF	General object recognition	No	Limited	Resource intensive
Rublee et al. [6]	ORB	Feature-based recognition	No	Yes	Sensitive to clutter and occlusion
Jethjarurach and Limpiyakorn [7]	Barcode Reader	Product identification	No	Yes	Requires visible barcode
Fernandcz et al. [8]	Image-based Barcode Recognition	Product recognition	No	Partial	Performance depends on barcode quality
Hongboonmee and Sangtan [17]	Banknote Recognition	Currency identification	No	Yes	Task-specific application
Bhandari et al. [15]	Deep Learning Detection	Assistive recognition	Yes	Partial	Computational requirements
Munia and Taher [13]	Machine Learning Detection	Assistive vision	Yes	Partial	Limited fine-grained recognition
Proposed Framework	**YOLOv8 + ORB + Barcode**	**Multi-category assistive recognition**	**Yes**	**Yes**	**Slightly increased processing time**

Unlike previous studies that focused on a single recognition task, the proposed framework was validated across four assistive application domains: product label identification, Thai banknote recognition, pharmaceutical identification, and expiration-date verification. Therefore, the performance reported in Section 1 reflects the overall capability of the framework across heterogeneous recognition tasks rather than a single application domain.

The comparison demonstrates that integrating YOLOv8 object localization with barcode decoding and ORB feature matching provides robust multi-object recognition while preserving practical mobile deployment. This hybrid design addresses the limitations of individual recognition approaches by combining accurate localization with reliable fine-grained object verification.

5. User-Centered Evaluation

A user study involving 50 visually impaired participants was conducted to evaluate the practical usability of the proposed framework. Participants completed four assistive tasks corresponding to the application domains of the system: (1) product identification, (2) Thai banknote recognition, (3) expiration-date verification, and

(4) pharmaceutical identification. Each participant performed all tasks under both controlled and uncontrolled environments. Participant demographics are summarized in Table 9.

Table 9: Participant demographics (N = 50)

Characteristic	Category	n	Percentage (%)
Visual Impairment	Totally Blind (TB)	20	40.0
	Low Vision (LV)	30	60.0
Gender	Male	24	48.0
	Female	26	52.0
Age	**Mean ± SD**	**38.4 ± 12.6**	**—**

Task success rates under different participant conditions are presented in Table 10.

Table 10: Task Success Rate (TSR) evaluation

Participant Group	Training Status	n	Task Success Rate (%)	SD	Performance Significance
Low Vision (LV)	Trained	15	96.0	2.1	Optimal performance; high adaptability
	Untrained	15	82.5	5.4	Baseline proficiency
Totally Blind (TB)	Trained	10	89.0	4.8	High reliability via audio-tactile feedback
	Untrained	10	74.5	8.2	Significant learning curve identified
Overall	**All Participants**	**50**	**85.5**	**5.1**	**Overall System Usability**

Statistical analysis using one-way ANOVA revealed significant differences between trained and untrained participants $p < 0.05$. Participants who received brief system orientation consistently achieved higher task success rates than untrained participants. The greatest improvement was observed in product identification and pharmaceutical recognition, where training improved camera positioning and object alignment. The framework also maintained stable performance under both controlled and uncontrolled environments, demonstrating robust usability under practical operating conditions. These findings support previous studies emphasizing that assistive technologies should be evaluated using both technical performance and user-centered usability measures [11], [17], [25].

6 Discussion and Research Contribution

The findings demonstrate that the proposed hybrid framework effectively addresses the limitations of existing recognition approaches. Feature-based methods are computationally efficient but sensitive to environmental variability [4], [5], [6], barcode-based methods depend on visible machine-readable labels [7], [8], [9], and deep-learning-based detectors often lack fine-grained verification mechanisms [10], [13], [15]. By integrating YOLOv8 object detection, barcode decoding, and ORB feature matching, the proposed framework combines the complementary strengths of these techniques within a unified mobile architecture. Experimental results demonstrate improvements in recognition accuracy, classification reliability, and practical usability.

Compared with the previous ORB–Barcode framework [19], incorporating YOLOv8 improved object localization in the presence of cluttered backgrounds, illumination variations, and partial occlusion. Although the average

processing time increased from 1.80 s to 2.30 s, the framework achieved higher recognition accuracy and more robust multi-object recognition across all four assistive application domains, representing an acceptable trade-off for practical assistive applications.

The user-centered evaluation further confirmed that these technical improvements translated into practical benefits. Trained participants achieved significantly higher task success rates, demonstrating that reliable recognition combined with an intuitive interaction workflow can improve usability for visually impaired users.

Despite these promising results, recognition performance may still degrade under extremely low-light conditions, severe motion blur, or heavy occlusion. Future work will investigate adaptive illumination enhancement, continual learning, and multimodal sensor fusion to improve robustness further. These findings provide a scalable foundation for future mobile assistive vision systems supporting independent daily living.

CONCLUSION

This study proposed a hybrid assistive vision framework integrating YOLOv8 object detection, ORB feature matching, and barcode recognition within a unified mobile architecture for visually impaired assistance. By combining robust object localization with fine-grained verification, the proposed framework addresses the limitations of conventional single-technique recognition approaches.

Experimental results demonstrated high recognition performance across 1,105 object classes and 7,927 images, achieving 97.6% recognition accuracy, an F1-score of 0.978, and a ROC-AUC of 0.97 while maintaining practical deployment on resource-constrained mobile devices. The proposed framework outperformed both the previous ORB–Barcode framework and the standalone YOLOv8 model, providing reliable recognition across four assistive application domains: product identification, Thai banknote recognition, expiration-date verification, and pharmaceutical identification.

User-centered evaluation involving 50 visually impaired participants further confirmed significant improvements in task success following brief system training, demonstrating the practical usability of the proposed framework under both controlled and uncontrolled environments. Overall, the findings demonstrate that integrating complementary recognition techniques provides a scalable and practical foundation for mobile assistive vision systems supporting independent daily living.

Future work will focus on continual learning, expanding recognition categories, adaptive illumination enhancement, multimodal sensor fusion, and adaptive model updating to further improve robustness and long-term deployment in real-world assistive applications.

REFERENCES

[1] World Health Organization, “World Report on Vision,” World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2019. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789241516570

[2] S. Chapirom, C. Suttawet, J. Boonyarattanasoontorn, and D. Engstrom, “Realizing accessibility in Thailand: Make the right real, lifelong education, and decent work for persons with mobility disabilities,” *J. Social Work Professions Council Thailand,* vol. 1, no. 1, pp. 17–37, 2025.

[3] Department of Empowerment of Persons with Disabilities, “Disability-inclusive employment and business project: Catalyzing disability-inclusive employment and business towards effective implementation of the Asian and Pacific decade of persons with

disabilities, 2023–2032," Ministry Social Develop. Human Secur., Bangkok, Thailand, Final Rep., Oct. 2025. [Online]. Available: https://dep.go.th/images/uploads/files/DIEBReportENFinal26122025.pdf

[4] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Int. J. Comput. Vis.,* vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004, doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

[5] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "SURF: Speeded up robust features," in *Proc. 9th Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV),* Graz, Austria, May 2006, pp. 404–417, doi: 10.1007/11744023_32.

[6] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF," in *Proc. Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV),* Barcelona, Spain, Nov. 2011, pp. 2564–2571, doi: 10.1109/ICCV.2011.6126544.

[7] N. Jethjarurach and Y. Limpiyakorn, "Mobile product barcode reader for Thai blinds," in *Proc. Int. Conf. Inf. Sci. Appl. (ICISA),* Seoul, South Korea, May 2014, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICISA.2014.6847426.

[8] W. P. Fernandcz, Y. Xian, and Y. Tian, "Image-based barcode detection and recognition to assist visually impaired persons," in *Proc. IEEE 7th Annu. Int. Conf. CYBER Technol. Autom. Control Intell. Syst. (CYBER),* Honolulu, HI, USA, Jul. 2017, pp. 1241–1245, doi: 10.1109/CYBER.2017.8446388.

[9] N. Pradhan, R. K. Tyagi, and P. Nagpal, "Barcode recognition techniques: Review & application," *Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol. (IJIRCST)*, vol. 9, no. 3, May 2021, pp. 37–42, doi: 10.21276/ijircst.2021.9.3.6.

[10] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proc IEEE. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, Jun. 2016, pp. 779–788.

[11] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, Jun. 2016, pp. 770–778.

[12] N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve, N. Usunier, A. Kirillov, and S. Zagoruyko, "End-to-end object detection with transformers," in *Proc. 16th Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV),* Glasgow, U.K., Aug. 2020, pp. 213–229, doi: 10.1007/978-3-030-58452-8_13.

[13] T. H. Munia and K. A. Taher, "Use of machine learning in object detection for visually impaired person," in *Proc. 4th Int. Conf. Intell. Technol. (CONIT),* Bangalore, India, Jun. 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/CONIT61985.2024.10627544.

[14] K. R. Aduri and P. V. Naganjaneyulu, "Advancements in computer vision-based assistive technologies for visually impaired," in *Proc. Int. Conf. Green Energy, Comput. Intell. Technol. (GEn-CITy),* Iskandar Puteri, Malaysia, Mar. 2024, pp. 465–474, doi: 10.1049/icp.2025.0294.

[15] A. Bhandari, P. W. C. Prasad, A. Alsadoon, and A. Maag, "Object detection and recognition: Using deep learning to assist the visually impaired," *Disability Rehabil.: Assistive Technol.,* vol. 16, no. 3, pp. 280–288, 2021, doi: 10.1080/17483107.2019.1673834.

[16] K. Sreenivasulu, P. K. Rao, and V. Motupalli, "A comparative review on object detection system for visually impaired," *Turkish J. Comput. Math. Educ.,* vol. 12, no. 2, pp. 1598–1610, 2021.

[17] N. Hongboonmee and K. Sangtan, "Development application for identify Thai banknote by voice for blindness via smartphone," (in Thai), *J. Inf. Sci. Technol.,* vol. 9, no. 2, pp. 24–34, Dec. 2019, doi: 10.14456/jist.2019.11.

[18] H.-W. Ting, S.-L. Chung, C.-F. Chen, H.-Y. Chiu, and Y.-W. Hsieh, "A drug identification model developed using deep learning technologies: Experience of a medical center in Taiwan," *BMC Health Serv. Res.*, vol. 20, no. 1, 2020, Art. no. 312, doi: 10.1186/s12913-020-05166-w.

[19] P. Joembunthanaphong, "An intelligent vision system for product label and banknote recognition for visually impaired assistance," in *Proc. 16th BENJAMIT Netw. Nat. Int. Conf.,* Bangkok, Thailand, Mar. 2026, pp. 559–583.

[20] Bank of Thailand. "Current banknotes in circulation." BOT.or.th. Accessed: Jun. 27, 2026. [Online]. Available: https://www.bot.or.th/en/our-roles/banknotes/History-and-Series-of-Banknote-And-Commemorative/current-series-of-banknotes.html

[21] K. Endo, W. Ohyama, T. Wakabayashi, and F. Kimura, "Performance improvement of dot-matrix character recognition by variation model based learning," in *Proc. Asian Conf. Comput. Vis. (ACCV) Workshops,* Singapore, Nov. 2015, pp. 138–151, doi: 10.1007/978-3-319-16631-5_11.

[22] N. Anakpluek, W. Pasanta, L. Chantharasukha, P. Chokratansombat, P. Kanjanakaew, and T. Siriborvornratanakul, "Improved Tesseract optical character recognition performance on Thai document datasets," *Big Data Res.,* vol. 39, 2025, Art. no. 100508, doi: 10.1016/j.bdr.2025.100508.

[23] P. Joembunthanaphong, "Attaining CMMI level 3 with agile development in small-medium firms," in *Innovation, Strategy, and Transformation Frameworks for the Modern Enterprise*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2023, ch. 5, pp. 115–149, doi: 10.4018/979-8-3693-0458-7.ch005.

[24] K. C. Laudon and J. P. Laudon, *Management Information Systems: Managing the Digital Firm*, 15th ed. Harlow, U.K.: Pearson, 2017.

[25] C. Stephanidis, Ed., *User Interfaces for All: Concepts, Methods, and Tools.* Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000.

[26] B. Green and S. Seshadri, *AngularJS*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2013.

[27] K. Banker, P. Bakkum, S. Verch, D. Garrett, and T. Hawkins, *MongoDB in Action*, 2nd ed. Shelter Island, NY, USA: Manning, 2016.

[28] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. Harlow, U.K.: Pearson, 2018.

[29] M. Sokolova and G. Lapalme, "A systematic analysis of performance measures for classification tasks," *Inf. Process. Manage.,* vol. 45, no. 4, pp. 427–437, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.ipm.2009.03.002.

Thai Antipyretic Medicinal Plant Recognition Using CNNs Integrated into a LINE Chatbot

Walairach Nunsong[1] Surasit Sakda[2] Taravichet Titijaroonroj[3] Donyarut Kakanopas[4*]

[1,2]*Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat, Thailand*

[3]*School of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

[4*]*Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand*

*Corresponding author e-mail: donyarut.k@rmutsv.ac.th

Received: 8 April 2026; Revised: 15 August 2026; Accepted: 26 August 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

This study developed a leaf-image recognition system for Thai antipyretic medicinal plants using deep convolutional neural networks (CNNs). Recognizing medicinal plants can be difficult because several species have similar leaf shapes and textures. An automatic recognition tool may help non-expert users identify medicinal plants more consistently. The main contributions are the collection of a 20-species Thai antipyretic herb leaf dataset, the evaluation of eight CNN architectures, and the integration of the selected model into a LINE Chatbot prototype. A new dataset of leaves from 20 medicinal plants for antipyretics found in southern Thailand was created. Data augmentation was applied to increase the number and variability of training images. Eight CNN architectures, namely AlexNet, ResNet, VGG, DenseNet, GoogLeNet, EfficientNet, MobileNet, and SqueezeNet, were evaluated for recognizing 20 Thai antipyretic herb species. Lastly, a CNN architecture, which is the best performing, was integrated with a LINE Chatbot for practical application. The experimental results showed that SqueezeNet achieved the highest accuracy of 92.8% with a processing time of 0.004 seconds per image. The SqueezeNet model was therefore selected for integration into the LINE Chatbot prototype.

***Keywords*:** Convolutional neural network (CNN), Herbal plant recognition, Image classification, Thai herb leaf recognition, Thai medicinal plant

INTRODUCTION

Medicinal plants are commonly used in traditional Thai medicine. During the COVID-19 pandemic, plants with antipyretic properties, such as Andrographis and Ginger, received increased attention from government agencies and the public. This increased interest motivated the present study to focus specifically on Thai medicinal plants traditionally used to reduce fever. Accurate identification of these plants remains challenging because many species share similar visual characteristics, and distinguishing them often requires expert knowledge [1], [2], [3]. These challenges have encouraged the development of image-based methods to support plant identification. Among the observable plant features, leaves provide useful visual information, including shape, color, margin, and texture. Therefore, leaf images are commonly used for plant recognition [4]. However, inter-class similarity and intra-class variation can still reduce identification accuracy.

Previous studies have applied both conventional machines learning and deep learning to medicinal plant recognition. Some studies used manually extracted shape, color, and texture features with conventional classifiers [5], while others applied visual geometry group 16-layer network (VGG16), convolutional neural networks (CNNs), CNN–recurrent neural network (RNN) models, and established CNN architectures [6], [7], [8], [9], [10]. Although these studies reported promising results, they focused on medicinal plants from Indonesia, Vietnam, Malaysia, and India. However, a key research gap remains. Thai medicinal plants traditionally used to reduce fever have received limited attention in image-based recognition studies.

Research on Thai medicinal plants remains limited. Mettripun [11] classified eight Thai herb species using image-region features and an artificial neural network, while Pornpanomchai et al. [12] used 13 leaf features and k-nearest neighbors (k-NN) to recognize 32 herb species. Pornudomthap et al. [13] developed a transfer-learning framework and an Android application for identifying 20 Thai herbs. However, these studies addressed general medicinal herb categories rather than plants specifically associated with antipyretic use. Within the reviewed literature, a dedicated dataset and systematic comparison of multiple CNN architectures for Thai antipyretic herb recognition have not been reported.

Accordingly, this study aims to identify an effective CNN architecture for recognizing 20 Thai antipyretic medicinal plants from leaf images, considering both recognition performance and processing time. As illustrated in Figure 1, the research workflow begins with leaf-image collection and preparation, followed by data augmentation and division of the dataset into training and testing sets. Eight CNN architectures are then trained and evaluated, and the best-performing model is integrated into a LINE Chatbot as a proof of concept. This workflow represents the three main contributions of the study: a newly collected leaf-image dataset, a systematic comparison of eight CNN architectures, and a practical demonstration of model deployment through LINE Chatbot.

The objective of this study is to evaluate CNN architectures for recognizing 20 Thai antipyretic medicinal plants from leaf images and to identify the model that provides the best balance between recognition performance and processing time.

The main contributions are three parts. First, a new leaf-image dataset covering 20 Thai antipyretic medicinal plants was collected and organized. Second, eight CNN architectures—AlexNet, ResNet, VGG, SqueezeNet, DenseNet, GoogLeNet, MobileNet, and EfficientNet—were systematically evaluated using the same dataset and evaluation

protocol. Third, the best-performing model was integrated into a LINE Chatbot as a proof of concept to demonstrate its practical deployment for herb identification.

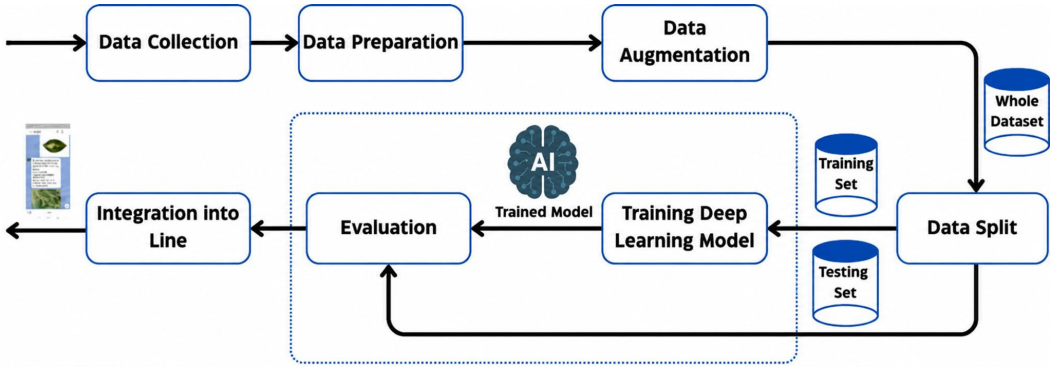


Figure 1: Workflow diagram illustrating the steps involved in developing the deep-learning for medicinal plant recognition system for Thai antipyretic.

1. Visual Characteristics of Thai Antipyretic Herb Leaves

Traditional Thai medicinal plants are commonly identified by folk healers using a combination of leaf appearance, smell, and taste. However, this study considers only visual information from leaf images. This makes recognition challenging because some herbs have similar appearances and are normally distinguished using non-visual characteristics and the experience of practitioners.

The 20 antipyretic herb classes exhibit both considerable morphological variation and subtle inter-class differences. As summarized in Table 1, their leaves vary in shape, apex, base, margin, and color [14], [15]. Some classes differ clearly in their overall dimensions and shapes, while others share similar visual characteristics and require closer examination of the leaf apex, base, and margin.

A locally specific example is *Cordyline fruticosa*, which folk healers in southern Thailand distinguish into two forms known as Mak Phu and Mak Mia. Mak Phu has short, narrow leaves, whereas Mak Mia has large, broad leaves. Including these locally recognized forms creates a fine-grained recognition challenge. Therefore, this dataset differs from existing foreign medicinal-leaf datasets in both its species composition and its representation of Thai antipyretic herbs and locally recognized botanical distinctions.

Table 1: Botanical characteristics of leaves used to identify Thai herbal plants for antipyretics

Local name	Scientific name	Leaf shape	Leaf apex	Leaf base	Leaf margin	Leaf color
Thung Fa	*Alstonia macrophylla*	oblanceolate	cuspidate	acute	entire	green
Chalut	*Alyxia reinwardtii Blume*	oblong	obtuse	oblong	entire	green
Fa Thalai Chon	*Andrographis paniculate*	ovate	acute	obtuse	entire	green
Mao Khai Pla	*Antidesma ghaesembilla Gaertn*	ovate	obtuse	obtuse	entire	green
Ma Phueang	*Averrhoa carambola*	lanceolate	acute	obtuse	entire	green
Chingchi	*Capparis micracantha*	elliptic	acute	obtuse	undulate	green
Kok Kra Om	*Cardiospermum halicacabum*	trifoliolate	acute	obtuse	lobed	green
Khwi Nin	*Cinchona succirubra*	ovate	acute	obtuse	entire	green

Table 1: Botanical characteristics of leaves used to identify Thai herbal plants for antipyretics (Cont.)

Local name	Scientific name	Leaf shape	Leaf apex	Leaf base	Leaf margin	Leaf color
Mak Phu	*Cordyline fruticosa*	lanceolate	acute	attenuate	entire	fuchsia
Mak Mia		linear	cuspidate	cuneate	entire	fuchsia
Kum Num	*Crateva religiosa*	oval	acuminate	acute slightly distorted	entire	green
Lai Phueak	*Eurycoma longifolia jack*	oblong	cuspidate	acute	entire	green
Ma Duea Chum Phon	*Ficus racemasa*	elliptic	cuspidate	obtuse	undulate	green
Cha Muang	*Garcinia cowa Roxb*	oblong	cuspidate	obtuse	entire	green
Bai Ngoen	*Graptophyllum pictum*	elliptic	cuspidate	attenuate	undulate	green-white pattern
Khon Tha	*Harrisonia perforate*	elliptic	obtuse	acute	lobed	green
Thaoyaimom	*Clerodendrum*	linear	cuspidate	cuneate	entire	green
Nom Maeo	*Uvaria siamensis*	lanceolate	acuminate	obtuse	entire	green
Boraphet	*Tinospora crispa*	cordate	acute	cordate	entire	green
Yanang	*Tiliacora triandra*	lanceolate	acute	obtuse	entire	green

METHODS

This study developed a CNN-based workflow for recognizing Thai antipyretic herb leaves and integrating the selected model into a LINE Chatbot, as shown in Figure 1. The process begins with data collection, where thirty images of each of twenty different herbal plant species were captured. Next, data augmentation techniques are applied to increase the diversity of the training data. After augmentation, the dataset is prepared by splitting the images into training and testing sets. The CNN models were trained using the training set and evaluated using the testing set. Finally, the trained model is integrated into a LINE Chatbot platform, providing an easy-to-use tool for identifying Thai medicinal plants.

1. Data Collection

The twenty species of Thai medicinal plants selected for their antipyretic properties were based on [14], [15]. In addition, these herbs are commonly found in southern Thailand and are traditionally used as antipyretics, according to discussions with Thai traditional medicine practitioners in the provinces where the data were collected. Herb samples were gathered between October 2022 and February 2023 from the southern provinces of Trang and Nakhon Si Thammarat. The local and scientific names of the herbs were verified by a specialist in Thai traditional medicine.

The selected antipyretic plants include *Alstonia macrophylla*, *Alyxia reinwardtii Blume*, *Andrographis paniculata*, *Antidesma ghaesembilla Gaertn*, *Averrhoa carambola*, *Capparis micracantha*, *Cardiospermum halicacabum*, *Cinchona succirubra*, *Cordyline fruticose* (Mak Phu), *Cordyline fruticose* (Mak Mia), *Crateva religiosa*, *Eurycoma longifolia Jack*, *Ficus racemosa*, *Garcinia cowa Roxb*, *Graptophyllum pictum*, *Harrisonia perforata*, *Tacca leontopetaloides*, *Tiliacora triandra*, *Tinospora crispa*, and *Cyathostemma micranthum siamensis*.

Leaves from these twenty herbal plant species were collected, with thirty images captured for each species, resulting in a total of 600 images for this study. Each leaf was placed on a white paper background to minimize background noise and improve recognition accuracy. Images were taken using a Huawei Nova5T smartphone, with resolutions ranging from 577 × 443 pixels to 4000 × 3000 pixels. Example images for each herb species are shown in Figure 2.

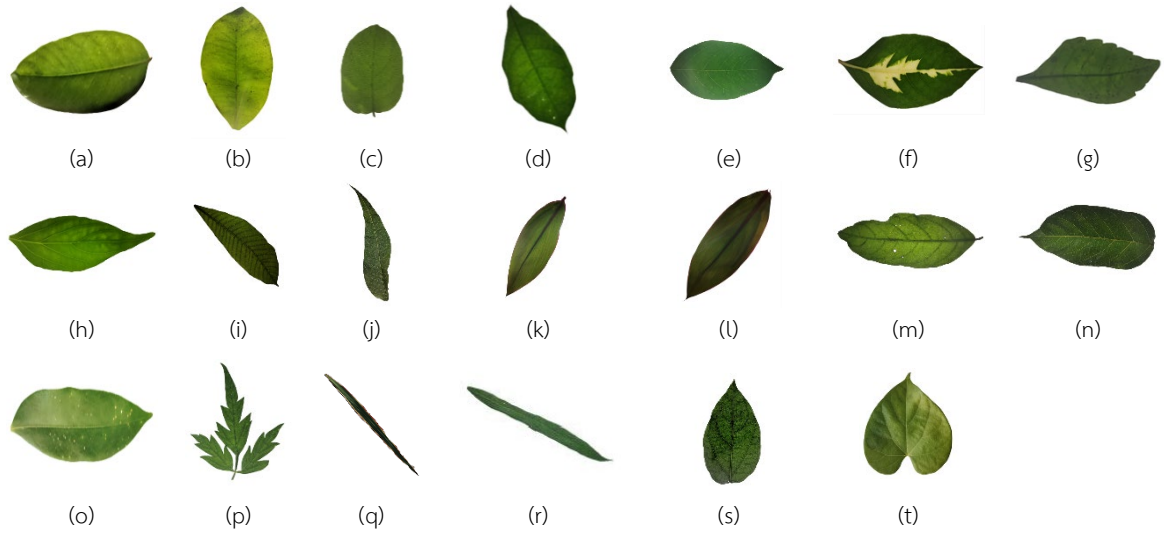


Figure 2: Example of the dataset images (a) *G. cowa Roxb*, (b) *A. reinwardtii Blume*, (c*) A. ghaesembilla Gaertn*, (d) *C. succirubra*, (e) *A. carambola*, (f) *G. pictum*, (g) *H. perforata*, (h) *A. paniculata*, (i) *A. macrophylla*, (j) *C. religiosa*, (k) *C. fruticose* (Mak Mia), (l) *C. micranthum siamensis*, (m) *C. micracantha*, (n) *F. racemosa*, (o) *E. longifolia Jack*, (p) *C. halicacabum*, (q) *C. fruticose* (Mak Phu), (r) *T. leontopetaloides*, (s) *T. triandra*, and (t) *T. crispa*

2. Data Augmentation

CNN models generally require sufficient training images; however, the original dataset in this study was limited. Therefore, data augmentation was applied before model training. Data augmentation is widely used to increase the sample of the training images and their variety. This process can improve model robustness to translation, rotation, and scale variations. Leaf images may vary in orientation, position, and scale during image capture. In general, human photography often lacks precise control over the direction or position of an image. To address this limitation, training computers to recognize various patterns becomes essential. To enhance the dataset and improve recognition accuracy, data augmentation techniques are applied. Specifically, four methods are utilized: (i) horizontal flipping, (ii) rotation, (iii) zooming in, and (iv) zooming out, as illustrated in Figure 3. All augmented images are resized to a resolution of 577 × 443 pixels. Following this process, each species dataset contains 150 images, including the original and the augmented versions.



(a) (b) (c) (d) (e)

Figure 3: Example of augmented images (a) Input image (b) flipping with horizontal axis, (c) rotation with 45 degrees, (d) zooming in, and (e) zooming out

3. Dataset Preparation

Model performance was evaluated using 5-fold cross-validation. This approach reduces dependence on a single train-test split. In this study, 5-fold cross-validation is employed, as it is commonly used to provide reliable estimates of testing error rates while minimizing significant variation or bias [16]. After applying data augmentation, each species dataset consists of 150 images, including the original image and its augmented versions. The complete dataset comprises 3,000 images. These images are split into training and testing sets in an 80:20 ratios, resulting in 2,400 images for training and 600 images for testing. For each fold, augmented versions derived from the same original image were not shared between the training and testing sets. This setting allowed each model to be evaluated across multiple data splits after augmentation.

4. Recognition using CNN

Eight CNN architectures were evaluated for classifying Thai antipyretic herb leaf images. The models tested included AlexNet [17], ResNet [18], VGG [19], SqueezeNet [20], DenseNet [21], GoogLeNet [22], MobileNet [23], and EfficientNet [24]. Among these, SqueezeNet achieved the highest accuracy as reported in the Experimental Results subsection and was selected for chatbot integration. SqueezeNet is a lightweight CNN architecture designed to achieve high accuracy while significantly reducing the model size. Introduced by researchers Iandola et al. in 2016 [20], SqueezeNet aims to provide an efficient alternative to larger models like AlexNet without compromising performance. This characteristic is relevant to chatbot deployment, where fast model response and compact implementation are desirable. The core innovation in SqueezeNet is the Fire module, which consists of two main layers: a “squeeze” layer and an "expand" layer. The squeeze layer uses 1×1 filters to reduce the number of input channels, acting as a bottleneck. The expand layer then applies a mix of 1×1 and 3×3 filters to process the reduced feature maps. This approach minimizes the number of parameters while preserving accuracy. SqueezeNet achieves model compression through three strategies: (1) replacing 3×3 filters with 1×1 filters, (2) reducing the number of input channels to 3×3 filters, and (3) downsampling late in the network to maintain high-resolution feature maps in early layers. With these techniques, SqueezeNet achieves comparable accuracy to AlexNet while reducing the model size by over 50 times, making it a suitable candidate for resource-constrained applications.

5. Integration of the CNN Model into the LINE Chatbot

This section describes the LINE Chatbot prototype developed for recognizing Thai antipyretic medicinal plants from leaf images. The prototype chatbot is deployed on the LINE Official Account (LINE OA) platform, specifically designed to identify Thai herb leaves and provide detailed information about them.

Chatbot platforms are widely used for user interaction and can support image-based services [25]. The chatbot includes auto-response messaging and support for multiple message formats. The auto-response messaging functionality allows the chatbot to respond to user queries and engage in real-time interactions without human involvement, enabling users to receive responses without manual intervention. Additionally, the platform supports various message formats, including text, images, and videos, enabling users to conveniently upload images of herb leaves for identification. Upon receiving an image, the chatbot employs CNN-based models to classify the herb and returns the predicted herb name and related information, including the herb's common and scientific names, alternative names, medicinal properties, and relevant images. Furthermore, the chatbot provides supplementary resources such as terms of use, details about the development team, and user manuals, which can be accessed through the LINE rich menu. These features show how the trained CNN model was connected to a LINE OA interface for herb identification and information delivery.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Performance Evaluation

The performance of the deep CNN for Thai medicinal plant recognition is assessed using Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score. These metrics are defined based on the terms True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), and True Negative (TN), which describe the relationship between actual and predicted labels [26]. A True Positive (TP) occurs when the model correctly identifies a positive case, such as recognizing a plant species accurately. In contrast, a False Negative (FN) represents cases where the model fails to identify a positive instance, incorrectly predicting it as negative. A False Positive (FP) is when the model incorrectly predicts a positive label for a negative case, such as misidentifying another plant species as the target species. Lastly, a True Negative (TN) occurs when the model correctly identifies a negative instance, such as determining that a plant does not belong to a specific species.

Precision measures the proportion of correctly predicted positive cases out of all predicted positives, reflecting the model’s ability to avoid false positives. Recall evaluates the proportion of actual positives correctly identified by the model, indicating its ability to minimize false negatives. F1-Score is the harmonic mean of Precision and Recall, offering a balanced metric that is especially useful when dealing with imbalanced data. Finally, Accuracy quantifies the proportion of correctly classified instances, both positive and negative, relative to the total number of instances. Together, these metrics provide a comprehensive evaluation of the model’s performance, capturing its strengths in recognizing relevant cases while minimizing misclassifications.

2. Experimental Results

2.1 CNNs Performance Evaluation Results

The CNN architectures were evaluated for Thai antipyretic herb recognition. The training parameters were configured separately for each architecture. Stochastic gradient descent (SGD) was used for AlexNet, VGG, SqueezeNet, GoogLeNet, MobileNet, and EfficientNet, with learning rates of 0.07921, 0.03209, 0.02954, 0.03166, 0.03593, and 0.07780, respectively. Adam was used for ResNet and DenseNet, with learning rates of 0.00035 and 0.08345, respectively. Momentum was set to 0.9 for the SGD-based models, while weight decay was set to 0 for all models. All experiments were conducted on a system equipped with an Intel Core i7 central processing unit (CPU), an NVIDIA RTX 3090 graphics processing unit (GPU), and 32 GB of RAM. All eight CNN architectures were initialized with ImageNet-pretrained weights and subsequently fine-tuned on the collected Thai antipyretic herb dataset.

Table 2: Comparison of recognition performance, inference time, and computational complexity among eight CNN architectures.

Architecture	Precision (%)	Recall (%)	F1 (%)	Accuracy (%)	Inference Time (Sec.)	Parameter sizes	GFLOPS
AlexNet	82.10 ± 0.020	72.20±0.032	72.40±0.033	72.20±0.033	**0.001**	61.1M	0.71
ResNet	84.60 ± 0.019	78.60±0.028	79.10±0.027	78.60±0.027	0.004	68.9M	11.40
VGG	71.50 ± 0.056	67.40±0.028	65.40±0.030	67.50±0.027	0.002	138.4M	15.47
SqueezeNet	**92.40 ± 0.036**	**92.80±0.021**	**92.40±0.029**	**92.80±0.020**	0.004	**1.2M**	0.82
DenseNet	91.40 ± 0.012	89.90±0.019	89.70±0.019	89.90±0.019	0.025	8.0M	2.83
GoogLeNet	74.90 ± 0.034	65.90±0.034	64.60±0.043	65.80±0.034	0.012	6.6M	1.50
MobileNet	47.90 ± 0.078	22.50±0.038	19.80±0.033	22.50±0.038	0.009	3.5M	**0.30**
EfficientNet	89.60 ± 0.016	86.20±0.016	86.50±0.018	86.20±0.017	0.014	5.3M	0.39

The accuracy of each CNN architecture is summarized in Table 2. Based on the experimental results, the SqueezeNet model outperforms all others, achieving the highest precision, recall, F1-score, and accuracy on the newly created medicinal plant dataset. SqueezeNet achieves an impressive 92.8% accuracy for herb recognition with a processing time of 0.004 seconds per image.

In comparison, AlexNet demonstrates the shortest processing time of 0.001 seconds, making it the fastest model tested. Although AlexNet achieved the shortest inference time, its accuracy was substantially lower than that of SqueezeNet. This difference indicates that SqueezeNet provided the strongest balance between accuracy and processing time among the evaluated models.

The number of parameters reflects the model size and memory requirements, whereas billions of floating-point operations (GFLOPs) indicate the computational operations required for a forward pass. VGG and ResNet had the highest computational complexity, with 138.4M parameters and 15.47 GFLOPs, and 68.9M parameters and 11.40 GFLOPs, respectively. However, their accuracies were lower than those of SqueezeNet, indicating that larger and more computationally demanding models do not necessarily achieve better recognition performance.

SqueezeNet achieved the highest accuracy of 92.8% with only 1.2M parameters and 0.82 GFLOPs. DenseNet also achieved high accuracy but required 8.0M parameters and 2.83 GFLOPs. Although MobileNet had the lowest

GFLOPs, its recognition accuracy was substantially lower. These results show that SqueezeNet provided the best balance between recognition performance and computational complexity. Parameter count and GFLOPs also did not directly correspond to inference time because latency can be affected by memory access, GPU parallelism, and architecture-specific operations.

Moreover, we employed the gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM) technique, as described in [27], to highlight significant areas within images that contribute to model differentiation. This method visualizes the most critical regions in red/yellow and less important areas in blue. An example in Figure 4 illustrates activation maps generated for herb leaf images using eight different architectures. These include species such as *C. micranthum siamensis*, *T. leontopetaloides*, *G. pictum*, and *H. perforata*. For *C. micranthum siamensis* and *T. leontopetaloides*, SqueezeNet demonstrated superior performance by accurately identifying the correct class. The Grad-CAM results suggest that SqueezeNet attended more consistently to leaf regions than several other evaluated models.

In the case of *G. pictum*, the unique texture of the leaf surface serves as a key discriminating feature. As shown in Figure 4, under the column "*G. pictum*," SqueezeNet effectively highlights the texture area, which may have contributed to the correct prediction. In contrast, other CNNs either focus on the entire leaf area (e.g., AlexNet, DenseNet, EfficientNet, VGG, MobileNet) or mistakenly emphasize the background (e.g., GoogLeNet and ResNet), which reduces their prediction accuracy.

For *H. perforata*, the distinguishing feature lies in the wrinkles along the leaf edges. SqueezeNet successfully concentrates on these wrinkles, whereas other CNNs incorrectly focus on irrelevant regions, which may be related to their incorrect predictions in these examples. These examples provide visual support for the quantitative performance of SqueezeNet. Its attention to leaf-related regions may partly explain its higher accuracy in this dataset.

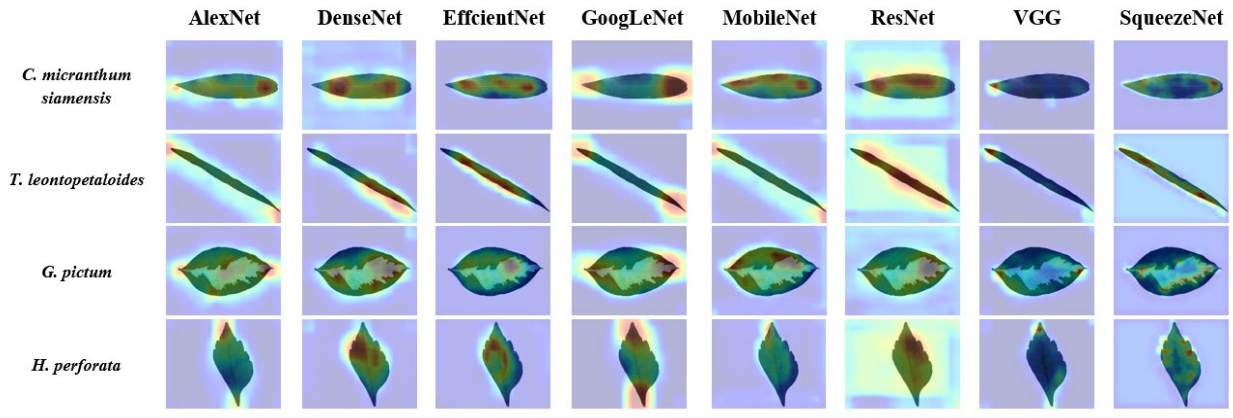


Figure 4: Grad-Cam's visualization of Thai herb leaf identification through eight CNNs.

2.2 Prototype of LINE Application

As described in the "Recognition using CNN" subsection, the model with the highest recognition accuracy was used to develop a LINE Chatbot prototype. The SqueezeNet model was integrated into the LINE OA platform to

test the feasibility of chatbot-based herb recognition. This application works on the LINE platform through LINE OA. The application has two main functions: image-based leaf recognition and result display. To start using the chatbot, you add it as a friend on LINE OA. After adding the LINE OA account, the main menu is displayed, as shown in Figure 5(a). This menu has three options: (i) how to use the application, (ii) identifying the Thai herb leaf, and (iii) information about the team that made the app. Under how to use the application, as shown in Figure 5(b), there are two main points: (i) what each menu option does and (ii) restrictions on use. Users can send one image at a time, which should be of a leaf. The chatbot knows 20 types of Thai herb leaves for antipyretics.

Identifying the Thai herb leaf option has two parts: (i) instructions on how to use it, and (ii) recognizing the leaf from the given image. The chatbot first displays usage instructions, as shown in Figure 5(c). After a user submits a leaf image, the predicted result is displayed, as shown in Figures 5(d) and 5(e). The last option, also known as information about the team that made the app, on the main menu introduces the team and gives contact information, as shown in Figure 5(f). The chatbot uses the SqueezeNet architecture because it achieved the highest accuracy among the evaluated CNN models.



Figure 5: Example of LINE Chatbot screen showing (a) main menu, (b) terms of use, (c) Thai herb leaf identification, (d) and (e) the predicted results, and (f) the developing team

2.3 Discussion

This study aimed to develop and evaluate a CNN-based method for recognizing Thai antipyretic medicinal plants from leaf images. SqueezeNet achieved the highest accuracy among the evaluated architectures, with an accuracy of 92.8%. This finding suggests that a lightweight CNN can perform well on this controlled leaf-image dataset.

Compared to other models, SqueezeNet not only offered the highest precision, recall, and F1-score but also maintained a competitive processing speed (0.004 seconds per image). In contrast, AlexNet demonstrated the fastest processing time (0.001 seconds per image) but significantly lower accuracy at 72.2%. This result indicates that the fastest model was not necessarily the most accurate model in this experiment.

Models such as DenseNet and EfficientNet also achieved high accuracies (89.9% and 86.2%, respectively) but did not surpass SqueezeNet. MobileNet and GoogLeNet exhibited relatively poor performance, particularly MobileNet, which recorded an accuracy of only 22.5%. However, previous studies have reported performance for lightweight architectures such as MobileNetV2 and Ayur-PlantNet in medicinal plant recognition [28], [29]. Therefore, the relatively low performance of MobileNet in this study should be interpreted as specific to the dataset, model configuration, and training settings rather than as a general limitation of lightweight architectures.

To further understand the behavior of each model, Grad-CAM visualizations were generated. These visualizations revealed that SqueezeNet consistently focused on the most relevant parts of herb leaf images, such as the entire leaf shape in *C. micranthum siamensis* and *T. leontopetaloides*, surface textures in *G. pictum*, and the wrinkles along the leaf edges in *H. perforate*. In contrast, other models often misfocused on irrelevant background areas or broad regions, leading to decreased recognition performance. These observations provide a visual explanation that is consistent with the quantitative results. Its ability to accurately attend to important visual features while ignoring background noise contributes significantly to its superior classification performance.

Two factors help explain why SqueezeNet achieved higher recognition performance. First, the Grad-CAM results show that SqueezeNet focused on the surface texture of *G. pictum* and the leaf-edge wrinkles of *H. perforata*, while several other models focused on the entire leaf or background. Second, the SqueezeNet architecture uses Fire modules that combine 1×1 and 3×3 filters to capture channel and local spatial features. It also uses late downsampling to preserve fine texture and edge details. These characteristics may have helped SqueezeNet extract more relevant features for herb recognition.

The results indicate that SqueezeNet was suitable for the evaluated Thai antipyretic herb dataset under controlled imaging conditions. Integrating SqueezeNet into a LINE Chatbot demonstrates the feasibility of a user-accessible prototype for herb identification. This study provides an initial dataset and chatbot prototype for Thai antipyretic herb recognition from leaf images.

3. Limitation

This study focused on CNN-based models and did not compare them with multilayer perceptrons (MLPs), extreme gradient boosting (XGBoost), or other conventional classifiers. Direct comparisons require careful control of input features because CNNs learn features automatically, whereas conventional methods rely on predefined

representations. Future work will conduct a fair comparison using controlled feature representations and identical evaluation settings.

4. Data Availability

The dataset collected and analyzed during this study is not currently available in a public repository. However, it may be made available upon reasonable request by contacting the corresponding author, Donyarut Kakanopas, at donyarut.k@rmutsv.ac.th. Each request will be considered individually, and access to the dataset will be granted subject to approval.

CONCLUSION

This study developed a CNN-based LINE Chatbot prototype for recognizing Thai antipyretic medicinal plants from leaf images. The key contributions include collecting a dataset of 20 Thai herbs, evaluating eight CNN architectures, and integrating the best model into a chatbot. Among the models tested, SqueezeNet achieved the highest recognition accuracy and was selected for prototype integration. However, two main limitations were identified: First, the dataset was collected under controlled conditions with plain backgrounds, limiting data variety. Second, the chatbot was developed in Thai to support local users; however, formal usability testing has not yet been conducted.

Future work should collect leaf images under natural backgrounds, increase the number of samples per species, and evaluate the chatbot with target users.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to acknowledge Dr.Yutana Pongpiriyadacha, an assistant professor and pharmacy specialist with expertise in Thai traditional medicine. He verified the identity of various herbs, including their scientific and local names. We appreciate the research's funding from Rajamangala University of Technology Srivijaya. During the preparation of this manuscript, the authors used language-editing tools, including ChatGPT, Claude, and Grammarly, to improve grammar, readability, and clarity. These tools were used only for language refinement. All scientific content, data analysis, interpretation of results, and conclusions were developed, checked, and approved by the authors. The authors take full responsibility for the content of the final manuscript.

REFERENCES

[1] D. Barhate, S. Pathak, B. K. Singh, A. Jain, and A. K. Dubey, “A systematic review of machine learning and deep learning approaches in plant species detection,” *Smart Agric. Technol.*, vol. 9, 2024, Art. no. 100605, doi: 10.1016/j.atech.2024.100605.

[2] H. Wu, L. Fang, Q. Yu, and C. Yang, “Composite descriptor based on contour and appearance for plant species identification,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 133, 2024, Art. no. 108291, doi: 10.1016/j.engappai.2024.108291.

[3] C. Yang, “Plant leaf recognition by integrating shape and texture features,” *Pattern Recognit*., vol. 112, 2021, Art. no. 107809, doi: 10.1016/j.patcog.2020.107809.

[4] P. P. Kaur, S. Singh, and M. Pathak, “Review of machine learning herbal plant recognition system,” unpublished manuscript, 2020, doi: 10.2139/ssrn.3565850.

[5] E. F. Simanjuntak, Y. S. Sipahutar, M. J. Pasaribu, and A. Saleh, "Herbal plant classification using multi-feature extraction and multilayer perceptron," *J. Comput. Sci. Inf. Technol. Telecommun. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 607–614, Sep. 2024.

[6] A. H. Vo, H. T. Dang, B. T. Nguyen, and V.-H. Pham, "Vietnamese herbal plant recognition using deep convolutional features," *Int. J. Mach. Learn.*, vol. 9, no. 3, pp. 363–367, Jun. 2019.

[7] I. A. Md Zin, Z. Ibrahim, D. Isa, S. Aliman, N. Sabri, and N. N. A. Mangshor, "Herbal plant recognition using deep convolutional neural network," *Bull. Elect. Eng. Inform.*, vol. 9, no. 5, pp. 2198–2205, Oct. 2020.

[8] S. Sangwan, Kanupriya, A. Kaur, V. Mittal, and V. Kumar, "Identification of medicinal plants by visual characteristics of leaves," *Tuijin Jishu/J. Propulsion Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 931–937, 2024, doi: 10.52783/tjjpt.v45.i02.5988.

[9] A. Fauzi, B. Soerowirdjo, and E. Haryatmi, "Herbal plant leaves classification for traditional medicine using convolutional neural network," *IAES Int. J. Artif. Intell.*, vol. 13, no. 3, pp. 3322–3329, Sep. 2024, doi: 10.11591/ijai.v13.i3.pp3322-3329.

[10] K. Saputra S, D. Y. Niska, I. Taufik, M. Hidayat, and D. F. Dharma, "Classification of herbal plants based on leaf images using convolutional neural network," in *Proc. 4th Int. Conf. Innov. Educ. Sci. Culture (ICIESC)*, Medan, Indonesia, Oct. 2022, doi: 10.4108/eai.11-10-2022.2325271.

[11] N. Mettripun, "Thai herb leaves classification based on properties of image regions," in *Proc. 59th Annu. Conf. Soc. Instrum. Control Engineers Jpn. (SICE)*, Chiang Mai, Thailand, Sep. 2020, pp. 372–377, doi: 10.23919/SICE48898.2020.9240256.

[12] C. Pornpanomchai, S. Rimdusit, P. Tanasap, and C. Chaiyod, "Thai herb leaf image recognition system (THLIRS)," *Agric. Nat. Resour.*, vol. 45, no. 3, pp. 551–562, Jun. 2011.

[13] S. Pornudomthap, R. Rattanatamma, and P. Sangkloy, "Overcoming data limitations in Thai herb classification with data augmentation and transfer learning," *J. Adv. Comput. Intell. Intell. Inform.*, vol. 28, no. 3, pp. 511–519, 2024.

[14] N. Ruangrungsi and T. Mangkhalakup, *Thai Herbs*, vol. 1. Bangkok, Thailand: B Healthy (in Thai), 2004.

[15] W. Chuakul, "Indigenous medicinal plants used as antipyretics," (in Thai), *Thai Pharmaceutical Health Sci. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 435–449, Oct.–Dec. 2009. [Online]. Available: https://ejournals.swu.ac.th/index.php/pharm/article/download/2774/2786/9058

[16] I. K. Nti, O. Nyarko-Boateng, and J. Aning, "Performance of machine learning algorithms with different K values in K-fold cross-validation," *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci.*, vol. 13, no. 6, pp. 61–71, Dec. 2021. doi: 10.5815/ijitcs.2021.06.05.

[17] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," *Commun. ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, 2017, doi: 10.1145/3065386.

[18] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, Jun. 2016, pp. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.

[19] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," presented at the 3rd Int. Conf. Learn. Representations (ICLR), San Diego, CA, USA, May 7–9, 2015.

[20] F. N. Iandola, S. Han, M. W. Moskewicz, K. Ashraf, W. J. Dally, and K. Keutzer, "SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5 MB model size," 2016, *arXiv:1602.07360*.

[21] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, "Densely connected convolutional networks," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Honolulu, HI, USA, Jul. 2017, pp. 2261–2269, doi: 10.1109/CVPR.2017.243.

[22] C. Szegedy et al., "Going deeper with convolutions," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Boston, MA, USA, Jun. 2015, pp. 1–9, doi: 10.1109/CVPR.2015.7298594.

[23] A. G. Howard et al., "MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications," 2017, *arXiv:1704.04861*.

[24] M. Tan and Q. V. Le, "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *Proc. 36th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML)*, Long Beach, CA, USA, Jun. 2019, pp. 6105–6114.

[25] IT-Online. "Chatbots will appeal to modern workers." ITONLINE.co.za. Accessed: Aug. 16, 2026. [Online]. Available: https://itonline.co.za/2019/08/06/chatbots-will-appeal-to-modern-workers/

[26] K. M. Ting, "Confusion matrix," in *Encyclopedia of Machine Learning*, C. Sammut and G. I. Webb, Eds. Boston, MA, USA: Springer, 2011, p. 209.

[27] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, and D. Batra, "Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV)*, Venice, Italy, Oct. 2017, pp. 618–626, doi: 10.1109/ICCV.2017.74.

[28] D. Sugiarto, J. Siswantoro, M. F. Naufal, and B. Idrus, "Mobile application for medicinal plants recognition from leaf image using convolutional neural network," *Indonesian J. Inf. Syst*., vol. 5, no. 2, pp. 43–56, Feb. 2023, doi: 10.24002/ijis.v5i2.6633.

[29] B. R. Pushpa and N. S. Rani, "Ayur-PlantNet: An unbiased light weight deep convolutional neural network for Indian Ayurvedic plant species classification," *J. Appl. Res. Med. Aromatic Plants*, vol. 34, Apr. 2023, Art. no. 100459, doi: 10.1016/j.jarmap.2023.100459.

การพัฒนากรอบการทำงานอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม n8n สำหรับการทดสอบเจาะระบบโดยใช้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่และหลักฐานเชิงโครงสร้าง

อรรณพ หมั่นสกุล*

*คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์, นนทบุรี, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: annopmon@pim.ac.th

รับต้นฉบับ: 24 พฤษภาคม 2569; รับบทความฉบับแก้ไข: 20 กรกฎาคม 2569; ตอบรับบทความ: 20 กรกฎาคม 2569
เผยแพร่ออนไลน์: 27 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินกรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานสำหรับการทดสอบเจาะระบบ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ร่วมกับกลไกการตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดล เพื่อลดข้อจำกัดของการทดสอบเจาะระบบแบบเดิมที่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญสูง ใช้เครื่องมือหลายประเภทแยกจากกัน และมีความไม่สม่ำเสมอของผลลัพธ์ระหว่างรอบการทดสอบ กรอบการทำงานที่พัฒนาขึ้นใช้แพลตฟอร์ม n8n เป็นศูนย์กลางในการประสานกระบวนการทำงานอัตโนมัติ ภายใต้สภาพแวดล้อม Docker container stack โดยจำแนกเป้าหมายการทดสอบออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ระบบบริการเครือข่าย เว็บแอปพลิเคชันสมัยใหม่ ระบบ API Security และระบบที่เกี่ยวข้องกับการรั่วไหลของข้อมูลลับหรือการตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัย จากนั้นระบบจะเลือกกลยุทธ์การทดสอบให้เหมาะสมกับแต่ละประเภทของเป้าหมาย รวบรวมผลลัพธ์จากเครื่องมือให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง และจัดเก็บในฐานข้อมูล PostgreSQL ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วย GPT-4o ผ่านการออกแบบคำสั่งนำเข้าและการกำหนดผลลัพธ์แบบมีโครงสร้าง โดยไม่มีการปรับแต่งโมเดลเฉพาะงาน ทั้งนี้ ได้พัฒนากลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน เพื่อตรวจสอบว่าข้อค้นพบทุกประเด็นต้องมีหลักฐานจากเครื่องมือหรือบันทึกการทำงานรองรับก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย การทดลองดำเนินการกับระบบเป้าหมายที่มีช่องโหว่โดยเจตนา 4 ระบบ ได้แก่ Metasploitable3, OWASP Juice Shop, OWASP crAPI และ OWASP WrongSecrets โดยทดสอบซ้ำระบบละ 6 รอบ รวมทั้งสิ้น 24 รอบการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กรอบการทำงานสามารถรวบรวมหลักฐานเชิงโครงสร้างได้อย่างสม่ำเสมอ โดยมีค่าความสม่ำเสมอของหลักฐานเชิงโครงสร้างสูงกว่าร้อยละ 97 ทุกเป้าหมาย มีอัตราการผ่านการตรวจสอบของข้อค้นพบจากแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่อยู่ระหว่างร้อยละ 83.02 ถึง 90.32 และมีคะแนนความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับเฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 89.83 ถึง 96.83 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การผสานกระบวนการทำงานอัตโนมัติ การจัดการหลักฐานเชิงโครงสร้าง และการตรวจสอบผลลัพธ์ของแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่แบบอิงหลักฐาน สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือ ความสม่ำเสมอ และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติ การลดภาวะหลอนของโมเดล แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ การวิเคราะห์ช่องโหว่ การทำงานอัตโนมัติแบบเวิร์กโฟลว์

Development of an n8n-Based Automated Framework for Penetration Testing Using Large Language Models and Structured Evidence

Annop Monsakul*

*Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi, Thailand

*Corresponding author e-mail: annopmon@pim.ac.th

Received: 24 May 2026; Revised: 20 July 2026; Accepted: 20 July 2026
Published online: 27 August 2026

Abstract

This research aims to develop and evaluate an evidence-driven automated framework for penetration testing by integrating large language models with hallucination-aware verification. The proposed framework addresses key limitations of traditional penetration testing, including heavy reliance on expert analysts, fragmented use of multiple security tools, heterogeneous tool outputs, and inconsistent results across repeated testing cycles. The framework employs n8n as the central workflow orchestration platform within a Docker container stack. It classifies assessment targets into four categories: network service systems, modern web applications, API security systems, and systems involving secret leakage or insecure configuration. Based on the target category, the framework selects an appropriate testing strategy, collects outputs from relevant security assessment modules, transforms them into structured evidence, and stores them in a PostgreSQL database. GPT-4o is then used through prompt engineering and structured output, without model fine-tuning, to support vulnerability interpretation, evidence correlation, and risk prioritization. To reduce the risk of unsupported or hallucinated findings, the framework incorporates a hallucination-aware verification mechanism requiring every reported finding to be supported by tool-generated evidence or execution logs before inclusion in the final report. The experiment was conducted using four deliberately vulnerable systems: Metasploitable3, OWASP Juice Shop, OWASP crAPI, and OWASP WrongSecrets. Each target was tested six times, resulting in 24 campaign runs. The experimental results indicate that the proposed framework consistently collected structured evidence, achieving structured-evidence consistency above 97% across all targets. The verification pass rate of LLM-generated findings ranged from 83.02% to 90.32%, while the average traceability score ranged from 89.83% to 96.83%. These results suggest that combining workflow automation, structured evidence management, and evidence-based verification of large language model outputs can improve the reliability, consistency, and traceability of automated penetration testing.

***Keywords*:** Automated penetration testing, Hallucination mitigation, Large language models, Vulnerability analysis, Workflow automation

บทนำ

ปัจจุบันระบบสารสนเทศขององค์กรมีความซับซ้อนและเชื่อมโยงกันมากขึ้น ทั้งในระดับบริการเครือข่าย เว็บแอปพลิเคชัน ระบบ API และองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลลับหรือการตั้งค่าระบบ ส่งผลให้การประเมินช่องโหว่และการทดสอบเจาะระบบไม่สามารถใช้แนวทางเดียวกันกับทุกระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1], [2], [3], [4] เนื่องจากระบบเป้าหมายแต่ละประเภทมีลักษณะของช่องโหว่ วิธีการตรวจสอบ และหลักฐานที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์แตกต่างกัน หากใช้กระบวนการทดสอบแบบตายตัว อาจทำให้การตรวจสอบไม่ครอบคลุม ไม่สอดคล้องกับบริบทของระบบ และยากต่อการจัดลำดับความเสี่ยงอย่างถูกต้อง

ในบริบทของการตรวจสอบบริการเครือข่าย เครื่องมือประเภท network scanning เช่น Nmap และ Metasploit ถูกใช้เพื่อค้นหาพอร์ตที่เปิดอยู่ ระบุ service banner ตรวจสอบเวอร์ชันของบริการ และสนับสนุนการประเมินช่องโหว่ระดับระบบ [5], [6], [7] สำหรับเว็บแอปพลิเคชัน เครื่องมือและแนวทางตาม OWASP Web Security Testing Guide และ OWASP ZAP ถูกใช้เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของ HTTP request/response, route, header, cookie, form และช่องโหว่ที่เกี่ยวข้องกับเว็บแอปพลิเคชัน [2], [3], [8], [9] ในส่วนของระบบ API การทดสอบจำเป็นต้องพิจารณา endpoint, HTTP method, status code, authorization behavior และข้อกำหนดตาม OWASP API Security Top 10 เพื่อประเมินช่องโหว่ที่เกิดจากการควบคุมสิทธิ์หรือการออกแบบ API ที่ไม่ปลอดภัย [1], [10] นอกจากนี้ ระบบที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลลับหรือการตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัย เช่น OWASP WrongSecrets ใช้สำหรับประเมินกรณี secret leakage, token, credential และ configuration ที่อาจนำไปสู่ความเสี่ยงด้านความมั่นคงปลอดภัย [11]

การประยุกต์ใช้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ หรือ Large Language Model (LLM) ในงานด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์มีศักยภาพในการช่วยตีความผลการสแกน วิเคราะห์บริบท จัดระดับความรุนแรง เชื่อมโยงข้อค้นพบ และสร้างรายงานในรูปแบบที่มีโครงสร้าง [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20] อย่างไรก็ตาม การใช้ LLM ในบริบทการทดสอบเจาะระบบยังมีความเสี่ยงจากภาวะหลอนของโมเดล (hallucination) ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อสรุปที่ไม่มีหลักฐานรองรับ [14], [15], [21], [22], [23], [24] เช่น การระบุช่องโหว่ที่ไม่ปรากฏจริง การเสนอ exploit ที่ไม่สัมพันธ์กับข้อมูลจากระบบ หรือการให้ข้อเสนอแนะที่เกินกว่าหลักฐานที่ตรวจพบ ดังนั้น การนำ LLM มาใช้ในงานด้านนี้จำเป็นต้องมีกลไกควบคุมคุณภาพของผลลัพธ์ โดยให้ข้อค้นพบทุกประเด็นสามารถตรวจสอบย้อนกลับไปยังหลักฐานจากเครื่องมือหรือบันทึกการทำงานได้

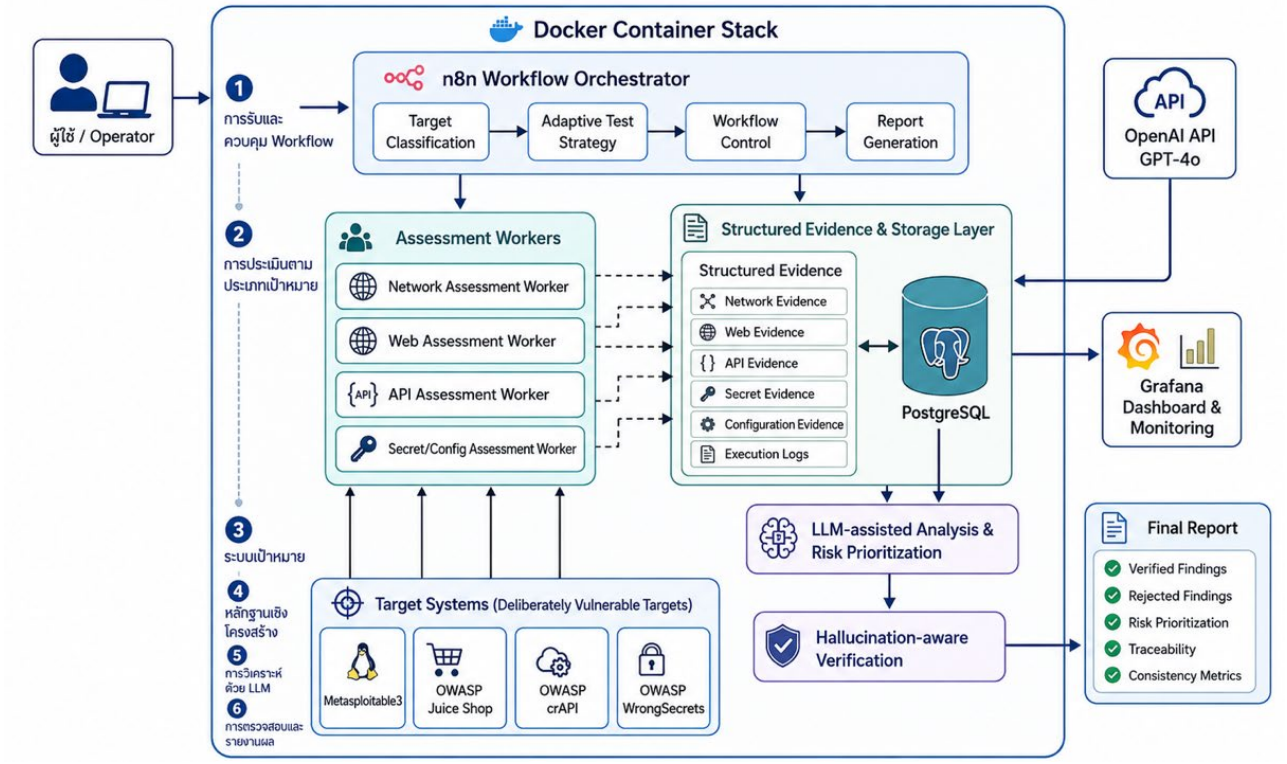
งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนากรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานสำหรับการทดสอบเจาะระบบ โดยใช้แพลตฟอร์ม n8n เป็นศูนย์กลางในการประสานกระบวนการทำงาน ภายใต้สภาพแวดล้อม Docker container stack กรอบการทำงานดังกล่าวจำแนกเป้าหมายออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ระบบบริการเครือข่าย เว็บแอปพลิเคชัน ระบบ API Security และระบบที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลลับรั่วไหล/การตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัย (secret/misconfiguration) จากนั้นเลือกกลยุทธ์การทดสอบให้เหมาะสมกับแต่ละประเภท รวบรวมผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง วิเคราะห์ด้วย GPT-4o [21], [25], [26] และตรวจสอบข้อค้นพบด้วยกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐานก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย

จากปัญหาและแนวทางดังกล่าว งานวิจัยนี้กำหนดคำถามวิจัยหลักว่า กรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานที่ใช้ LLM ร่วมกับกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน สามารถเพิ่มความสม่ำเสมอ ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติได้หรือไม่ โดยมีสมมติฐานว่า หากระบบสามารถจำแนกประเภทเป้าหมาย เลือกวิธีทดสอบที่เหมาะสม จัดเก็บหลักฐานเชิงโครงสร้าง และบังคับให้ข้อค้นพบจาก LLM ต้องมีหลักฐานรองรับก่อนเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย จะช่วยลดความเสี่ยงจากภาวะหลอนของโมเดล และทำให้ผลลัพธ์ของการประเมินช่องโหว่มีความสม่ำเสมอและตรวจสอบได้มากขึ้น

ความสำคัญของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการออกแบบกรอบการทำงานอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม n8n สำหรับการทดสอบเจาะระบบแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐาน การพัฒนากลไกจัดการหลักฐานเชิงโครงสร้างและการเชื่อมโยงรหัสหลักฐานเพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของข้อค้นพบ และการประยุกต์ใช้กลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐานเพื่อคัดกรองข้อค้นพบจากแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย

ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองและพัฒนาเชิงระบบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินกรอบการทำงานอัตโนมัติสำหรับการทดสอบเจาะระบบแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐาน โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ร่วมกับกลไกการตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดล ภายใต้สภาพแวดล้อมห้องปฏิบัติการที่ควบคุมได้ การดำเนินการวิจัยมุ่งเน้นให้ระบบสามารถจำแนกประเภทของเป้าหมาย เลือกกลยุทธ์การทดสอบที่เหมาะสม รวบรวมผลลัพธ์จากเครื่องมือให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง วิเคราะห์และจัดลำดับความเสี่ยงด้วย LLM และตรวจสอบความถูกต้องของข้อค้นพบก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย ทั้งนี้ โครงสร้างกรอบแนวคิดของระบบประกอบด้วย 6 ชั้นหลัก ได้แก่ Target classification, Adaptive test strategy, Structured evidence collection, LLM-assisted analysis and risk prioritization, Hallucination-aware verification และ Reporting & consistency evaluation ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1: สถาปัตยกรรมของกรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานสำหรับการทดสอบเจาะระบบ

1. การออกแบบภาพรวมของการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบและกรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐาน 2) การจัดเตรียมสภาพแวดล้อมการทดลองภายใต้ Docker container stack 3) การพัฒนากระบวนการทำงานอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม n8n สำหรับควบคุมกระบวนการทดสอบ 4) การพัฒนาโมดูลรวบรวมหลักฐานเชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ และกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน 5) การทดลองซ้ำกับระบบเป้าหมาย 4 ประเภท รวม 24 รอบการทดลอง และ 6) การวิเคราะห์ผลลัพธ์ในด้านความสม่ำเสมอ ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ ทั้งนี้ ภาพรวมของสถาปัตยกรรมระบบแสดงในรูปที่ 1 และขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้เห็นลำดับการทำงานของกรอบการวิจัยอย่างเป็นระบบ

2. สถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนา

สถาปัตยกรรมของระบบถูกออกแบบให้ทำงานภายใต้ Docker container stack เพื่อให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อม แยกองค์ประกอบของระบบออกจากกัน และทำซ้ำการทดลองได้อย่างเป็นระบบ องค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วย n8n ทำหน้าที่เป็น Workflow orchestrator PostgreSQL ทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูลกลางสำหรับจัดเก็บหลักฐานและผลการทดลอง Assessment workers เช่น Nmap, ZAP, Metasploit, Custom script สำหรับประเมินช่องโหว่ตามประเภทของเป้าหมาย Grafana สำหรับติดตามสถานะการทดลอง และ GPT-4o ผ่าน OpenAI API สำหรับสนับสนุนการวิเคราะห์ข้อค้นพบด้วย LLM [21], [25], [26], [27] ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1: องค์ประกอบของสภาพแวดล้อมการทดลอง

องค์ประกอบ	บทบาทในระบบ	เครื่องมือ/เทคโนโลยี
1. Workflow Orchestrator	ควบคุมลำดับการทำงานทั้งหมด	n8n
2. Evidence Database	จัดเก็บหลักฐาน ผลการทดลอง บันทึกการทำงาน	PostgreSQL
3. Network Worker	ประเมินบริการเครือข่าย	Custom worker
4. Web Worker	ประเมินเว็บแอปพลิเคชัน	Custom worker/Web scanner
5. API Worker	ประเมิน API Security	Custom worker
6. Secret/Config Worker	ตรวจจับ secret และ misconfiguration	Custom worker
7. LLM Analysis	วิเคราะห์และจัดลำดับความเสี่ยง	GPT-4o
8. Monitoring	ติดตามสถานะการทดลอง	Grafana

กระบวนการทำงานที่พัฒนาบน n8n ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการประสานงานกระบวนการทดสอบเจาะระบบและการวิเคราะห์ช่องโหว่ โดยแบ่งโครงสร้างการทำงานออกเป็น 8 ชั้น ได้แก่ Trigger & target input, Target classification, Adaptive test strategy, Assessment worker invocation, Structured evidence collection, LLM- assisted analysis & risk prioritization, Hallucination-aware verification และ Reporting & consistency evaluation การออกแบบในลักษณะนี้ช่วยให้การทดสอบแต่ละรอบมีลำดับขั้นตอนชัดเจน สามารถตรวจสอบผลลัพธ์ในแต่ละชั้นได้ และสามารถขยายหรือปรับเปลี่ยนโมดูลในอนาคตได้โดยไม่กระทบต่อสถาปัตยกรรมหลักของระบบ

สำหรับ Secret/Config assessment worker งานวิจัยนี้ใช้โมดูลประเมินแบบ custom worker เพื่อค้นหาร่องรอยของข้อมูลลับและการตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัยในระบบเป้าหมาย โดยกระบวนการตรวจสอบประกอบด้วยการค้นหารูปแบบข้อความที่มีความเสี่ยง เช่น token, credential, API key, password, private key, environment variable และ configuration ที่เปิดเผยข้อมูลสำคัญหรือมีค่าที่ไม่ปลอดภัย โมดูลดังกล่าวใช้แนวทาง rule-based pattern matching ร่วมกับ keyword matching และ configuration checklist เพื่อระบุหลักฐานเบื้องต้นจากระบบเป้าหมาย OWASP WrongSecrets

ผลลัพธ์ที่ได้จาก Secret/Config assessment worker จะถูกแปลงเป็นหลักฐานเชิงโครงสร้างก่อนจัดเก็บในฐานข้อมูล PostgreSQL โดยแต่ละรายการประกอบด้วย campaign ID, target ID, evidence type, source worker, timestamp, raw observation, matched pattern, severity hint และ reference location เช่น ชื่อไฟล์ ตำแหน่งของค่า configuration หรือข้อความบันทึกการทำงานที่เกี่ยวข้อง การออกแบบดังกล่าวช่วยให้ข้อค้นพบด้านข้อมูลลับรั่วไหลและการตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัยสามารถตรวจสอบย้อนกลับไปยังหลักฐานต้นทางได้อย่างชัดเจน

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือตรวจจับ secret โดยตรง แต่ใช้ Secret/Config assessment worker เป็นส่วนหนึ่งของกรอบการทำงานเพื่อทดสอบความสามารถในการรวบรวม แปลง และตรวจสอบหลักฐานเชิงโครงสร้างในบริบทของ secret leakage และ misconfiguration

3. ระบบเป้าหมายในการทดลอง

การทดลองใช้ระบบเป้าหมายที่มีช่องโหว่โดยเจตนา จำนวน 4 ระบบ เพื่อให้ครอบคลุมบริบทของการประเมินช่องโหว่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระบบบริการเครือข่าย เว็บแอปพลิเคชันสมัยใหม่ ระบบ API Security และระบบที่เกี่ยวข้องกับการรั่วไหลของข้อมูลลับหรือการตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัย การเลือกเป้าหมายทั้ง 4 ประเภทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่ากรอบการทำงานที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกประเภทเป้าหมาย เลือกกลยุทธ์การทดสอบ และรวบรวมหลักฐานเชิงโครงสร้างได้เหมาะสมกับลักษณะของช่องโหว่แต่ละประเภทหรือไม่ โดยรายละเอียดของระบบเป้าหมาย ประเภทเป้าหมาย และจุดเน้นการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: ระบบเป้าหมายและประเภทของการประเมินช่องโหว่

ระบบเป้าหมาย	ประเภทเป้าหมาย	จุดเน้นการทดสอบ
1. Metasploitable3	Host/Network Service	พอร์ต บริการ service banner และช่องโหว่ระดับระบบ
2. OWASP Juice Shop	Modern Web Application	HTTP request/response, routes, headers, forms
3. OWASP crAPI	API Security	endpoint, method, status code, authorization behavior
4. OWASP WrongSecrets	Secret/Misconfiguration	secret leakage, token, credential, configuration

4. ตัวแปรในการทดลอง

การวิจัยนี้กำหนดตัวแปรในการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพ ความสม่ำเสมอ และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของกรอบการทำงานที่พัฒนาขึ้น โดยแบ่งเป็นตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม ดังตารางที่ 3

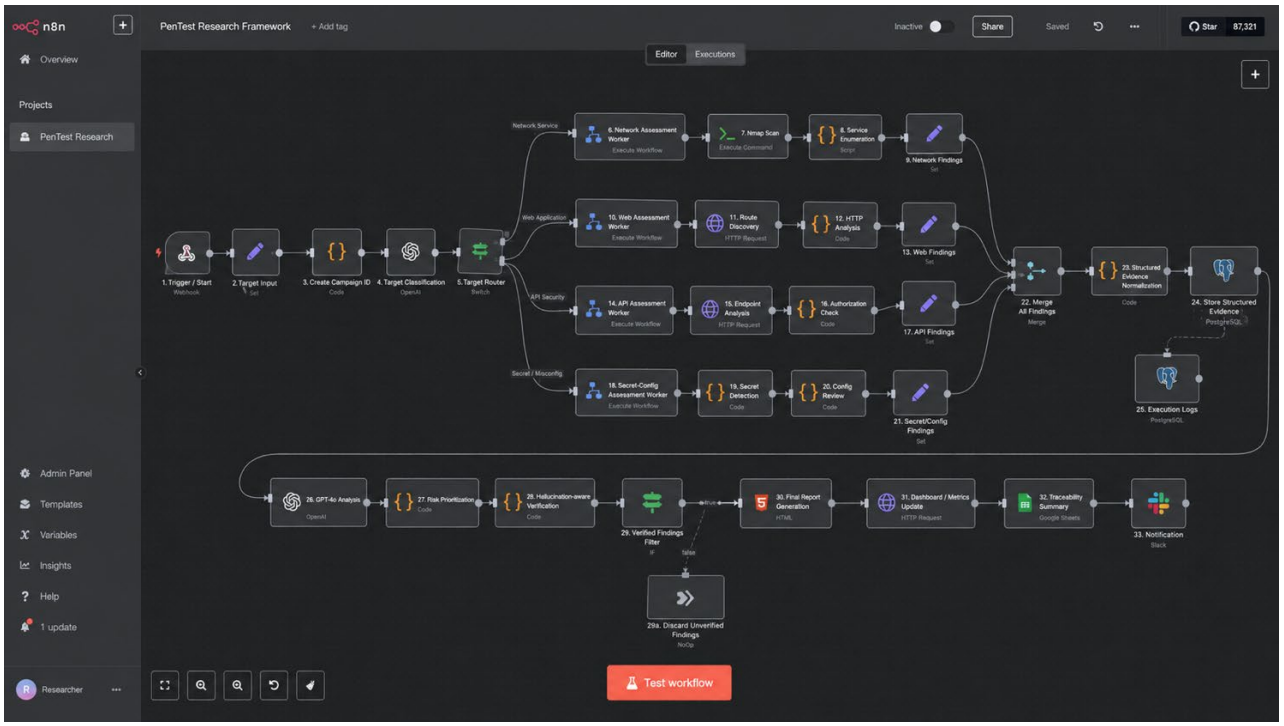
ตารางที่ 3: ตัวแปรในการทดลอง

ประเภทตัวแปร	รายละเอียดโดยสรุป
ตัวแปรต้น	ประเภทของระบบเป้าหมาย ได้แก่ Metasploitable3, OWASP Juice Shop, OWASP crAPI และ OWASP WrongSecrets; รอบการทดสอบซ้ำ 6 รอบต่อเป้าหมาย; และกลยุทธ์การทดสอบแบบ adaptive ตามประเภทของเป้าหมาย
ตัวแปรตาม	จำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้าง, จำนวนข้อค้นพบจาก LLM, จำนวนข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ, จำนวนข้อค้นพบที่ถูกปฏิเสธ, ค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ, ระยะเวลาในการดำเนินการ และค่าความสม่ำเสมอของผลลัพธ์
ตัวแปรควบคุม	workflow version, prompt template, structured output schema, LLM model, verification rules, configuration ของระบบเป้าหมาย และสภาพแวดล้อม Docker container stack

5. การพัฒนากระบวนการทำงานบนแพลตฟอร์ม n8n

กระบวนการทำงานที่พัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม n8n ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการควบคุมและประสานกระบวนการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติ [25] ตั้งแต่การรับข้อมูลเป้าหมาย การจำแนกประเภทของระบบ การเลือกโมดูลประเมินช่องโหว่ที่เหมาะสม การรวบรวมหลักฐานเชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อค้นพบ ไปจนถึงการบันทึกผลและจัดทำรายงานขั้นสุดท้าย ทั้งนี้ ภาพรวมของกระบวนการทำงานอัตโนมัติ (workflow automation) แสดงดังรูปที่ 2 โดยสามารถสรุปลำดับการทำงานหลักได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. รับข้อมูลเป้าหมายและสร้าง campaign ID เพื่อใช้ติดตามผลการทดลองในแต่ละรอบ
2. จำแนกประเภทของเป้าหมายและเลือก assessment worker ให้เหมาะสมกับลักษณะของระบบ
3. รวบรวมผลลัพธ์จาก assessment worker และแปลงให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง
4. วิเคราะห์หลักฐานด้วย GPT-4o และตรวจสอบข้อค้นพบด้วยกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน
5. บันทึกผลลงฐานข้อมูล สร้างรายงานขั้นสุดท้าย และคำนวณตัวชี้วัดสำหรับการประเมินผลการทดลอง



รูปที่ 2: ตัวอย่าง กระบวนการทำงานอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม n8n สำหรับกรอบการทดสอบเจาะระบบแบบอัตโนมัติ

หลังจาก Target classification ระบบจะใช้กฎแบบ rule-based เพื่อเลือก assessment worker ให้สอดคล้องกับลักษณะของเป้าหมาย หากเป้าหมายมีลักษณะเป็นบริการเครือข่าย ระบบจะเรียกใช้ Network assessment worker หากพบลักษณะของเว็บแอปพลิเคชัน ระบบจะเรียกใช้ Web assessment worker หากพบ endpoint หรือพฤติกรรมของ API ระบบจะเรียกใช้ API assessment worker และหากพบร่องรอยของข้อมูลลับหรือการตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัย ระบบจะเรียกใช้ Secret/Config assessment worker ในกรณีที่เป้าหมายมีหลายลักษณะร่วมกัน ระบบสามารถเรียกใช้ worker มากกว่าหนึ่งตัว และบันทึก source worker ไว้ในหลักฐานแต่ละรายการเพื่อใช้ตรวจสอบย้อนกลับ ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4: กลยุทธ์การเลือกโมดูลประเมินแบบปรับตามประเภทเป้าหมาย

ประเภทเป้าหมาย	เงื่อนไขที่ใช้พิจารณา	โมดูลที่ถูกเรียกใช้	หลักฐานที่รวบรวม
Host/ Network Service	พบ IP address, open port, service banner หรือ network service	Network Assessment Worker	port, protocol, service banner, version, vulnerability hint
Modern Web Application	พบ HTTP/HTTPS endpoint, route, form, header หรือ web response	Web Assessment Worker	request/response, route, header, cookie, form, alert
API Security	พบ API endpoint, HTTP method, JSON response หรือ authorization behavior	API Assessment Worker	endpoint, method, status code, response behavior, authorization evidence
Secret/Misconfiguration	พบ token, credential, API key, configuration หรือ secret pattern	Secret/Config Assessment Worker	secret pattern, file/config reference, matched value, configuration evidence
Mixed Target	พบคุณลักษณะมากกว่า 1 ประเภท	เรียกหลาย worker ตามลำดับ	หลักฐานจากหลาย worker พร้อม source worker

โดยรหัสเทียมในอัลกอริทึมที่ 1 แสดงลำดับการทำงานหลักของกรอบการทำงานที่นำเสนอ โดยเริ่มจากการสร้างรหัสประจำรอบการทดสอบ การจำแนกประเภทเป้าหมาย และการเลือกโมดูลประเมินช่องโหว่ให้เหมาะสมกับลักษณะของระบบเป้าหมาย จากนั้นระบบจะแปลงผลลัพธ์ดิบจากโมดูลประเมินให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง และส่งต่อไปยังแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่เพื่อช่วย

วิเคราะห์ข้อค้นพบ ข้อค้นพบแต่ละรายการจะต้องผ่านการตรวจสอบด้านการรองรับด้วยหลักฐาน ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ และการควบคุมขอบเขตของข้อกล่าวอ้างก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้ายดังนี้

อัลกอริทึมที่ 1 กระบวนการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐาน

ข้อมูลนำเข้า: ข้อมูลเป้าหมาย (T), ค่ากำหนดของกระบวนการทำงาน (C), และกฎการตรวจสอบ (R)

ผลลัพธ์: ข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ (F_v), ข้อค้นพบที่ไม่ผ่านการตรวจสอบ (F_r), และรายงานขั้นสุดท้าย

1. สร้างรหัสประจำรอบการทดสอบ (CID) สำหรับเป้าหมาย (T)
2. จำแนกประเภทของเป้าหมาย (T_c) ตามคุณลักษณะของระบบเป้าหมาย
3. เลือกโมดูลประเมินช่องโหว่ (W) ตามกลยุทธ์การทดสอบแบบปรับตามประเภทเป้าหมาย
4. เรียกใช้โมดูลประเมินช่องโหว่ (W) และรวบรวมผลลัพธ์ดิบ (D_r)
5. แปลงผลลัพธ์ดิบ (D_r) ให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง (E_s)
6. จัดเก็บหลักฐานเชิงโครงสร้าง (E_s) ลงในฐานข้อมูลหลักฐาน
7. ส่งหลักฐานเชิงโครงสร้าง (E_s) ไปยังแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่เพื่อวิเคราะห์แบบอิงหลักฐาน
8. สร้างข้อค้นพบเบื้องต้น (F_c) พร้อมรหัสอ้างอิงหลักฐานของแต่ละข้อค้นพบ
9. ตรวจสอบข้อค้นพบแต่ละรายการ (f \in F_c) ด้วยกฎด้านการรองรับด้วยหลักฐาน การตรวจสอบย้อนกลับ และการควบคุมขอบเขตข้อกล่าวอ้าง
10. หากข้อค้นพบ (f) ผ่านกฎการตรวจสอบทั้งหมด ให้เพิ่ม (f) ลงใน (F_v)
11. หากข้อค้นพบ (f) ไม่ผ่านกฎการตรวจสอบ ให้เพิ่ม (f) ลงใน (F_r)
12. สร้างรายงานขั้นสุดท้ายโดยใช้เฉพาะข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ (F_v)
13. คำนวณตัวชี้วัดการประเมินผลและจัดเก็บผลลัพธ์ของรอบการทดสอบ

6. การจัดการหลักฐานเชิงโครงสร้างและการวิเคราะห์ด้วย LLM

ผลลัพธ์จาก assessment worker แต่ละประเภทจะถูกแปลงจากข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปแบบ หลักฐานเชิงโครงสร้างก่อนเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ โดยแต่ละรายการหลักฐานประกอบด้วยข้อมูลสำคัญ เช่น campaign ID, target ID, evidence type, source worker, timestamp, raw observation และ reference สำหรับการตรวจสอบย้อนกลับ หลักฐานทั้งหมดจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูล PostgreSQL เพื่อใช้เป็นแหล่งข้อมูลกลางสำหรับการวิเคราะห์ การตรวจสอบความถูกต้องของข้อค้นพบ การสร้างรายงาน และการคำนวณตัวชี้วัดของผลการทดลอง แนวทางนี้ช่วยลดปัญหาความไม่เป็นมาตรฐานของผลลัพธ์จากเครื่องมือหลายประเภท และทำให้สามารถเชื่อมโยงข้อค้นพบกลับไปยังหลักฐานต้นทางได้อย่างเป็นระบบ

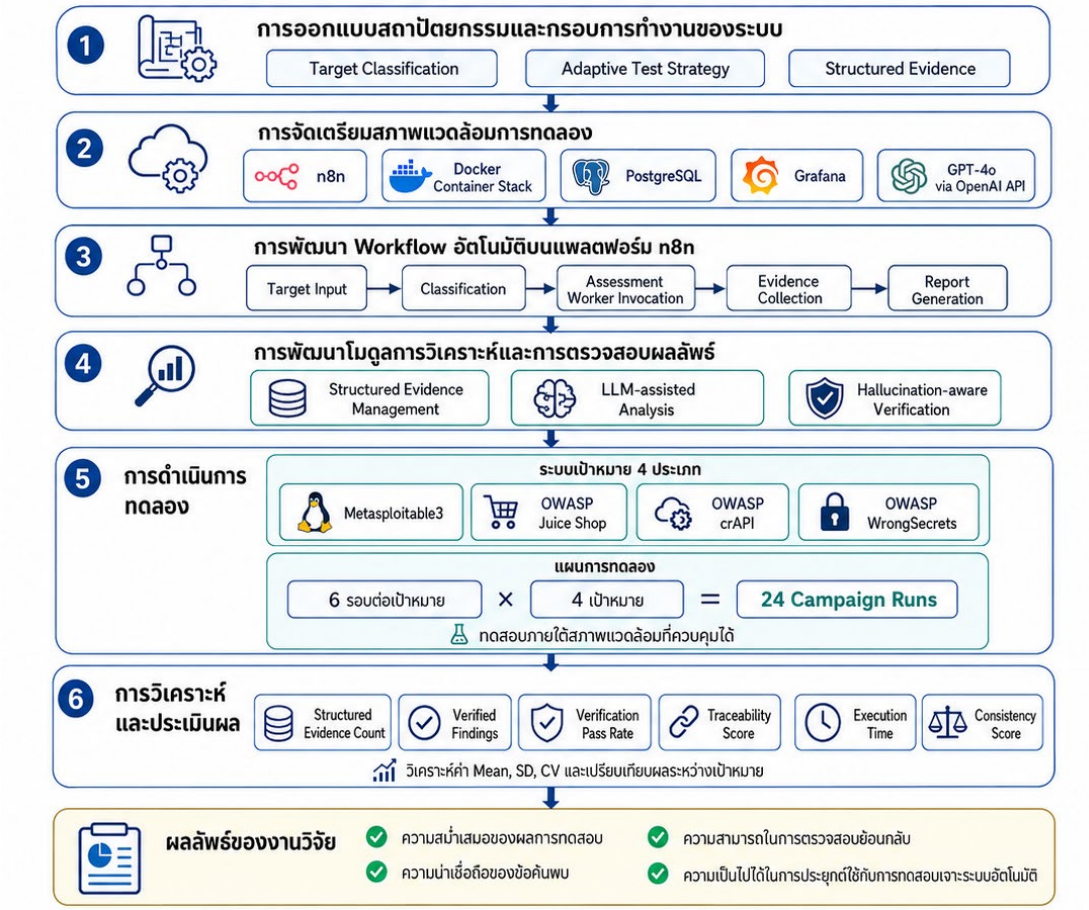
หลังจากจัดเก็บหลักฐานเชิงโครงสร้างแล้ว ระบบจะส่งข้อมูลดังกล่าวไปยัง GPT-4o ผ่าน OpenAI API เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ช่องโหว่ การเชื่อมโยงหลักฐาน การจัดลำดับความเสี่ยง และการสร้างข้อค้นพบในรูปแบบที่สามารถตรวจสอบต่อได้ [12], [21], งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบคำสั่งนำเข้า (prompt engineering) และผลลัพธ์แบบมีโครงสร้าง (structured output) โดยไม่มีการปรับแต่งโมเดลเฉพาะงาน (fine-tune model) เพื่อควบคุมให้ LLM วิเคราะห์เฉพาะหลักฐานที่ได้รับ และต้องระบุ evidence ID ที่สนับสนุนข้อค้นพบแต่ละรายการ วิธีดังกล่าวทำให้ LLM ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือช่วยตีความและสังเคราะห์หลักฐาน แทนการสร้างข้อสรุปโดยไม่มีข้อมูลรองรับ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญต่อการลดความเสี่ยงจากภาวะหลอนของโมเดล และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติ

7. กลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน

เพื่อควบคุมความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์จาก LLM งานวิจัยนี้พัฒนากลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน สำหรับตรวจสอบข้อค้นพบก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย โดยกลไกดังกล่าวพิจารณาข้อค้นพบจาก LLM ใน 4 ด้าน ได้แก่ Evidence support, Traceability, Claim control และ Report readiness เพื่อให้มั่นใจว่าข้อค้นพบทุกประเด็นมี evidence ID รองรับ สามารถตรวจสอบย้อนกลับไปยังหลักฐานต้นทางได้ ไม่กล่าวอ้างเกินกว่าหลักฐานที่ตรวจพบ และมีข้อมูลเพียงพอสำหรับการจัดทำรายงาน ทั้งนี้ ข้อค้นพบที่ผ่านเกณฑ์จะถูกจัดเป็นข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ (verified findings) ส่วนข้อค้นพบที่ไม่ผ่านเกณฑ์จะถูกจัดเป็นข้อค้นพบที่ไม่ผ่านการตรวจสอบ (rejected findings) และไม่นำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย [14], [15], [22], [24]

8. ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองดำเนินการกับระบบเป้าหมายที่มีช่องโหว่โดยเจตนา 4 ระบบ โดยทดสอบซ้ำระบบละ 6 รอบ รวมทั้งสิ้น 24 รอบการทดลอง ในแต่ละรอบ ระบบจะรับข้อมูลเป้าหมายและสร้าง campaign ID จากนั้นจำแนกประเภทของเป้าหมาย เลือก assessment worker ที่เหมาะสม รวบรวมและแปลงผลลัพธ์เป็นหลักฐานเชิงโครงสร้าง วิเคราะห์หลักฐานด้วย GPT-4o ตรวจสอบข้อค้นพบด้วยกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน บันทึกผลการทดลองลงฐานข้อมูล PostgreSQL และคำนวณตัวชี้วัดด้านความสม่ำเสมอ ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ ทั้งนี้ ในการทดลองซ้ำแต่ละรอบมีการควบคุม workflow version, prompt template, structured output schema, LLM model, verification rules และ configuration ของระบบเป้าหมายให้คงที่ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างรอบการทดลองได้อย่างเป็นระบบ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3: ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและการทดลอง 24 รอบการทดลอง

9. ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินผล

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินกรอบการทำงานประกอบด้วย ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ในมิติของจำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้าง จำนวนข้อค้นพบจาก LLM จำนวนข้อค้นพบที่ผ่านและไม่ผ่านการตรวจสอบ อัตราการผ่านการตรวจสอบ ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ เวลาในการดำเนินการ และความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยตัวชี้วัดเชิงอัตราและค่าความสม่ำเสมอคำนวณตามสมการ (1)–(4)

$$\text{Verification Pass Rate} = \frac{\text{Verified Findings}}{\text{LLM Findings}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Rejection Rate} = \frac{\text{Rejected Findings}}{\text{LLM Findings}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{CV}(\%) = \frac{\text{SD}}{\text{Mean}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Consistency Score} = 100 - \text{CV} \quad (4)$$

ตารางที่ 5: ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินกรอบการทำงาน

ตัวชี้วัด	ความหมาย	วิธีคำนวณ
Structured Evidence Count	จำนวนหลักฐานที่รวบรวมได้	นับจำนวน evidence records
LLM Findings	จำนวนข้อค้นพบที่ LLM สร้าง	นับจำนวน findings
Verified Findings	จำนวนข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ	นับ findings ที่ผ่าน verification
Rejected Findings	จำนวนข้อค้นพบที่ไม่ผ่านการตรวจสอบ	นับ findings ที่ถูก rejected
Verification Pass Rate	อัตราข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ	สมการ (1)
Rejection Rate	อัตราข้อค้นพบที่ถูกปฏิเสธ	สมการ (2)
Traceability Score	ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ	คะแนนจาก evidence linkage
Execution Time	เวลาดำเนินการต่อ campaign	เวลาสิ้นสุด–เวลาเริ่มต้น
Consistency Score	ความสม่ำเสมอของผลลัพธ์	สมการ (4)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การวิจัยนี้ประเมินกรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานสำหรับการทดสอบเจาะระบบ โดยทดลองกับระบบเป้าหมายที่มีช่องโหว่โดยเจตนา 4 ประเภท ได้แก่ Metasploitable3, OWASP Juice Shop, OWASP crAPI และ OWASP WrongSecrets โดยทดสอบซ้ำระบบละ 6 รอบ รวมทั้งสิ้น 24 รอบการทดลอง ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ในมิติของความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับจำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้าง จำนวนข้อค้นพบจาก LLM จำนวนข้อค้นพบที่ผ่านและไม่ผ่านการตรวจสอบ อัตราการผ่านการตรวจสอบ เวลาในการดำเนินการ และความสม่ำเสมอของผลลัพธ์

1. ผลการทดลองสรุปตามระบบเป้าหมาย

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองสรุปตามระบบเป้าหมาย โดยรวมตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ จำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้างเฉลี่ย จำนวนข้อค้นพบจาก LLM จำนวนข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ จำนวนข้อค้นพบที่ถูกปฏิเสธ อัตราการผ่านการตรวจสอบ ค่า ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับเฉลี่ย และเวลาเฉลี่ยในการดำเนินการทดลอง

จากตารางที่ 6 พบว่า OWASP Juice Shop มีจำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้างเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 136.83 รายการ และใช้เวลาเฉลี่ยในการดำเนินการสูงสุด เท่ากับ 632.83 วินาที สะท้อนให้เห็นว่าเว็บแอปพลิเคชันมีองค์ประกอบที่ต้องตรวจสอบหลากหลาย เช่น เส้นทางการใช้งาน HTTP request/response headers cookies และ forms จึงสร้างหลักฐานจำนวนมากและใช้เวลาประเมินสูงกว่าเป้าหมายอื่น

ตารางที่ 6: ผลการทดลองสรุปตามระบบเป้าหมาย

ระบบเป้าหมาย	Average Evidence	LLM Findings	Verified	Rejected	Pass Rate (%)	Traceability (%)	Mean Time (s)
Metasploitable3	89.17	81	69	12	85.19	94.83	442.17
OWASP Juice Shop	136.83	125	107	18	85.60	91.83	632.83
OWASP crAPI	115.33	106	88	18	83.02	89.83	562.33
OWASP WrongSecrets	70.00	62	56	6	90.32	96.83	373.17
รวม/เฉลี่ย	**102.83**	**374**	**320**	**54**	**85.56**	**93.33**	**502.63**

ในด้านคุณภาพของข้อค้นพบ พบว่า ระบบสร้างข้อค้นพบจาก LLM ทั้งหมด 374 รายการ โดยผ่านการตรวจสอบ 320 รายการ และถูกปฏิเสธ 54 รายการ คิดเป็นอัตราการผ่านการตรวจสอบเฉลี่ยร้อยละ 85.56 และอัตราการปฏิเสธร้อยละ 14.44 ผลลัพธ์นี้สะท้อนว่ากลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน มีบทบาทสำคัญในการคัดกรองข้อค้นพบที่ไม่มีหลักฐานรองรับก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย

เมื่อพิจารณารายเป้าหมาย พบว่า OWASP WrongSecrets มีอัตราการผ่านการตรวจสอบสูงสุด เท่ากับร้อยละ 90.32 และมีค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับร้อยละ 96.83 เนื่องจากหลักฐานด้าน secret leakage และ misconfiguration มักมีลักษณะชัดเจน สามารถเชื่อมโยงกลับไปยัง token, credential, file หรือ configuration ที่ตรวจพบได้โดยตรง ขณะที่ OWASP crAPI มีอัตราการผ่านการตรวจสอบต่ำสุด เท่ากับร้อยละ 83.02 และมีค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับต่ำสุด เท่ากับร้อยละ 89.83 สะท้อนว่าการวิเคราะห์หลักฐานด้าน API Security มีความซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากต้องตีความพฤติกรรมของ endpoint, HTTP method, response behavior และ authorization behavior ร่วมกัน

2. ความสม่ำเสมอของผลลัพธ์

ตารางที่ 7 แสดงค่าความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ใน 4 มิติ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของจำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้าง ความสม่ำเสมอข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบ ความสม่ำเสมอของค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ และความสม่ำเสมอของเวลาในการดำเนินการ

ตารางที่ 7: ค่าความสม่ำเสมอของผลลัพธ์

ระบบเป้าหมาย	Evidence Consistency (%)	Verified Finding Consistency (%)	Traceability Consistency (%)	Execution Time Consistency (%)
Metasploitable3	98.35	95.24	99.21	98.32
OWASP Juice Shop	97.67	95.78	99.18	97.94
OWASP crAPI	98.13	96.48	99.16	98.39
OWASP WrongSecrets	97.98	94.47	99.22	98.55
เฉลี่ย	**98.03**	**95.49**	**99.19**	**98.30**

จากตารางที่ 7 พบว่า กรอบการทำงานที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความสม่ำเสมอสูงในทุกมิติ โดยค่า Evidence consistency เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 98.03 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรวบรวมหลักฐานเชิงโครงสร้างได้อย่างมีเสถียรภาพในแต่ละรอบการทดลอง โดยค่า Verified finding consistency เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 95.49 แสดงให้เห็นว่าจำนวนข้อค้นพบที่ผ่านการตรวจสอบมีความคงที่ในระดับดี แม้การวิเคราะห์จะอาศัย LLM ซึ่งอาจมีความไม่แน่นอนในการสร้างผลลัพธ์บางส่วน

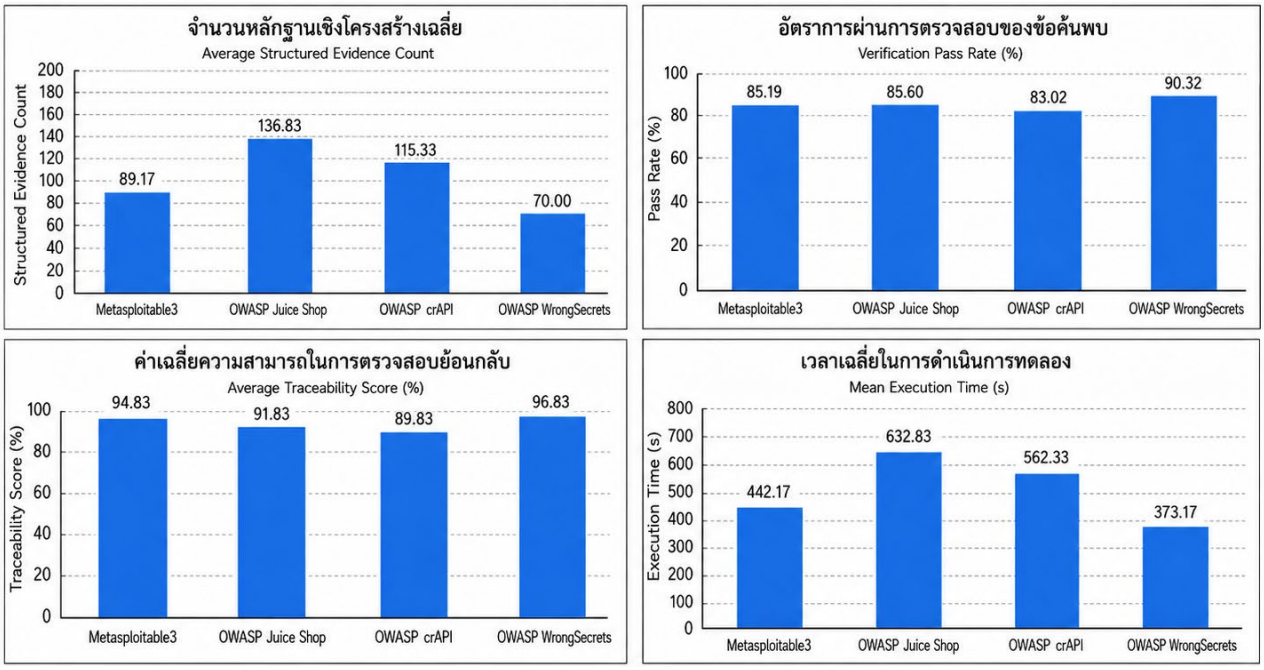
นอกจากนี้ ค่า Traceability consistency เฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 99.19 แสดงให้เห็นว่าการออกแบบฐานข้อมูลหลักฐานเชิงโครงสร้างและการเชื่อมโยง evidence ID สามารถสนับสนุนการตรวจสอบย้อนกลับได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่วนค่า Execution time consistency เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 98.30 แสดงว่าการทำงานของกระบวนการทำงานอัตโนมัติภายใต้สภาพแวดล้อม Docker container stack มีเวลาการดำเนินการที่ค่อนข้างคงที่ระหว่างรอบการทดลอง

โดยรวม ผลการทดลองสนับสนุนสมมติฐานของงานวิจัยว่า การผสาน workflow automation, structured evidence, LLM-assisted analysis และ hallucination-aware verification สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือ ความสม่ำเสมอ และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติได้อย่างเป็นระบบ

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น PentestGPT และงานด้าน LLM agents สำหรับการทดสอบเจาะระบบ ซึ่งมุ่งใช้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่เพื่อช่วยวางแผน วิเคราะห์ และสนับสนุนกระบวนการทดสอบเจาะระบบ [12], [13] งานวิจัยนี้มีจุดแตกต่างสำคัญคือไม่ได้ให้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่สร้างข้อสรุปโดยอิสระ แต่กำหนดให้ข้อค้นพบทุกประเด็นต้องเชื่อมโยงกับหลักฐานเชิงโครงสร้างและรหัสหลักฐานก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร่วมกับงานด้านการประเมินความสามารถและความเสี่ยงของแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ในบริบทความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เช่น CyberSecEval, SecBench และ CyberMetric [14], [16], [17] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบกรอบการทำงานเชิงปฏิบัติที่ผสานการจัดการหลักฐานเชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ และกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรอบการทำงานที่นำเสนอสามารถให้ค่าอัตราการผ่านการตรวจสอบของข้อค้นพบเฉลี่ยร้อยละ 85.56 คะแนนความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับเฉลี่ยร้อยละ 93.33 และค่าความสม่ำเสมอของหลักฐานเชิงโครงสร้างเฉลี่ยร้อยละ 98.03 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการเพิ่มความน่าเชื่อถือ ความสม่ำเสมอ และการตรวจสอบย้อนกลับของการทดสอบเจาะระบบอัตโนมัติ

3. สรุปภาพรวมผลการทดลอง

กรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความสม่ำเสมอ น่าเชื่อถือ และตรวจสอบย้อนกลับได้ดี โดยแต่ละระบบเป้าหมายมีลักษณะผลลัพธ์แตกต่างกันตามประเภทของช่องโหว่และความซับซ้อนของระบบ ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4: กราฟภาพรวมผลการทดลองทั้ง 4 ตัวชี้วัด

จากรูปที่ 4 พบว่า OWASP Juice Shop มีจำนวนหลักฐานเชิงโครงสร้างเฉลี่ยและเวลาเฉลี่ยในการดำเนินการทดลองสูงสุด สะท้อนความซับซ้อนของเว็บแอปพลิเคชันที่มีองค์ประกอบต้องตรวจสอบหลายประเภท [5] เช่น route, request/response, header, cookie และ form ขณะที่ OWASP WrongSecrets มีอัตราการผ่านการตรวจสอบของข้อค้นพบและค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับสูงสุด เนื่องจากหลักฐานด้านข้อมูลลับรั่วไหล/การตั้งค่าที่ไม่ปลอดภัย (secret/misconfiguration) มีความชัดเจนและสามารถตรวจสอบย้อนกลับไปยังตำแหน่งของไฟล์ token credential หรือ configuration ได้โดยตรง ส่วน OWASP crAPI มีอัตราการผ่านการตรวจสอบและค่า ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับต่ำสุด สะท้อนว่าการตีความหลักฐานด้าน API Security มีความซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากต้องพิจารณาพฤติกรรมของ endpoint, HTTP method, response behavior และ authorization behavior [6] ร่วมกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากรอบการทำงานที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการประเมินช่องโหว่ที่แตกต่างกันตามบริบทของระบบเป้าหมาย และช่วยให้การใช้ LLM อยู่ภายใต้หลักฐานที่ตรวจสอบได้อย่างเป็นระบบ

4. การแสดงผลผ่าน Dashboard

นอกจากการสรุปผลการทดลองในรูปแบบตารางและกราฟแล้ว ระบบยังรองรับการแสดงผลผ่าน Grafana dashboard สำหรับติดตามผลการทดลองและตัวชี้วัดหลักของกรอบการทำงาน [27] เช่น จำนวนรอบการทดลอง จำนวนข้อค้นพบจาก LLM [12], [14], [21], [22] จำนวนข้อค้นพบที่ผ่านและไม่ผ่านการตรวจสอบ อัตราการผ่านการตรวจสอบ ค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับและเวลาในการดำเนินการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้ dashboard มีบทบาทเป็นเครื่องมือสนับสนุนการติดตามและตรวจสอบสถานะของระบบในภาพรวม ขณะที่การอภิปรายผลเชิงวิจัยอ้างอิงจากตารางผลลัพธ์และรูปที่ 5 เป็นหลัก เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลและทำให้บทความมีความกระชับ



รูปที่ 5: การแสดงผลสรุปผ่าน Grafana dashboard สำหรับกรอบการทดสอบเจาะระบบแบบอัตโนมัติ

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกรอบการทำงานอัตโนมัติแบบขับเคลื่อนด้วยหลักฐานสำหรับการทดสอบเจาะระบบ โดยใช้แพลตฟอร์ม n8n เป็นศูนย์กลางในการประสานกระบวนการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อม Docker container stack ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกประเภทของเป้าหมาย เลือกกลยุทธ์การทดสอบที่เหมาะสม รวบรวมผลลัพธ์จาก assessment worker ให้อยู่ในรูปแบบหลักฐานเชิงโครงสร้าง วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ และตรวจสอบข้อค้นพบก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้ายด้วยกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน

ผลการทดลองกับระบบเป้าหมายที่มีช่องโหว่โดยเจตนา 4 ประเภท จำนวน 24 รอบการทดลอง แสดงให้เห็นว่า กรอบการทำงานสามารถรวบรวมหลักฐานเชิงโครงสร้างได้อย่างสม่ำเสมอ มีอัตราการผ่านการตรวจสอบของข้อค้นพบจาก LLM อยู่ในระดับสูง สอดคล้องกับแนวทางการใช้แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ในบริบทความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ [12], [14], [16], [20], [22] และมีค่าความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับที่สะท้อนความเชื่อมโยงของผลลัพธ์กับหลักฐานได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ค่าความสม่ำเสมอของตัวชี้วัดหลักยังอยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างคงที่ภายใต้สภาพแวดล้อมการทดลองที่ควบคุมได้

ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้คือการเสนอแนวทางการใช้ LLM ในการทดสอบเจาะระบบภายใต้หลักฐานที่ตรวจสอบได้ แทนการให้ LLM สรุปผลโดยอิสระ โดยการผสานหลักฐานเชิงโครงสร้าง รหัสหลักฐาน ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ และกลไกตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐาน ทำให้ข้อค้นพบที่เข้าสู่รายงานขั้นสุดท้ายมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ลดความเสี่ยงจากการกล่าวอ้างเกินหลักฐาน และสนับสนุนการนำผลการประเมินไปใช้ในบริบทด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างเป็นระบบ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมห้องปฏิบัติการและใช้ระบบเป้าหมายที่มีช่องโหว่ที่กำหนดไว้ จึงยังไม่ครอบคลุมความซับซ้อนของระบบ production จริง งานวิจัยในอนาคตควรขยายการทดลองไปยังสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากขึ้น เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง LLM หลายรุ่น เพิ่มกลไก human-in-the-loop หลังขั้นตอนการตรวจสอบภาวะหลอนของโมเดลแบบอิงหลักฐานและก่อนขั้นตอนการสร้างรายงานขั้นสุดท้าย โดยระบบจะส่งต่อเฉพาะข้อค้นพบที่มีความเสี่ยงสูง ข้อค้นพบที่มีหลักฐานไม่สมบูรณ์ หรือข้อค้นพบที่ระบบจัดให้อยู่ในกลุ่มต้องตรวจสอบเพิ่มเติมไปยังผู้เชี่ยวชาญด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เพื่อพิจารณาอนุมัติ ปฏิเสธ หรือปรับแก้ข้อค้นพบดังกล่าวก่อนนำเข้าสู่รายงานขั้นสุดท้าย และระบบจะบันทึกผลการตัดสินใจลงในฐานข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตรวจสอบย้อนกลับ รวมถึงพัฒนากระบวนการตรวจสอบเชิงหลักฐานให้รองรับมาตรฐานหรือกรอบการประเมินด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่หลากหลายยิ่งขึ้น

REFERENCES

[1] OWASP API Security Project Team. “OWASP Top 10 API Security Risks – 2023.” OWASP.org. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://owasp.org/API-Security/editions/2023/en/0x11-t10/

[2] OWASP Foundation. *OWASP Web Security Testing Guide v4.2.* (2020). Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/

[3] OWASP Foundation, “OWASP Top Ten Web Application Security Risks,” 2025. [Online]. Available: https://owasp.org/www-project-top-ten/

[4] Forum of Incident Response and Security Teams, “Common Vulnerability Scoring System Version 4.0: Specification Document,” Document Version 1.2, Nov. 1, 2023. [Online]. Available: https://www.first.org/cvss/v4-0/cvss-v40-specification.pdf

[5] *Metasploitable3*. (2025). GitHub repository. Rapid7, Inc. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://github.com/rapid7/metasploitable3

[6] G. Lyon, *Nmap Network Scanning.* Beaverton, OR, USA: Nmap Software, 2009. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://nmap.org/book/toc.html

[7] *Metasploit Framework*. GitHub repository. Rapid7, Inc. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://github.com/rapid7/metasploit-framework

[8] B. Kimminich et al. *OWASP Juice Shop*. (2026). GitHub repository. (v20.1.1). OWASP. Accessed: Jul. 18, 2026. [Online]. Available: https://github.com/juice-shop/juice-shop

[9] ZAP Dev Team. "Documentation." ZAPROXY.org. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://www.zaproxy.org/docs/

[10] OWASP Foundation. "OWASP crAPI." OWASP.org. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://owasp.org/www-project-crapi/

[11] J. Willemsen et al. *OWASP WrongSecrets*. (2026). OWASP. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://owasp.org/www-project-wrongsecrets/

[12] G. Deng et al., "PentestGPT: Evaluating and harnessing large language models for automated penetration testing," in *Proc. 33rd USENIX Secur. Symp.*, Philadelphia, PA, USA, Aug. 2024, pp. 847–864.

[13] R. Fang, R. Bindu, A. Gupta, Q. Zhan, and D. Kang, "LLM agents can autonomously hack websites," 2024, *arXiv:2402.06664*.

[14] M. Bhatt et al., "CyberSecEval 2: A wide-ranging cybersecurity evaluation suite for large language models," 2024, *arXiv:2404.13161*.

[15] S. Wan et al., "CYBERSECEVAL 3: Advancing the evaluation of cybersecurity risks and capabilities in large language models," 2024, *arXiv:2408.01605*.

[16] P. Jing et al., "SecBench: A comprehensive multi-dimensional benchmarking dataset for LLMs in cybersecurity," 2024, *arXiv:2412.20787*.

[17] N. Tihanyi, M. A. Ferrag, R. Jain, T. Bisztray, and M. Debbah, "CyberMetric: A benchmark dataset based on retrieval-augmented generation for evaluating LLMs in cybersecurity knowledge," in *Proc. IEEE Int. Conf. Cyber Secur. Resilience (CSR)*, London, U.K., Sep. 2024, pp. 296–302.

[18] I. David and A. Gervais, "Multi-agent penetration testing AI for the web," 2025, *arXiv:2508.20816*.

[19] X. Wu et al., "CurriculumPT: LLM-based multi-agent autonomous penetration testing with curriculum-guided task scheduling," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 16, 2025, Art. no. 9096, doi: 10.3390/app15169096.

[20] N. O. Jaffal, M. Alkhanafseh, and D. Mohaisen, "Large language models in cybersecurity: A survey of applications, vulnerabilities, and defense techniques," *AI*, vol. 6, no. 9, 2025, Art. no. 216, doi: 10.3390/ai6090216.

[21] OpenAI. "GPT-4o system card." OPENAI.com. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://openai.com/index/gpt-4o-system-card/

[22] *Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile*, NIST AI 600-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, Jul. 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.6028/NIST.AI.600-1

[23] National Institute of Standards and Technology, "The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0," Gaithersburg, MD, USA, NIST CSWP 29, Feb. 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29

[24] OWASP, "OWASP Top 10 for LLM Applications 2025," OWASP Found., Wilmington, DE, USA, Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://genai.owasp.org/resource/owasp-top-10-for-llm-applications-2025/

[25] n8n. "AI Workflow Automation Platform." N8N.io. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://n8n.io/

[26] Docker Inc. Docker Compose. (2026). Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://docs.docker.com/compose/

[27] Grafana Labs. "Dashboards." GRAFANA.com. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://grafana.com/docs/grafana/latest/visualizations/dashboards/

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2569

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น บทความที่นำเสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามรูปแบบที่กำหนด และพร้อมที่จะนำไปตีพิมพ์ได้ทันที การเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร มีรายละเอียดดังนี้

1. หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์

1.1 เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ หรือไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือรายงานการสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการใดมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ หากตรวจสอบพบว่ามีการตีพิมพ์ซ้ำซ้อน ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.2 เป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

1.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะต้องผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewer) อย่างน้อย 2 ท่าน ต่อบทความ ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิอาจให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือปรับปรุงบทความให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4 กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามที่เห็นสมควร

1.5 บทความ ข้อความ ภาพประกอบ และตารางประกอบ ที่ตีพิมพ์ลงวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือตัดทอนข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

1.7 หากเป็นงานแปลหรือเรียบเรียงจากภาษาต่างประเทศ ต้องมีหลักฐานการอนุญาตให้ตีพิมพ์เป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์

1.8 ต้องมีการอ้างอิงที่ถูกต้อง เหมาะสมก่อนการตีพิมพ์ ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน

1.9 บทความที่ส่งถึงกองบรรณาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่ส่งคืนผู้เขียน

2. รูปแบบการกลั่นกรองบทความก่อนลงตีพิมพ์ (Peer-review)

ในการประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิเป็นการประเมินแบบ Double-blind peer review คือ ผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้เขียนบทความ และผู้เขียนบทความไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้ทรงคุณวุฒิ

3. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาลงตีพิมพ์

นิพนธ์ต้นฉบับต้องเป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ ระเบียบวิธีวิจัย ผลการวิจัยและการอภิปรายผล สรุปผล กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และเอกสารอ้างอิง*

หมายเหตุ : บทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้หน้าบทคัดย่อภาษาไทยอยู่ก่อนหน้าบทคัดย่อภาษาอังกฤษ สำหรับบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

---

* เอกสารอ้างอิง เป็นการบอกรายการแหล่งอ้างอิงตามที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาของงานเขียน

4. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ได้คำนึงถึงจริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ โดยจริยธรรมและบทบาทหน้าที่ของผู้เกี่ยวข้อง มีดังนี้

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผู้เขียนต้องเขียนบทความให้เป็นไปตามรูปแบบที่วารสารกำหนดไว้
2. หากมีการนำข้อมูลของผู้อื่นหรือข้อมูลของผู้เขียนที่เคยตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่นมาใช้ ผู้เขียนต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลนั้น โดยไม่ทำให้ผู้อื่นเข้าใจผิดว่าข้อมูลนั้นเป็นผลงานใหม่ของผู้เขียน
3. ผู้เขียนต้องไม่ดัดแปลงหรือบิดเบือนข้อมูล
4. ผู้เขียนต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัย (ถ้ามี)
5. ผู้เขียนต้องเปิดเผยข้อมูลเกี่ยวกับผลประโยชน์ทับซ้อนอย่างชัดเจน (ถ้ามี)
6. หากผลงานของผู้เขียนมีการดำเนินการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์หรือสัตว์ ผู้เขียนควรดำเนินการตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ และปฏิบัติตามข้อบังคับและกฎหมายที่เกี่ยวข้องอย่างเคร่งครัด

จริยธรรมและหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการต้องดำเนินการเผยแพร่วารสารให้ตรงตามเวลา
2. บรรณาธิการต้องคัดเลือกบทความ โดยพิจารณาจากคุณภาพและความสอดคล้องของเนื้อหาบทความกับขอบเขตของวารสาร
3. บรรณาธิการต้องดำเนินการประเมินบทความอย่างเป็นธรรม ไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความโดยใช้อคติ
4. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้เขียนบทความ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน และผู้ประเมินบทความ
6. บรรณาธิการต้องใช้โปรแกรมในการตรวจสอบการคัดลอกผลงาน เพื่อป้องกันการตีพิมพ์ผลงานซึ่งคัดลอกมาจากผลงานผู้อื่น หากพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่น บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการพิจารณาบทความทันที และติดต่อผู้เขียนเพื่อขอคำชี้แจง

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

1. ผู้ประเมินบทความ ควรพิจารณาตอบรับการประเมินเฉพาะบทความที่สอดคล้องกับความเชี่ยวชาญของตนเองเท่านั้น เพื่อให้บทความที่ตีพิมพ์มีคุณภาพ
2. ผู้ประเมินบทความควรประเมินบทความให้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อไม่ให้บทความที่ผ่านการพิจารณาตีพิมพ์ล่าช้า
3. ผู้ประเมินควรประเมินบทความโดยให้ข้อเสนอแนะตามหลักวิชาการเท่านั้น ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีเหตุผลหรือไม่มีข้อมูลรองรับ
4. ผู้ประเมินควรปฏิเสธการประเมินบทความ หากเห็นว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน
5. ผู้ประเมินต้องไม่เปิดเผยเนื้อหาภายในบทความให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องทราบ
6. หากผู้ประเมินเห็นว่ามีบทความอื่นที่ผู้เขียนไม่ได้กล่าวอ้างถึง แต่เป็นบทความที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับบทความ ผู้ประเมินควรแจ้งให้ผู้เขียนกล่าวอ้างถึงบทความนั้น

5. ข้อกำหนดการจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนต้องจัดพิมพ์บทความตามข้อกำหนดเพื่อให้มีรูปแบบการตีพิมพ์เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน ดังนี้

5.1 ขนาดของกระดาษ ให้ใช้ขนาด A4

5.2 กรอบของข้อความ ระยะห่างของขอบกระดาษ

ด้านบน 2.5 ซม. (0.98”) ด้านล่าง 2 ซม. (0.79”)

ด้านซ้าย 2 ซม. (0.79”) ด้านขวา 2 ซม. (0.79”)

5.3 ระยะห่างระหว่างบรรทัด หนึ่งช่วงบรรทัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Single)

5.4 ตัวอักษร รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ TH Sarabun New

5.5 รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความ กำหนดดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ขนาด 20 **ตัวหนา** กำหนดกึ่งกลาง

ชื่อผู้เขียน (Author) ขนาด 16 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง ไม่ต้องใส่คำนำหน้า

สังกัด (Affiliation) ขนาด 14 *ตัวเอน* กำหนดกึ่งกลาง

E-mail ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding Author) ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

บทคัดย่อ (Abstract) จัดรูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ **1 คอลัมน์** ชื่อหัวข้อ ขนาด 14 ***ตัวหนาและเอน*** กำหนดกึ่งกลาง ข้อความในบทคัดย่อ ขนาด 14 ตัวธรรมดา

คำสำคัญ (Keywords) ให้ใส่คำสำคัญ 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อ เว้น 1 บรรทัดด้วยขนาด 12 คำสำคัญขนาด 14 ***ตัวหนาและเอน*** กำหนดชิดซ้าย ข้อความในคำสำคัญ ขนาด 14 ตัวธรรมดา

รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- **รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 1 คอลัมน์**
- **หัวข้อหลัก** ประกอบด้วย บทนำ (INTRODUCTION) ระเบียบวิธีวิจัย (METHODS) ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (RESULTS AND DISCUSSION) สรุปผล (CONCLUSIONS) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) (ACKNOWLEDGEMENTS [if any]) เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ขนาด 16 **ตัวหนา** กำหนดชิดซ้าย
- **หัวข้อรอง ระดับที่ 1** ขนาด 14 ***ตัวหนาและเอน*** กำหนดชิดซ้าย เมื่อขึ้นหัวข้อระดับเดียวกันหรือมากกว่าในลำดับถัดไป ให้เคาะเว้น 1 บรรทัดหลังจบเนื้อหา
- **หัวข้อรอง ระดับที่ 2** ขนาด 14 *ตัวเอน* กำหนดชิดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 ซม.
- **เนื้อเรื่อง** ขนาด 14 ตัวธรรมดา
- **ชื่อตาราง** ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง
- **หัวข้อในตาราง** ขนาด 12 **ตัวหนา** กำหนดกึ่งกลาง เนื้อหาในตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา
- **ชื่อภาพประกอบ** ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ
- **เนื้อหาในภาพประกอบ** ขนาด 12 ตัวธรรมดา

5.6 เอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหาบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข ตามมาตรฐานสากล โดยใช้หมายเลขในเครื่องหมายก้ามปู [ ] และเรียงลำดับการอ้างอิงตามเนื้อหา โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3] [4], [5], [6] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม ตัวอย่างเช่น by Brown [4], [5]; as mentioned earlier [2], [4], [5], [6], [9]; Smith [4] and Brown and Jones [5]; Wood *et al.* [7]

2. รูปแบบของชื่อหัวข้อใช้รูปแบบตัวอักษร TH Sarabun New ขนาด 14 ตัวธรรมดา ในเนื้อหาขนาด 12 ตัวธรรมดา

3. การอ้างอิงท้ายบทความ จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และใช้การอ้างอิงตามรูปแบบการอ้างอิง IEEE V 3.28.2025 ซึ่งผู้เขียนสามารถศึกษาวิธีการเขียนเอกสารอ้างอิงตามรูปแบบที่กำหนดได้ที่เว็บไซต์ https://ieeeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf โดยจะต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความอ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง

4. กรณีที่เอกสารที่นำมาอ้างอิงเขียนเป็นภาษาไทยให้เติมคำว่า “(in Thai)” เข้าไปในเอกสารอ้างอิง ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างรูปแบบการเขียนและการแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ

<u>ตัวอย่างที่ 1 การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)</u>

Basic Format:

[Number] J. K. Author, *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.

[Number] J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sect. x, pp. xxx–xxx.

Examples:

[1] V. Rijiravanich, *Work Study: Principles and Case Studies*, 4th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2005.

[2] L. Edelstein-Keshet, *Mathematical Models in Biology*. New York, NY, USA: Random House, 1998.

[3] K. J. Roodbergen, “Storage assignment for order picking in multiple-block warehouses,” in *Warehousing in the Global Supply Chain: Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems.* London, U.K.: Springer, 2012, pp. 139–155.

ตัวอย่างที่ 2 การอ้างอิงจากวารสาร (Periodicals)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx–xxx, Abbrev. Month. year.

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx–xxx, Abbrev. Month. year, doi: xxx.

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. Month. year, Art. no. xxx.

Examples:

[4] N. Dechampai and K. Sethanan, "An application of lean manufacturing system in the textile of lean manufacturing system in the textile and garment industry case study: Wacoal Kabinburi Co., Ltd," (in Thai), *MBA-KKU J.*, vol. 7, no. 2, pp. 13–27, 2014.

[5] S.-F. Wang, H.-P. Chen, Y. Ku, and M.-X. Zhong, "Voltage-mode multifunction biquad filter and its application as fully-uncoupled quadrature oscillator based on current-feedback operational amplifiers," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6681, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20226681.

[6] M. Dwiyaniti *et al*., "Extremely high surface area of activated carbon originated from sugarcane bagasse," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, pp. 1–8.

[7] M. Yoshiki, Y. Fujita, A. Kawamura, and H. Arai, "Instability of plates with holes (1st report)," (in Japanese), *J. Zosen Kiokai*, vol. 1967, no. 122, pp. 137–145, 1967.

[8] F. de Oliveira Santini, "Clockwise versus counterclockwise turning bias: Moderation effects of foot traffic and cognitive experience on visual attention," *J. Retail. Consum. Serv.*, vol. 67, 2022, Art. no. 102965.

ตัวอย่างที่ 3 การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis / Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State (only U.S.), year.

Examples:

[9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

[10] Y. Sornsa and P. Wanrerk, "Buckling of rectangular plates with a central square hole," (in Thai), B.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2007.

ตัวอย่างที่ 4 การอ้างอิงจากการประชุมทางวิชาการ (Conferences and Conference Proceedings)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of paper," in *Abbrev. Name of Conf.,* City, State (only U.S.), Country, Abbrev. Month. year, pp. xxx–xxx.

Examples:

[11] N. Kriengkorakot, P. Kriengkorakot, S. Duan, P. Thung, and W. Piromsuk, "Repair work reduction in sewing process of the apparel factory," (in Thai), in *Proc. 10th Ubon Ratchathani Univ. Nat. Res. Conf.*, Ubon Ratchathani, Thailand, Jul. 2016, pp. 87–96.

[12] J. Lingad, S. Karimi, and J. Yin, "Location extraction from disaster-related microblogs," in *Proc. 22nd Int. Conf. World Wide Web*, Rio de Janeiro, Brazil, May 2013, pp. 1017–1020.

ตัวอย่างที่ 5 การอ้างอิงเว็บไซต์

[Number] J. K. Author. "Page Title." Website Title. Date Accessed. [Online.] Available: Web Address.

Examples:

[13] B. Suttamanatwong. "Minimum Wage Rate 2022." (in Thai), MOL.go.th. Accessed: Dec. 31, 2022. [Online.] Available: https://www.mol.go.th/อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ

[14] Greenpeace Thailand. "The different air quality measurement standards." (in Thai), GREENPEACE.org. Accessed: Nov. 23, 2022. [Online.] Available: https://www.greenpeace.org/thailandexplore/protect/cleanair/air-standard/

6. วิธีการจัดส่งบทความ

ผู้เขียนส่งบทความออนไลน์ได้ที่ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal

ทุกบทความที่ส่งเข้ามาจะมีการตรวจพิจารณาเบื้องต้นโดยกองบรรณาธิการก่อน เมื่อบทความผ่านการพิจารณาเบื้องต้นผู้เขียนจึงจะสามารถชำระเงินได้ หลังจากที่ผู้เขียนชำระเงินเรียบร้อย ทางกองบรรณาธิการจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

Thai-Nichi Institute of Technology
1771/1 Pattanakarn Road, Suanluang, Bangkok 10250, Thailand
Tel: 0-2763-2600, E-mail: JEDT@tni.ac.th
Website: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal

