

<http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech>

ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of **Industrial Technology**

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๕

VOLUME 22 | ISSUE 2 | 2026 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๕

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เขียวยงจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงษ์นาพณิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนชัย กุลวรรณพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ผลศิลป์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี นายสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการนานาชาติ

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis
Professor Dr.Cristina Leonelli
Professor Dr.Greg Heness
Professor Dr.Michiya Matsusaki
Professor Dr.Kannan Venkatramanan

University of Birmingham, United Kingdom
University of Modena and Reggio Emilia, Italy
University of Technology Sydney, Australia
Osaka University, Japan
SCSVMV University, India

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

Professor Dr.Ing.Suchart Siengchin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Associate Professor Dr.Smith Songpiriyakij	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Editor-in-Chief

Associate Professor Dr.Attaphon Kaewvilai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Associate Editor

Associate Professor Dr.Boonlue Sawatmongkhon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
--	---

Editorial Board Members

Professor Dr.Prayoot Akkaraekthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Sutthisak Phongthanapanich	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Navadol Laosiripojan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pichet Limsuwan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Sumrerng Jugjai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pranut Potiyaraj	Chulalongkorn University
Professor Dr.Hathaikarn Manuspiya	Chulalongkorn University
Professor Dr.Phadungsak Ratanadecho	Thammasat University
Professor Dr.Prinya Chindaprasirt	Khon Kaen University
Professor Wing Commander Dr.Sarawut Sujitjorn	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Thanatchai Kulworawanichpong	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Apirat Laobuthee	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Sureerat Polsilapa	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Duangrudee Chaysuwan	Kasetsart University

International Editors

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis	University of Birmingham, United Kingdom
Professor Dr.Cristina Leonelli	University of Modena and Reggio Emilia, Italy
Professor Dr.Greg Heness	University of Technology Sydney, Australia
Professor Dr.Michiya Matsusaki	Osaka University, Japan
Professor Dr.Kannan Venkatramanan	SCSVMV University, India

Head of Administrative Management

Associate Professor Dr.Kampanart Theinnoi	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Administrative Management

Assistant Professor Dr.Prasertsak Tiawongsombat	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assistant Professor Dr.Pantip Boonsong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Journal Manager

Miss Chonlada Chueapradit	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---------------------------	---

วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเป็นวารสารตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่องค์ความรู้ งานวิจัย สิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม ของภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ ผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) และไม่ได้สังกัดหน่วยงานเดียวกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีกำหนดการออกปีละ 3 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกันยายน – ธันวาคม ของทุกปี

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร. 02-555-2000 ต่อ 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

The journal of industrial technology is an academic publication which devotes to be a medium to disseminate knowledge, research, invention, and innovation for academics. The article provides and reports of interest to the field of engineering technology such as mechanical engineering, civil engineering, electrical and electronic engineering, chemical engineering, materials engineering, production engineering, industrial engineering, environmental engineering, energy and renewable energy engineering, computational engineering and etc.

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality for academic quality by at least 3 experts in related fields, who are outsiders from various institutions. The authors and reviewers do not know each other's information (double-blinded peer reviews) and are not affiliated with the same institution. The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

In addition, the research and academic works published in this journal are considered the independent opinions of the author. The author is responsible for any legal consequences that may result from the published articles with which editorial members do not always necessarily agree.

Publishing Schedule

The journal of industrial technology is published in 3 issues per year. Issue 1 will be published between January and April of every year. Issue 2 will be published between May and August of every year. Issue 3 will be published between September and December of every year.

Publisher

Research and Academic Supports Division College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Building 63, 3rd Floor, 1518, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800, Tel. +66 2 555-2000 ext. 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2572

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาและเผยแพร่บทความด้วยระบบ Online Journal Submission (OJS) ทั้งนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัล (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) และฐานข้อมูล Google Scholar ซึ่งทำให้การสืบค้นและการอ้างอิงข้อมูลบทความด้วยระบบออนไลน์นั้นถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้จัดพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี คือฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม และฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม สำหรับการเผยแพร่บทความแบบออนไลน์นั้นได้ดำเนินการผ่านทางเว็บไซต์ ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech และ ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal ที่อยู่ในระบบ Thai Journals Online (ThaiJO)

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชา ข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ ขอกราบขอบพระคุณที่ปรึกษาวารสารฯ กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ที่สละเวลาและใช้ความรู้ความสามารถในการทำให้คุณภาพของวารสารฯ เป็นที่น่าเชื่อถือและมีคุณค่าเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ และขอขอบคุณนักวิชาการทุกท่านที่ส่งบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเข้าร่วมทำให้วารสารฯ ดำเนินการสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ พร้อมทั้งจะรับฟังข้อเสนอแนะจากทุกภาคส่วนเพื่อทำให้วารสารฯ มีการพัฒนามากยิ่งขึ้น และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลต่อไป

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกเพื่การหาค่ากำลังของวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Application of Piezoelectric Sensors to Determine the Strength of Eco-Friendly Construction Material)	1-16
<i>Chalermpon Wungsumpow, Sakol Pochalard, Kitti Promsang, Nipaporn Auttanate, Sathaporn Sittiwong, Wichok Promdaung, Keeratikan Piriyakul</i>	
อิทธิพลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อกลไกการอุดตันและการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วย เยื่อกรองแบบนาโน (Influence of Natural Organic Matter on Fouling Mechanisms and Hexavalent Chromium Removal by Nanofiltration Membranes)	17-35
<i>Apinya Onsarn, Supatpong Mattaraj, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Sompop Sanongraj, Tiammanee Rattanaweeran, Antika Pranudta</i>	
การประยุกต์ใช้วิศวกรรมสังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีในระดับท้องถิ่น: กรณีศึกษาเรื่องการจัดการ พืชอาหารสัตว์สำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงโค (Applying Social Engineering for Localized Technology Development: A Case Study in Forage Management for Cattle Farmers)	36-52
<i>Weerachai Madtharak, Theeramate Songthong</i>	
Influence of Engine Oil Viscosity on the Combustion and Performance Characteristics of Gasoline Direct Injection Engines	53-71
<i>Nuttapon Buntekt, Punya Promhuad, Mongkol Dangsunthornchai</i>	
การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพใน กระบวนการฟนสี (Design and Development of a Fixture for an Automated Mobile Rice Thresher to Improve Painting Process Efficiency)	72-89
<i>Yothin Suriyamart, Manop Donmuen, Kittipid Labnongsaeng, Kittirod Chotchuen, Ronnachai Yungpromma, Tossapol Jangnoi, Sahassawas Poojara</i>	



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือเพื่อจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม (An Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Spare Parts Prioritization in the Beverage Industry) <i>Piyawat Likhitluecha, Choosak Pornsing</i>	90-108
การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางพลวัตของตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากส่วนผสมยางธรรมชาติและตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน (Comparative Study on the Dynamic Performance of Natural Rubber-Based and Polyurethane Rail Dampers) <i>Songsak Suthasupradit, Thanakrit Kummanee, Rattapoom Parichatprecha, Khemapat Tontiwattanukul</i>	109-125
การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อความหนาของชั้นสีเกินมาตรฐานในการเคลือบสีกันสนิมของฝากระโปรงรถยนต์ (Experimental Design for Optimization of Conditions Affecting Over-Standard Paint Thickness in Car Hood Electrodeposition Process) <i>Chalida Chanwijitch, Apichart Chaichawalit, Potiwat Ngamkajornwiwat</i>	126-138
คุณสมบัติคอนกรีตพูนที่ผสมเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Properties of Pervious Concrete Containing Fly Ash and Polyvinyl Alcohol Fibers) <i>Wunchock Kroehong, Panya Klongaksornkul, Sattawat Haruehansapong, Warayut Narong-In, Apiwat Saengkaew, Pitiphong Thongdao</i>	139-153
การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาโดยประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ (Design and Development of the Lygodium Shoulder Bags through the Integration of Quality Function Deployment and Kansei Engineering) <i>Apichon Thongmung Kamnerdwam, Surasit Rawangwong, Chatree Homkhiew, Chainarong Srivabut, Thipsukon Boonyaso, Chaiwattanapat Laosat</i>	154-176
การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (Two-phase Induction Motor Drive with Two-phase Matrix Converter with Sinusoidal PWM) <i>Sataporn Suathed, Prasopchok Hothongkham</i>	177-192



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
ผลของน้ำมันธรรมชาติต่อความคงสภาพเชิงออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับ สารแคนนาบิไดโอยอลสูงภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน (Effects of Natural Oils on the Oxidative Stability of a High Cannabidiol Cannabis Oil Formulation under Accelerated Thermal Conditions) <i>Benjamaporn Lomlai, Supaporn Phanwilai, Thammanoon Thaweechai</i>	193-207
หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล (Atonomous Mobile Robot for Environmental Quality Monitoring in Hospital) <i>Sasipa Arisariyawong, Thanwarat Kason, Achara Yoophasuk, Watcharapon Gingcha, Tanayos Arisariyawong</i>	208-223
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2



การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกเพื่อการหาค่ากำลังของวัสดุ ก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เฉลิมพล วังสำเภา¹ สกล โพลลาด² กิตติ พรหมแสง² นิภาพร อรรถนทร³,
สถาพร สิทธิวงศ์^{1,4} วิโชค พรหมดวง^{1,4} และ กীরติกานต์ พิริยะกุล^{1,5*}

¹ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาวัสดุกรรมแบบผสมผสานภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
อุทยานเทคโนโลยี มจพ., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² กองอาคารและสถานที่, มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ, มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

⁴ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

⁵ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 กันยายน 2568; วันที่บทความบทความ: 20 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: บทความนี้เสนอวิธีการตรวจสอบกำลังของวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการทดสอบแบบ
ไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคเป็นเตอร์อิลีเมนต์ ผ่านเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก เพื่อวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (V_s)
เปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างทดสอบเตรียมจากดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และผสมเส้นใยขนไก่
ธรรมชาติที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งในสัดส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร บ่มตัวอย่าง
เป็นเวลา 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกสามารถวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิเพื่อประเมิน
ความแข็งแรงของวัสดุได้เป็นอย่างดี โดยค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับค่ากำลังรับ
แรงอัดแกนเดียว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนเส้นใยขนไก่ที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 0.5 ซึ่งให้ค่ากำลัง
รับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดและผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง 294 kPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย
เกินกว่าร้อยละ 0.5 จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความเร็วคลื่นลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยที่
ไม่สม่ำเสมอและการเกิดช่องว่างในเนื้อวัสดุ

คำสำคัญ: เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก; ดิน-ซีเมนต์; การทดสอบเป็นเตอร์อิลีเมนต์; กำลังรับแรงอัด

Application of Piezoelectric Sensors to Determine the Strength of Eco-Friendly Construction Material

Chalermpon Wungsumpow¹, Sakol Pochalard², Kitti Promsang², Nipaporn Auttanate³,
Sathaporn Sittiwong^{1,4}, Wichok Promdaung^{1,4} and Keeratikan Piriyaikul^{1,5*}

¹ Operations Center of Integrated Innovation Research and Development under Industrial Standards, KMUTNB Techno Park, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Building and Landscape Division, Suan Dusit University

³ Faculty of Sciences and Health Technology, Navamindradhiraj University

⁴ Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok

⁵ Department of Civil and Environmental Engineering Technology College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

Received: 16 September 2025; Revised; 20 February 2026; Accepted; 2 June 2026

Online Published: 18 August 2026

Abstract: This study evaluates the strength of eco-friendly construction materials using a non-destructive bender element technique with piezoelectric sensors. The shear wave velocity (V_s) was measured and correlated with unconfined compressive strength (UCS). Specimens were prepared from Bangkok soft clay mixed with 8% Type 1 Portland cement and reinforced with natural chicken feather fibers at 0, 0.5, 1.0, and 1.5% by volume. After 28 days of curing period, results showed that piezoelectric sensors effectively assess material strength, with V_s exhibiting a positive correlation with UCS. The optimal fiber content was found to be 0.5%, yielding the maximum UCS and exceeding the Department of Highways standard (294 kPa). Conversely, fiber content exceeding 0.5% reduced both compressive strength and wave velocity due to non-uniform fiber distribution and increased voids within the material matrix.

Keywords: Piezoelectric sensor; Soil-cement; Bender element testing; Compressive strength



1 บทนำ

ห้องปฏิบัติการกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดลอม ร่วมทำวิจัยกับภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้พัฒนาเครื่องมือทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย การวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในบริบทของการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ และดินในงานวิศวกรรมโยธาจะมีบทบาทสำคัญยิ่งเนื่องจากเครื่องมือเหล่านี้ไม่เพียงแต่ต้องอาศัยกลศาสตร์ของคลื่น (Wave Mechanics) ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นเฉือน (Shear Wave: S-wave) แต่ยังต้องอาศัยหลักการทางอิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลสัญญาณ และการสื่อสารข้อมูลทางไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูงเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้และสอดคล้องกับมาตรฐานสากล โดยการพัฒนาเครื่องมือสำหรับทดสอบที่ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Sensors) สำหรับการใช้งานจำเป็นจะต้องคำนึงถึงระบบต่างๆ เช่น ระบบวงจรขับสัญญาณ (Driving Circuit) การวัดและการประมวลผลสัญญาณ (Signal Conditioning & Processing) ตลอดจนการเก็บรวบรวมและส่งต่อข้อมูลด้วยระบบดิจิทัลและ IoT แนวทางการวิจัยด้านไฟฟ้าโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างระบบทดสอบที่มีความเที่ยงตรงสูง ลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก Crosstalk และ Noise และสามารถทำงานได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและสภาพพื้นที่สนามจริง โดยจะอาศัยหลักการของการเดินทางคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ผ่านวัสดุต่างๆ การทดสอบนี้เรียกว่าเป็นเดอร์อีลีเมนต์ ถูกประดิษฐ์ในปี ค.ศ. 1985 โดย

นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน Dyvik และ Madshus [1] ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการติดตั้งและการใช้งานเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก โดยมีเครื่องมือทดสอบทางธรณีเทคนิคมาตรฐานหลากหลายประเภทที่ห้องปฏิบัติการ Norwegian Geotechnical Institute (NGI) เช่น เครื่องทดสอบ Resonant Column เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง และเครื่องทดสอบการยุบตัวของดิน โดยเซ็นเซอร์นี้สามารถใช้ในการวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (V_s) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (G_{max}) และกำลังของวัสดุของตัวอย่างดินในระหว่างกระบวนการการคายน้ำ (Consolidation) และการเฉือน (Shear) ในการทดสอบแต่ละประเภท การทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียว 5 ชนิด ภายใต้ระดับความดันที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าผลจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบ Resonant Column และการทดสอบอื่นๆ สำหรับห้องปฏิบัติการกลศาสตร์กลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดลอม ได้เคยมีความพยายามสร้างเครื่องมือต้นแบบที่ไม่ทำลายสำหรับวัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิเพื่อหาลำดับของดิน-ซีเมนต์ ดังที่อธิบายโดย กิรติกันต์ พิริยะกุล และ ณรงค์ ธรรมภูติ [2, 3] เครื่องทดสอบต้นแบบดังกล่าวสามารถใช้วัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิของวัสดุได้แต่ยังมีข้อจำกัดในการวัดสัญญาณคลื่นทุติยภูมิ สัญญาณเกิดการรบกวนที่ไม่ต้องการในวงจรไฟฟ้าเกิดจากการส่งสัญญาณไฟฟ้าข้ามไปรบกวนกันเอง Crosstalk ส่งผลให้แปลผลความเร็วคลื่นทุติยภูมิเป็นไปได้ยากและคลาดเคลื่อน

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครเป็นดินที่มีปัญหาทางวิศวกรรมสูง เนื่องจากมีกำลังรับแรงแบกทานต่ำ และการทรุดตัวสูง การก่อสร้างโครงสร้างบนดินชนิดนี้



จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน วิธีการที่นิยมแพร่หลายคือการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความมั่นคงให้กับโครงสร้างดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5-9] วัสดุที่ใช้สำหรับทดสอบคือดินเหนียวกรุงเทพมหานครโดย Mairaing และ Amonkul [4] ได้ศึกษาพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างไปจนถึงปากแม่น้ำ จากข้อมูลการสำรวจดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะสำรวจ 4,000 แห่งพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนนี้มีความหนามากกว่าในบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย และความหนาจะลดลงเมื่อห่างไปทางทิศเหนือ ในเขตกรุงเทพฯ ความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯอยู่ที่ความลึกระหว่าง 10 - 20 เมตร เนื่องจากคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวกรุงเทพมหานครมีปริมาณความชื้นสูงเกือบถึงขีดจำกัดของความเปียกของเหลว ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวสูงและมีกำลังเฉือนต่ำ คณะนักวิจัยด้านวิศวกรรมโยธา Horpibulsuk และคณะ [5] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพมหานครอย่างละเอียดพบว่าขีดจำกัดเหลวเพิ่มขึ้นตามความสามารถในการบีบอัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงของดินสำหรับการใช้งานในวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานโดยผสมปูนซีเมนต์ เรียกว่าดิน-ซีเมนต์ การปรับปรุงพื้นดินโดยวิธีการ ดิน-ซีเมนต์ นี้เป็นที่นิยมแพร่หลายมาหลายทศวรรษ มีโครงการวิจัยหลากหลายโครงการที่พยายามพัฒนาเทคนิคนี้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน [6-9]

การคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมโดยการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธา Wungsumpow และคณะ [10] และใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในการวิเคราะห์พื้นที่ฝังกลบของเสียซึ่ง

ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรีไซเคิล เช่น แก้วลอย ปัจจุบันของเสียอุตสาหกรรมและใยสังเคราะห์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในส่วนผสมดิน-ซีเมนต์ แนวคิดของวัสดุผสมเชิงนิเวศ (Eco-composite) ซึ่งเน้นย้ำถึงความสำคัญของเส้นใยธรรมชาติในกระบวนการผลิตยุคใหม่ (Ismail and Chung) [11] เส้นใยธรรมชาติมีแหล่งกำเนิดจากพืช สัตว์ และกระบวนการทางธรณีวิทยาต่าง ๆ เมื่อถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุผสม เส้นใยเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากวัสดุสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้น เส้นใยธรรมชาติมักถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์เนื่องจากมีความแข็งแรงโดยธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ตัวอย่างของเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ได้แก่ ไยกล้วย ไยสับปะรด ฝ้าย ชีล และเคนาฟ นอกจากนี้ยังมีการให้ความสนใจอย่างมากต่อแหล่งที่มาและคุณลักษณะของเส้นใยแต่ละชนิดอีกด้วย อุตสาหกรรมไก่เนื้อของไทยในปี 2566 พบว่าประเทศไทยมีการผลิตไก่เนื้อประมาณ 1,781.55 ล้านตัว หรือคิดเป็นเนื้อไก่ 2.85 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2565 ร้อยละ 0.54 หากคำนวณจากน้ำหนักเฉลี่ยของชนไก่ที่ประมาณ 5% ของน้ำหนักตัวไก่ (ไก่เนื้อเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม) จะได้ชนไก่ประมาณ 125 กรัมต่อตัว ซึ่งหมายความว่าประเทศไทยมีชนไก่เหลือจากอุตสาหกรรมประมาณ 222,693 ตันต่อปี [12] ชนไก่เป็นของเสียที่ย่อยสลายยาก เนื่องจากประกอบด้วยเคราตินซึ่งเป็นโปรตีนที่มีความคงทนต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติ การทิ้งชนไก่โดยไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น การปนเปื้อนในแหล่งน้ำและดิน



ปัจจุบันแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำเส้นใยชนไก่ ซึ่งเป็นของเสียจากภาคปศุสัตว์ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง มาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในดินซีเมนต์ ซึ่งจุดเด่นของงานวิจัยนี้ที่แตกต่างจากงานอื่นคือ การนำเส้นใยชนไก่มาใช้ร่วมกับเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก เพื่อประเมินค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยชนไก่ต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นหตุยภูมิที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกกับค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อนำไปสู่การสร้างสรรค์การทำนายค่ากำลังของวัสดุที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

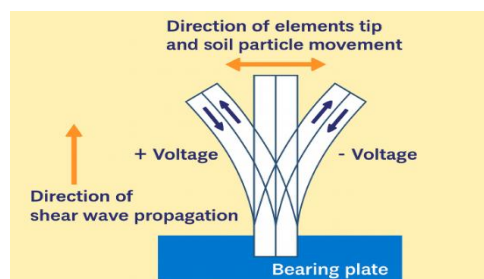
2.1 เซรามิกเพียโซอิเล็กทริก

เซรามิกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Ceramics, รูปที่ 1) ใช้เซรามิกประเภทวัสดุอ่อน (Soft Piezoelectric Materials) หรือ PZT-5 ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10 kHz ติดตั้งเพื่อทำการทดสอบคือวัสดุชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษในการ เปลี่ยนพลังงานกล (แรงกด การสั่น การดัดงอ) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นการเปลี่ยนรูปเชิงกลหรือการสั่นได้ด้วยกลไกนี้เรียกว่า “เพียโซอิเล็กทริกเอฟเฟกต์” (Piezoelectric Effect) วัสดุเซรามิกที่นิยมใช้ เช่น ตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate: PZT) มีคุณสมบัติเด่นคือให้สัญญาณไฟฟ้า

ที่มีขนาดใหญ่ มีเสถียรภาพ และสามารถผลิตในรูปแบบแท่ง แผ่น หรือแผ่นดิสก์บาง ๆ เพื่อใช้งานได้หลากหลาย โดยมีหลักการทำงานของการทำงานกำเนิดคลื่นเฉือน (Shear Wave) ด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก คือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับเข้าไปที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริก แผ่นจะเกิดการหดและขยายตัว ทำให้ปลายแผ่นแกว่งไปมาในแนวนอน การแกว่งนี้ทำให้อนุภาคดินที่สัมผัสอยู่เคลื่อนที่ซ้าย-ขวา ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนภายในดินและสร้างคลื่นเฉือนที่แพร่กระจายขึ้นในแนวตั้ง คุณสมบัติสำคัญของคลื่นชนิดนี้คือ ทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค การทำงานดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติดินเชิงพลศาสตร์ เช่น ค่าความเร็วคลื่นเฉือนและโมดูลัสเฉือน ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างฐานรากและงานวิศวกรรมแผ่นดินไหวดังแสดงตามรูปที่ 2



รูปที่ 1 เพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก



2.2 ดินเหนียวกรุงเทพมหานคร

ดินเหนียวกรุงเทพมหานครที่ใช้ในการทดสอบได้จากโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงใต้ ที่ระดับความลึกประมาณ 10–12 เมตร ได้สถานีโรงพยาบาลศิริพยาบาล โดยดินดังกล่าวเป็นเนื้อดินละเอียดซึ่งเกณฑ์ กรมทางหลวงชนบท มทข. 244 – 2567 งานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) [13] ดินที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ต้องเป็นวัสดุที่ปราศจากหน้าดิน วัชพืช หรืออินทรีย์วัตถุอื่น ๆ และไม่มีสารอื่นที่อาจเป็นอันตรายต่อคุณภาพของดินซีเมนต์เจือปน ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายและทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพมหานคร

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตรากีพีโอ (สีแดง) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.14

2.4 เส้นใยขนไก่

เส้นใยขนไก่มาจากอุตสาหกรรมปศุสัตว์เป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำและมีโครงสร้างที่กลวง มีความหนาแน่นต่ำ มีโครงสร้างซับซ้อนและมีความเป็นระเบียบสูง จัดเป็นหนึ่งในโครงสร้างเคราตินที่ซับซ้อน ที่สุดในสัตว์มีกระดูกสันหลัง ประกอบด้วยเคราติน 91% น้ำ 8% และไขมัน 1% ขนไก่มีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความเหนียวสูง เป็นฉนวนความร้อน มีความหนาแน่นต่ำ ไม่ก่อให้เกิดการขัดสี และกันน้ำได้ดี โครงสร้างของขนไก่มีลักษณะเป็นลำต้นหลัก (Rachis) ที่แตกกิ่งออกไปในแนวนาน โดยกิ่งเหล่านี้ถูกยึดด้วย Barbicels ที่เป็นขอกเกี่ยว ที่ผ่านการทำความสะอาดและขจัดคราบมัน (Wax) และผ่านการอบแห้งแล้ว จากอุตสาหกรรมการผลิตหมอนขนไก่ ซึ่งมีความยาวขนไก่เฉลี่ย 7 เซนติเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 0.58 ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานคร

พารามิเตอร์	ค่า
ขีดจำกัดเหลว (%)	84
ขีดจำกัดพลาสติก (%)	34
UCS (kPa)	14.8
ความถ่วงจำเพาะ	2.68
ปริมาณความชื้น (%)	81
หน่วยน้ำหนัก (T/m^3)	1.47
การจำแนกประเภทดิน	CH
การร่อนตะแกรงผ่านเบอร์ 200 (%)	56.9



รูปที่ 3 เส้นใยขนไก่

2.5 การเตรียมดินผสมซีเมนต์

ในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยจะผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement: OPC) กับน้ำในปริมาณที่เท่ากับค่าขีดจำกัดของเหลว (Liquid Limit) ที่ร้อยละ 84 โดยใช้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่ผสมในปริมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักดินแห้ง อัตราน้ำต่อซีเมนต์ W/C ที่ 0.5 และใช้เส้นใยขนไก่ในสัดส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 หลังจากนั้นจึงทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน



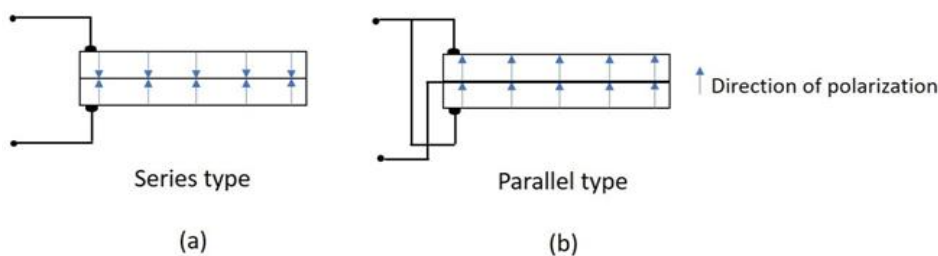
3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์

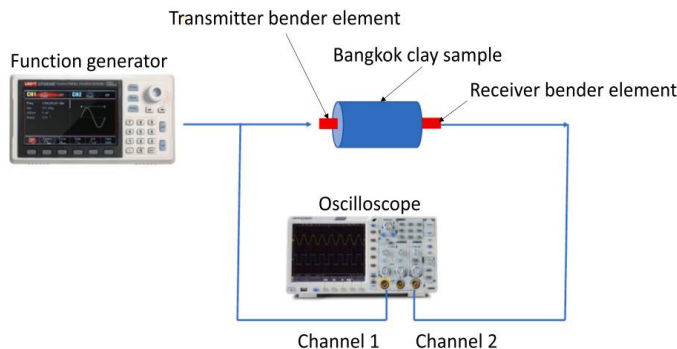
หลักการทำงานของเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกอิงตามคุณสมบัติของวัสดุเซรามิกชนิดเพียโซอิเล็กทริกเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายผ่านหน้าสัมผัสของวัสดุเซรามิกสองแผ่นซึ่งจัดวางในรูปแบบที่หนึ่งแผ่นขยายตัวและอีกแผ่นหดตัว จะทำให้ทั้งแผ่นเกิดการงอตัว ดังที่ Dyvik และ Madhus [1] อธิบายไว้ และในทางกลับกันหากมีการรบกวนเชิงกลในแนวราบ (lateral disturbance) เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์ชนิดนี้ ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกจึงสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่นทุติยภูมิได้ แบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ชนิดต่ออนุกรม (Series Connected) และชนิดต่อขนาน (Parallel Connected) โดยรูปที่ 4(a) แสดงลักษณะของชนิดต่ออนุกรม ซึ่งมีการจัดเรียงโพลาริไซในทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละแผ่น และสายไฟจะเชื่อมต่อกับผิวอิเล็กโทรดด้านนอกทั้งสอง ขณะที่ชนิดต่อขนาน แสดงในรูปที่ 4(b) มีทิศทางของโพลาริไซในแผ่นทั้งสองเหมือนกัน และสายไฟจะเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดด้านนอกทั้งสองที่มีขั้วเดียวกัน ส่วนอิเล็กโทรดตรงกลางจะเป็นอีกขั้วหนึ่ง โดยต้องมีการขัดผิวบางส่วนของแผ่นเพื่อต่อสายไฟเข้าสู่อิเล็กโทรดกลาง โดยทั่วไป

เซ็นเซอร์ชนิดต่ออนุกรมเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวรับสัญญาณ ส่วนชนิดต่อขนานเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวส่ง การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D8295-19

รูปที่ 5 แสดงผังการทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์โดยใช้ Function generator สำหรับสร้างสัญญาณรูปคลื่นทุติยภูมิขนาด $10 V_{pp}$ และต้องจรรยาตามรูปที่ 5 จากนั้นจ่ายสัญญาณตามเงื่อนไขที่ต้องการและใช้เครื่องออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณและเวลาระหว่างสัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับ โดยเริ่มจากการจ่ายสัญญาณตารางที่ 2 ตามลำดับ ไปยังเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกตัวส่ง ทำให้เกิดคลื่นทุติยภูมิ เมื่อคลื่นทุติยภูมิเดินทางมาถึงปลายอีกด้านของตัวอย่างดิน การบิดตัวของเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกตัวรับจะก่อให้เกิดสัญญาณอีกครั้ง ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังออสซิลโลสโคปเพื่อตรวจจับสัญญาณและเปรียบเทียบเวลาระหว่างการส่งและการรับคลื่นทุติยภูมิ สำหรับการทดสอบจะใช้ความถี่อยู่ระหว่าง 2 ถึง 12 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้ระดับความเครียดต่ำมาก (ต่ำกว่า 0.0001%) ที่ความถี่ต่ำๆ สัญญาณอาจได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ Near-Field ส่วนที่ความถี่สูง สัญญาณที่รับจะอ่อนและตีความได้ยาก สัญญาณจะถูกเฉลี่ยถึง 32 ครั้งเพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 4 เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (a) ชนิดอนุกรม และ (b) ชนิดขนาน



รูปที่ 5 การทำงานของการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์

ในการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์ คลื่นทุติยภูมิถูกสร้างขึ้นและรับโดยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างดิน ความเร็วคลื่นทุติยภูมิจะคำนวณจากระยะทางระหว่างปลายถึงปลาย (tip-to-tip) ของเซ็นเซอร์ทั้งสอง และเวลาที่คลื่นทุติยภูมิใช้ในการเดินทางผ่านระยะทางดังกล่าวตามสมการที่ 1

$$V_s = L/t \quad (1)$$

โดยที่ V_s คือ ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (เมตร/วินาที), L คือ ระยะทางระหว่างปลายของเซ็นเซอร์ทั้งสอง (มิลลิเมตร), t คือ เวลาที่คลื่นเฉือนใช้ในการเดินทางผ่านระยะทางนี้ (ไมโครวินาที)

เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นเฉือน (t) คำนวณจากสมการที่ 2

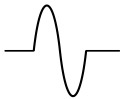
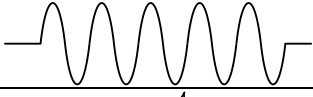
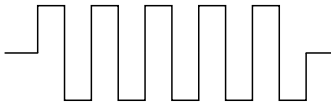
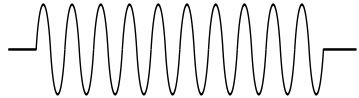
$$t = t_1 - t_2 \quad (2)$$

ความเร็วคลื่นทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$V_s = f \cdot \lambda \quad (3)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ของเร็วคลื่นทุติยภูมิ (เฮิรตซ์), λ คือ ความยาวคลื่น

ตารางที่ 2 รูปแบบสัญญาณคลื่นทุติยภูมิ

รูปแบบสัญญาณ	รายละเอียด
	คลื่นไซน์ 1 ลูก
	คลื่นไซน์ 5 ลูก
	คลื่นสามเหลี่ยม 1 ลูก
	คลื่นสามเหลี่ยม 5 ลูก
	สี่เหลี่ยม 1 ลูก
	สี่เหลี่ยม 5 ลูก
	คลื่นไซน์ต่อเนื่อง



3.2 การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด Unconfined compressive Strength (UCS)

การทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive Strength, UCS) ด้วยวิธีความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด มีข้อดีของการทดสอบ เช่น ประหยัดเวลาในการทดสอบรู้ผลการทดสอบ ได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการทดสอบนั้นง่าย แม้ว่าการทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัดจะทำลายตัวอย่างที่ทดสอบก็ตาม ในการทดลองกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ถูกบรรจุในกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและความสูง 100 มิลลิเมตร จากนั้นหล่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจะถูกทดสอบโดยใช้วิธี UCS ตามมาตรฐาน ASTM D1633-17 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด ยี่ห้อCONTROLS รุ่น MULTISPEED 34-V1072 ความคุมอัตราการกดที่ความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อนาทีจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด (UCS)

4. ผลการทดลอง

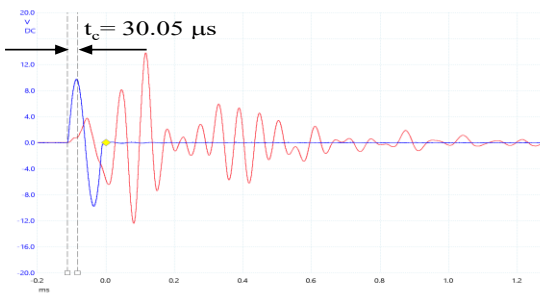
4.1 ผลการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์

จากรูปที่ 5 แสดงเวลาสอบเทียบ t_c เป็น 30.44 ไมโครวินาที ของสัญญาณคลื่นทุติยภูมิแบบไซน์ 1 ลูก โดยนำเซ็นเซอร์ตัวส่งและตัวรับมาชนกันและวัดค่า t_c จากนั้นวัดเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านตัวอย่างดินซีเมนต์ t_s เป็น 381.7 ไมโครวินาที ความยาวของตัวอย่างดินซีเมนต์เป็น 99.196 มิลลิเมตร ดังนั้นความเร็วคลื่นทุติยภูมิสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 เป็น 282.247 เมตรต่อวินาที ตารางที่ 3 ความเร็วคลื่นทุติยภูมิของทุกรูปแบบสัญญาณและมีค่าใกล้เคียงกัน จากสัญญาณไซน์ต่อเนื่องความเร็วคลื่นทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากวิธี cross-correlation ในสมการที่ 3 ซึ่งได้ประมาณ 310-320 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 3 และ 4 ซึ่งแสดงผลการวัดเวลาการเดินทางของคลื่น (t) และความเร็วคลื่น (V_s) ที่ได้จากสัญญาณรูปแบบต่างๆ พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยสัญญาณแบบ คลื่นไซน์ (Sine Wave) ให้ค่าความเร็วคลื่นที่มีความสม่ำเสมอและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dyvik และ Madhus [1] และ Yamashita et al. [14] ซึ่งระบุว่าการใช้สัญญาณคลื่นไซน์แบบ Single pulse จะช่วยลดผลกระทบจากคลื่นสะท้อน (Near-field Effect) ได้ดีกว่าสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous Signal) หรือสัญญาณรูปทรงอื่น ส่งผลให้ค่า V_s ที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำกว่า การทดสอบในงานวิจัยนี้จึงยืนยันได้ว่าการใช้สัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 10 kHz เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบวัสดุดินซีเมนต์ผสมเส้นใยขนไก่การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณคลื่น (Waveform Analysis) จากการทดสอบเปรียบเทียบ

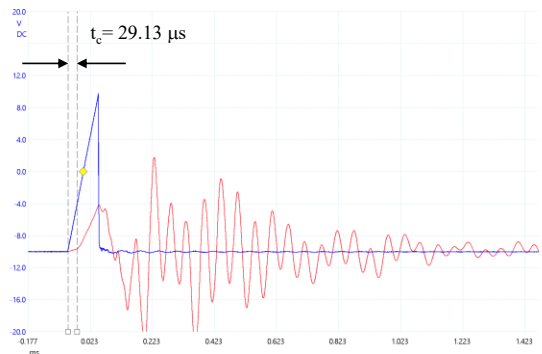


รูปแบบสัญญาณอินพุต (Input Signals) 3 รูปแบบ ได้แก่ คลื่นไซน์ (Sine Wave), คลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) และคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle Wave) ที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6-17 พบว่ารูปแบบสัญญาณมีผลต่อความชัดเจนของการระบุเวลาการเดินทางของคลื่น (Arrival Time) 1. คลื่นไซน์ (Sine Wave) ให้ลักษณะสัญญาณตอบสนองที่ราบเรียบและมีความเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด ทำให้สามารถระบุจุดเริ่มต้นของคลื่นทุกสัญญาณ (First arrival) ได้ง่ายและแม่นยำกว่ารูปแบบอื่น ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์ทั่วไป 2. คลื่นสี่เหลี่ยม

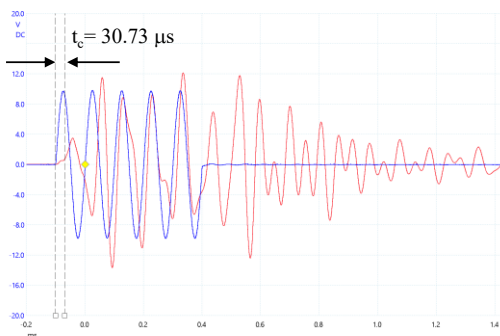
(Square Wave) แม้จะมีพลังงานสูงแต่ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) และการสั่นค้าง (Ringing) ในช่วงต้นของสัญญาณรับ ทำให้การแปลผลเวลาการเดินทางมีความคลาดเคลื่อนได้ง่ายกว่า 3. คลื่นสามเหลี่ยม (Triangle Wave) ให้ผลตอบสนองที่คล้ายคลึงกับคลื่นไซน์แต่มีความชันของหน้าคลื่นที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ คลื่นไซน์ (Sine Wave) เป็นหลักในการคำนวณค่าความเร็วคลื่น (V_s) เนื่องจากให้ความถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงสุดในการทดสอบกับวัสดุดินซีเมนต์



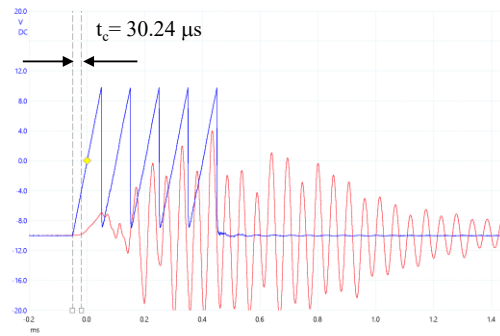
รูปที่ 5 เวลาสอบเทียบสัญญาณไซน์ 1 ลูก



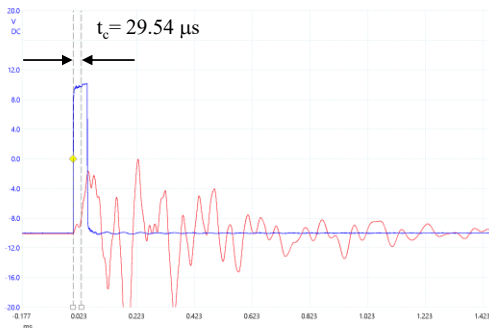
รูปที่ 7 เวลาสอบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม 1 ลูก



รูปที่ 6 เวลาสอบเทียบสัญญาณไซน์ 5 ลูก

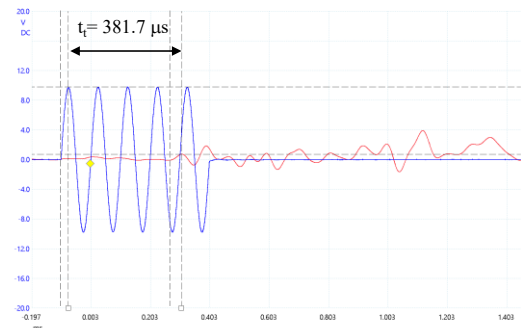


รูปที่ 8 เวลาสอบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม 5 ลูก



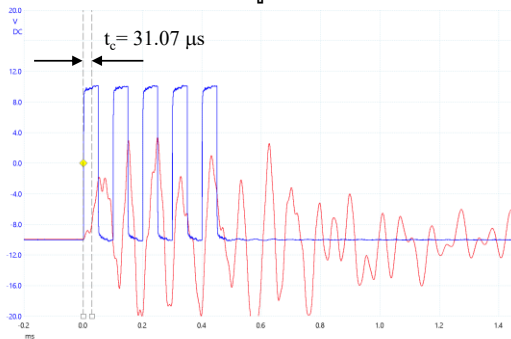
รูปที่ 9 เวลาสอบเทียบสัญญาณสี่เหลี่ยม

1 ลูก



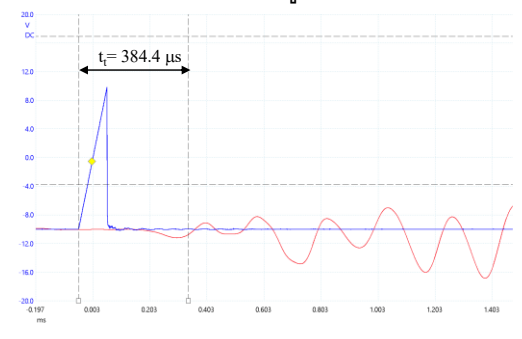
รูปที่ 12 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณไซน์

5 ลูก



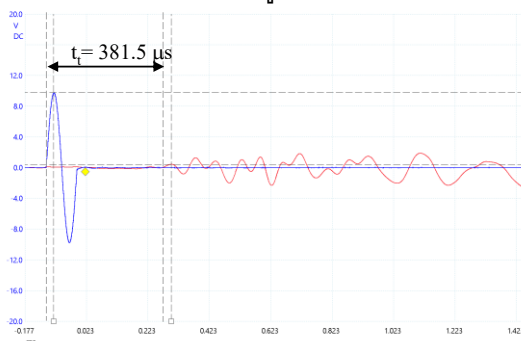
รูปที่ 10 เวลาสอบเทียบสัญญาณสี่เหลี่ยม

5 ลูก

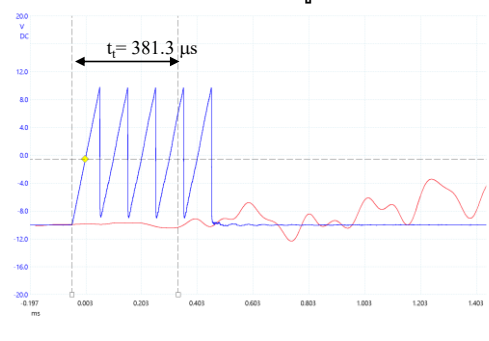


รูปที่ 13 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ

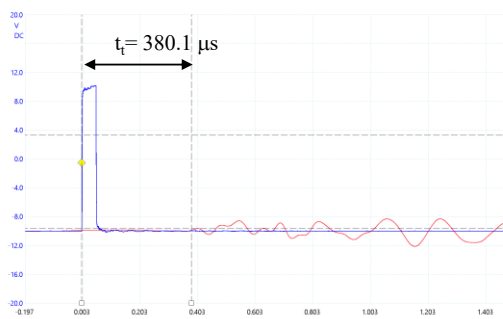
สามเหลี่ยม 1 ลูก



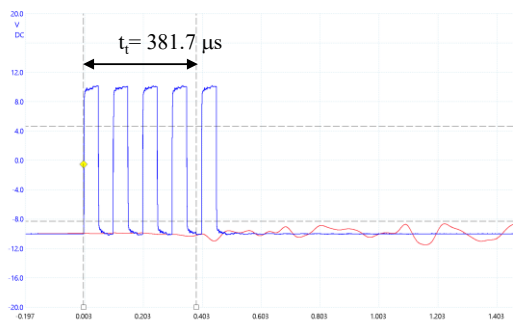
รูปที่ 11 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิ
สัญญาณไซน์ 1 ลูก



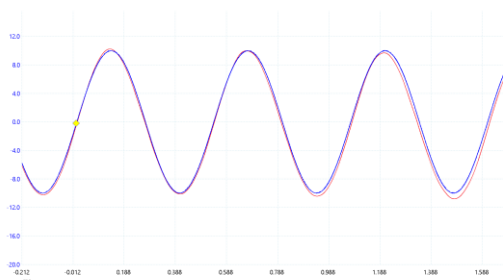
รูปที่ 14 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ
สามเหลี่ยม 5 ลูก



รูปที่ 15 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ
สี่เหลี่ยม 1 ลูก



รูปที่ 16 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ
สี่เหลี่ยม 5 ลูก



รูปที่ 17 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณไซน์
ต่อเนื่อง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเป็นเดือรีอีลีเมนต์

Signals	L (mm)	t_r (μs)	t_c (μs)	t (μs)	V_s (m/s)
ไซน์ 1 ลูก	99.196	381.5	30.05	351.45	282.247
ไซน์ 5 ลูก	99.196	381.7	30.73	350.97	282.634
สามเหลี่ยม 1 ลูก	99.196	384.4	29.13	355.27	279.213
สามเหลี่ยม 5 ลูก	99.196	381.3	30.24	351.06	282.561
สี่เหลี่ยม 1 ลูก	99.196	380.1	29.54	350.56	282.964
สี่เหลี่ยม 5 ลูก	99.196	381.7	31.07	350.63	282.908

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเป็นเดือรีอีลีเมนต์

f (Hz)	λ (m)	V_s (m/s)
622	0.500	311.00
1282	0.250	320.50
1867	0.167	311.17
2583	0.125	322.88
3750	0.083	312.50

4.2 ผลการทดสอบ UCS และการเติมเส้นใยจาก ขนไก่

รูปที่ 18 พบว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) มีค่า
สูงที่สุดที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.5 เนื่องจากเส้นใยขน
ไก่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ช่วยรับ
แรงดึงและช่วยยึดเหนี่ยวเม็ดดิน (Bridging Effect) แต่
เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 0.5 จะส่งผลให้
เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของเส้นใย
ทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดช่องว่าง
(Voids) ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่น
และกำลังรับแรงอัดลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 468.62 kPa
ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ซึ่งเมื่อปริมาณ
เส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.0 และ 1.5 ค่ากำลังรับแรงอัด
กลับมีแนวโน้มลดลง การที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก
เนื่องจากเส้นใยขนไก่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง



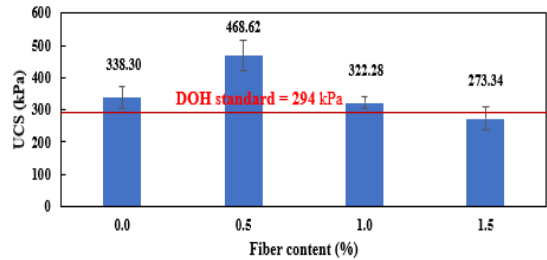
บทความวิจัย

(Reinforcement) ช่วยรับแรงดึงและยึดเหนี่ยวเม็ดดิน (Bridging Effect) แต่เมื่อปริมาณเส้นใยมากเกินไป เกิน 0.5% จะเกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของเส้นใย ทำให้เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงและการยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยทำได้ไม่ทั่วถึง ค่ากำลังจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ที่แสดงให้เห็นช่องว่างในตัวอย่างที่มีเส้นใยปริมาณสูง

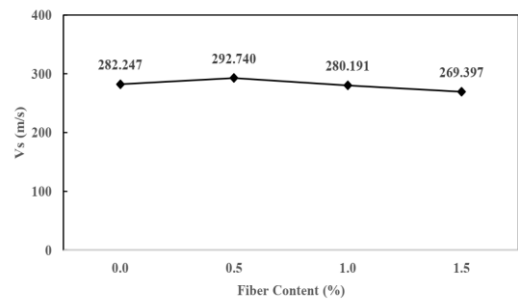
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ UCS

จากรูปที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นทุติยภูมิและค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) R^2 เป็น 0.9156 ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงนี้แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วคลื่นแปรผันตรงกับค่ากำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อวัสดุมีการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์ จะส่งผลให้โครงสร้างภายในมีความหนาแน่นและความแข็งตึง (Stiffness) เพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นเสียงสามารถเดินทางผ่านตัวกลางได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นในตัวกลางยืดหยุ่น ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าเทคนิคเบ็นเดอร์ลีเมนต์สามารถนำมาใช้ทำนายค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเส้นใยขนไก่ได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ สามารถที่จะบ่งชี้ว่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่ากำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ เมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นจะมาก ทำให้คลื่นเดินทางได้เร็วขึ้น ดังสมการที่ 4

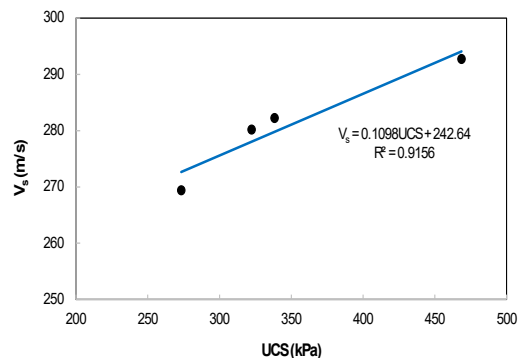
$$V_s = 0.1098UCS + 242.64 \quad (4)$$



รูปที่ 18 ผลการทดสอบ UCS กับปริมาณเส้นใยขนไก่



รูปที่ 19 ผลการทดสอบเบ็นเดอร์ลีเมนต์กับปริมาณเส้นใยขนไก่

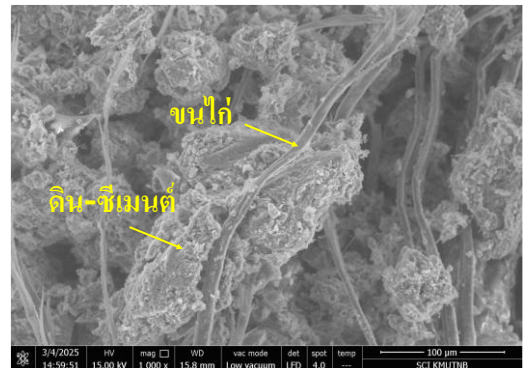


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ UCS



4.4 ผลการทดสอบ SEM

รูปที่ 21 แสดงรูปขยาย 1,000 เท่าเพื่อศึกษา ลักษณะฐานวิทยาและการยึดเกาะระหว่างเส้นใย ชนไก่กับเนื้อดินซีเมนต์ ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 450 ที่กำลังขยาย 1000x โดยนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังแล้วมาเคลือบทอง (Gold coating) ก่อนนำไปส่องดูโครงสร้างภายใน ซึ่งยืนยันได้ว่า ดิน-ซีเมนต์สามารถยึดเกาะเส้นใยธรรมชาติจากชนไก่ได้ดี สอดคล้องกับผลการทดสอบ UCS ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยชนไก่เพิ่มขึ้น โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและซีเมนต์ (Interfacial Bonding Criteria): การพิจารณาประสิทธิภาพการยึดเกาะในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (SEM) โดยสังเกตลักษณะรอยต่อระหว่างผิวเส้นใยและเนื้อดินซีเมนต์ (Interfacial Transition Zone: ITZ) ซึ่งการยึดเกาะที่ดี (Good bonding) พิจารณาจาก 2 ลักษณะหลัก คือ 1. กลไกการยึดเกาะทางกายภาพ (Mechanical Interlocking): ผิวของเส้นใยชนไก่มีความขรุขระตามธรรมชาติ ช่วยเพิ่มแรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อซีเมนต์ ไม่พบร่องรอยการหลุดร่อน (Pull-out) หรือช่องว่าง (Gap) ที่รอยต่ออย่างชัดเจน และ 2. การห่อหุ้มของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ (Cement Hydration Products): พบว่ามีผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เข้ามาเกาะและห่อหุ้มรอบเส้นใยอย่างหนาแน่น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ดีของวัสดุ (Compatibility) ช่วยให้เส้นใยสามารถรับแรงดึงและถ่ายเทหน่วยแรงจากเนื้อดินซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 21 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (SEM) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเส้นใยชนไก่ที่ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร แสดงลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเม็ดดิน 4

5. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกเพื่อประเมินกำลังของวัสดุ ดินซีเมนต์ผสมชนไก่ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (V_s) ได้อย่างแม่นยำและมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) โดยปริมาณเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 0.5 ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดินให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดคือปริมาณเส้นใยที่ไม่ควรเกินร้อยละ 0.5 เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างในเนื้อวัสดุ องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของการใช้เทคนิคคลื่นเสียงความถี่สูงในการตรวจสอบคุณภาพวัสดุก่อสร้างในสนาม (Field Application) ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ประหยัด และไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive) โดยจากผลการวิจัยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

- จากการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกในการวัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิพบว่ารูปแบบของ



สัญญาณไม่มีผลกระทบกับเวลาการเดินทางและความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ อีกทั้งการใช้คลื่นไซน์ต่อเนื่องเพื่อวัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิยังเป็นวิธีใหม่ที่สามารถวัดค่าได้ใกล้เคียง

- จากการทดสอบ UCS แนะนำให้ใช้เส้นใยชนไก่ในปริมาณร้อยละ 0.5 ในดิน-ซีเมนต์ ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ แต่ไม่ควรเพิ่มปริมาณเส้นใยชนไก่เกินร้อยละ 1 เนื่องจากกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานของกรมทางหลวงที่ 294 kPa

- จากการวิจัยพบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นทุติยภูมิและค่ากำลังรับแรงอัด $V_s = 0.1098UCS + 242.64$ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีค่าความคลาดเคลื่อน R^2 เป็น 0.9156

- จากการทดสอบ SEM ยืนยันได้ว่าดิน-ซีเมนต์สามารถยึดเกาะเส้นใยธรรมชาติจากชนไก่ได้ดีสอดคล้องกับผลการทดสอบ UCS ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยชนไก่เพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามเลขที่สัญญาเลขที่ KMUTNB-69-IP-16

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Dyvik and C. Madshus, Lab measurements of Gmax using bender elements, the Geotechnical Engineering Division, Advances in the art of testing soil under cyclic conditions, ASCE, MI, USA, 1985, 186-196.
- [2] K. Piriyaikul, A development of a bender element apparatus, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2010, 20(2), 363-369.
- [3] K. Piriyaikul and N. Thumputi, Using of piezoelectric ceramic sensor to measure the shear wave velocity of Bangkok clay, The Journal of Industrial Technology, 2012, 8(2), 82-89.
- [4] W. Mairaing and C. Amonkul, Soft Bangkok clay zoning, The EIT-Japan Symposium on Engineering for Geo-Hazards: Earthquakes and Landslides-Surface and Subsurface Structures, Proceedings, 2010, 1-10.
- [5] S. Horpibulsuk, S. Shibuya, K. Fuenkajorn and W. Katkan, Assessment of engineering properties of Bangkok clay, Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(2), 73-187.
- [6] S. Pochalard, K. Promsang, C. Wungsumpow and K. Piriyaikul, Enhancement of initial shear modulus in cement and fly ash admixed Bangkok clay out of bender element test, Discover Sustainability, 2025, 6(1), 1-20.
- [7] S. Pochalard, C. Wungsumpow and K. Piriyaikul, Enhancement of compressive strength in cement admixed Bangkok clay with glass fiber and bottom ash for eco-friendly functional road materials, Mechanics of Advanced Composite Structures, 2025, 279-292.



- [8] S. Pochalard, C. Wungsumpow, and K. Piriyaikul, Enhancement on compressive strength of Bangkok clay cement using novel high-strength polyethylene fibers, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Proceedings, 2024, 1335(1), 1-8.
- [9] A. Petcherdchoo, S. Pochalard, and K. Piriyaikul, Use of bender element tests for determining shear modulus of fly-ash and cement admixed Bangkok clay with considering unconfined compressive strength, Case Studies in Construction Materials, 2023, 18, 1-13.
- [10] C. Wungsumpow, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, D. Suanburi and K. Wangyao, Applying electrical resistivity tomography measurement in landfill mining: A study on configuration and spacing setting, Sustainable Energy and Environment (SEE 2018): Technology and Innovation for Global Energy Revolution, Proceedings, 2018.
- [11] H. Ismail and F. L. Chung, Partial replacement of silica by white rice husk ash in natural rubber compounds: The effects of bonding agents, Iranian Polymer Journal, 1998, 7, 255–262.
- [12] Office of Agricultural Economics, Agricultural Economic Situation in 2023 and Outlook for 2024, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand, 2023. (in Thai)
- [13] DRR Standard 244-2567, Standard of Soil Cement Base, 2024. (in Thai)
- [14] S. Yamashita, T. Kawaguchi, Y. Nakata, T. Mikami, T. Fujiwara, and S. Shibuya, Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements, Soils and Foundations, 2009, 49(4), 631-650.



อิทธิพลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อกลไกการอุดตันและการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยเยื่อกรองแบบนาโน

อภิญญา อ่อนสาร* สุพัฒน์พงษ์ มัตราช วิภาดา เดชะปัญญา กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา
สมภพ สหนองราษฎร์ เทียมมะณีย์ รัตนวีระพันธ์ และ อัญญิกา ประหัตทา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: supatpong.m@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 ธันวาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 25 มีนาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน (Nanofiltration, NF) ในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) (10, 20 และ 30 mg/L) ในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) (10 mg/L as NOM) ภายใต้ระบบการไหลแบบตายตัว (dead-end Filtration System) โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ค่าฟลักซ์สารละลายและรูปแบบจำลองการอุดตันของเยื่อกรองด้วยแบบจำลอง Hermia ผลการทดลองพบว่าการรบกวนกันของ Cr^{6+} และ NOM ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อันเนื่องมาจากการสะสมไอออนและการตกตะกอนของสารอินทรีย์ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรอง โดยแบบจำลองของ Cake Filtration Model (CFM) มีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงทดลองมากที่สุด นอกจากนี้การมี NOM ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเกิดชั้นเค้กบนผิวเยื่อกรองและกลไกการผลักทางไฟฟ้า ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของ NOM ต่อพฤติกรรมการอุดตันและประสิทธิภาพการกำจัดของเยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักร่วมกับสารอินทรีย์ได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: โครเมียมเฮกซะวาเลนต์; สารอินทรีย์ธรรมชาติ; เยื่อกรองนาโน; ฟลักซ์; การอุดตัน

Influence of Natural Organic Matter on Fouling Mechanisms and Hexavalent Chromium Removal by Nanofiltration Membranes

Apinya Onsarn*, Supatpong Mattaraj, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka,
Sompop Sanongraj, Tiammanee Rattanaweerapan and Antika Pranudta

Chemical and Environmental Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

* Corresponding author, E-mail: supatpong.m@ubu.ac.th

Received: 7 December 2025; Revised: 25 March 2026; Accepted: 2 June 2026

Online Published: 18 August 2026

Abstract: This research aimed to evaluate the performance of nanofiltration (NF) membranes for the removal of hexavalent chromium (Cr^{6+}) (10, 20 and 30 mg/L) from synthetic wastewater in the presence of natural organic matter (NOM) (10 mg/L as NOM) under a dead-end filtration system. The investigation focused on permeate flux behavior and fouling mechanisms using Hermia's models. The results revealed that the coexistence of Cr^{6+} and NOM resulted in a significantly flux decline, which was attributed to ion accumulation and the deposition of organic matter on the membrane surface, leading to membrane fouling. Among the models, the Cake Filtration Model (CFM) showed the best agreement with the experimental data. In addition, the presence of NOM enhanced the removal efficiency of Cr^{6+} . This improvement can be explained by the formation of a cake layer on the membrane surface and the electrical repulsion mechanism. This study highlights the significant role of NOM in membrane fouling behavior removal performance of nanofiltration membranes. The findings provide useful insights for design and development of appropriate water treatment processes for wastewater containing both heavy metals and natural organic matter.

Keywords: Hexavalent chromium; Natural Organic Matter; Nanofiltration; Flux; Fouling



1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนน้ำและคุณภาพของแหล่งน้ำ เป็นประเด็นที่น่ากังวลในหลายประเทศทั่วโลก ขณะที่ปริมาณน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารมลพิษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากการเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาอุตสาหกรรมและกิจกรรมทางเกษตรกรรม โดยเฉพาะในประเทศที่มีการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ซึ่งการปล่อยสารปนเปื้อนเหล่านี้อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent Chromium, Cr^{6+}) เป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง และมักพบในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม เช่น การชุบโลหะ การผลิตเหล็ก เซรามิก การฟอกหนัง สิ่งทอและแก้ว เป็นต้น โดย Cr^{6+} ที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์สามารถสะสมและก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ การอักเสบของผิวหนัง รวมถึงอวัยวะภายใน อย่างตับและไต [1–3] จากความเป็นพิษดังกล่าว องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) จึงได้กำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของ Cr^{6+} ในน้ำดื่มที่ระดับไม่เกิน 0.05 mg/L [4] ซึ่งสะท้อนถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นแม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นในการสรรหาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัด Cr^{6+} ออกจากน้ำเสีย ปัจจุบันมีวิธีการบำบัดที่หลากหลาย เช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง การดูดซับ การตกตะกอน และการแยกด้วยเยื่อเมมเบรน [5–9] ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน การเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อความคุ้มค่า

และประสิทธิผล ในการจัดการมลพิษจากโครเมียมในน้ำเสียอย่างยั่งยืน

เยื่อกรองนาโน (Nanofiltration, NF) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยม ในการประยุกต์ใช้ทั้งในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม และการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบเยื่อกรองออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) แต่สามารถดำเนินการได้ภายใต้ความดันที่ต่ำกว่า อีกทั้งยังมีความสามารถในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการกำจัดไอออนบวกประจุคู่ (Divalent Cations) และสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) การแยกสารในระบบนาโนฟิลเตรชัน อาศัยหลักการคัดขนาด (Size Exclusion) เป็นกลไกหลักในการกำจัดสารอินทรีย์ ขณะที่การกำจัดสารอนินทรีย์ เช่น ไอออนต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับแรงผลักระหว่างประจุ (Electrostatic Effect) ระหว่างเยื่อกรองและสารละลาย [10] จุดเด่นของเยื่อกรองนาโน ได้แก่ ความสะดวกในการควบคุมระบบ ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของเทคโนโลยีนี้ คือการเกิดการอุดตันของเยื่อกรอง (Membrane Fouling) ซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์หรืออัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อลดลงเมื่อระบบดำเนินการไปตามเวลา การลดลงของค่าฟลักซ์มีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน เข้าสู่ระบบ ตลอดจนสถานะในการดำเนินการกรอง โดยเฉพาะเมื่อมีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ปะปนในน้ำที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่การอุดตันของเยื่อกรองนาโน และยิ่งเมื่อ Cr^{6+} รวมตัวกับสารอินทรีย์ธรรมชาติจะยิ่งเพิ่มความเสี่ยงในการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองมากขึ้นส่งผลทำให้ค่า



ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว การอุดตันนี้อาจเกิดจากความเข้มข้นมากขึ้นทำให้สารมลพิษสะสมบริเวณใกล้ผิวเยื่อกรองและนำไปสู่การเกิดการอุดตันได้ในสองรูปแบบหลัก ได้แก่ การอุดตันบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง (Surface Fouling) ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้ และการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อกรอง (Internal Pore Fouling) ซึ่งบางกรณีอาจทำความสะอาดได้เพียงบางส่วนหรือไม่สามารถทำได้เลย สำหรับกลไกทางคณิตศาสตร์ การเกิด Fouling สามารถจำแนกได้เป็น 4 รูปแบบหลักตามแบบจำลองของ Hermia ได้แก่ (1) Complete Blocking Model (CBM) (2) Standard Blocking Model (SBM), (3) Intermediate Blocking Model (IBM) และ (4) Cake Filtration Model (CFM) [11–12] ซึ่งแต่ละแบบจำลองให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของการอุดตันในสภาวะที่แตกต่างกัน และสามารถใช้ในการวิเคราะห์การลดลงของฟลักซ์เพื่อวางแผนในการดำเนินระบบและทำความสะอาดระบบได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้การพบร่วมกันของ Cr^{6+} และ NOM สามารถพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะในน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะฟอกหนังและสิ่งทอ ซึ่งมีการใช้สารประกอบโครเมียมในการบวนการผลิต และน้ำเสียจากแหล่งดังกล่าวมักถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำผิวดินที่มี NOM อยู่ ทำให้เกิดการปะปนของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในระบบน้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่ง NOM ประกอบด้วยสารจำพวกฮิวมิกและฟุลวิก ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น คาร์บอกซิลและฟีนอลิก ที่สามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับโลหะหนักได้หลายรูปแบบ โดยเฉพาะการเกิดสารเชิงซ้อน ซึ่งปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวนี้มีผลโดยตรงต่อการกำจัดในระบบเยื่อกรอง จากการเกิดสารเชิงซ้อน

สามารถเปลี่ยนแปลงทั้งขนาด รูปร่าง ประจุรวมถึงความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ ส่งผลต่อกลไกการแยกของเยื่อกรอง ได้แก่ การคัดกรองด้วยขนาดและแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต หรือในบางกรณีเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับ NOM ซึ่งอาจช่วยเพิ่มการกักเก็บของเยื่อกรอง เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน NOM ยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้ฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดของระบบลดลงในระยะยาว

ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโนในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ภายใต้ระบบการกรองแบบไหลปิดตาย โดยมุ่งเน้นการศึกษาผลของความเข้มข้นของ Cr^{6+} และ NOM ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดและฟลักซ์เพอร์มีเอท รวมถึงการวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันของเยื่อกรองที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกรองผลที่ได้จากการศึกษานี้คาดว่าจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} จากน้ำเสียสังเคราะห์และ NOM ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 สารเคมีและเยื่อกรอง

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้เป็นสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (Analytical Grade) หรือเกรดสังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เพิ่มเติม สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) จากบริษัท S.P.Y. Science Tech ประเทศไทย, กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 36%, โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH),



โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) จากบริษัท Ajax FineChem ประเทศออสเตรเลีย และกรดซัลฟิวริกโมโนไฮเดรต ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท PubChem ประเทศสหรัฐอเมริกา

สำหรับวัสดุรองที่ใช้ในการทดลอง คือ เยื่อกรองนาโนเชิงพาณิชย์ รุ่น HL4040FM ผลิตโดยบริษัท GE Water & Process Technologies ซึ่งเป็นเยื่อกรองชนิดฟิล์มบาง Thin Film Composite Membrane) ผลิตจากวัสดุพอลิเอไมด์ (Polyamide) มีขนาดรูพรุน อยู่ในช่วง 150–300 ดาลตัน (Da) ให้ประสิทธิภาพ การกำจัดแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ได้สูงถึงร้อยละ 98 ภายใต้อัตราความดัน 100 psig เยื่อกรองสามารถใช้งานได้ ในช่วง pH 3–9 และรองรับกระบวนการทำความสะอาด ในช่วง pH 2–10.5 มีความทนทานต่อคลอรีนได้ในระดับต่ำกว่า 0.1 ppm และสามารถใช้งานภายใต้อัตราความดันดำเนินการกรองระหว่าง 70–300 psig โดยมีความดันสูงสุดที่สามารถทนได้คือ 600 psig

สำหรับเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในการทดลอง โดยได้ตัดเยื่อกรองให้อยู่ในรูปแผ่นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการชุดทดลองระบบการกรองแบบไหลปิดตาย สำหรับในกรณีที่ยังไม่มีการใช้งานแผ่นเยื่อกรองแบบนาโนในทันทีหลังจากการตัดแผ่นเยื่อกรอง จะเก็บรักษาแผ่นเยื่อกรอง โดยแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ที่ความเข้มข้น 1% และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อรักษาและป้องกันการเสื่อมสภาพของแผ่นเยื่อกรอง

2.2 การเตรียมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์และสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) จากสารละลายโพแทสเซียม

ไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) โดยควบคุมความเข้มข้นของ Cr^{6+} ให้อยู่ในระดับ 10, 20 และ 30 mg/L (ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวสอดคล้องกับช่วงความเข้มข้นของโครเมียมที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งอาจมีความเข้มข้นระดับต่ำจนถึงระดับหลายสิบ mg/L นอกจากนี้ยังเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับศึกษาผลความเข้มข้นต่อพฤติกรรม การดูดซับของเยื่อกรอง การลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพ การกำจัดอย่างเป็นระบบ) ภายใต้อัตรา pH 7 และ ปรับสภาพความแรงประจุของสารละลายด้วยโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.01 mol/L น้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ถูกเก็บจากแหล่งน้ำผิวดินภายในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภคภายในพื้นที่มหาวิทยาลัย โดยทำน้ำตัวอย่างจำนวนประมาณ 1,000 L เข้าสู่กระบวนการบำบัดเบื้องต้น เพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอยและความขุ่นด้วยวิธีการกรองแบบลำดับขั้น ตั้งแต่ขนาดรูพรุน 10 μm ไปจนถึง 0.45 μm เพื่อให้ได้สารละลายที่ปราศจากอนุภาคแขวนลอยและตะกอนขนาดใหญ่ สำหรับสาร อินทรีย์ที่มีประจุบวก เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จะถูกปรับสภาพโดยผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ เพื่อแทนที่ด้วยโซเดียมไอออน (Na^+) จากนั้น น้ำตัวอย่างที่มีทั้งสารอินทรีย์ธรรมชาติและสารอนินทรีย์จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้ออสโมซิสผกกลับ เพื่อให้ได้สารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปเข้มข้น โดยได้ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นประมาณ 30 L สำหรับใช้ในการทดลองระบบเยื่อกรองนาโนต่อไป และได้ปรับสภาพให้สารอินทรีย์อยู่ในรูปของโซเดียมคลอไรด์ โดยควบคุมความแรงประจุเท่ากับ



0.01 mol/L สำหรับการทดลองในทุกการทดสอบ สำหรับการคำนวณความแรงประจุ จะพิจารณาตามปริมาณหรือความเข้มข้นรวมของประจุทั้งหมดที่ปรากฏในสารละลาย ตามสมการที่ (1)

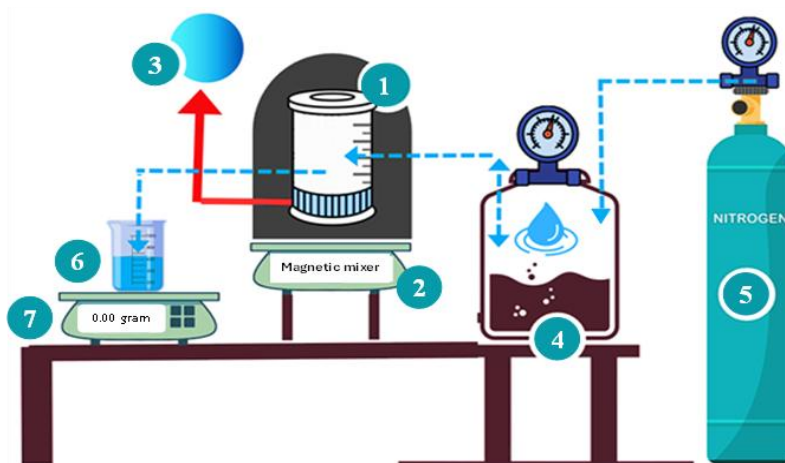
$$I.S. = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 C_i \quad (1)$$

โดยที่ C_i คือความเข้มข้นของไอออน i และ Z_i คือค่าประจุของไอออน i

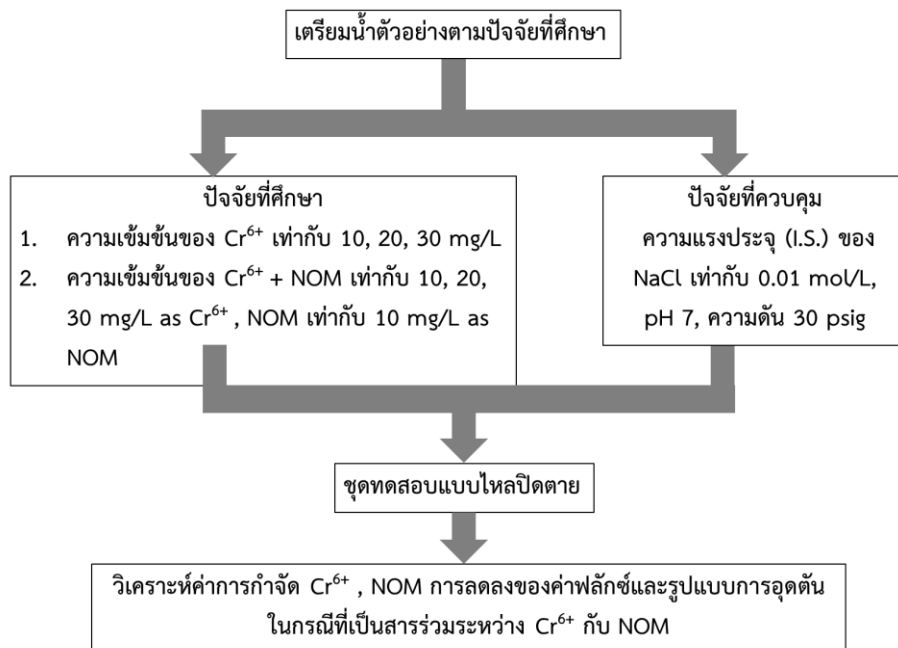
2.3 ชุดทดสอบไหลปิดตาย

รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งและการทำงานของระบบชุดทดลองแบบไหลปิดตาย โดยชุดการทดลองแบบการไหลปิดตาย (หมายเลข 1) ที่ใช้ในการศึกษานี้ มีปริมาตรภายใน 400 mL ภายในติดตั้งใบกวนซึ่งขับเคลื่อนด้วยระบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) (หมายเลข 2) เพื่อสร้างการไหลวนของสารละลายสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการทดลอง แผ่นเยื่อกรอง

นาโนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm (หมายเลข 3) และถูกติดตั้งภายในชุด Stirred Cell ซึ่งสามารถรองรับความดันได้สูงสุดถึง 75 psig สำหรับน้ำตัวอย่างจะถูกบรรจุในถังแรงดันสแตนเลสขนาด 10 L (หมายเลข 4) ซึ่งสามารถทนต่อความดันได้สูงสุด 100 psig โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์ 99%) (หมายเลข 5) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อขับเคลื่อนให้น้ำตัวอย่างไหลผ่านแผ่นเยื่อกรอง กระบวนการกรองนี้ทำให้เกิดน้ำเพอร์มิเอท (Permeate) ซึ่งจะไหลออกจากระบบทดลองและถูกรวบรวมลงในบีกเกอร์ (หมายเลข 6) การวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเยื่อกรองดำเนินการโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลยี่ห้อ Mettler toledo (หมายเลข 7) ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านค่า 2 ตำแหน่งทศนิยม ส่วนแผนผังการดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ร่วมสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองนาโน แสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ชุดระบบการทดลองแบบไหลปิดตาย (Dead-end Filtration System)



รูปที่ 2 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

2.4 ขั้นตอนการทดสอบด้วยชุดการทดลองแบบไหลปิดตาย

ก่อนการทดลองแผ่นเยื่อกรองนาโนจะถูกล้างทำความสะอาดเบื้องต้นด้วยน้ำกลั่น ตามด้วยการติดตั้งในชุดทดสอบและล้างระบบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.001 M อีก 30 นาที ก่อนล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด ภายหลังการทำความสะอาด ระบบจะถูกเดินด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน (DI Water) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการทดลองจริง พร้อมทั้งวัดอัตราการไหลหรือค่าฟลักซ์ของน้ำ DI ภายใต้ช่วงแรงดัน 0–50 psig เพื่อนำไปคำนวณค่าการซึมผ่าน

เริ่มต้นของเยื่อกรอง (Initial Membrane Permeability) ค่าการซึมผ่านนี้จะใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ภายหลังการกรองน้ำตัวอย่าง และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประเมินค่าฟลักซ์ของเยื่อกรองก่อนและหลังการล้าง ภายหลังสิ้นสุดการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง

การทดสอบระบบเยื่อกรองนาโน ได้ใช้น้ำตัวอย่างที่เตรียมโดยการเติมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 10–30 mg/L และสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ความเข้มข้น 10 mg/L พร้อมทั้งเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อควบคุมความแรงประจุของสารละลายเท่ากับ 0.01 mol/L ที่ pH 7 การทดลองดำเนินการภายใต้ความดันคงที่ 30 psig ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยใช้ระบบการไหลปิดตาย



การวิเคราะห์ผลการทดลองประกอบด้วย การวัดค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท (Permeate Flux) ที่ลดลงตามเวลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำเพอร์มีเอทตั้งแต่วันที่ 0 ถึง 240 นาที แบ่งช่วงการเก็บตัวอย่างเป็นทุก 5 นาทีในช่วงเวลา 0–60 นาที ทุก 10 นาทีในช่วงเวลา 60–180 นาที และทุก 20 นาทีในช่วงเวลา 180–240 นาที เพื่อแสดงการลดลงของฟลักซ์ในกระบวนการกรอง ซึ่งการทดลองนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาและทรัพยากร ซึ่งการทดลองในแต่ละเงื่อนไขดำเนินการจำนวน 1 ครั้ง โดยที่ค่าที่ได้จากการทดลองแต่ละจุด ได้จากค่าเฉลี่ยจากการอ่านเครื่องมือหลายครั้ง (Instrumental Repeatability) และมีแนวโน้มของข้อมูลสม่ำเสมอ (Consistent Trend)

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} จะใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเพอร์มีเอท และวัดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Shimadzu Corporation รุ่น UV mini 1240, Japan) คือ 254 นาโนเมตร (UV254) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดสาร NOM โดยการวัด UV absorbance เป็นตัวแทนของสาร NOM ในกลุ่มของอะโรมาติกเป็นหลัก และไม่สามารถแทนค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการดังกล่าว

สำหรับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองสำหรับสารร่วมกันระหว่าง Cr^{6+} และ NOM จะถูกนำไปวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันของเยื่อกรองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia และ Bredée [11] เพื่อระบุการเกิดการอุดตันที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเยื่อกรองนาโน

2.5 สมการที่ใช้วิเคราะห์

การประเมินประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองนาโนด้วยชุดการไหลปิดตาย จะทำโดยการวิเคราะห์ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux; J_v) ถือเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท (Q_p) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง (A_m) ค่าฟลักซ์ที่ได้จะแสดงในหน่วย LMH ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (2)$$

เมื่อ L_p คือ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง [LHM.kPa^{-1}], ΔP คือ ค่าความดันในระบบ [kPa], σ คือค่าสัมประสิทธิ์แรงดันออสโมติก [-], $\Delta \pi$ คือ ค่าแรงดันออสโมติก [kPa], Q_p คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท [L/h], A_m คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง [m^2]

ค่าฟลักซ์สัมพัทธ์ (normalized flux) เป็นดัชนีชี้วัดแนวโน้มการลดลงของฟลักซ์ คำนวณได้จากค่าฟลักซ์สารละลาย ณ เวลาใด (J_v) เทียบกับฟลักซ์สารละลายเริ่มต้น (J_o) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{Normalized Flux} = \frac{J_v}{J_o} \quad (3)$$

ค่าการกักกัน (rejection; R) ใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยเฉพาะ Cr^{6+} และสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบเยื่อกรองนาโนซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\% R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ C_p คือ ความเข้มข้นของน้ำเพอร์มีเอท [mg/L] และ C_f คือ ความเข้มข้นของน้ำรีเทนเนต [mg/L]



สำหรับการวิเคราะห์กลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองนาโน โดยใช้แบบจำลองโมเดลการอุดตันของเฮอร์เมีย [12] ภายใต้ความดันคงที่ เพื่ออธิบายกลไกการลดลงของฟลักซ์ที่เกิดขึ้น โดยมีลักษณะการเกิดทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้ (1) Complete Blocking Model (CBM) เกิดจากอนุภาค อุดตันรูพรุนทั้งหมดโดยไม่ซ้อนทับกัน (2) Intermediate Blocking Model (IBM) เกิดจากอนุภาคซ้อนทับกันภายในผนังรูพรุน (3) Standard Blocking Model (SBM) เกิดจากอนุภาคเกาะบนรูพรุนและพื้นที่ว่างแบบทับซ้อนกันและ (4) Cake Filtration Model (CFM) เกิดจากการสะสมของอนุภาคเป็นเค้กหนา/ชั้นเค้ก ซึ่งแสดงเป็นสมการเชิงเส้นตรงและลักษณะการอุดตันที่เกิดขึ้น ถูกแสดงตามตารางที่ 1

*เมื่อ J_v คือค่าฟลักซ์ของสารละลาย ณ เวลาใด (LMH), J_o คือ ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้น (LMH), t คือ เวลา (hr), K_A คือค่าคงที่ของการเกิดการอุดตันแบบ CBM, K_B คือค่าคงที่ของการเกิดการอุดตันแบบ IBM,

K_C คือค่าคงที่ของการเกิดการอุดตันแบบ SBM และ K_D คือ ค่าคงที่ของการเกิดการอุดตันแบบ CFM

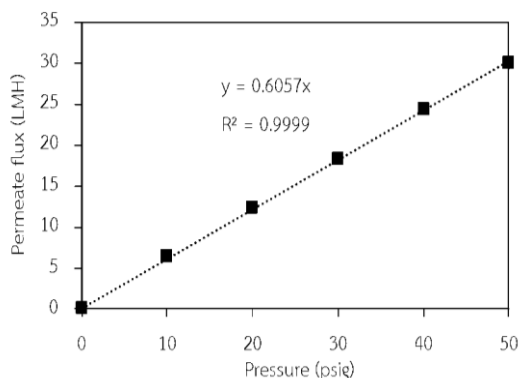
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบระบบเยื่อกรองนาโน

ก่อนเริ่มการทดลองกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน ได้มีการทดสอบเบื้องต้น เพื่อประเมินผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ โดยนำกลั่นปราศจากไอออนเป็นสารละลายต้นแบบ สำหรับการทดสอบนี้ ได้ทำการวัดค่าฟลักซ์หรืออัตราการไหลของน้ำเพื่อมีเอทต่อพื้นที่เยื่อกรอง ภายใต้ความดันที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 psig ผลการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความดันและค่าฟลักซ์สารละลาย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9999 ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 สมการเชิงเส้นตรงด้วยแบบจำลองโมเดลการอุดตันของเฮอร์เมีย

Blocking mechanism	Linearized equation	Fouling mechanisms
complete blocking model (CBM)	$\ln J_v = \ln J_o - K_A t$ (5)	
standard blocking model (SBM)	$1/J_v^{0.5} = 1/J_o^{0.5} + K_B t$ (6)	
intermediate blocking model (IBM)	$1/J_v = 1/J_o + K_C t$ (7)	
cake filtration model (CFM)	$1/J_v^2 = 1/J_o^2 + K_D t$ (8)	



รูปที่ 3 ผลของความดันในระบบต่อค่าฟลักซ์เพอมีเอทของเยื่อกรองนาโน

ผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ความดันของระบบมีผลโดยตรงต่อค่าฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรอง อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์สามารถอธิบายจากสมการที่ (2) โดยไม่ต้องคำนึงถึงแรงดันออสโมติกเนื่องจากน้ำ DI ที่ใช้มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก (น้อยกว่า $3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์เบื้องต้นเนื่องจากค่าอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลต่อแรงดันออสโมติก สมการที่ (2) สามารถลดรูปได้ดังนี้ $J_v = L_p(\Delta P)$ ขณะที่ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง (L_p) คือค่าความชันของกราฟ มีค่าเท่ากับ 0.6057 LMH/psig (0.0878 LMH/kPa)

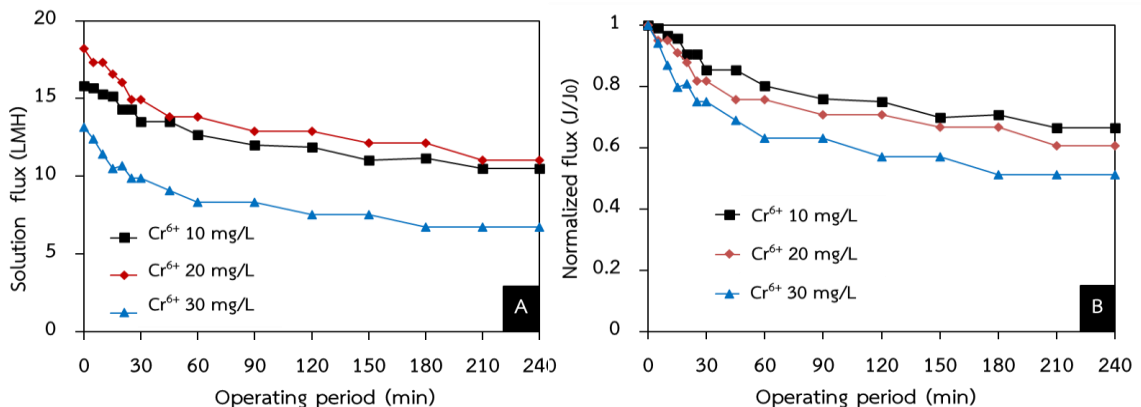
3.2 ผลของความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียมต่อฟลักซ์สารละลาย

ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ของสารละลาย เมื่อใช้งานร่วมกับเยื่อกรองนาโน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองคงที่โดยกำหนดความเข้มข้นของ Cr^{6+} ที่ระดับ 10, 20

และ 30 mg/L ความแรงประจุของสารละลาย NaCl ที่ 0.01 mol/L และค่า pH ที่ 7 พร้อมควบคุมแรงดันคงที่ 30 psig ตลอดจนการทดลอง ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 (A) จากผลการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์สารละลาย มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น โดยในการเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 240 นาที พบว่าค่าฟลักซ์สัมพัทธ์ (J/J_0) (รูปที่ 4 (B)) เท่ากับร้อยละ 66.38 สำหรับความเข้มข้น 10 mg/L , ร้อยละ 60.61 สำหรับความเข้มข้น 20 mg/L และร้อยละ 51.19 สำหรับความเข้มข้น 30 mg/L ตามลำดับ ผลการทดลองนี้สะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไอออนเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและความเข้มข้นของสารโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ปรับความแรงประจุ ทำให้เกิดการสะสมความเข้มข้นของสารละลายบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง [13] ซึ่งเหตุผลข้างต้นนี้ได้นำไปสู่การอุดตันของเยื่อกรอง (Membrane Fouling) และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ ค่าแรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ของระบบสูงขึ้น ส่งผลให้ความต่างของแรงดัน ($\Delta P - \sigma \Delta \pi$) แสดงในสมการที่ (2) ที่มีผลต่อการขับเคลื่อนการกรอง (Effective Transmembrane Pressure) ลดลง ในขณะที่ความดันที่ใช้ในการทดลองจะถูกควบคุมให้อยู่ในระดับคงที่ อีกทั้งแรงดันออสโมติกที่สูงขึ้น ยังมีผลต่อการลดแรงผลักไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวเยื่อกรองกับไอออนในสารละลาย [14] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกรองโดยรวมของระบบการกรองแบบ Cross-flow Filtration



บทความวิจัย



รูปที่ 4 (A) ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อค่าฟลักซ์สารละลาย, (B) ผลของค่าฟลักซ์สัมพัทธ์ (J/J_0) ต่อค่าฟลักซ์สารละลาย

3.3 ผลของความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ต่อค่าการกำจัด

ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้งานร่วมกับเยื่อกรองนาโน แสดงดังรูปที่ 5 (A) ซึ่งแสดงร้อยละของการกำจัด Cr^{6+} ภายใต้ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 10, 20 และ 30 mg/L ผลการทดลองพบว่าเยื่อกรองนาโนสามารถกำจัด Cr^{6+} ได้สูงสุดร้อยละ 81.09, 84.84 และ 89.62 ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 mg/L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าการกำจัด Cr^{6+} อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน (92.31–95.21%) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [15–16] อย่างไร ก็ตาม ความแตกต่างของค่าการกำจัดอาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น การมีอยู่ของ NOM ซึ่งสามารถเกิดชั้นเค้กและเพิ่มการกักเก็บแบบ Secondary Rejection รวมถึงความแตกต่างของชนิดเยื่อกรองและสถานะที่ใช้ทดลอง ดังนั้นผลการศึกษา

จึงมีความสอดคล้องกับแนวโน้มในวรรณกรรม และยืนยันบทบาทของกลไกการแยกด้วยเยื่อกรองแบบนาโนในการกำจัดโลหะหนัก โดยเฉพาะเมื่อมีสารอินทรีย์ร่วมด้วยทั้งนี้ค่าการกำจัดที่เพิ่มขึ้นอธิบายได้จากการลดแรงผลักประจุ อันเนื่องมาจากการรวมตัวกัน ของประจุบวกและประจุลบภายในโครงสร้างของเยื่อกรองนาโน ส่งผลให้เกิดการสะสมของไอออนบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองมากขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มสูงขึ้น [17] อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองนี้แตกต่างจากรายงานของ [18–21] ที่ระบุว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ Cr^{6+} ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง จากการไหลของสารละลายตั้งต้น ผ่านผิวเยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งก่อให้เกิดการสร้างชั้นสะสมบริเวณผิวของเยื่อกรอง เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{6+} ในถังฟีดสูงขึ้นทำให้ความหนาของชั้นสะสมดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization ซึ่งจำกัดการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง และเป็นสาเหตุ

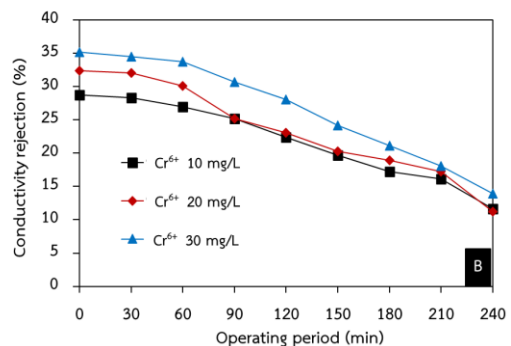
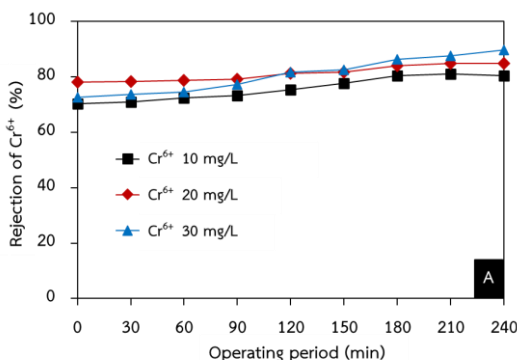


บทความวิจัย

สำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงตามลำดับ [18] ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากความแตกต่างด้านชนิดของเยื่อกรอง องค์ประกอบของสารละลาย และสภาวะการดำเนินงาน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการทำความเข้าใจการก่อกำจัดสารภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายของกระบวนการกรอง

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการก่อกำจัดเมื่อพิจารณาการนำไฟฟ้าด้วยเยื่อกรองนาโน ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 5 (B) ผลการทดลองพบว่าเยื่อกรองนาโนสามารถก่อกำจัด Cr^{6+} ได้แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น โดยที่ความเข้มข้น 10 mg/L มีค่าการก่อกำจัดร้อยละ 11.65–28.76, ความเข้มข้น 20 mg/L อยู่ในช่วงร้อยละ 11.22–32.41 และที่ 30 mg/L อยู่ในช่วงร้อยละ 13.90–35.22 โดยผลการทดลองพบว่าร้อยละการก่อกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการกรอง อาจเนื่องมาจากการสะสมความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์จากความ

แรงประจุที่เกิดการสะสม ที่ผิวของเยื่อกรอง ทำให้ประจุของโซเดียม (Na^+) ไหลผ่านเยื่อกรองนาโนได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามประจุ Cr^{6+} มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการกรอง ความแตกต่างดังกล่าวอธิบายได้จากแรงผลักระหว่างประจุบนผิวเยื่อกรองกับไอออนในสารละลาย ซึ่งเป็นกลไกที่เรียกว่า Donnan Exclusion การส่งผ่าน ของไอออนในกระบวนการกรองนาโนสามารถอธิบายได้ด้วยสองกลไกหลัก ได้แก่ (1) การพา (Convection) ซึ่งทำให้อนุภาคหรือไอออนที่มีขนาดใหญ่ ถูกกักเก็บได้มากขึ้นตามข้อจำกัดทางกายภาพ ของรูพรุนเยื่อกรอง และ (2) การละลายและการแพร่ (Solution-diffusion) ซึ่งทำให้ไอออนขนาดเล็กแพร่ผ่านได้ง่ายกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมี ของสารละลายและเยื่อกรอง กลไกทั้งสองนี้สะท้อนให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการก่อกำจัด Cr^{6+} ของเยื่อกรองนาโนขึ้นอยู่กับขนาดของไอออนและปฏิสัมพันธ์ทางไฟฟ้าสถิตภายในเยื่อกรอง [22]



รูปที่ 5 (A) ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการก่อกำจัด, (B) ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการก่อกำจัดเมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า



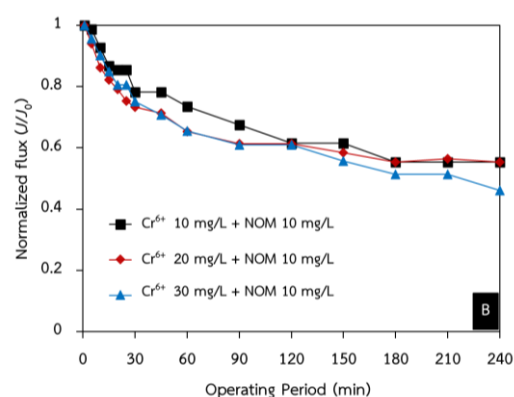
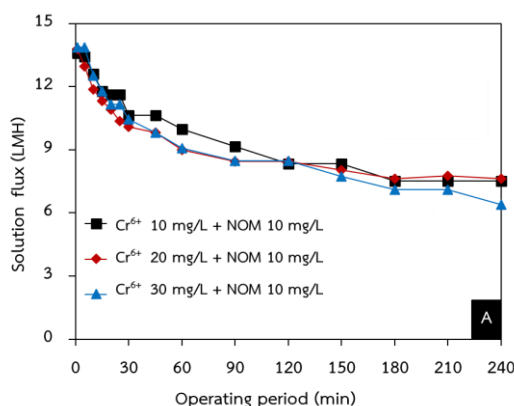
3.4 ผลของความเข้มข้น Cr^{6+} ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อฟลักซ์สารละลาย

ผลการศึกษาของความเข้มข้น Cr^{6+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อค่าฟลักซ์สารละลาย แสดงดังรูปที่ 6 ภายใต้การเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 240 นาที พบว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายลดลงอย่างชัดเจน โดยฟลักซ์สัมพัทธ์ (J/J_0) ลดลงคิดเป็นร้อยละ 55.42, 55.45 และ 46.02 สำหรับ Cr^{6+} ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ผลรวมของ NOM (ที่ความเข้มข้น 10 mg/L) ส่งผลให้ค่า ฟลักซ์ลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการอินทรีย์ธรรมชาติผสม ซึ่งบ่งชี้ว่าการลดลงของฟลักซ์ไม่ได้เกิดจากการสะสมของ Cr^{6+} ที่ผิวเยื่อกรองเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากการที่สารอินทรีย์ธรรมชาติสะสมบนผิวเยื่อกรองหรือแทรกตัวเข้าไปอุดตันรูพรุนของเยื่อกรอง ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำลดลง และเกิด การอุดตันบนพื้นผิวเยื่อกรองนาโน อันเป็นสาเหตุให้ฟลักซ์ลดลงอย่างมี

นัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติตั้งแต่ 0 ถึง 25 mg/L ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์สารละลาย เนื่องจากการเพิ่มแรงต้านของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่สะสมบนผิวของเยื่อกรองนาโน [23]

3.5 ผลของความเข้มข้น Cr^{6+} ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อค่าการกำจัด

ผลของความเข้มข้น Cr^{6+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} , ค่าการนำไฟฟ้าและ NOM รูปที่ 7 (A) แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยพบว่าเยื่อกรองนาโนสามารถกำจัด Cr^{6+} ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยมีค่าการกำจัดสูงสุดร้อยละ 92.31, 94.71 และ 95.21 ที่ความเข้มข้นของ Cr^{6+} เท่ากับ 10, 20 และ 30 mg/L ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการมี NOM ร่วมในสารละลาย มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} โดยกลไกที่อธิบายได้คือ

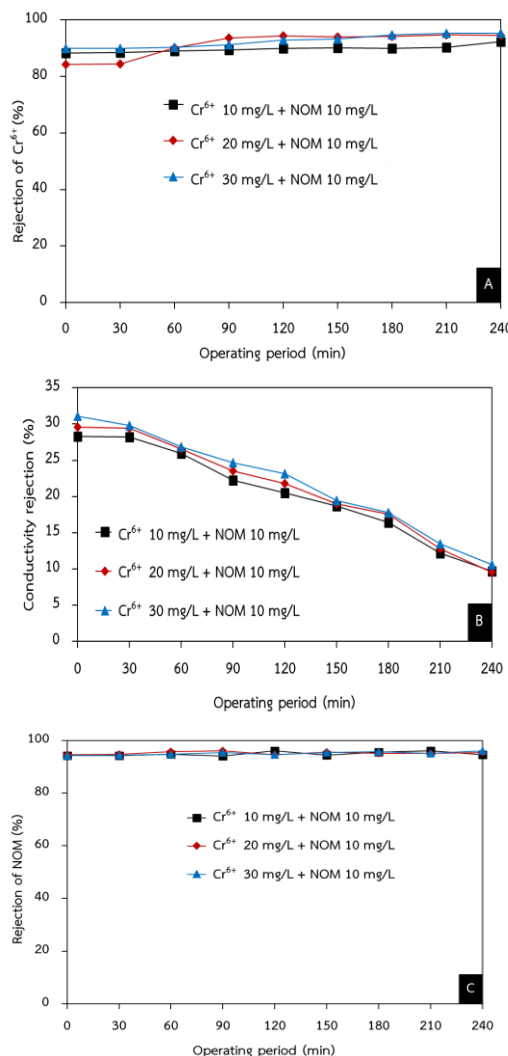


รูปที่ 6 (A) ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อค่าฟลักซ์สารละลาย, (B) ผลของค่าฟลักซ์สัมพัทธ์ (J/J_0) ต่อค่า ฟลักซ์สารละลาย



บทความวิจัย

การเกิด Complexation ระหว่าง Cr^{6+} กับ NOM โดยที่ NOM สามารถเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์กับโลหะหนักผ่านหมู่ฟังก์ชัน เช่น Carboxyl และ Phenolic Groups ส่งผลให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งอาจลดหรือเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด โดยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของระบบ การทดลอง อีกทั้งโมเลกุลของ NOM ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองนาโน ถูกกักเก็บบนผิวเยื่อกรองจนก่อให้เกิดชั้นเจลหรือเค้ก (Gel Layer หรือ Cake Layer) ทำหน้าที่เสมือนชั้นกรองเสริม ช่วยดักจับ Cr^{6+} ที่เหลืออยู่ในสารละลาย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มสูงขึ้น แม้ว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จะลดลงก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการอินทรีย์ธรรมชาติร่วมด้วย รูปที่ 7 (B) แสดงค่าการกำจัดเมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้าการทดลองพบว่าค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 9.67–28.30, 9.56–29.56 และ 10.61–31.06 ที่ความเข้มข้นของ Cr^{6+} เท่ากับ 10, 20 และ 30 mg/L ตามลำดับ ในระหว่างการกรองจะเกิดการสะสมไอออน Cr^{6+} และประจุโซเดียม (Na^+) (จากการปรับค่าความแรงประจุ) บนผิวของเยื่อกรอง จากการกักเก็บ NOM บนผิวเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นกลไก ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวของเยื่อกรอง อย่างไรก็ตาม การสะสมความเข้มข้นของประจุเดี่ยวโซเดียมสามารถแพร่ผ่านเยื่อกรองได้ง่ายกว่าไอออน Cr^{6+} ทำให้ค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าลดลงตามช่วงเวลาการกรอง นอกจากนี้ยังเป็นการรักษาสมดุลของประจุ (Charge Balance) ในน้ำเพอร์มิเอท



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดของเยื่อหุ้มนาโนกรองโครเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ: (A) ค่าการกำจัดเยื่อหุ้มนาโนกรองโครเมียม, (B) ค่าการกำจัดเมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า และ (C) คือค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ



ทั้งนี้ จึงสรุปได้ว่า การมี Cr^{6+} ในระดับความเข้มข้นสูงร่วมกับ NOM ภายใต้สภาวะการกรองที่เหมาะสม สามารถเพิ่มค่าการกำจัดสารปนเปื้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการกำจัด NOM แสดงดังรูปที่ 7 (C) พบว่าเยื่อกรองนาโนสามารถกำจัด NOM ได้ในระดับสูงมาก โดยมีค่าการกำจัดสูงสุดร้อยละ 96.01, 96.01 และ 96.00 ที่ความเข้มข้นของ Cr^{6+} เท่ากับ 10, 20 และ 30 mg/L ตามลำดับ กลไกหลัก ที่ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงดังกล่าวคือการคั่งขนาด เนื่องจากโมเลกุลของ NOM มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรอง จึงไม่สามารถผ่านเข้าไปในเมมเบรนและถูกกักเก็บบนผิว ส่งผลให้เกิดการแยก NOM ออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สาร NOM ซึ่งมีประจุเป็นลบสามารถเปลี่ยนประจุของเยื่อกรอง ส่งผลโดยตรงต่อกลไก Donnan exclusion โดยการเพิ่มแรงผลักระหว่างเยื่อกรองและไอออน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นในบางกรณี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยพบว่าค่าการกำจัดของ NOM ด้วยเยื่อกรองนาโนจากการดำเนินระบบด้วย bench-scale crossflow อยู่ในช่วงร้อยละ 94.90 ถึงร้อยละ 97.60 จากการเพิ่มความเข้มข้น NOM จาก 5 ถึง 25 mg/L [24]

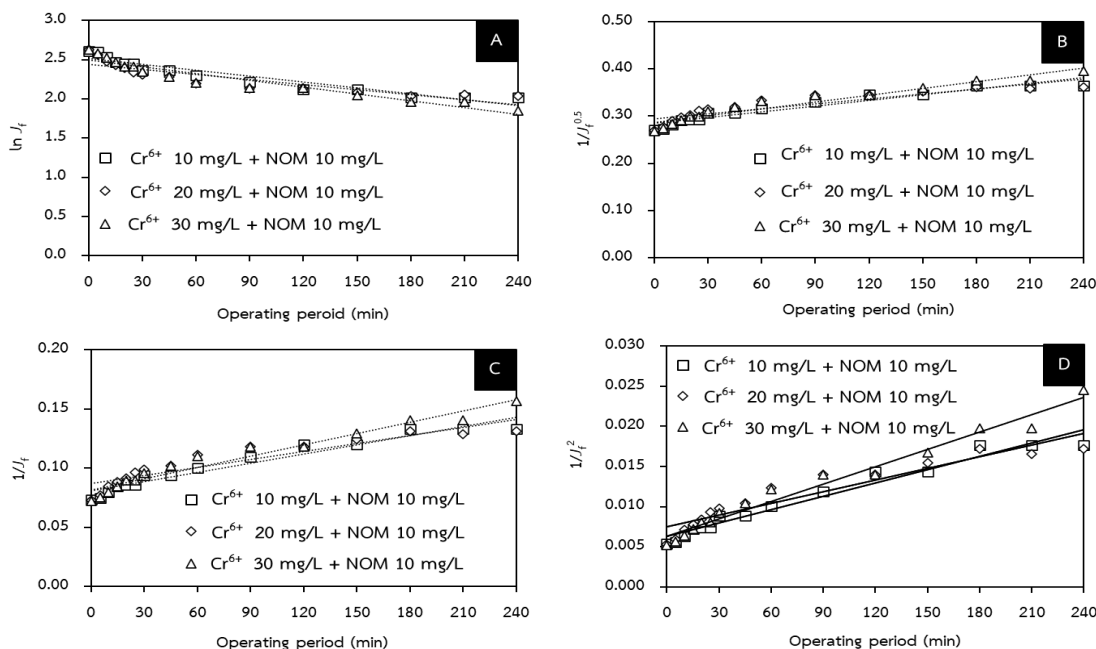
3.6 การดูดซับบนเยื่อกรองนาโนด้วยแบบจำลองโมเดลการดูดซับของเฮอริเมีย

การวิเคราะห์รูปแบบการดูดซับของเยื่อกรองนาโนโดยอาศัยแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ของ Hermia โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของน้ำเพอร์มิเอทที่ได้จากการทดลองภายใต้สภาวะที่มีการปรากฏร่วมกันของ Cr^{6+} และ NOM ในแต่ละช่วงเวลาเข้าสู่สมการของแบบจำลองโมเดลการดูดซับ เพื่อระบุลักษณะการ

ดูดซับที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองโมเดลการดูดซับของ Hermia แสดงในรูปที่ 8 และผลการเปรียบเทียบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (R^2) แสดงในตารางที่ 2

จากการวิเคราะห์ โดยการประยุกต์ใช้ทั้งสี่แบบจำลองโมเดลการดูดซับกับข้อมูลการทดลอง พบว่ารูปแบบการดูดซับแบบเกิดขึ้นแค่ก ให้ค่าความสัมพันธ์ (R^2) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นในทุกกรณี สำหรับสารละลาย Cr^{6+} ที่ 10 mg/L + NOM 10 mg/L พบว่าแบบจำลองนี้ ให้ค่า $R^2 = 0.9606$ ซึ่งสูงกว่าค่าของ CBM, SBM, และ IBM ที่มีค่า $R^2 = 0.9057, 0.9239$ และ 0.9391 ตามลำดับ ในกรณีของ Cr^{6+} 20 mg/L + NOM 10 mg/L พบว่าค่า $R^2 = 0.8913$ แม้ว่าจะมีการลดลงเล็กน้อยแต่ก็ยังสูงกว่าทุกแบบจำลอง และสำหรับ Cr^{6+} 30 mg/L + NOM 10 mg/L พบว่า $R^2 = 0.9742$ ซึ่งสูงที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสอดคล้องของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ และแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการดูดซับแบบเกิดขึ้นแค่กเป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับของเยื่อกรองได้อย่างแม่นยำที่สุดภายใต้สภาวะที่มีการปรากฏร่วมกันของ Cr^{6+} และ NOM นอกจากนี้ การเพิ่มความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในระบบยังส่งผลให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวเยื่อกรองมากขึ้นในลักษณะของการก่อตัวเป็นชั้นแค้บนผิวของเยื่อกรอง ซึ่งสอดคล้องกับกลไกของการดูดซับ ในลักษณะนี้ และสะท้อนถึงพฤติกรรมของการดูดซับที่เด่นชัด ในระบบที่มีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ธรรมชาติร่วมกัน



รูปที่ 8 การวิเคราะห์การดูดซับโดยผลร่วมระหว่าง Cr^{6+} กับ NOM ที่ค่า pH = 7, I.S. ของ NaCl = 0.01 mol/L ที่ความดัน 30 psig โดยที่มีลักษณะของการดูดซับแบบ; (A) CBM, (B) SBM, (C) IBM และ (D) CFM

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองโมเดลการดูดซับของเฮอร์เมีย

Solutions (mg/L)	Regression Coefficient, R^2			
	CBM	SBM	IBM	CFM
Cr^{6+} 10 mg/L + NOM 10 mg/L	0.9057	0.9239	0.9391	0.9606
Cr^{6+} 20 mg/L + NOM 10 mg/L	0.7958	0.8236	0.8488	0.8913
Cr^{6+} 30 mg/L + NOM 10 mg/L	0.9087	0.9334	0.9528	0.9742

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโนในการกำจัด Cr^{6+} ร่วมกับ NOM และการวิเคราะห์แบบจำลองโมเดลการดูดซับของเยื่อกรองภายใต้ระบบไหลปิดตาย สามารถสรุปผลที่ได้ดังนี้

1. ความดันกับค่าฟลักซ์ (Flux) พบว่าค่าฟลักซ์เพอมีเอทเพิ่มขึ้นตามความดันในการดำเนินระบบที่สูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในระดับสูงมาก ($R^2 = 0.9998$) สะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความดันและค่าพารามิเตอร์การซึมผ่านของเยื่อกรองในสภาวะปราศจากแรงดันออสโมติก

2. ผลของความเข้มข้น Cr^{6+} และ NOM ต่อ ฟลักซ์สารละลาย พบว่าค่าฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นของ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมี NOM ร่วมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Concentration Polarization และการสะสมของสารบนผิวเยื่อกรอง

3. ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} และ NOM พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ Cr^{6+} ส่งผลต่อค่าการกำจัดสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 30 mg/L สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้สูงสุดถึงร้อยละ 89.62 ขณะที่การมี NOM ทำให้ค่าการกำจัดได้ค่าสูงสุดถึงร้อยละ 95.21 สำหรับ NOM เอง เยื่อกรองนาโนสามารถกำจัดได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ในทุกสภาวะที่ทดสอบ ซึ่งเกิดจากกลไกการคัตขนาด

4. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการดูดตันของเยื่อกรองนาโนของ Hermia ทั้ง 4 รูปแบบ พบว่า รูปแบบการดูดตันแบบเค้กให้ค่าความสอดคล้องสูงที่สุด ($R^2 \sim 0.8913-0.9742$) ในทุกกรณีของการทดสอบระหว่าง Cr^{6+} และ NOM ซึ่งให้เห็นว่า การดูดตันส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของสารเกิดเป็นชั้นเค้กบนผิวเยื่อกรองนาโน

5. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในอนาคตควรมีการทำซ้ำการทดลองและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล รวมถึงขยายช่วงสภาวะการทดลองและการศึกษากับน้ำเสียจริง เพื่อให้ใกล้เคียงการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น นอกจากนี้ควรมีการทดสอบระยะยาวและศึกษากลไกการดูดตันเพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนพัฒนาใช้กับระบบการกรองแบบ Crossflow เพื่อลดการอุดตันและการออกแบบกระบวนการล้างอย่างเหมาะสมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Danouche, N.E. Ghachtouli and H.E. Arroussi, Phycoremediation mechanisms of heavy metals using living green microalgae: physicochemical and molecular approaches for enhancing selectivity and removal capacity, *Heliyon*, 2021, 7(7), e07555.
- [2] D. Vishnu and B. Dhandapani, Integration of *Cynodon dactylon* and *Muraya koenigii* plant extracts in amino-functionalized silica-coated magnetic nanoparticle as an effective sorbent for the removal of chromium(VI) metal pollutants, *IET Nanobiotechnology*, 2020, 14(6), 449–456.
- [3] D. Vishnu, A. Rajendran and B. Dhandapani, A potent insight into the microalgal and surface-modified magnetic microalgal biomass synthesis and treatment strategies in the removal of selenium and chromium metal ions, *Energy Ecology and Environment*, 2024, 9(2), 113–129.



- [4] A. Zhitkovich, Chromium in drinking water: Sources, metabolism, and cancer risks, Chemical Research in Toxicology, 2011, 24(10), 1617–1629.
- [5] X. Li, Y. Wang and J. Chen, Adsorptive removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using modified biochar: Kinetics and mechanisms, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(4), 104131.
- [6] J. Zhang, G. Yuan, H. Wang, J. Wu, G. Yang and K. Zhou, Resource utilization of waste masks in simultaneous high efficient removal of Light Green SF and Cr(VI) via microwave catalytic technology, Separation and Purification Technology, 2024, 330, 125523.
- [7] E.M. Saad, I.S. Butler and S.I. Mostafa, Adsorption of reduced chromium(VI) ions by vitamin C tablets onto a tellurato-functionalized cellulose derivative and its composite with cyanobacteria green algae in aqueous media, Environmental Progress and Sustainable Energy, 2021, 40(4), e13608.
- [8] H. Wang, W. Wang, S. Zhou and X. Gao, Adsorption mechanism of Cr(VI) on woody-activated carbons, Heliyon, 2023, 9(2), e13267.
- [9] Y. Ibrahim, V. Naddeo, F. Banat and S.W. Hasan, Preparation of novel polyvinylidene fluoride (PVDF)-tin(IV) oxide (SnO_2) ion exchange mixed matrix membranes for the removal of heavy metals from aqueous solutions, Separation and Purification Technology, 2020, 250, 117250.
- [10] M. Thanuttamavong, K. Yamamoto, J.I. Oh, K.H. Choo and S.J. Choi, Rejection characteristics of organic and inorganic pollutants by ultra low-pressure nanofiltration of surface water for drinking water treatment, Desalination, 2002, 145(1–3), 257–264.
- [11] P.H. Hermans, Principles of the mathematical treatment of constant-pressure filtration, Journal of the Society of Chemical Industry, 1936, 55, 1–10.
- [12] W.R. Bowen and J.S. Welfoot, Modelling the performance of membrane nanofiltration—critical assessment and model development, Chemical Engineering Science, 2002, 57(7), 1121–1137.
- [13] L.G. Peeva, E. Gibbins, S.S. Luthra, L.S. White, R.P. Stateva and A.G. Livingston, Effect of concentration polarisation and osmotic pressure on flux in organic solvent nanofiltration, Journal of Membrane Science, 2004, 236(1–2), 121–136.

- [14] P. Hongthong, S. Mattaraj and R. Jiraratananon, Effects of solution pH and ionic strength for removal of combined natural organic matter and copper (II) ion by membrane nanofiltration, *Applied Environmental Research*, 2013, 34(2), 39–56.
- [15] N. Hilal, H. Al-Zoubi, N.A. Darwish, A.W. Mohammad and M. Abu Arabi, A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy, *Desalination*, 2004, 170(3), 281–308.
- [16] M. Owlad, M.K. Aroua, W.A.W. Daud and S. Baroutian, Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review, *Water, Air, & Soil Pollution*, 2009, 200, 59–77.
- [17] J.E. Kilduff, S. Mattaraj, J.P. Pieracci and G. Belfort, Photochemical modification of poly (ether sulfone) and sulfonated poly (sulfone) nanofiltration membranes for control of fouling by natural organic matter, *Desalination*, 2000, 132(1–3), 133–142.
- [18] G. Zolfaghari and M. Kargar, Nanofiltration and microfiltration for the removal of chromium, total dissolved solids, and sulfate from water, *MethodsX*, 2019, 6, 549–557.
- [19] M. Muthukrishnan and B.K. Guha, Effect of pH on rejection of hexavalent chromium by nanofiltration, *Desalination*, 2008, 219(1–3), 171–178.
- [20] A. Hafiane, D. Lemordant and M. Dhahbi, Removal of hexavalent chromium by nanofiltration, *Desalination*, 2000, 130(3), 305–312.
- [21] B. Van der Bruggen and C. Vandecasteele, Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: Overview of possible applications in the drinking water industry, *Environmental Pollution*, 2003, 122(3), 435–445.
- [22] A. Lhassani, M. Rumeau, D. Benjelloun and M. Pontie, Selective demineralization of water by nanofiltration: Application to the defluorination of brackish water, *Water Research*, 2001, 35(13), 3260–3264.
- [23] J.E. Kilduff, S. Mattaraj and G. Belfort, Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: Effects of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation, *Journal of Membrane Science*, 2004, 239(1), 39–53.
- [24] C. Jarusutthirak, S. Mattaraj and R. Jiraratananon, Factors affecting nanofiltration performances in natural organic matter rejection and flux decline, *Separation and Purification Technology*, 2007, 58, 68–75.



การประยุกต์ใช้วิศวกรสังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีในระดับท้องถิ่น: กรณีศึกษาเรื่องการจัดการพืชอาหารสัตว์สำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงโค

วีรชัย มัญญารักษ์¹ และ อีรเมธ สงทอง^{2*}

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

² สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Theeramate.so@skru.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 1 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรสังคมในการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโคให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงโคในท้องถิ่น กรณีศึกษา เกษตรกรผู้เลี้ยงโค ตำบลพะวง และตำบลเกาะแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรสังคมเพื่อสรุปปัญหาและแนวทางแก้ไขโดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องมือวิศวกรสังคม 5 ชนิด ได้แก่ ฟ้ำปะทาน , นาฬิกาชีวิต , ไทม์ไลน์พัฒนาการ, Timeline กระบวนการ และ M.I.C. Model โดยประยุกต์ใช้ควบคู่กับเครื่องมือคุณภาพ (Quality tools) ได้แก่ ใบตรวจสอบแผนภูมิพาเรโต และผังก้างปลา ในการสรุปข้อมูลและประเด็นปัญหา แบบประเมินดัชนีความผิดปกติ (AI) เพื่อประเมินปัญหาสุขภาพ และแบบประเมินการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์ที่สร้าง ผลการศึกษาพบปัญหาการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค รวมถึงปัญหาสุขภาพที่มีความเกี่ยวข้องกับการเลี้ยงโค โดยมีค่าดัชนีความผิดปกติ (AI) เท่ากับ 2.46 หมายถึงต้องเอาใจใส่ ระวังระวัง ในการทำงาน จากการประยุกต์ใช้เครื่องมือวิศวกรสังคมที่พบปัญหานำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค โดยการถ่ายทอดความรู้ การปลูกหญ้าเนเปียร์ที่ทดแทนหญ้าธรรมชาติที่ขาดแคลน การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ที่ทดแทนแรงงานคน ผลการประเมินเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ จากผู้เชี่ยวชาญ/ผู้ชำนาญการ 5 ด้าน คือ ด้านประสิทธิภาพ ด้านการใช้งาน ด้านความปลอดภัย ด้านคุณภาพของหญ้า และด้านความคุ้มค่าและความยั่งยืน โดยรวมมีค่าเฉลี่ย 4.30 ซึ่งอยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดที่สามารถนำไปใช้แทนแรงงานคนในการหั่นหญ้า จากการประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรสังคมช่วยเสริมสร้างทักษะชีวิต (Soft Skills) ที่จำเป็นให้นักศึกษาในศตวรรษที่ 21 ให้เกิดทักษะการเป็นนักคิด นักสื่อสาร นักประสานงาน และนักสร้างนวัตกรรมชุมชน ตามกระบวนการพัฒนาทักษะวิศวกรสังคม

คำสำคัญ: วิศวกรสังคม; เทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น; การเลี้ยงโค; เครื่องย่อยหญ้า

Applying Social Engineering for Localized Technology Development: A Case Study in Forage Management for Cattle Farmers

Weerachai Madtharak¹ and Theeramate Songthong^{2*}

¹ Industrial Management Technology, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

² Production Technology, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: Theeramate.so@skru.ac.th

Received: 16 October 2025; Revised 1 May 2026; Accepted: 2 June 2026

Online Published: 19 August 2026

Abstract: This study applies the social engineering concept to localize technology and enhance forage management for cattle farmers in Pawong and Ko Tao Sub-districts, Mueang District, Songkhla Province. The methodology integrated five social engineering tools (Fah Prathan, Life Clock, Development Timeline, Process Timeline, and M.I.C. Model) with fundamental quality tools (Check Sheets, Pareto Charts, and Fishbone Diagrams) to systematically identify root problems and formulate solutions. Additionally, an Abnormality Index (AI) assessed occupational health risks, alongside a design evaluation for the newly developed equipment. The findings indicated significant deficiencies in existing forage management practices and prevalent occupational health issues among farmers. The calculated AI score of 2.46 underscored a critical need for ergonomic interventions and heightened operational caution. Through the application of social engineering principles, comprehensive solutions were devised. These interventions included knowledge transfer regarding Napier grass cultivation to mitigate natural forage scarcity, alongside the design and fabrication of a mechanized grass chopper machine to supplant manual labor. Expert evaluations of the prototype across five dimensions yielded an aggregate mean score of 4.30, demonstrating its high viability for practical implementation. Beyond localized agricultural advancements, the integration of this social engineering framework significantly bolstered students' essential 21st-century soft skills, cultivating proficiencies in critical thinking.

Keywords: Social Engineering; Local Technology Development; Cattle Farming; Grass Chopping Machine



1. บทนำ

การส่งเสริมเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่นเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาชุมชน สังคม ประเทศชาติ การพัฒนาภาคเกษตรและอุตสาหกรรม ส่วนหนึ่งคือการพยายามสร้างแนวทางให้เกิดการเปลี่ยนจากทำมากได้น้อย ให้เป็นทำน้อยได้มาก มหาวิทยาลัยราชภัฏเป็นสถาบันอุดมศึกษาเพื่อพัฒนาท้องถิ่นโดยการน้อมนำพระบรมราโชบาย[1] โดยมี ยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏเพื่อการพัฒนาท้องถิ่น ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560 - 2579) ขึ้นเพื่อใช้เป็นกรอบในการพัฒนา ยกระดับคุณภาพการศึกษา และพัฒนาท้องถิ่นที่รับผิดชอบ

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ได้ดำเนินงานโครงการพัฒนาคุณภาพชีวิตและยกระดับรายได้ให้กับคนในชุมชนฐานราก มาอย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 6 ในปี 2568 มีกิจกรรมหลายรูปแบบ เพื่อยกระดับให้กับกลุ่มเป้าหมายที่ประกอบอาชีพเกษตรกรเป็นหลัก ซึ่งเป็นไปตามยุทธศาสตร์ของคณะฯ รวมถึงมหาวิทยาลัยฯ โดยส่วนหนึ่งได้รับความร่วมมือจากคณะเทคโนโลยีการเกษตร ในการทำงานร่วมกัน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการส่งเสริมเกษตรกรในพื้นที่เป้าหมายทุกมิติ ตั้งแต่การเริ่มต้นในช่วงปีแรกจากการสำรวจปัญหา สร้างความเข้าใจกับชุมชน รวมถึงสนับสนุนการดำเนินกิจกรรมต่างๆ เพื่อการพัฒนาชุมชนในหลายรูปแบบ ซึ่งวิศวกรสังคม (Social Engineer) เป็นแนวคิดเพื่อการฝึกทักษะนักศึกษาและชุมชนโดยมีกรอบแนวคิดในการพัฒนา คือ 1)วิเคราะห์ศักยภาพชุมชน 2)ยกระดับชุมชน 3)สร้างนวัตกรรมเพื่อแก้ปัญหาชุมชน 4)สร้างความยั่งยืนในการแก้ปัญหาเชิงพื้นที่ โดยใช้เครื่องมือวิศวกรสังคม[2] เครื่องมือ

วิศวกรสังคมถูกออกแบบมาเพื่อใช้กระบวนการฝึกฝนพัฒนาให้นักศึกษามีทักษะวิศวกรสังคมที่สำคัญ 4 ประการ คือ ทักษะการเป็นนักคิด นักสื่อสาร นักประสาน และนักสร้างนวัตกรรมเป็นการพัฒนา Soft Skills เพื่อนำไปสู่การพัฒนาท้องถิ่น [3] มหาวิทยาลัยฯ เริ่มให้ความสำคัญในการบ่มเพาะและพัฒนาศักยภาพวิศวกรสังคมของนักศึกษา [4] เพื่อฝึกทักษะและสามารถบูรณาการองค์ความรู้และสร้างนวัตกรรมเพื่อแก้ปัญหาชุมชน ตามความหมายของวิศวกรสังคมคือผู้ที่ใส่ใจต่อปัญหาและเรื่องราวต่างๆ ในสังคม พร้อมทั้งเข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนาสังคมให้ดีขึ้น โดยอาศัยการสังเกต การเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์อย่างมีเหตุผล รวมถึงการแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ ผ่านการลงพื้นที่ชุมชนท้องถิ่นเพื่อร่วมกันสร้างสรรค์นวัตกรรมใหม่ๆ ที่ตอบโจทย์ปัญหาและส่งเสริมการมีส่วนร่วมของคนในชุมชน [5] ซึ่งเป็นทักษะ Soft Skills ที่สอดคล้องและจำเป็นต่อการดำรงชีวิตในศตวรรษที่ 21 เป็นทักษะแห่งอนาคตใหม่ที่สำคัญ แนวคิดวิศวกรรมสังคมจึงเป็นสายธารทางความคิดที่ก่อกำเนิดขึ้นในสังคมอเมริกัน โดย Rene A. Wormser [6] ที่ได้กล่าวว่า “วิศวกรรมสังคม คือ กลุ่มพลังปัญญาชนที่มีจำนวนน้อย แต่มีผลกระทบต่อสังคมอย่างใหญ่หลวง”

การส่งเสริมนักศึกษาให้ลงพื้นที่ชุมชนท้องถิ่นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเรียนรู้เชิงปฏิบัติ (Experiential Learning) และการพัฒนาทักษะวิศวกรสังคม โดยนักศึกษาจะได้เรียนรู้วิถีชีวิต วัฒนธรรม ความต้องการ และปัญหาของชุมชนอย่างแท้จริง นอกจากนี้ยังช่วยให้นักศึกษาสามารถนำความรู้ทางวิชาการไปประยุกต์ใช้จริง สร้างนวัตกรรมหรือแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมกับบริบทท้องถิ่น



บทความวิจัย

ตลอดจนเสริมสร้างทักษะการทำงานร่วมกับชุมชน การสื่อสาร และความรับผิดชอบต่อสังคม ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน การประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรรมสังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น กรณีศึกษา เกษตรกรผู้เลี้ยงโค ตำบลพะวงและตำบลเกาะแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

2. วัตถุประสงค์

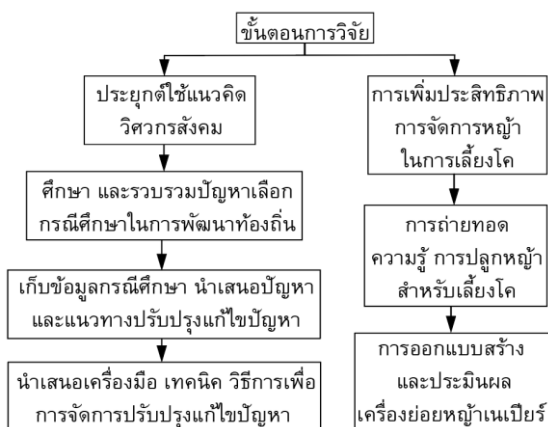
เพื่อประยุกต์ใช้แนวคิดและเครื่องมือวิศวกรรมสังคมในการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโคให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงโคในท้องถิ่น

3. วิธีการศึกษา

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ขั้นตอนการประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรรมสังคม[2,3] และการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโคให้แก่เกษตรกร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการวิจัย

3.2 กลุ่มตัวอย่าง

เกษตรกรผู้เลี้ยงโค ตำบลพะวงและตำบลเกาะแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ในการเลือกกลุ่มตัวอย่างจะใช้วิธีการคัดเลือกแบบเจาะจงตามเกณฑ์คือ เป็นเกษตรกรที่เลี้ยงโคมาไม่ต่ำกว่า 10 ปี และมีการเลี้ยงโคไม่ต่ำกว่า 10 ตัว โดยใช้วิธีการเลี้ยงโคด้วยหญ้าธรรมชาติและการซื้อฟางก้อน

3.3 เครื่องมือที่ใช้และการวิเคราะห์ข้อมูล

1. เครื่องมือวิศวกรรมสังคมที่ใช้ในกระบวนการ มีเครื่องมือ 5 ชนิด [1-3] ดังต่อไปนี้

1.1 เครื่องมือ “ฟ้าประทาน” เป็นการฝึกแยกแยะข้อเท็จจริง (Fact) ออกจากอารมณ์ (Emotion) และความรู้สึก (Feeling) โดยการสังเกตข้อมูลบนพื้นฐานของเหตุและผล ยอมรับความเห็นต่าง และสามารถหาจุดร่วมเพื่อการพัฒนาตนเอง องค์กร และสังคม รวมทั้งการตีความข้อมูลในมิติต่างๆให้ตรงกับความเป็นจริงที่สุดของชุมชน

1.2 เครื่องมือ “นาฬิกาชีวิต” เป็นการฝึกให้เข้าใจเคารพวิถีชีวิตของคนในชุมชน สามารถเลือกเวลาและประเด็นร่วมได้อย่างเหมาะสม พร้อมฝึกการตั้งคำถามหลัก ได้แก่ ใคร (Who) ทำอะไร (What) ที่ไหน (Where) อย่างไร (How) เมื่อไหร่ (When) และทำไมต้องทำ (Why) ตลอดจนการบันทึก วิเคราะห์ และสรุปผลเพื่อให้มีความชัดเจน

1.3 เครื่องมือ “ไทม์ไลน์พัฒนาการ” เป็นกระบวนการฝึกการลำดับเหตุการณ์ต่างๆ โดยใช้ทักษะการตั้งคำถามเพื่อรวบรวมข้อมูลตามลำดับเวลาและเหตุการณ์เป็นระบบ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ศักยภาพและทุนทางสังคมหรือทุนชุมชนที่จะช่วยให้เกิดความ



บทความวิจัย

เข้าใจวิถีแห่งสรรพสิ่ง เป็นการระดมพลัง สร้างความร่วมมือ และการมีส่วนร่วม

1.4 เครื่องมือ “ไทม์ไลน์กระบวนการ” เป็นกระบวนการฝึกการศึกษาขั้นตอน ด้วยการตั้งคำถามเรื่องที่สนใจอย่างสงสัย อยากรู้ และบันทึกข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อให้เข้าใจวิธีการได้มาของสิ่งที่ศึกษาอย่างเข้าใจรอบด้านที่สามารถนำไปสู่การคิดวิเคราะห์ แยกแยะ และสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อการพัฒนากระบวนการ (Process Development)

1.5 เครื่องมือ “M.I.C. Model” เป็นกระบวนการฝึกคิดเชิงสร้างสรรค์เพื่อสร้างนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาท้องถิ่น โดยนำผลลัพธ์จากเครื่องมือ “Timeline กระบวนการ” มาต่อยอดเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มผลผลิต คุณภาพ หรือคุณค่าให้สูงขึ้น ผ่านการรวมขั้นตอน การปรับปรุงขั้นตอนกระบวนการ หรือการเพิ่มเติมขั้นตอนใหม่ในกระบวนการ ตามลำดับ

2. เครื่องมือคุณภาพ (Quality Tools) [7] สามารถนำมาประยุกต์ใช้ควบคู่กับเครื่องมือวิศวกรรมสังคม ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ 3 ชนิด ได้แก่

2.1 ใบตรวจสอบ (Check-sheets) เป็นแบบฟอร์มหรือตารางที่แสดงรายการรายละเอียดต่างๆ ของข้อมูลโดยออกแบบให้ง่ายต่อการจดบันทึกข้อมูล สะดวกต่อการเก็บ การจำแนกข้อมูลและวิเคราะห์ผล ซึ่งมักจะมีช่องให้พนักงานผู้ตรวจสอบสามารถใส่ข้อมูลหรือทำเครื่องหมายต่างๆ

2.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับแสดงปัญหาที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับปัญหาตามความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย และแสดงขนาดความถี่มากน้อยด้วยกราฟแท่งควบคู่ไปกับการแสดงค่าสะสมของความถี่ด้วยกราฟเส้น

ตารางที่ 1 เครื่องมือวิศวกรรมสังคม/เครื่องมือคุณภาพและการนำไปใช้

เครื่องมือ	การนำไปใช้
ฟ้าประทาน	การแยกแยะข้อเท็จจริงจากการสังเกต การหาข้อมูลบนพื้นฐานของเหตุและผล
นาฬิกาชีวิต	การศึกษาวิถีชีวิตของคนในชุมชน การเลือกเวลาการบันทึก วิเคราะห์ และสรุปผล
ไทม์ไลน์พัฒนาการ	การลำดับเหตุการณ์ต่างๆ โดยการตั้งคำถามเพื่อรวบรวมตามลำดับเวลาและเหตุการณ์
ไทม์ไลน์กระบวนการ	การศึกษา บันทึก ขั้นตอนหรือกระบวนการ นำไปสู่การวิเคราะห์ แยกแยะ สังเคราะห์
M.I.C. Model	การคิด การรวมขั้นตอน การปรับขั้นตอน กระบวนการ หรือการเพิ่มเติมขั้นตอนใหม่
ใบตรวจสอบ	การออกแบบการจดบันทึกข้อมูล สะดวกต่อการเก็บ การจำแนกข้อมูลและวิเคราะห์ผล
แผนภูมิพาเรโต	การแสดงปัญหาในชุมชนที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย
ผังแสดงเหตุและผล	การแก้ปัญหาโดยแจกแจงสาเหตุของปัญหา จากสาเหตุต่างๆ ที่มีผลต่อปัญหาที่เกิดขึ้น



2.3 ฟังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือฟังก์กัปลา (Fish Diagram) เป็นแผนภูมิที่ใช้ต่อจากแผนภูมิพาเรโต ซึ่งเมื่อเลือกแก้ปัญหาใดแล้วก็นำปัญหานั้นมาแจกแจงสาเหตุของปัญหาเช่น คนเครื่องจักร วิธีการ วัตถุดิบ ซึ่งอาจรวมถึงสภาพแวดล้อม โดยสรุปตามตารางที่ 1

3. แบบประเมินดัชนีความผิดปกติ (Abnormality Index, AI) ใช้แบบฟอร์มของ Standard Nordic Questionnaire เป็นแบบประเมินปัญหาสุขภาพที่ได้รับการยอมรับแพร่หลาย เช่น นิติเศรษฐ เพชรจุ [8] ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินสุขภาพพนักงานเป็นรายบุคคล โดยมีข้อมูลภาวะความไม่สบายที่เกิดขึ้นของผู้ตอบแบบสัมภาษณ์ โดยการคำนวณค่าดัชนีความผิดปกติใช้ โดยวิธีการประเมินความรู้สึกทั้ง 8 จากนั้นจะต้องให้คะแนน 10 ระดับ (0-9) โดย 0 หมายถึงมีความรู้สึกน้อยที่สุด และ 9 หมายถึงมีความรู้สึกมากที่สุด จากนั้นข้อมูลคะแนนที่ได้จะนำมาคำนวณค่าความผิดปกติ หรือความรู้สึกไม่สบายโดยใช้สมการที่(1) คำนวณค่าดัชนีความผิดปกติ

$$AI = \frac{\sum (1,2,4,5,6,7) - \sum (3,8)}{8} \quad (1)$$

การแปลงข้อมูลบ่งชี้ระดับความรุนแรง แบ่งเป็น 4 ระดับตามตารางที่ 2

4. แบบประเมินการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์เพื่อปรับปรุงการทำงาน

โดยทีมงานได้ศึกษาแนวทางการประเมิน [8] การพัฒนาประสิทธิภาพเครื่องสับย่อยพร้อมอัดแห้งหญ้าเนเปียร์ ที่เหมาะสมต่อการขนย้าย และยืดอายุหญ้าเนเปียร์ สำหรับผู้ประกอบการวิสาหกิจเกษตรกรโคเนื้อจังหวัดสุรินทร์ ประกอบการดำเนินงาน

ตารางที่ 2 เกณฑ์การแปลค่าดัชนีความผิดปกติ (AI)

ค่าดัชนี (AI)	การแปลผล
AI = 0	ไม่มีปัญหาอะไร
$0 < AI \leq 2$	มีปัญหาเล็กน้อยพอทนได้
$2 < AI \leq 3$	ต้องเอาใจใส่ ระมัดระวัง
$3 < AI \leq 4$	มีปัญหามากขึ้น รับไม่ได้
$4 > AI$	รับไม่ได้ให้แก้ไขทันที

การประเมินจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ด้านตามรูปที่ 2 ในการวิเคราะห์แบบประเมินผลการออกแบบเครื่องมือ/อุปกรณ์ ตามความคิดเห็นของผู้ตอบแบบ Rating scale วิเคราะห์โดยการประเมินความคิดเห็นเป็นค่าเฉลี่ยในการเก็บข้อมูลแต่ละรายการ มีความหมายของความเหมาะสม คือ 5 หมายถึง ระดับมากที่สุด , 4 หมายถึง ระดับมาก , 3 หมายถึง ระดับปานกลาง , 2 หมายถึง ระดับน้อย และ 1 หมายถึง ระดับน้อยที่สุด โดยในการศึกษาใช้เกณฑ์ประมาณค่า 5 ระดับ [9] โดยสอบถามความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน และผู้ชำนาญการซึ่งเป็นเกษตรกรผู้เลี้ยงโค จำนวน 6 คน

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ผลการประยุกต์ใช้แนวคิดและเครื่องมือวิศวกรสังคมในการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น และผลการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโคให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงโค

4.1 ผลการประยุกต์ใช้แนวคิดสังคม

1. ผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือวิศวกรสังคมโดยเริ่มจากขั้นที่ 1 คือ “ฟ้าประทาน” ในการลงพื้นที่ของนักศึกษาที่ผ่านการอบรมโครงการวิศวกรสังคม โดยมี



รูปที่ 2 แบบประเมินเครื่องในด้านต่างๆ

นักศึกษาคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและนักศึกษาเทคโนโลยีการเกษตรเป็นแกนนำลงพื้นที่เพื่อศึกษาข้อมูล ปัญหา แยกแยะข้อเท็จจริงจากการสัมภาษณ์ การสังเกต การสืบเสาะหาข้อมูล รวมถึงการตีความข้อมูลในมิติต่างๆ ตามความเป็นจริงของชุมชน โดยพบปัญหาการจัดการหม้อสำหรับเลี้ยงโคและความเมื่อยล้าการเลี้ยงโค

จากผลการศึกษาพบว่าการเลี้ยงโคส่วนหนึ่งเป็นการสร้างรายได้เสริมและเป็นความชอบส่วนตัวของบุคคล และบางครอบครัวมีการสานต่อจากรุ่นสู่รุ่น มีทั้งในรูปแบบการเลี้ยงเพื่อขายเนื้อและรับโคเด็กมาเลี้ยงและขายต่อเพื่อเพิ่มกำไร อีกทั้งลดระยะเวลาและงบประมาณในการเลี้ยงซึ่งจะได้เอากำไรจากส่วนนี้มาลงทุนต่อใน 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 โคต้นน้ำ และรูปแบบที่ 2 โคเด็ก ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการเลี้ยง อีกทั้งโคจะทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี ส่วนใหญ่ในชุมชนนิยมเลี้ยงอยู่คือ โคพื้นบ้านหรือโคเนื้อ เป็นการผสมกันของแม่โคเนื้อเพื่อจะเอาลูกโคมาเลี้ยง เอาเนื้อไปขาย การเลี้ยงโคเนื้อจะทำได้ดีเพราะเลี้ยงง่าย โตเร็ว และระยะเวลาในการเลี้ยงจะสั้นกว่า

จากการศึกษาพบว่าการเลี้ยงโคมีหลายรูปแบบ เช่น การให้โคกินหญ้าธรรมชาติ การปลูกหญ้า การซื้อฟางก่อน แต่จะประสบปัญหาบางฤดูกาล ที่หญ้าธรรมชาติมีไม่เพียงพอ ซึ่งฤดูร้อนหญ้าธรรมชาติก็ตาย ส่วนฤดูฝนก็เกิดน้ำท่วมขัง มีการแก้ปัญหาโดยการไปหาแหล่งหญ้าที่มีระยะไกลและตัดหญ้ามาให้โคในคอก รวมถึงบางรายที่มีการปลูกหญ้าแต่ยังขาดความรู้ความเข้าใจ ทำให้ได้ผลน้อย นอกจากนั้นบางรายก็มีการซื้อฟางข้าว ซึ่งมีต้นทุนสูง (กิโลละ 80 บาท) ในการเลี้ยงโคยังเจอปัญหาสิ่งแวดล้อม ภัยธรรมชาติ การจูงเคลื่อนย้ายโคในเขตชุมชนเพื่อนำไปหาแหล่งอาหารหรือน้ำ อีกทั้งทั้งปัญหาโรคและอุบัติเหตุต่างๆ ที่ยังเกิดขึ้น

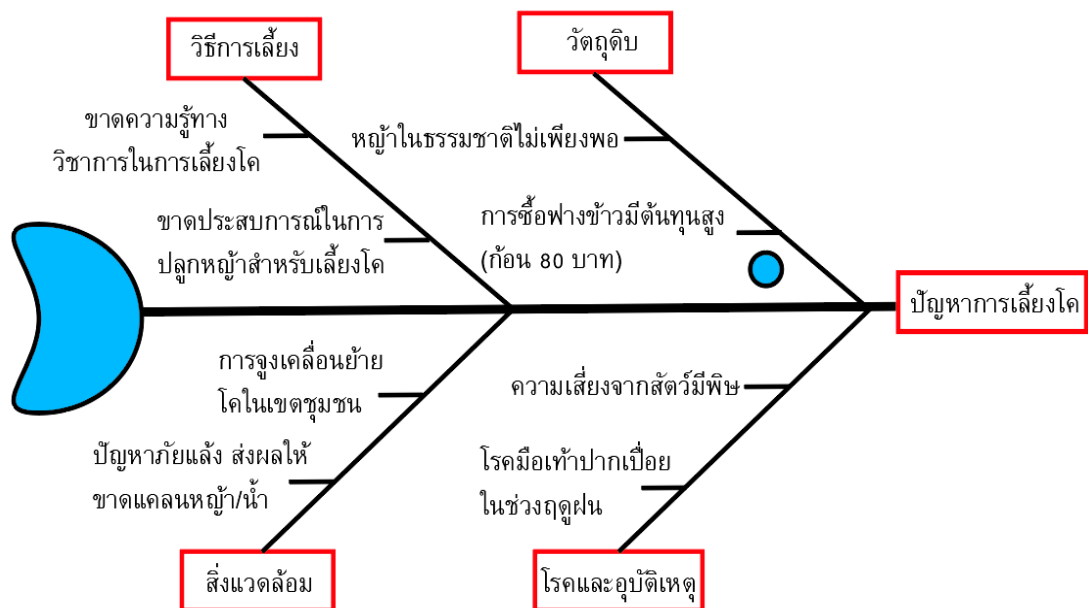
ผลจากการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพควบคู่กับเครื่องมือวิศวกรรมสังคม โดยการใช้วิธีการสัมภาษณ์ เพื่อการเก็บข้อมูล พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ใบตรวจสอบเพื่อการบันทึก เก็บ จำแนกและวิเคราะห์ข้อมูล และประยุกต์ใช้แผนภูมิพาเรโตเพื่อแสดงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น จากนั้นใช้ผังก้างปลาเพื่อเลือกปัญหามาแสดงดังรูปที่ 3 ปัญหาการเลี้ยงโค ที่เกี่ยวกับวิธีการเลี้ยง วัตถุดิบ สิ่งแวดล้อม และโรค/อุบัติเหตุที่เกิดขึ้น



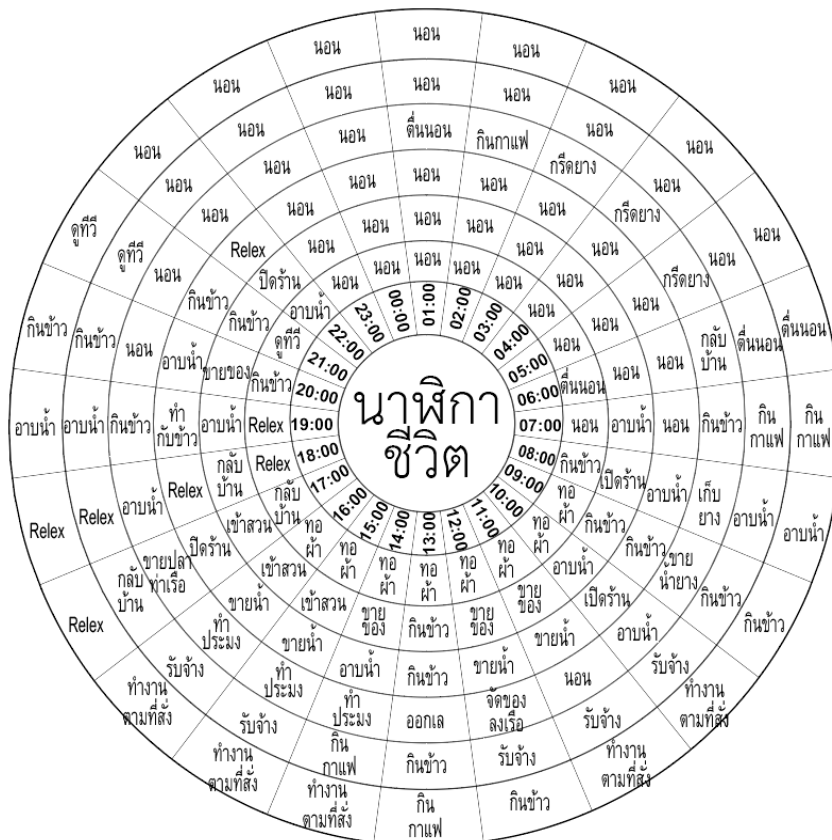
โดยผลการศึกษาปัญหาสุขภาพส่วนหนึ่งพบว่าเกษตรกรยังมีความเห็นต่อน้อยเมื่อกล่าวถึงการเลี้ยงโคที่มีสาเหตุมาจากการจูงเคลื่อนย้ายโคไปหาแหล่งอาหาร การแสวงหาและตัดหญ้าธรรมชาติ ขนย้ายมาให้โคในแต่ละวันที่มีปริมาณสูง จากการใช้แบบประเมินและเก็บข้อมูลดัชนีความผิดปกติ (AI) ประกอบการสัมภาษณ์ของเกษตรกรกลุ่มตัวอย่างจำนวน 6 คน ในการหาค่า AI โดยเฉลี่ยได้จากการคำนวณข้อมูลแทนค่าจากสูตร $AI = [(5.42 + 6.64 + 3.32 + 4.16 + 6.66 + 3.36) - (6.36 + 3.52)] / 8 = 2.46$ ตามการแปลความตามหมายคือต้องเอาใจใส่ระมัดระวังในการทำงาน จากปัญหาดังกล่าวสามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อประกอบการศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่นต่อไป

2. ผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือวิศวกรรมสังคม ชั้นที่ 2 “นาฬิกาชีวิต” โดยการเก็บข้อมูลจากเกษตรกรผู้เลี้ยงโค 6 คน แสดงกิจกรรมที่พร้อมกันในเวลา 24 ชั่วโมง ที่สามารถเลือกเวลาและประเด็นร่วมได้อย่างเหมาะสม การได้คำตอบในแต่ละคนว่า ใครทำอะไร ที่ไหน อย่างไร เมื่อไหร่ และทำไมต้องทำ ในการบันทึกข้อมูลเป็นวงล้อคล้ายนาฬิกาซึ่งแสดงข้อมูล ตามรูปที่ 4

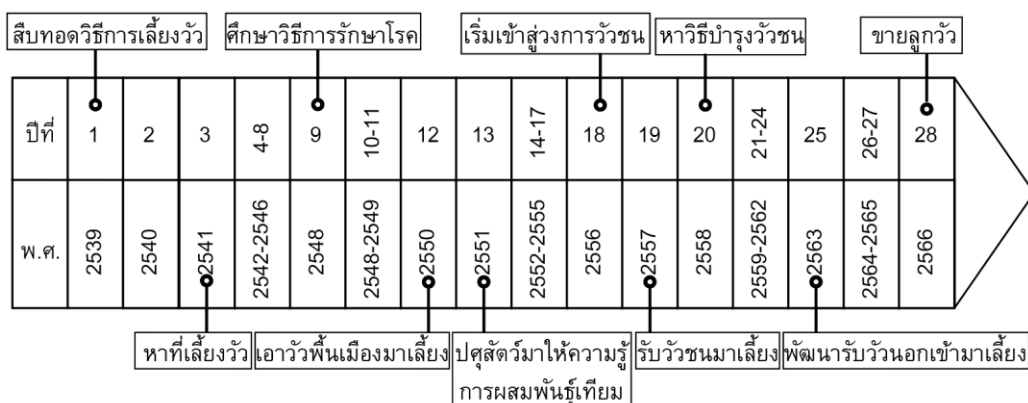
3. ผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือวิศวกรรมสังคมชั้นที่ 3 “Timeline พัฒนาการ” โดยพบว่า การเลี้ยงโคมีพัฒนาการจากการสืบทอดมาตั้งแต่ก่อนปี 2539 โดยต่อมากรมปศุสัตว์เริ่มเข้ามาช่วยเกี่ยวกับการผสมเทียมในปี 2551 โดยมีพัฒนาการรับโคจากภายนอกมาเลี้ยงเพื่อจำหน่าย จากผลการศึกษาสามารถวิเคราะห์ศักยภาพ ทุนทางสังคมหรือทุนชุมชนที่ช่วยให้เข้าใจวิถีชุมชนในการเลี้ยงโค ตามรูปที่ 5



รูปที่ 3 ผังก้างปลาแสดงปัญหาการเลี้ยงโค



รูปที่ 4 นาฬิกาชีวิต



รูปที่ 5 ไทม์ไลน์พัฒนาการเลี้ยงโคในชุมชน



4. ผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือชิ้นที่ 4 “Timeline กระบวนการ” เป็นผลการศึกษาขั้นตอนในการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปเป็นแนวทางเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อท้องถิ่นต่อไป ตามรูปที่ 6

5. ผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือวิศวกรรมสังคมชิ้นที่ “M.I.C. Model” เป็นการนำผลลัพธ์การศึกษามาสร้างสรรค์แนวคิดเพื่อสร้างนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น เพื่อเป็นการต่อยอด เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพ เพิ่มผลผลิต คุณภาพ หรือคุณค่าให้สูงขึ้น โดยผ่านการรวมขั้นตอน การปรับปรุงขั้นตอน และการวางแผนการทำงาน

กล่าวโดยสรุปคือการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค ตามแนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 การจัดโครงการอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการเลี้ยงโค การปลูกหญ้าเนเปียร์สำหรับเลี้ยงโคของเกษตรกร

แนวทางที่ 2 การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์สำหรับเลี้ยงโคของเกษตรกร

4.2 ผลการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค

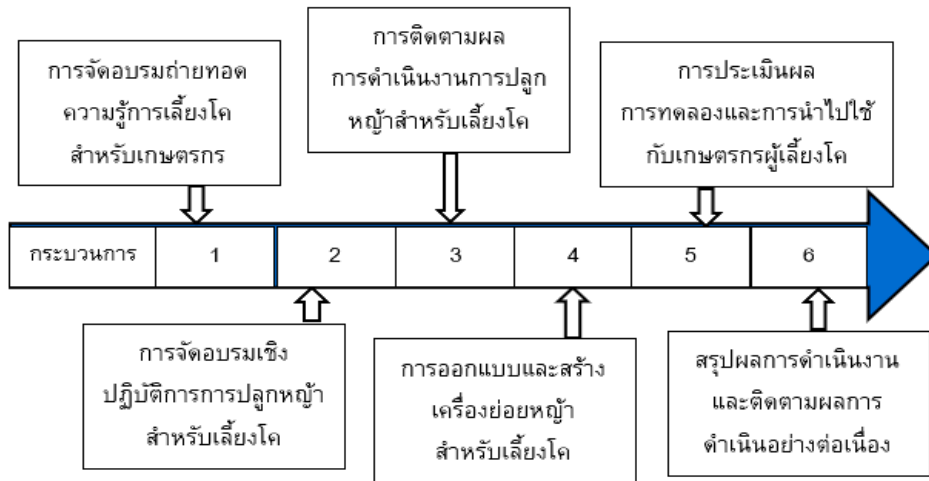
จากแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค มีผลการดำเนินงานดังนี้

1. ผลการจัดโครงการอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการเลี้ยงโค การปลูกหญ้าเนเปียร์สำหรับเลี้ยงโคตามรูปที่ 7 จากผลการศึกษาข้อมูลพบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ยังขาดความรู้เกี่ยวกับวิธีการเลี้ยงโค การปลูกพืชอาหารสัตว์ รวมถึงการลดต้นทุนการผลิต ในการปลูกหญ้าเนเปียร์

สำหรับเลี้ยงโคซึ่งเป็นหญ้าที่โตเร็ว ผลผลิตต่อไร่สูง ตัดได้ทุก 45-60 วัน มีโปรตีนดิบเฉลี่ย 12-18% โดยควรปลูกในดินร่วน ระบายน้ำดี ไถพรวนและใส่ปุ๋ยคอก ใช้ท่อนพันธุ์ยาว 20-30 ซม. มีตาอย่างน้อย 2-3 ตา โดยใช้พันธุ์ปากช่อง โดยปลูกแถวห่างกัน 75-100 ซม. ระหว่างต้น 50 ซม.วางท่อนพันธุ์เฉียง 45° หรือแนวนอน กลบดินบางๆ ปลูกได้ตลอดปี แต่เหมาะที่สุดช่วงต้นฤดูฝน การดูแลรักษาให้น้ำสม่ำเสมอ โดยเฉพาะหน้าแล้ง ใส่ปุ๋ยยูเรีย 5-10 กก./ไร่ หลังปลูก 30 วัน และทุกครั้งหลังตัด กำจัดวัชพืชในช่วงแรก เพื่อให้หญ้าโตได้เต็มที่ ส่วน การเก็บเกี่ยว ตัดครั้งแรกเมื่ออายุ 75 วัน หลังจากนั้นตัดทุก 45-60 วัน ความสูงที่เหมาะสมในการตัด 1-1.5 เมตร โดยตัดให้เหลือตอสูง 10-15 ซม. เพื่อให้แตกหน่อใหม่ได้เร็ว การใช้เลี้ยงโคโดยให้กินสด หากมีการย่อยให้ละเอียดจะทำให้โคกินได้ง่ายและเป็นเนื้อเดียวกันทั้งในส่วนโคนและปลายลำต้น

2. ผลการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์สำหรับเลี้ยงโค

จากผลการอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดความรู้ ส่งผลให้มีการปลูกหญ้าเนเปียร์สำหรับเลี้ยงใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงโค โดยเกษตรกรสามารถตัดหญ้าให้โคกินทั้งลำต้นได้แต่ถ้าย่อยให้ละเอียดขึ้นจะมีประสิทธิภาพดีกว่าจึงต้องใช้แรงงานคนในการหั่น ซึ่งมีปัญหาการหั่นหญ้าเนเปียร์ด้วยแรงงานคน หญ้าเนเปียร์มีลำต้นยาวและแข็ง ทำให้ต้องใช้แรงมากในการตัดและหั่น ไม่เหมาะสมกับปริมาณหญ้าจำนวนมาก เพราะใช้เวลานาน ความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ การใช้มีด เคียว หรือเครื่องมือมีคม อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย การทำงานต่อเนื่องทำให้เกิดอาการเมื่อยล้า



รูปที่ 6 โหมดไลน์กระบวนการ (การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโค)

กล้ามเนื้อและเสียงโรคจากการทำงานซ้ำๆ ขนาดการหันไม่สม่ำเสมอ หญ้าที่หันด้วยแรงงานคนมักมีความยาวไม่เท่ากัน ส่งผลให้สัตว์กินได้ยาก เกิดการเลือกกิน และมีการสูญเสียอาหาร ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ หากมีสัตว์เลี้ยงจำนวนมาก การหันด้วยแรงงานคนไม่เพียงพอต่อความต้องการ เปรียบเทียบกับเครื่องจักรแล้ว ผลผลิตต่อเวลาต่ำกว่าอย่างมาก ปัญหาด้านสุขภาพผู้ปฏิบัติงาน เสี่ยงต่ออาการปวดกล้ามเนื้อหลัง แขน และไหล่ ทำให้เกิดความเหนื่อยล้า และประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปัญหาสุขภาพส่วนหนึ่งพบว่าเกษตรกรยังมีความเห็นดีเห็นงามเมื่อมีค่า AI ที่ต้องเอาใจใส่ระมัดระวังในการทำงาน จากปัญหาดังกล่าวสามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อประกอบการศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น ทางทีมงานวิศวกรสังคมจึงได้มีการออกแบบสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ เกษตรกรผู้เลี้ยงโค ตำบลพะวงและตำบลเกาะแก้ว อำเภอเมืองจังหวัดสงขลา



รูปที่ 7 อบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดความรู้

การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ โดยเริ่มจากการศึกษาความต้องการ ศึกษาวัตถุประสงค์การใช้งาน วิเคราะห์ปริมาณหญ้าที่ต้องการย่อย พิจารณานาชนิดและความยาวของชิ้นหญ้าที่เหมาะสม การศึกษาข้อมูลและทบทวนวรรณกรรม [10] เรื่องการออกแบบสร้างเครื่องย่อยกิ่งไม้ ใบไม้ ประกอบที่มีมีดชุดใบมีดที่ย่อยกิ่งไม้ แบบ

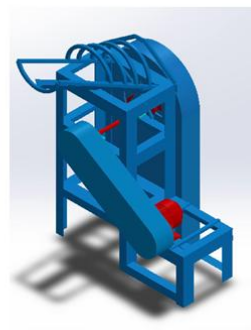
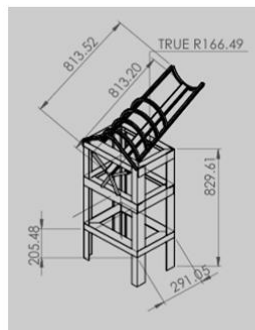


บทความวิจัย

หน้างาน มี 3 ใบมีด และศึกษาเครื่องย่อยที่มีใช้อยู่แล้วทั้งในประเทศและต่างประเทศ วิเคราะห์ข้อดี ข้อจำกัด และต้นทุนการผลิต รวมถึงศึกษาหลักการออกแบบเครื่องจักรกล ตามแนวทางการออกแบบ [10] โดยกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้วัสดุ และสมบัติเชิงกล ปัจจัยด้านความปลอดภัย การออกแบบองค์ประกอบของเครื่องจักร รวมถึงการออกแบบเพื่อการผลิต

การออกแบบสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ โดยเริ่มจากการออกแบบ ร่างแบบ เขียนแบบ ซึ่งเป็นการฝึกทักษะการสร้างนวัตกรรมของนักศึกษา รวมถึงสอดคล้องกับการจัดการเรียนการสอนที่บูรณาการในรายวิชาเพื่อพัฒนาความรู้และทักษะของนักศึกษา โดยการเชื่อมโยงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกัน เช่น วิศวกรรม + การจัดการ + เทคโนโลยี โดยใช้โครงงานกรณีศึกษา เป็นตัวกลางในการบูรณาการความรู้ โดยการวางลำดับเนื้อหาแบบ จากพื้นฐาน การประยุกต์ และการแก้ปัญหาเชิงสร้างสรรค์ เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น โดยการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์แสดงดังรูปที่ 8

โดยในการออกแบบสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ตามหลักการยศาสตร์ ที่มุ่งเน้นการลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของผู้ใช้งาน เพิ่มความสะดวกสบาย และการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยการออกแบบพิจารณาจากขนาดสัดส่วน ความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์ เครื่องจักร รวมถึงสภาพแวดล้อม การนำหลักการยศาสตร์ต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในทุกองค์ประกอบของการออกแบบเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ ตั้งแต่โครงสร้าง ระดับความสูง การจับยึด การป้อนหญ้า ระยะเอื้อม การทำงานที่ต้องใช้ รวมถึงการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงาน



รูปที่ 8 การออกแบบสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์



รูปที่ 9 การฝึกทักษะทักษะนักศึกษาในการทำงาน

ผลการดำเนินงานจากการออกแบบเบื้องต้น กำหนดโครงสร้างหลักของเครื่อง เช่น ฐานเครื่อง ระบบย่อย ระบบส่งกำลัง และระบบป้อนหญ้าตามรูปที่ 9 เลือกชนิดของกลไกการตัด คำนวณและออกแบบเชิงวิศวกรรม คำนวณแรงตัด แรงบิด และกำลังที่ต้องใช้ ออกแบบขนาดใบมีด จำนวนรอบต่อนาที และวัสดุที่ใช้ ออกแบบระบบส่งกำลัง เขียนแบบเครื่องจักร การสร้างต้นแบบ ประกอบโครงสร้าง ติดตั้งชุดตัดและระบบขับเคลื่อน ติดตั้งฝาครอบป้องกัน การทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน ตามรูปที่ 10 แสดงเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์และหญ้าที่ผ่านการย่อย



รูปที่ 10 เครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์และผ่านการย่อย

จากตารางที่ 3 ผลการประเมินการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ จากกลุ่มตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญและผู้ชำนาญการ รวมจำนวน 9 คน มีผลการประเมินรายด้านคือ ด้านประสิทธิภาพ มีค่าเฉลี่ย 4.32 ด้านการใช้งาน มีค่าเฉลี่ย 4.16 ด้านความปลอดภัย มีค่าเฉลี่ย 4.36 ด้านคุณภาพของหญ้า มีค่าเฉลี่ย 4.42 และด้านความคุ้มค่าและความยั่งยืน มีค่าเฉลี่ย 4.25 โดยมีค่าเฉลี่ยรวม 4.30 ซึ่งอยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สามารถนำไปใช้แทนแรงงานคนในการหั่นหญ้า

5. สรุปผล

ผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพและเครื่องมือวิศวกรสังคมที่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น พร้อมกับการพัฒนาทักษะของนักศึกษา และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหญ้าสำหรับเลี้ยงโคให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงโคที่มีแนวทางการถ่ายทอดความรู้การปลูกหญ้า และการพัฒนานวัตกรรมโดยการออกแบบสร้างเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อช่วยย่อยหญ้าแทนการใช้แรงงานคน ทำให้ Lead Time สั้นลงที่ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ผลการประเมินเครื่องย่อยหญ้าเนเปียร์

รายการประเมิน	$\bar{X}$	SD
ด้านประสิทธิภาพ	4.32	0.63
ด้านการใช้งาน	4.16	0.57
ด้านความปลอดภัย	4.36	0.83
ด้านคุณภาพของหญ้า	4.42	0.42
ด้านความคุ้มค่าและความยั่งยืน	4.25	0.76
ค่าเฉลี่ย	4.30	0.72

ในทางเศรษฐกิจช่วยให้เพิ่มความสามารถในการทำกำไร และเพิ่มรอบการหมุนเวียนของเงินทุน (Capital Turnover) อีกทั้งการยกระดับทักษะความรู้ของเกษตรกร รวมถึงเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและกระตุ้นอุตสาหกรรมต่อเนื่อง โดยมีผลตามกระบวนการพัฒนาทักษะวิศวกรสังคม ที่แสดงให้เห็นว่า การพัฒนานักศึกษาให้เป็นวิศวกรสังคมที่มีประสิทธิภาพ การนำความรู้ไปปฏิบัติจริงในชุมชน การลงมือทำ และบูรณาการองค์ความรู้เพื่อแก้ไขปัญหาชุมชน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวช่วยพัฒนาทักษะของวิศวกรสังคม ได้แก่ การเป็นนักคิด นักสื่อสาร นักประสานงาน และนักสร้างนวัตกรรมชุมชน ซึ่งการพัฒนานักศึกษาในบทบาทวิศวกรสังคม ไม่เพียงมุ่งเน้นที่ความรู้ทางวิชาการเท่านั้น แต่ยังเป็น การเสริมสร้างทักษะชีวิต (Soft Skills) ที่จำเป็นต่อการทำงานด้วย รวมถึงความเข้าใจและความเห็นอกเห็นใจผู้อื่น โดยแนวทางการใช้ชุมชนเป็นฐานในการเรียนรู้ในการพัฒนาทักษะของนักศึกษา โดยมีขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การสำรวจพื้นที่และศึกษาปัญหาชุมชน การวิเคราะห์ข้อมูลชุมชนด้วยเครื่องมือวิศวกรสังคม การพัฒนาปรับปรุงและการนำเสนอผลการแก้ไขปัญหาชุมชน การลงมือปฏิบัติในพื้นที่จริง ตลอดจน



บทความวิจัย

การประเมินผลและถอดบทเรียนร่วมกัน แนวทางนี้ช่วยให้นักศึกษาได้พัฒนาทักษะวิศวกรรมสังคมผ่านประสบการณ์ตรงที่มีประสิทธิภาพ

6. อภิปรายผล

จากผลการประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรรมสังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีในระดับท้องถิ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประกอบอาชีพของชุมชนสามารถส่งผลให้เกิดประโยชน์ต่อนักศึกษาและชุมชนท้องถิ่นจากแนวคิดประโยชน์อย่างแท้จริงในทฤษฎีวิศวกรรมสังคม[11] ตามที่ได้ศึกษาพื้นฐานแนวคิด มีจุดมุ่งหมายชัดเจนในการปฏิรูปภาคอุตสาหกรรม โดยมุ่งพัฒนาปรับปรุงการทำงานระหว่างวิศวกรกับเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพ การตอบสนองความต้องการของคนในชุมชน โดยแนวคิดวิศวกรรมสังคมได้เริ่มมีการนำไปประยุกต์ใช้มากขึ้น เช่น [12] ศึกษาการพัฒนานักศึกษาด้านแบบโดยใช้กระบวนการวิศวกรรมสังคมเพื่อสร้างนวัตกรรมการพัฒนาท้องถิ่นบนเส้นทางการท่องเที่ยวจากเขาวิ้งสู่เขาแด่น จังหวัดเพชรบุรี นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่พบว่าการพัฒนาให้นักศึกษาให้มีทักษะในการพัฒนาดตนเองโดยใช้กระบวนการวิศวกรรมสังคม [13] ช่วยส่งเสริมให้นักศึกษามีสมรรถนะทั้งด้านความรู้ ทักษะ และทัศนคติที่ดีต่อการพัฒนาชุมชน สังคม และประเทศชาติ อีกทั้งยังมุ่งเน้นให้นักศึกษาเกิดทักษะการเป็นนักคิด นักสื่อสาร นักประสานงาน และนักสร้างนวัตกรรมชุมชน สอดคล้องกับผลการศึกษา ที่พบว่าการจัดกิจกรรมต้องสอดคล้องกับความรับผิดชอบของตนเองและสังคม โดยการสร้างนวัตกรรมการจัดกิจกรรมที่สร้างสรรค์ ควบคู่กับการบูรณาการทักษะวิชาชีพ เพื่อให้นักศึกษารู้จักบริหารจัดการตนเอง

สร้างกระบวนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มุ่งพัฒนาให้ผู้เรียนมีทักษะการคิด การลงมือปฏิบัติ การแก้ปัญหา การพัฒนางาน และมีเจตคติที่ดี จากแนวคิดของ Edwin L. Earp [14] ที่ได้นำเสนอแนวคิด “วิศวกรรมสังคม” ที่มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการผ่านการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมทางสังคมและปัจเจกบุคคล แนวคิดนี้ให้ความสำคัญกับการศึกษาสังคม กระบวนการทางสังคม โดยหลักการของวิศวกรรมสังคมที่มุ่งใช้กระบวนการวิธีและเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์เป็นพื้นฐานในการพัฒนา ทำให้ทฤษฎีวิศวกรรมสังคมมีจุดเริ่มต้นและพัฒนาอย่างเข้มแข็งในสหรัฐอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญเพื่อใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการ ปรับปรุง และพัฒนาสังคมอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกรอบแนวคิดในการประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรรมสังคมเพื่อการพัฒนาท้องถิ่นในด้านต่างๆ เช่น ด้านสังคมศาสตร์ซึ่งเกี่ยวกับการจัดการท่องเที่ยวชุมชน ด้านวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องทุ่นแรงเพื่อใช้ในชุมชน

จากการติดตามผลการดำเนินงานโดยนักศึกษาวิศวกรรมสังคมหลังเสร็จสิ้นโครงการตามรูปที่ 11 พบว่าเกษตรกรมีความพึงพอใจจากการดำเนินงาน มีการนำผลการดำเนินงานไปใช้ประโยชน์จริงอย่างต่อเนื่อง จากการประเมินปัญหาสุขภาพของเกษตรกรหลังการปรับปรุงพัฒนาเกษตรกรมีความรู้สึกถึงอาการเหน็ดเหนื่อยเมื่อยล้าในการทำงานลดลง มีการขยายผลการปลูกหญ้าเนเปียร์ โดยมีข้อเสนอแนะอยากให้มีการหรือกิจกรรมเพื่อชุมชนในลักษณะดังกล่าวอีกผลการประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรรมสังคมในด้านการพัฒนานักศึกษาได้รับการพัฒนาทักษะที่จำเป็นในศตวรรษใหม่



รูปที่ 11 การติดตามผลการดำเนินงานโครงการ

ได้แก่ การคิดเชิงระบบ การแก้ปัญหาเชิงสร้างสรรค์ การทำงานเป็นทีม และภาวะผู้นำ เกิดการบูรณาการความรู้เชิงวิชาการกับการปฏิบัติจริง ทำให้นักศึกษามีสมรรถนะทั้งด้านความรู้ (Knowledge) ทักษะ (Skills) และทัศนคติ (Attitude) นักศึกษามีความรับผิดชอบต่อสังคม เห็นคุณค่าของการมีจิตอาสา และเข้าใจการทำงานร่วมกับผู้อื่น ด้านชุมชนและสังคม เสริมสร้างเครือข่ายความร่วมมือระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานท้องถิ่น และประชาชน ด้านการเรียนรู้และการวิจัย สร้างองค์ความรู้ใหม่ที่เกิดจากการปฏิบัติจริงในพื้นที่ชุมชน พัฒนารูปแบบการเรียนรู้เชิงบูรณาการ เช่น แนวคิด “ชุมชนเป็นห้องเรียน” เป็นฐานข้อมูลเพื่อการต่อยอดงานวิจัย การประเมินผล และการพัฒนานวัตกรรมในอนาคต ด้านทัศนคติและคุณลักษณะ ผู้เรียนมีจิตสำนึกพลเมืองดี (Civic Mind) และความรับผิดชอบต่อส่วนรวม มีความเข้าใจในวัฒนธรรมท้องถิ่น เห็นอกเห็นใจ และสามารถสื่อสารกับชุมชนได้อย่างเหมาะสม เกิดเจตคติที่ดีต่อการพัฒนาชุมชนและการทำงานร่วมกับผู้อื่น การประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกร

สังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น จึงสามารถนำไปปรับใช้ได้ในการพัฒนาสังคม

7. ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการสร้างเครือข่ายความร่วมมือเพื่อสร้างวิศวกรสังคม เพื่อใช้ชุมชนเป็นฐานการเรียนรู้ให้กับนักศึกษาโดยใช้ทักษะกระบวนการวิศวกรสังคม

2. ควรสร้างเครื่องมือประเมินทักษะต่างๆ ในการพัฒนานักศึกษาด้วยกระบวนการวิศวกรสังคมที่เป็นมาตรฐานไม่แตกต่างกัน

3. ควรมีการบูรณาการศาสตร์กับคณะหรือหน่วยงานอื่นๆ เพื่อให้เกิดการพัฒนาชุมชนอย่างต่อเนื่อง และสามารถพัฒนาหรือต่อยอดเพื่อเป็นชุมชนต้นแบบ

4. ควรมีการจัดกิจกรรมการเรียนรู้การสอนโดยฝึกให้นักศึกษาได้ฝึกคิดวิเคราะห์ประเด็นต่างๆ หรือการมีส่วนร่วมในกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

5. ควรขยายผลในประยุกต์ใช้แนวคิดวิศวกรสังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น ไปยังพื้นที่กรณีศึกษาอื่นๆ อย่างต่อเนื่องและสร้างความยั่งยืน

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนโครงการยกระดับนวัตกรรมชุมชนด้วยกระบวนการวิศวกรสังคม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ปีงบประมาณ 2567 ขอบคือนักศึกษาโครงการวิศวกรสังคม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คือ นายชนภัทร น้อยทับทิม นายนัฐติน กาชอ นายบุญศรี ภารตกฤตยาพันธ์ นายบุญอัน แสงวิมล นายพิรพงศ์ อินจันทร์ และคณะเทคโนโลยีการเกษตร คือ นายสุริยา ปรานสุข นายปภาวิชญ์ ปานดำ นายธนภัทร แสงแก้ว และขอขอบคุณอาจารย์ทวีศักดิ์ ทองไฟ รวมถึงผู้นำชุมชนและเกษตรกรผู้เลี้ยงโค ตำบลพะวงและตำบลเกาะแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา



9. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Isaro, The royal guidance on education with mission of Rajabhat University Group for higher education institution to developing Local, Armed Forces Development Command Journal, 2021, 45(2), 53–63. (in Thai)
- [2] S. Kongkoon, Learning local communities using the social engineer process in Huachang Subdistrict, Uthumphon Phisai District, Sisaket Province, School of Administrative Studies Academic Journal, 2025, 8(3), 50-66. (in Thai)
- [3] N. Pueanthim, The enhancement of social engineer potential for the sustainable development of local communities, Lawarath Social E-Journal, 2024,6(1), 181-200. (in Thai)
- [4] P. Jansiboot, J. Kongkeaw, J. Kuadkhan, P. Khunpanrai and S. Rodklai, Cultivation and Development of the potential of social engineer of Songkhla Rajabhat University students, Journal of Administration and Social Sciences Review, 2025, 8(2), 373–386.
- [5] K. Khamdeetan and C. Ponthong, Guidelines for developing social engineer skills of a group of Rajabhat University students in the Northern Region, Journal of MCU Ubon Review, 2024, 9(3), 353–366.
- [6] B.F. Wright, P. Roscoe, Introduction to the philosophy of the law, Science Quarterly, 1922, 3, 367.
- [7] M. Kittiyankajon, Application of 7 quality control tools and SWOT analysis to determine the marketing strategy: A case study of construction material store, Rajamangala University of Technology Tawan-ok Social Science Journal, 2021, 10(1), 66-75
- [8] N. Phetchu, Work injury risk reduction utilizing ergonomics principles: A case study of Pijit Rubber Fund Cooperrative Ltd., Master's Thesis, Industrial and Systems Engineering, Prince of Songkla University, 2013.
- [9] P. Kansut, Applied statistics for teachers, 1st Ed., Thai Wattana Panich Publishing, Bangkok, Thailand, 2011.
- [10] W. Ungphakorn and C. Thanatngan, Machine Design, 1st Ed., SE-Education Public Company Limited, Bangkok, Thailand, 2007.'
- [11] M. Klangkhonnok and S. Kaewsuphong, The concept of true benefit in roscoe pound's social engineering theory, Paniatan Journal, 2021, 17(2), 73–98.
- [12] <https://www.pbru.ac.th/pbru/news/66434> (Accessed on 30 September 2025)



บทความวิจัย

[13] K. Khongnawang and C. Chaiwongkiat,
Development of community products
through the social engineering process of
community product production groups in Na
Siao Subdistrict, Mueang District,
Chaiyaphum Province, Journal of Social
Science Outlook, 2025, 1(2), 29–37.

[14] E.L. Earp, The social engineer, Eaton &
Mains, NY, USA, 1867

Influence of Engine Oil Viscosity on the Combustion and Performance Characteristics of Gasoline Direct Injection Engines

Nuttapon Buntekt^{1,2}, Punya Promhuad^{1,2} and Mongkol Dangsunthornchai^{2,3*}

¹ Curriculum of Modern Automotive Technology and Automation System (MATA), KMUTNB Techno Park, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy (CTAE), Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

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

* Corresponding author, E-mail: mongkold@kmutnb.ac.th

Received: 4 March 2026; Revised 7 May 2026; Accepted: 2 June 2026

Online Published: 19 August 2026

Abstract: The present study examines the influence of lubricating oil viscosity on the combustion dynamics and overall performance of a gasoline direct injection (GDI) engine. Experimental evaluations were conducted using three multigrade oils (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50) at a constant engine speed of 2000 rpm across low (10 Nm) and medium (50 Nm) load conditions. The rheological analysis confirmed an exponential decrease in viscosity with rising temperatures, with SAE 20W-50 exhibiting the highest flow resistance. Engine performance data revealed that the lowest viscosity variant (SAE 10W-30) minimized frictional losses, thereby maximizing peak cylinder pressure, indicated mean effective pressure, and fuel economy. Furthermore, SAE 10W-30 recorded the optimal brake thermal efficiency ($\approx 25\%$). Although SAE 20W-50 offered enhanced film strength, it resulted in marginally reduced efficiency. Under medium-load conditions, the thermal reduction of viscosity diminished the performance variations among the tested oils. The study concludes that strategic selection of lower-viscosity lubricants can substantially improve the mechanical efficiency and fuel economy of GDI engines under partial loads, while maintaining adequate component durability.

Keywords: GDI engine; Lubricant viscosity; Combustion performance; Friction losses; Brake thermal efficiency



1. Introduction

The rapid development of gasoline direct injection (GDI) technology has enabled higher thermal efficiency and reduced fuel consumption compared to conventional port fuel injection (PFI) engines. By injecting fuel directly into the combustion chamber, GDI engines achieve better charge cooling, precise mixture control, and improved part-load efficiency [1]. However, these advantages come at the expense of increased combustion pressure, temperature, and particulate emissions, which impose greater mechanical and thermal stresses on the lubrication system [2].

Lubricating oil plays a critical role in maintaining hydrodynamic film strength, minimizing wear, and reducing frictional losses in engine components such as piston rings, cylinder liners, and bearings. The viscosity of the oil governs its flow resistance and film thickness, which directly influence both mechanical efficiency and heat transfer characteristics of the engine [3]. Low-viscosity oils can reduce frictional and pumping losses, enhancing fuel economy, but may also lead to insufficient film formation and increased wear under high temperature and load conditions [4]. Conversely, high-viscosity oils provide stronger lubrication protection but can increase parasitic losses, particularly during cold start or low-load operation [5].

Previous studies have examined the effects of lubricant viscosity on friction and fuel consumption in spark-ignition engines. For instance, Fernando. F Rovai et al [6]. reported that using lower-viscosity lubricants significantly reduced friction mean effective pressure (FMEP) and improved brake-specific fuel consumption (BSFC). Similarly, found that viscosity influences the combustion duration and in-cylinder pressure rise rate, particularly in engines operating at low speeds or light loads. However, most of these studies were conducted using PFI configurations or simplified friction rigs, with limited data available for modern GDI engines under realistic operating conditions [7].

Recent research emphasizes that lubricant viscosity plays a pivotal role in optimizing engine dynamics and mechanical efficiency by directly influencing internal resistance. Lowering lubricant viscosity significantly reduces frictional losses within the piston assembly and bearings, which enhances the stability of in-cylinder pressure profiles and leads to an increase in Brake Mean Effective Pressure (BMEP) [8,9]. Furthermore, the rheological properties of the oil affect the engine's thermal management; high-viscosity fluids can induce localized heating that reduces intake air density, whereas optimized low-viscosity lubricants maintain a more favorable thermal gradient, thereby preserving the airflow rate and volumetric efficiency [9].



From a thermodynamic perspective, the transition toward ultra-low viscosity oils is a primary strategy for improving thermal efficiency and reducing fuel consumption. Experimental evidence indicates that minimizing parasitic pumping work and hydrodynamic drag allows for a measurable reduction in brake-specific fuel consumption. Modern formulations, often utilizing advanced friction modifiers, enable these thinner oil films to operate effectively without compromising engine durability, ensuring that a greater portion of combustion energy is converted into effective work [8].

In GDI engines, lubricant–fuel interaction is particularly complex due to direct wall impingement, higher cylinder pressure, and increased blow-by gas recirculation. These factors can alter the viscosity and oxidation state of the oil during operation, subsequently affecting combustion stability, heat release behavior, and overall engine efficiency [10]. Therefore, understanding how base oil viscosity impacts the combustion process and energy conversion efficiency under different loads is essential for optimizing both performance and durability.

The present study aims to investigate the effect of engine oil viscosity on the combustion and performance characteristics of a GDI engine. Three multigrade lubricants SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50 were tested under low (10 Nm) and medium (50 Nm) load conditions at 2000 rpm. The

analysis covers viscosity–temperature behavior, in-cylinder pressure development, mean effective pressures, airflow and fuel consumption, and brake thermal efficiency. The objective is to establish the correlation between oil viscosity and mechanical efficiency in GDI operation, providing insights into selecting lubricants that optimize both fuel economy and engine protection.

2. Experimental apparatus

2.1 Viscosity Measurement Setup

The viscosity characteristics of three multigrade lubricating oils—SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50 were experimentally determined using a falling-ball viscometer method. The schematic and photographs of the experimental setup are shown in Fig. 1. Each oil sample was poured into a cylindrical glass tube to a level slightly above two reference marks, corresponding to a vertical travel distance of 25 cm between the start and end points. The measurement procedure was performed at controlled oil temperatures ranging from 25 °C to 90 °C, in increments of approximately 10 °C.

To achieve the desired test temperatures, the glass tube containing the oil was immersed in a thermostatic water bath equipped with a thermocouple for continuous temperature monitoring and an electrical heating element to maintain uniform heat distribution throughout the sample. Once the target temperature was



stabilized (± 0.5 °C), a steel sphere with a diameter of 50.8 mm was carefully released from the upper reference mark and allowed to fall freely through the oil column under the influence of gravity.

The time required for the sphere to traverse the 25-cm path between the START and END reference points was measured using a digital stopwatch. Each experiment was repeated three times to ensure repeatability, and the average value was used for subsequent analysis. The terminal velocity of the ball was then computed and used to determine the kinematic viscosity of each lubricant according to Stokes' law, which relates viscous drag, buoyant force, and gravitational acceleration [11].

2.2 GDI Engine setup

The schematic representation of the experimental setup is shown in Fig. 2, which was designed to investigate the combustion and performance characteristics of a gasoline direct injection (GDI) engine lubricated with oils of varying viscosity grades. The test bench utilized a four-cylinder, four-stroke Mazda Skyactiv-G P3 GDI engine, which was coupled to a Lamm DW160H eddy-current dynamometer. Engine load and speed were precisely regulated using an FDJ-001 control interface, enabling steady-state operation across the designated torque and speed conditions. The key technical specifications of the GDI engine are summarized in Table 1.

Table 1 Specifications of the test engine.

Parameter	Specification
Brand/Model	Mazda / Skyactiv-G P3
Engine type	4-stroke, liquid-cooled, inline 4-cylinder
Bore × Stroke (mm)	71.0 × 82.0
Displacement (cm ³)	1298
Compression ratio	12.0:1
Rated power	69.35 kW @ 5800 rpm
Maximum torque	123 Nm @ 4000 rpm
Fuel injection type	Direct injection

In-cylinder pressure was recorded using a Kistler 6052C-3-1 (Switzerland) piezoelectric pressure transducer, synchronized with crank angle measurements obtained from a Kistler 2614CK encoder. Both signals were routed to a DEWESoft combustion analysis system (Slovenia) for high-resolution data acquisition and processing. The engine's ignition and injection parameters were managed by a Link G4+ Force GDI ECU, which provided precise control of fuel timing and pressure. The GDI injector employed was a six-hole multi-hole injector, operating at an injection pressure of 100 bar with an injection timing of 330° before top dead center (bTDC).

Commercial-grade Gasohol E20 (20% ethanol blended gasoline) served as the test fuel throughout the experiment. Its key properties are summarized in Table 2. The fuel was supplied through a dual-stage pumping system comprising a low-pressure (LP) and high-pressure (HP) fuel



pump, integrated with a calibrated weight-based fuel measurement system to ensure accurate fuel flow monitoring.

To minimize confounding factors, each test point was recorded only after thermal stabilization. The engine was warmed up until coolant temperature and lubricant temperature at the measurement location reached steady values (within $\pm 1-2$ °C for at least 3–5 min). The dynamometer-controlled speed and load at the target setpoints (2000 rpm; 10 Nm and 50 Nm), and the same fuel (Gasohol E20) and stock engine calibration were retained throughout all tests. Combustion data were then acquired over 200 consecutive cycles and ensemble-averaged to reduce cycle-to-cycle variability. A sample size of 200 cycles has been established as statistically sufficient for reliable assessment of IMEP cycle-to-cycle variation in SI and GDI engines.

The engine speed of 2000 rpm was selected as it represents a typical part-load urban cruising condition for this class of 1.3 L GDI engine. At this speed, the engine operates well below its rated output (5800 rpm), and viscous frictional losses constitute a proportionally larger fraction of total mechanical losses. This operating point therefore maximises the sensitivity of the performance measurements to differences in lubricant viscosity, making it the most appropriate condition for isolating and quantifying oil viscosity effects.

Table 2 Properties of Gasohol E20 [11]

Property	Value
Lower heating value (MJ/kg)	39.3
Density (kg/L)	0.757
Research Octane Number (RON)	95.2
Motor Octane Number (MON)	83.4
Carbon (% mass)	78
Hydrogen (% mass)	13
Oxygen (% mass)	8
H/C ratio (molar)	2
O/C ratio (molar)	0.077

The engine was operated under closed-loop stoichiometric control ($\lambda = 1.0$) throughout all experiments. The same fuel (Gasohol E20), injection timing (330° bTDC), injection pressure (100 bar), and ECU calibration were retained across all oil grades and test conditions, ensuring that combustion chemistry remained consistent and that observed performance differences are attributable solely to lubricant viscosity.

Table 3 summarises the mean stabilised thermal conditions recorded for each oil grade and load condition. For all tests, the lubricant temperature stabilised at 90 °C $\pm$ 1 °C, and the coolant inlet temperature was maintained at 80 °C while the coolant outlet remained at 87–90 °C across all three oil grades and both load conditions, confirming that the thermal boundary conditions were controlled equally and consistently across all tests. Performance differences observed are therefore attributable to the intrinsic viscosity characteristics of each lubricant grade.



Table 3 Mean stabilised thermal conditions for each test condition (coolant temperatures controlled equally across all three oil grades)

Oil Grade (SAE)	Load Condition	Oil Temp. (°C)	Coolant Inlet (°C)	Coolant Outlet (°C)
10W-30	Low (10 Nm)	90	80	87
10W-30	Medium (50 Nm)	91	80	90
10W-40	Low (10 Nm)	89	80	87
10W-40	Medium (50 Nm)	91	80	90
20W-50	Low (10 Nm)	90	80	87
20W-50	Medium (50 Nm)	91	80	90

2.3 Calculation and Data Analysis

2.3.1 Kinematic viscosity from the falling-ball method

A falling-ball viscometer was used to obtain the lubricant kinematic viscosity as a function of temperature under a consistent, comparative protocol. The steel sphere traveled a known distance $L = 0.25$ m, and the travel time (t) was recorded; the corresponding terminal velocity (V) was calculated as:

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Assuming steady, laminar falling-sphere motion (Stokes regime), the dynamic viscosity (μ) can be expressed as:

$$\mu = \frac{2r^2g(\rho_s - \rho_f)}{9V} \quad (2)$$

where r is the sphere radius (m), g is gravitational acceleration (m s^{-2}), ρ_s is the sphere density (kg m^{-3}), and ρ_f is the lubricant density (kg m^{-3}). The kinematic viscosity (V) was then obtained from:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_f} \quad (3)$$

Each condition was repeated three times, and the average value was reported. Because the primary objective is to compare lubricants under identical conditions, the falling-ball results are used mainly to establish relative viscosity–temperature trends between SAE grades. Any potential departures from ideal Stokes assumptions (e.g., wall effects or transitional Reynolds number) are treated consistently across all oils because the same geometry and procedure were applied.

2.3.2 Indicated work and IMEP

Cycle-resolved in-cylinder pressure $p(\theta)$ was recorded and synchronized with crank angle θ . The indicated work W_i over one engine cycle was obtained from the p – V integral:

$$W_i = \oint PdV \quad (4)$$

The indicated mean effective pressure (IMEP) was calculated as:

$$\text{IMEP} = \frac{W_i}{V_d} \quad (5)$$



where V_d is the total displaced volume of the engine (or the displaced volume of the measured cylinder, depending on the reporting basis). In this work, the combustion analysis software (DEWESoft) was used to compute indicated metrics consistently from the measured pressure traces, while the definitions above are provided for completeness and transparency.

2.3.3 Brake power, BSFC, BMEP and BTE

Brake torque (T) and speed (N) were measured by the dynamometer. Brake power (P_b) was calculated as:

$$P_b = 2\pi NT \quad (6)$$

with N in revolutions per second (or converted consistently from rpm). The brake specific fuel consumption (BSFC) was calculated as:

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (7)$$

Where $\dot{m}_f$ is the fuel mass flow rate.

For a four-stroke engine, brake mean effective pressure (BMEP) was calculated as:

$$BMEP = \frac{4\pi T}{V_d} \quad (8)$$

Brake thermal efficiency (BTE) was calculated from the fuel lower heating value (LHV) as:

$$BTE = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot LHV} \quad (9)$$

2.3.4 Friction means effective pressure

The friction means effective pressure (FMEP) was estimated from:

$$FMEP = IMEP - BMEP \quad (10)$$

3. Results and Discussion

The kinematic viscosity of engine oils with different SAE grades (10W-30, 10W-40, and 20W-50) was experimentally evaluated using a falling-ball viscometer setup. In this test, a steel ball with a diameter of 50.8 mm was allowed to move through each oil sample over a fixed vertical distance of 25 cm under steady-state conditions, while the time required for the ball to travel this distance was recorded at various oil temperatures ranging from 30 °C to 90 °C. The velocity of the ball was subsequently calculated, and the kinematic viscosity was determined based on Stokes' law and the relationship between viscous drag, buoyant force, and gravitational acceleration [11]. As illustrated in Fig. 3a, the time required for the ball to traverse the oil column decreases exponentially with increasing temperature for all oil grades. This trend reflects the reduction in internal friction as the oil molecules gain kinetic energy at elevated temperatures. Among the samples, SAE 20W-50 exhibited the longest fall time across all temperatures, indicating the highest viscosity and resistance to flow.

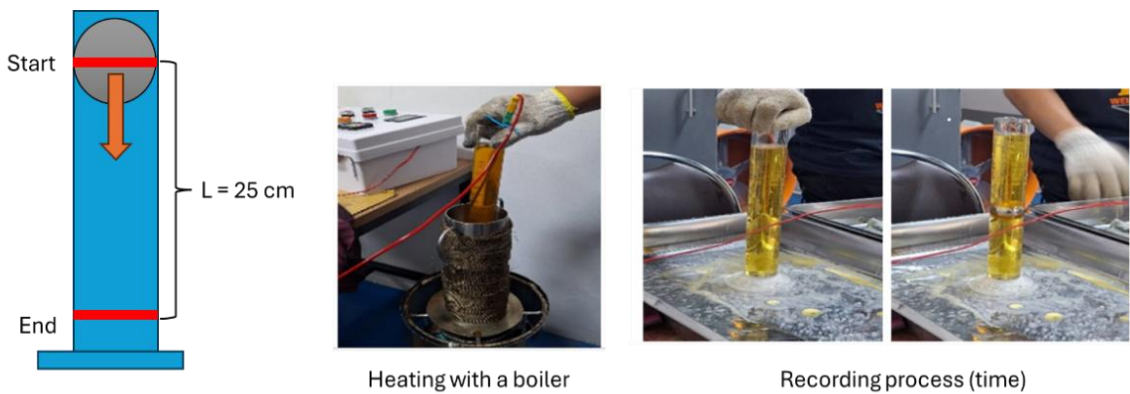


Fig. 1 Experimental procedure for the falling-ball viscosity measurement

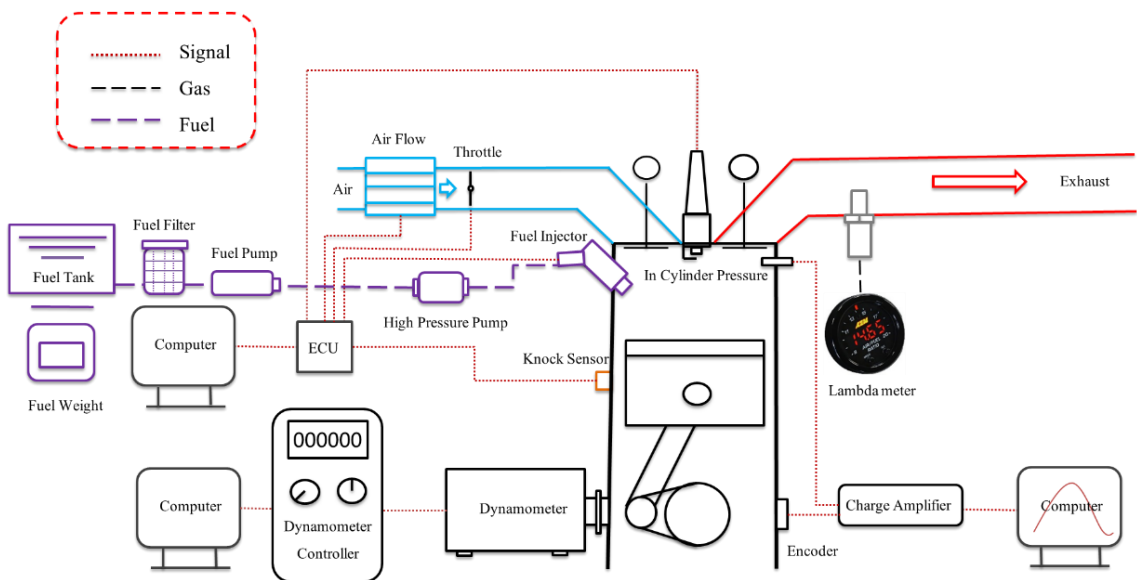


Fig. 2 The schematic of Schematic of GDI engine setup.

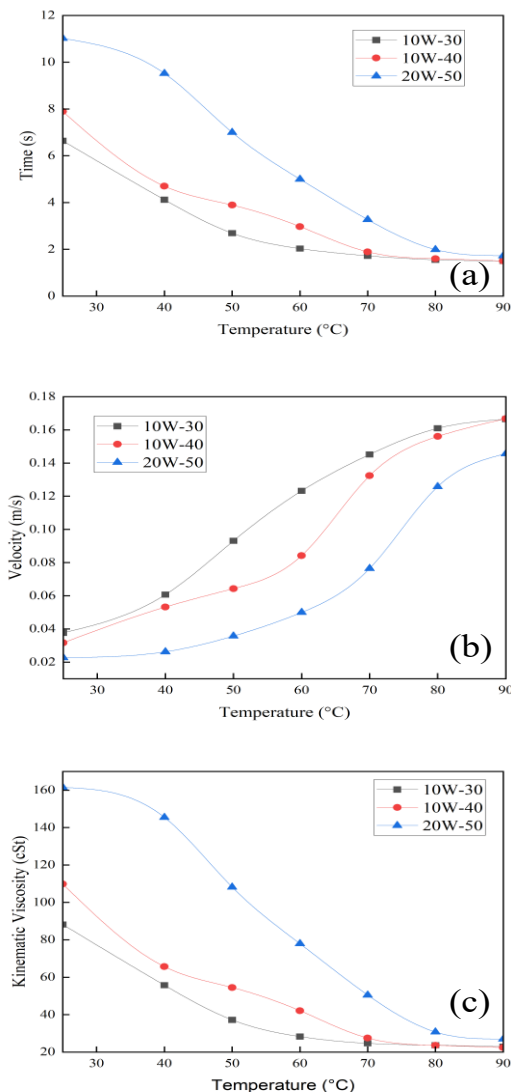


Fig. 3 Variation of (a) falling time, (b) velocity, and (c) kinematic viscosity of different engine oils (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50) as a function of temperature (30–90 °C) determined using a falling-ball viscometer with a 50.8 mm steel ball over a 25 cm path length

In contrast, SAE 10W-30 showed the shortest fall time, consistent with its lower viscosity index. At 30 °C, the measured time for 20W-50 was approximately 10.5 s, compared to 8.0 s for 10W-40 and 6.5 s for 10W-30, demonstrating the sensitivity of the falling-ball method to viscosity differences among lubricants of varying grades [12].

The relationship between velocity and temperature, shown in Fig. 3b, follows an inverse trend to that of fall time. The velocity of the ball increases with temperature due to the decrease in viscous resistance. The 10W-30 oil consistently produced the highest velocity at each temperature, while 20W-50 yielded the lowest. The rate of increase in velocity was most pronounced between 30 °C and 70 °C, beyond which the change became relatively gradual, indicating a transition to near-Newtonian flow behavior at elevated temperatures. This observation aligns with previous findings that engine oils exhibit reduced sensitivity to temperature once approaching their optimal operating viscosity range [13].

The variation of kinematic viscosity with temperature is depicted in Fig. 3c. As expected, viscosity decreased exponentially with rising temperature, consistent with the Arrhenius-type dependence commonly observed in lubricating oils. At 30 °C, the 20W-50 oil exhibited a kinematic viscosity of approximately 155 cSt, which was nearly double that of 10W-30 at 78 cSt.

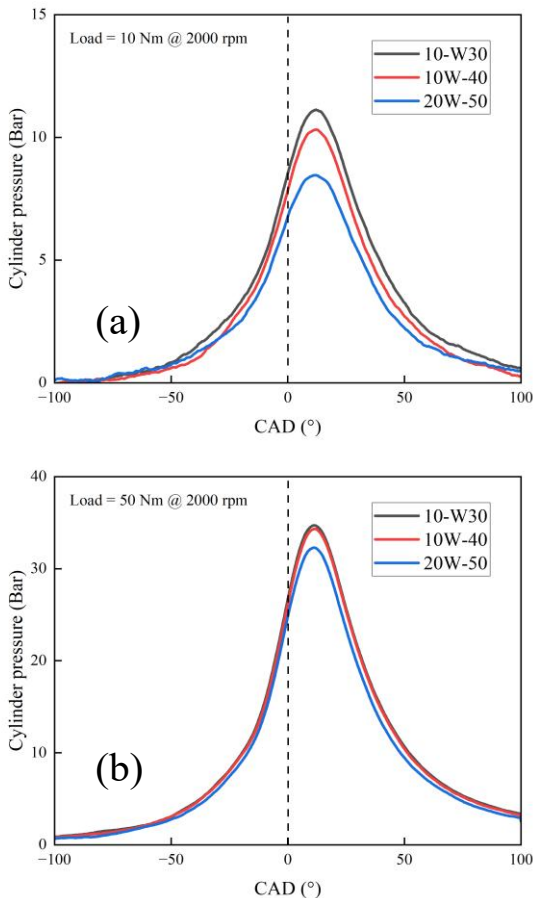


Fig. 4 In-cylinder pressure profiles of a GDI engine operating with different lubricating oils (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50) at 2000 rpm under (a) low load = 10 Nm and (b) medium load = 50 Nm conditions

However, at 90 °C, which represents the typical engine operating temperature, the viscosities of all three oils converged to a similar range (20–25 cSt). This suggests that at this operating state,

the influence of the oil grade is significantly diminished compared to its more pronounced effect at lower temperatures. Consequently, the difference in hydrodynamic film thickness among these grades becomes less significant under stabilized high-temperature conditions [14].

After determining the viscosity characteristics of each lubricant, combustion measurements were conducted on the 1.3-L, four-cylinder GDI engine at 2000 rpm under low-load (10 Nm) and medium-load (50 Nm) conditions. In-cylinder pressure was measured in an instrumented cylinder (one cylinder) while the engine operated in normal four-cylinder configuration. Fig. 4 presents the cylinder pressure traces at a constant engine speed of 2000 rpm, recorded at low load (10 Nm) and medium load (50 Nm), respectively.

As shown in Fig. 4a, the maximum cylinder pressure varied noticeably with the viscosity grade of the lubricant. At low load, SAE 10W-30 produced the highest peak pressure of approximately 11.8 bar, followed by 10W-40 (≈ 10.6 bar) and 20W-50 (≈ 9.2 bar). The higher peak pressure with lower-viscosity oil can be attributed to reduced hydrodynamic friction between the piston rings and cylinder wall during the compression and combustion phases. At the stabilised oil temperature of 90 °C, the viscosities of all three oils converged to a similar range (20–25 cSt), resulting in comparable ring-pack sealing



effectiveness across all grades. The slight advantage in peak cylinder pressure observed with 10W-30 is therefore primarily attributed to reduced hydrodynamic drag rather than superior sealing. The lower viscosity minimizes pumping and viscous losses, enabling more effective compression work transfer to combustion pressure. It should be noted that the elevated peak cylinder pressure associated with SAE 10W-30 does not reflect a proportional increase in indicated IMEP. Based on the thermodynamic relationship $IMEP = BMEP + FMEP$ and considering that BMEP was maintained constant across all test conditions through dynamometer control, any reduction in FMEP would necessarily yield a marginal decrease in IMEP. Consequently, the higher peak pressure observed with the lower-viscosity lubricant is more accurately interpreted as a result of diminished hydrodynamic resistance during the compression stroke, which facilitates more efficient in-cylinder work transfer within that specific phase of the cycle, rather than an enhancement of the total cycle-integrated indicated work. This interpretation is corroborated by the work of Abu-Nada et al. [15], who reported that a reduction in piston-assembly friction modifies the in-cylinder pressure trajectory without producing a commensurate change in the net indicated work output per cycle.

In contrast, the 20W-50 oil exhibited delayed pressure buildup and a slightly broader combustion duration, suggesting that higher viscosity hinders oil film flow at cold and light-load conditions, leading to increased mechanical friction and potentially slower heat release. Similar observations have been reported by E. Abu-Nada et al. [15], where thicker oils were associated with higher FMEP (Friction Mean Effective Pressure) and lower indicated efficiency at partial load.

Under medium engine load (Fig. 4b), the influence of oil viscosity became less pronounced. All lubricants produced similar pressure profiles, with peak pressures around 33–35 bar. The reduced sensitivity at medium load is due to elevated oil temperatures that decrease viscosity differences among the samples, allowing all lubricants to operate within the mixed- or hydrodynamic-lubrication regime. Consequently, combustion behavior was governed primarily by injection and ignition timing rather than by mechanical frictional differences.

Nevertheless, 10W-30 still exhibited a marginally higher peak pressure, implying slightly improved energy conversion efficiency. This can be linked to its lower internal resistance, which promotes more consistent ring motion and enhanced volumetric efficiency. However, excessively low viscosity may risk thinner oil films and reduced wear protection under high thermal



stress, particularly in GDI engines known for elevated piston crown and liner temperatures [16].

The observed differences in peak pressure at low load can be attributed to the combined effects of mechanical loss and sealing/film behavior, which influence the effective indicated work available for combustion development. Importantly, the comparison was made at identical speed-load setpoints after thermal stabilization; thus, the differences are interpreted as lubricant-driven trends rather than transient thermal effects.

Following the in-cylinder pressure analysis, the effects of lubricant viscosity on engine performance were examined in terms of indicated IMEP, FMEP, and the coefficient of variation of IMEP (IMEP_COV) under both low and medium load conditions at 2000 rpm, as summarized in Fig. 5.

As illustrated in Fig. 5a, the IMEP increased significantly with engine load for all oil grades, consistent with the higher fuel energy input under medium-load operation. At the typical engine operating temperature of 90 °C, the viscosities of all three lubricants converged to a similar range, as previously shown in Fig. 4c. Consequently, the sealing effectiveness and gas leakage (blow-by) across the piston rings were nearly identical for all oil grades.

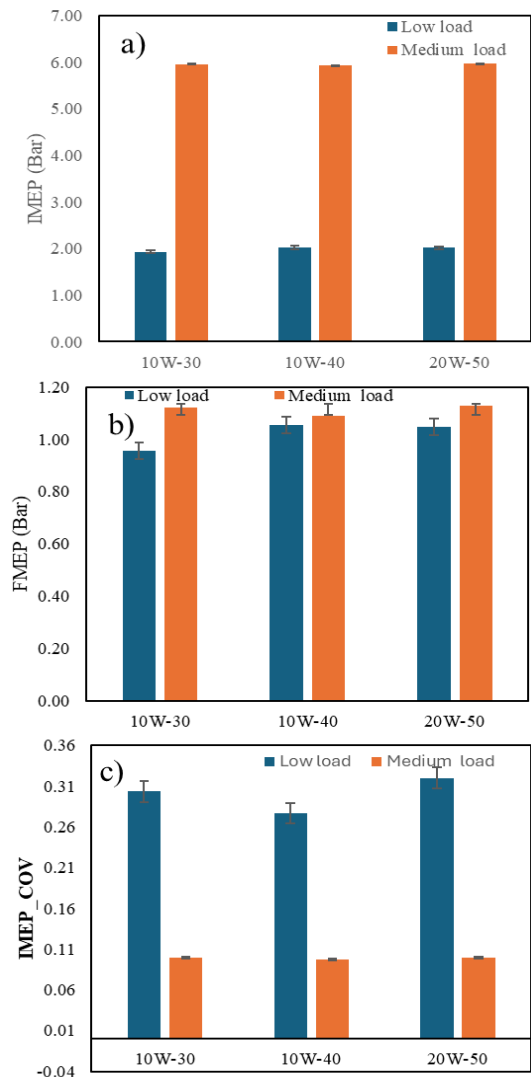


Fig. 5 Comparative analysis of (a) IMEP, (b) FMEP and (c) coefficient of variation of IMEP (IMEP_COV) for three lubricant grades (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50) under low load (10 Nm) and medium load (50 Nm) conditions at 2000 rpm.



This explains why the IMEP values yielded by 10W-30, 10W-40, and 20W-50 were very similar, with only a marginal difference observed at low load, where the slightly thinner film of 10W-30 might result in a minor reduction in pressure retention compared to the higher-viscosity grades.

At medium load (50 Nm), the IMEP values converged across all oil grades, indicating that the influence of viscosity diminishes once the oil reaches its fully warmed-up condition and enters the hydrodynamic lubrication regime. These findings are consistent with the trends observed in similar GDI engine studies, where low-viscosity lubricants improved part-load efficiency but offered minimal advantage under high-temperature conditions.

The FMEP values for all test conditions are presented in Fig. 5b. It was observed that FMEP slightly increased with load and with oil viscosity. The 20W-50 oil consistently produced the highest FMEP values, followed by 10W-40, while 10W-30 resulted in the lowest frictional losses. The differences are primarily governed by the hydrodynamic shear stress in the oil film and the pumping losses associated with thicker oils.

Although high-viscosity oils enhance the load-carrying capacity of the lubricant film, they also increase resistance to motion, particularly in the piston-ring–liner and crankshaft journal bearings. The higher FMEP, with 20W-50 under both

conditions confirms that excessive viscosity leads to increased mechanical losses and reduced indicated efficiency. At medium load, however, the rise in oil temperature reduces viscosity differences among the oils, which explains the relatively small deviation in FMEP at 50 Nm.

The coefficient of variation of IMEP (IMEP_COV) was used to assess cycle-to-cycle combustion stability, as shown in Fig. 5(c). At low load, all oils exhibited higher IMEP_COV values (0.25–0.32), indicating greater combustion variability under partial-load operation. At the same speed–load point, the higher-viscosity oil (20W-50) tended to show slightly higher sensor-reported airflow compared with lower-viscosity oils. This trend is consistent with the possibility that increased mechanical losses may require a marginally higher air and fuel throughput to maintain the same brake load; however, the airflow metric is used here mainly to support relative comparisons between lubricants under identical test conditions. Among them, 10W-30 and 20W-50 showed slightly higher variations compared to 10W-40, which may be linked to differences in oil–fuel interaction and combustion chamber wall wetting at low temperatures.

As engine load increased, IMEP_COV markedly decreased (<0.1 for all cases), signifying improved combustion stability. This improvement results from higher in-cylinder temperatures and enhanced fuel



vaporization, which mitigate the effects of oil viscosity on ignition and mixture formation. Such a trend is consistent with prior studies reporting that GDI engines exhibit more stable combustion with rising load and temperature [1].

To further evaluate the influence of lubricant viscosity on engine performance, the volumetric airflow (CFM) and fuel consumption rate were measured under both low load (10 Nm) and medium load (50 Nm) conditions at a constant engine speed of 2000 rpm, as shown in Fig. 6.

As depicted in Fig. 6a, the volumetric airflow increased markedly with engine load for all lubricant types, reflecting the greater air–fuel charge required to sustain higher torque output. At both load conditions, the 20W-50 oil produced a slightly higher airflow rate compared to 10W-30 and 10W-40, which can be attributed to the marginally higher throttle opening needed to overcome the greater frictional resistance of the higher-viscosity oil.

At low load, all oil types exhibited similar airflow behavior ($\approx 1.8\text{--}2.0$ CFM), while at medium load, the airflow increased to approximately 6.5–7.0 CFM, with 20W-50 showing the maximum. The minor increase in airflow for thicker oils suggests a compensatory rise in engine breathing effort due to higher mechanical drag. This behavior is consistent with prior studies that reported increased intake flow and pumping work when lubricating viscosity exceeds the optimal hydrodynamic range [3].

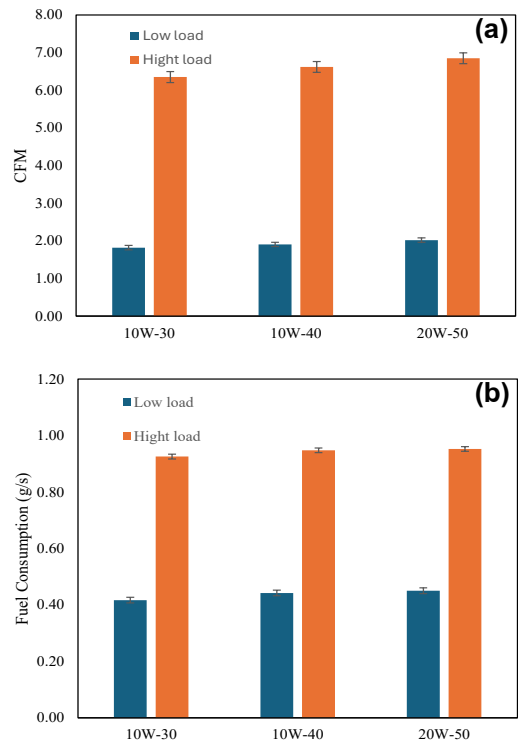


Fig. 6 (a) Variation of airflow rate (CFM) and (b) fuel consumption rate (g/s) of a GDI engine operating with different lubricants (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50) at 2000 rpm under low (10 Nm) and medium (50 Nm) load conditions

The corresponding fuel consumption rates are presented in Fig. 6b. Similar to airflow trends, fuel consumption increased significantly with engine load and viscosity grade. Under medium load, the fuel flow rate rose from approximately 0.9 g/s (10W-30) to 1.0 g/s (20W-50). This increase can be attributed to additional pumping and frictional

losses that must be compensated for higher fuel input to maintain the same brake output.

At low load, the differences among oils were less pronounced but still followed the same trend 10W-30 consumed the least fuel, followed by 10W-40 and 20W-50. The reduction in fuel flow for lower-viscosity oils is directly linked to lower frictional torque and improved thermal efficiency, particularly under light-load operation where viscous losses represent a substantial portion of total mechanical losses.

These findings emphasize that oil viscosity has a measurable impact on part-load fuel economy, even though its influence diminishes under high-temperature, medium-load conditions when viscosity differences narrow.

The brake thermal efficiency (BTE) of the GDI engine operated with three lubricant grades (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50) under low (10 Nm) and medium (50 Nm) load conditions at 2000 rpm is presented in Fig. 7. BTE represents the ratio of brake power output to the chemical energy input from the fuel, thereby reflecting the combined effects of combustion efficiency, frictional losses, and pumping work.

As shown in Fig. 7, BTE increased markedly with engine load for all lubricant types, rising from approximately 10–11% at low load to 24–25% at medium load. This improvement is primarily due to higher combustion temperatures and reduced

relative heat losses at elevated loads, which enhance the thermodynamic efficiency of the cycle. Furthermore, at medium load, the engine operates closer to stoichiometric conditions with improved fuel vaporization, minimizing incomplete combustion and increasing brake output.

Across all test conditions, the 10W-30 oil yielded the highest BTE, followed closely by 10W-40, while 20W-50 consistently produced the lowest values. The difference was more evident at low load, where viscous friction and pumping losses have a larger proportional effect on total mechanical losses. The lower viscosity of 10W-30 reduces hydrodynamic drag in critical interfaces such as piston-ring–liner and crank journal bearings allowing more of the combustion energy to be converted into brake work.

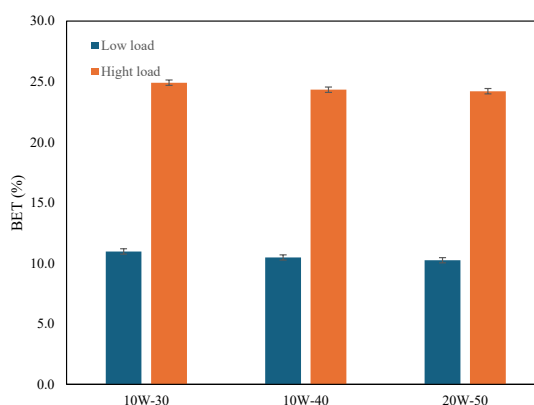


Fig. 7 BTE of a GDI engine operated with three lubricant grades (SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50)



At medium load, the gap between the oils narrowed, consistent with the findings in IMEP and FMEP analyses. As the oil temperature rises, viscosity differences diminish, leading all lubricants to behave similarly within the hydrodynamic regime. These results corroborate the general understanding that oil viscosity plays a significant role in part-load efficiency but becomes less influential once thermal equilibrium is reached.

4. Conclusion

This experimental investigation elucidated the influence of engine oil viscosity on the combustion and performance characteristics of a GDI engine under low- and medium-load conditions at 2000 rpm. Three multigrade lubricants SAE 10W-30, 10W-40, and 20W-50 were evaluated based on their flow behavior, in-cylinder pressure profiles, mean effective pressures, and thermal efficiency.

The principal findings of this study are as follows:

(1) At low load, SAE 10W-30 produced the highest peak cylinder pressure (~11.8 bar), greatest IMEP, and lowest FMEP, yielding the best brake thermal efficiency (~10–11%). These advantages are attributable to its lower hydrodynamic drag in the piston-ring–liner and bearing interfaces. (2) At medium load, viscosity differences diminished as oil temperature increased, resulting in comparable combustion and friction characteristics across all three grades and a peak BTE of approximately 24–25% for all lubricants. (3) SAE 10W-40 provided the

most stable cycle-to-cycle combustion (lowest IMEP_COV) across both load conditions, indicating a favourable balance between oil film protection and mechanical efficiency. (4) SAE 20W-50 consistently incurred the highest frictional losses and fuel consumption, particularly under partial-load operation.

In summary, lubricant viscosity significantly affects GDI engine performance at partial loads, where SAE 10W-30 offers the most favourable fuel economy and thermal efficiency. Its impact diminishes at medium loads due to temperature-induced viscosity convergence. SAE 10W-40 represents a practical compromise for applications where both efficiency and lubrication margin are important considerations, while SAE 20W-50 should be avoided where fuel economy is a priority. These findings provide actionable guidance for lubricant selection in modern GDI engine applications operating under typical urban driving conditions.

Future research should investigate: (i) a broader range of engine speeds (e.g., 1000–4000 rpm) to establish the speed-dependency of viscosity effects; (ii) transient operating conditions and cold-start behaviour, where viscosity differences are most pronounced; (iii) long-term tribological assessment to directly quantify wear rates and durability across oil grades; and (iv) the influence of lubricant additives and synthetic oil formulations on GDI engine combustion stability and efficiency.



Overall, the results indicate that lubricant viscosity significantly affects GDI engine behavior at low loads, influencing frictional losses, heat release, and energy conversion efficiency. However, its impact becomes minimal at medium loads, where temperature-induced viscosity reduction dominates. The 10W-30 oil provides the most favorable compromise between efficiency and protection during typical operating conditions, while 10W-40 may offer a more conservative lubrication margin than 10W-30 under conditions where film thickness is critical, with only a marginal reduction in brake thermal efficiency. Direct assessment of durability would require dedicated tribological testing beyond the scope of the present work.

5. References

- [1] M. Costa, U. Sorge, and L. Allocca, Numerical study of the mixture formation process in a four-stroke GDI engine for two-wheel applications, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, 19(4), 1212–1226.
- [2] A. Zare, T. A. Bodisco, P. Verma, M. Jafari, M. Babaie, L. Yang, M. M. Rahman, A. Banks, Z. D. Ristovski, R. J. Brown, and S. Stevanovic, Emissions and performance with diesel and waste lubricating oil: A fundamental study into cold start operation with a special focus on particle number size distribution, *Energy Conversion and Management*, 2020, 209, 112604.
- [3] A. Shimada, Y. Harigaya, M. Suzuki, and M. Takiguchi, An Analysis of Oil Film Temperature, Oil film thickness and heat transfer on a piston ring of internal combustion engine: The Effect of local lubricant viscosity, *SAE Transactions*, 2004, Technical Paper No. 2004-32-0024.
- [4] J. Blanco-Rodríguez, X. Simón-Montero, M. Cortada-García, S. Maroto, and J. Porteiro, Modelling the impact of reducing lubricant viscosity on a conventional passenger car fuel economy and wear protection, *Results in Engineering*, 2024, 24, 103159.
- [5] H. Zhang, W. Zhu, Y. Guo, W. Du, X. Yang, and B. Mei, Study on low temperature starting strategy for high power density diesel engines, *Proceedings of the Institution of mechanical engineers part D: Journal of Automobile Engineering*, 2025, 239(2–3), 665–679.
- [6] F. Rovai, E. Sartori, J. Crepaldi, and S. Rajala, Engine lubricant impact in light-vehicle fuel economy: A combined numerical simulation and experimental validation, *Lubricants*, 2025, 13, 137.
- [7] G. Saliba, R. Saleh, Y. Zhao, A. A. Presto, A. T. Lambe, B. Frodin, S. Sardar, H. Maldonado, C. Maddox, A. A. May, G. T. Drozd, A. H. Goldstein, L. M. Russell, F. Hagen, and A. L. Robinson, Comparison of gasoline direct-injection (GDI) and port fuel injection (PFI)



- vehicle emissions: Emission certification standards, cold-start, secondary organic aerosol formation potential, and potential climate impacts, *Environmental Science and Technology*, 2017, 51, 6542–6552.
- [8] W. Holweger, L. Bobbio, Z. Mo, J. Fliege, B. Goerlach, and B. Simon, "A Validated Computational Study of Lubricants under White Etching Crack Conditions Exposed to Electrical Fields, *Lubricants*, 2023, 11(2), 45.
- [9] M. M. da Silva, C. Kiesling, C. Gumhold, S. Warter, A. Wimmer, S. Schallmeiner, and G. Hager, Experimental Investigation of the influence of engine operating and lubricant oil parameters on sliding bearing and friction behavior in a heavy-duty diesel engine, *ASME 2021 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, Proceeding*, 2021, ICEF2021-66874.
- [10] M. Garcia Tobar, K. Pinta Pesantez, P. Jimenez Romero, and R. W. Contreras Urgiles, The impact of oil viscosity and fuel quality on internal combustion engine performance and emissions: An experimental approach, *Lubricants*, 2025, 13(4), 188.
- [11] N. Syifa, H. Hartono, and S. Sulhadi, "Determination of terminal velocity and fluid viscosity using falling ball viscometer with video tracker application, *Journal Pendidikan Fisika*, 2022, 10(2), 75-80.
- [12] S. Sittichompoo, N. Buntek, T. Iamcheerangkoon, K. Ketpirune, P. Promhuad, A. Chaimanatsakun, and K. Theinnoi, The effect of port water injection on knocking and emission characteristics of natural-aspirated GDI engine operated under cruising condition, *International Journal of Engine Research*, 2025, 26(11), 1761–1784.
- [13] W. Sriratana, S. Nakklinkoon, and S. Satthamsakul, Test of oil lubricant viscosity by using hall effect sensor, 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), *Proceeding*, 2018, 1–4.
- [14] J. Moder, F. Grün, F. Summer, T. Gasperlmaier, and M. Andritschky, Effect of temperature on wear and tribofilm formation in highly loaded DLC-steel line contacts, *Tribology International*, 2018, 123, 120–129.



- [15] E. Abu-Nada, I. Al-Hinti, A. Al-Sarkhi, and B. Akash, Effect of piston friction on the performance of SI engine: A new thermodynamic approach, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(2), 022802.
- [16] T. Kaneko, K. Yamamori, H. Suzuki, K. Onodera, and S. Ogano, Friction reduction technology for low viscosity engine oil compatible with LSPI prevention performance, SAE 2016 International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, 2016, Technical Paper No. 2016-01-2276.



การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องหวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการฟั่นสี

โยธิน สุริยมาตร¹ มานพ ดอนหมื่น^{1*} กิตติพิชญ์ หลาบหนองแสง¹ กิตติโรจน์ โชติชื่น²
รณชัย ยุ่งพรมมา³ ทศพล แจ้งน้อย⁴ และ สหสวรรษ ภูจิระ⁴

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

² แผนกวิชาช่างเทคนิคอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น

³ แผนกวิชาช่างเขียนแบบเครื่องกล, วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น

⁴ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: manop.do@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ: 5 พฤศจิกายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 3 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 4 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรของไทยกำลังเผชิญกับความท้าทายที่สำคัญเกี่ยวกับการขาดแคลนแรงงาน และความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการฟั่นสี ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดคอขวดในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องหวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติในกระบวนการฟั่นสี ได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลาเพื่อวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานและกระบวนการที่มีอยู่ ใช้แผนภูมิแก๊งปลาเพื่อระบุสาเหตุหลักของความไม่มีประสิทธิภาพ พัฒนาระบบอัตโนมัติโดยใช้มอเตอร์ ระบบเกียร์ทด และระบบควบคุม PLC จากนั้น ทำการทดสอบประสิทธิภาพ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่าอุปกรณ์จับยึดแบบอัตโนมัติที่พัฒนา สามารถลดเวลาในกระบวนการฟั่นสีจาก 120 นาที เหลือ 95.77 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 20.19 นอกจากนี้ จำนวนขั้นตอนการทำงานลดลงจาก 19 ขั้นตอน เหลือ 13 ขั้นตอน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 31.58 มีมูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน 3,587,520 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 0.16 ปี หรือ 2 เดือน นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มกำลังการผลิตจาก 4 เครื่อง เป็น 5 เครื่องต่อวัน ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและเพิ่มรายได้ด้านการผลิต

คำสำคัญ: อุปกรณ์จับยึด; ระบบอัตโนมัติ; เครื่องหวดข้าว; กระบวนการฟั่นสี; การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา

Design and Development of a Fixture for an Automated Mobile Rice Thresher to Improve Painting Process Efficiency

Yothin Suriyamart¹, Manop Donmuen^{1*}, Kittipid Labnongsaeng¹, Kittirod Chotchuen²,
Ronnachai Yungpromma³, Tossapol Jangnoi⁴ and Sahassawas Poojeera⁴

¹ Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

² Department of Industrial Technology, Khon Kaen Technical College

³ Department of Mechanical Drafting Technology, Khon Kaen Technical College

⁴ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

* Corresponding Author, E-mail: manop.do@rmuti.ac.th

Received: 5 November 2025; Revised: 3 April 2026; Accepted: 4 June 2026

Online Published: 19 August 2026

Abstract: The Thai agricultural machinery manufacturing industry faces critical challenges pertaining to labor shortages and the imperative to enhance production efficiency, particularly within the painting process, which represents a significant bottleneck in the production workflow. This research aimed to design and develop an automated mobile fixture device for rice thresher in the painting process. Motion and time study techniques were applied to analyze the operational workflow and identify process, utilized fishbone diagrams to systematically identify root causes of inefficiencies, developed an automated system incorporating an electric motor, gear reduction mechanism, and Programmable Logic Controller (PLC)-based control system. Finally, performance testing and economic cost-benefit analysis. The findings revealed that the developed automated fixture device reduced painting process cycle time from 120 minutes to 95.77 minutes, representing a 20.19% reduction, Furthermore, the number of operational steps was decreased from 19 steps to 13 steps, corresponding to a reduction of 31.58%. Economic analysis revealed an operational value of 3,587,520 Thai Baht per annum, with a payback period of 0.16 years, equivalent to approximately two months. In addition, the production capacity was increased from 4 units to 5 units per day, thereby enhancing manufacturing efficiency and augmenting production revenue.

Keywords: Fixture; Automation System; Rice Threshing; Painting Process; Motion and Time Study

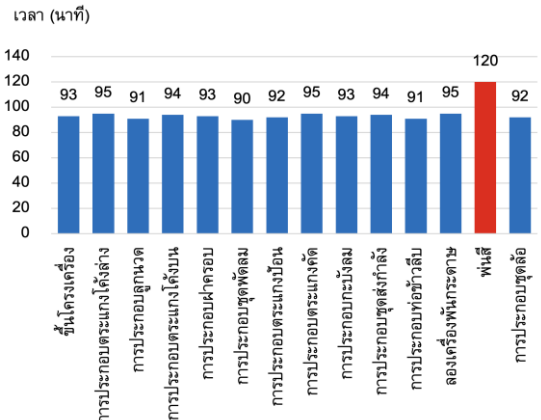


1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรถือเป็นภาคอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศไทย ที่มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนภาคการเกษตรซึ่งเป็นรากฐานทางเศรษฐกิจของประเทศ จากข้อมูลพบว่ามูลค่าตลาดในประเทศของอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรของไทยมีแนวโน้มเติบโตต่อเนื่องอยู่ที่ 158.5 - 171.0 พันล้านบาท เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.0 - 4.0% ต่อปีในช่วงปี 2567-2569 [1] เครื่องนวดข้าวถือเป็นเครื่องจักรกลการเกษตรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศ การผลิตเครื่องนวดข้าวในประเทศไทยมีประวัติยาวนานกว่า 50 ปี โดยมีผู้ผลิตหลักกระจายอยู่ในภาคอีสาน ภาคกลางและภาคเหนือ

บริษัท ตรีศึกษา ABC จำกัด เป็นหนึ่งในผู้ผลิตเครื่องนวดข้าวรายสำคัญของประเทศ ที่ดำเนินธุรกิจมานานกว่า 40 ปี มีประสบการณ์ในการผลิตเครื่องนวดข้าวอเนกประสงค์ที่สามารถใช้ในการนวดพืชหลากหลายชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ทานตะวัน ปอเทือง และถั่วลิสงทุกชนิด ทำให้ได้รับความนิยมจากเกษตรกรทั้งในประเทศและต่างประเทศ เครื่องนวดข้าวที่ผลิตมีหลายรุ่นหลายขนาด ตั้งแต่ขนาด 4 ฟุต 5 ฟุต 6 ฟุต 7 ฟุต และ 8 ฟุต โดยเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 ฟุตเป็นรุ่นที่มียอดขายสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 60 ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์สายการผลิตพบว่ากระบวนการพ่นสีซึ่งเป็นหนึ่งใน 14 สถานีงานของสายการประกอบเครื่องนวดข้าว มีลักษณะเป็นคอขวด (Bottleneck Process) ที่ใช้เวลามากที่สุด โดยใช้เวลารวม 120 นาที จากเวลาการผลิตทั้งหมด 1,391 นาที ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวม



รูปที่ 1 แสดงเวลาการผลิตเครื่องนวดข้าว (ก่อนปรับปรุง)

ของการผลิต ปัจจุบันโรงงานสามารถผลิตเครื่องนวดข้าวได้เพียง 4 เครื่องต่อวัน แต่มีความต้องการจากตลาดเพิ่มขึ้นเป็น 5 เครื่องต่อวัน หากไม่สามารถปรับปรุงกำลังการผลิตได้ จะสูญเสียโอกาสทางการค้าสูงถึง 240 เครื่องต่อปี หรือคิดเป็นมูลค่า 30.6 ล้านบาทต่อปี

จากการศึกษาพบว่า กระบวนการพ่นสีมีปัญหาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต ขาดความต่อเนื่องในการทำงานเนื่องจากต้องรอให้คนงานเปลี่ยนตำแหน่งการพ่นสี และความซับซ้อนของขั้นตอนการทำงานที่ต้องใช้แรงงานคนจำนวนมาก จากปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในกระบวนการพ่นสี โดยอุปกรณ์จับยึด (Fixture) จะถูกออกแบบให้รองรับน้ำหนัก และเคลื่อนย้ายพร้อมชิ้นงานที่มีน้ำหนักมากเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับน้ำหนักของชิ้นงาน [2] ซึ่งเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ (Automation System and



Robot) ได้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาสายการผลิต เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาด ดังนั้น ในสายการผลิตและการประกอบจึงหันมาใช้ กระบวนการแบบอัตโนมัติมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อความ รวดเร็วในการดำเนินงานและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม ของกระบวนการผลิต [3] นอกจากนี้การควบคุมระบบ อัตโนมัติต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมผลิตนิยมใช้ PLC ซึ่งมี คุณสมบัติเด่นด้านความน่าเชื่อถือ ความยืดหยุ่นใน การควบคุม และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์และ หุ่นยนต์ [4] จากการศึกษาเปรียบเทียบระบบพ่นสีด้วย Robot กับการพ่นสีด้วยปืนแบบแมนนวล (Manual) พบว่าโดยรวมระบบอัตโนมัติสามารถควบคุมความ หยาบฟิล์ม ความหนาพื้นผิว และการยึดเกาะได้ดีขึ้น โดยใช้พลังงานและเวลาในการพ่นลดลง [5] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบอัตโนมัติในการยกระดับ ประสิทธิภาพการผลิต เพื่อสนับสนุนการออกแบบและ พัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าว งานวิจัยนี้ยังอ้างอิงแนวทาง จากการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time Study) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์และ ปรับปรุงวิธีการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [6, 7] รวมถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของ การลงทุน เช่น ระยะเวลาคืนทุน [8] เป็นต้น ตัวอย่าง การประยุกต์ใช้อุปกรณ์จับยึด (Fixture) ในงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง เช่น การออกแบบและใช้งานฟิกซ์เจอร์ เฉพาะทางที่พัฒนาขึ้นใหม่ช่วยลดเวลาและความ ผิดพลาดในกระบวนการเชื่อม สามารถลดรอบการผลิต (Cycle Time) ลงได้ถึง 20% [9] และยังสามารถเพิ่ม ผลิตภาพในสายการผลิตแคลมป์เบรกได้ 84.84% แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้อุปกรณ์จับยึด (Fixture) ในกระบวนการเชื่อมด้วย Robot [10]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ และพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่ อัตโนมัติในกระบวนการพ่นสี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การผลิต ลดเวลาการทำงาน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยัง มีการวิเคราะห์ประเมินประสิทธิภาพและความคุ้มค่า ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยออกแบบพัฒนาและทดลอง ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การศึกษา ข้อมูลกระบวนการพ่นสี 2) การวิเคราะห์สาเหตุของ การพ่นสีล่าช้าใช้เวลานาน 3) การออกแบบและผลิต อุปกรณ์จับยึด (Fixture) และ 4) การทดสอบและ ประเมินผล โดยการศึกษาข้อมูลการทำงานก่อนการ ปรับปรุงของกระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 ฟุตใช้เทคนิคการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time Study) และข้อมูลด้านการผลิต ของสถานประกอบการ

2.1 การศึกษาข้อมูลกระบวนการพ่นสี

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและนำข้อมูลขั้นตอนการ ทำงานในกระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าวด้วย Robot ปัจจุบันก่อนการปรับปรุงจากสถานประกอบการ แสดงดังรูปที่ 2 โดยการใช้แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) แสดงดังตารางที่ 1 เพื่อ วิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการพ่นสี โดยใช้สัญลักษณ์มาตรฐาน 5 ประเภท ได้แก่ การ ดำเนินงาน การเคลื่อนที่ การรอคอย การตรวจสอบ และการเก็บรักษา



รูปที่ 2 กระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าวด้วย Robot

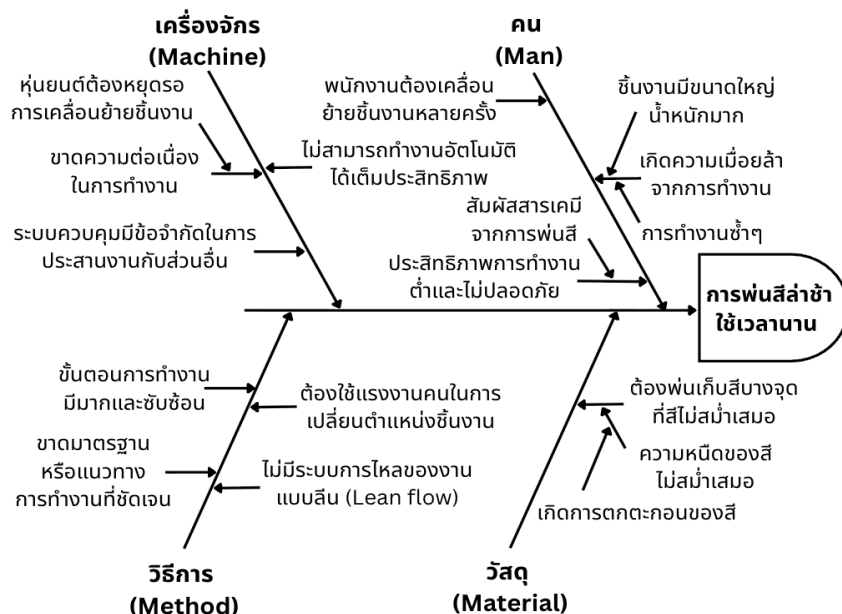
2.2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหากระบวนการพ่นสีล่าช้าใช้เวลานาน

การศึกษาข้อมูลพบว่ากระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 พ่นด้วยหุ่นยนต์ (Robot) แสดงดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย 19 ขั้นตอน ใช้เวลารวมกระบวนการพ่นสี 120 นาที ผู้วิจัยได้ทำการหาสาเหตุของปัญหา โดยการวิเคราะห์ปัญหากระบวนการพ่นสีล่าช้า ใช้เวลานานด้วยแผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram) [11] ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 แผนภูมิการไหลของกระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 พ่น (ก่อนปรับปรุง)

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	สัญลักษณ์					เวลา (นาที)
	○	⇒	D	□	▽	
1. รถโฟล์คลิฟท์ยกงานมาวางบนแท่นรองชิ้นงาน	●					3.42
2. พนักงานชิ้นงานเข้าห้องพ่นสีให้ตรงตำแหน่งโซนที่ 1		●				1.12
3. ล็อกสลักกับพื้น	●					3.20
4. Robot พ่นสีโซนที่ 1	●					1.50
5. ถอดสลักและเลื่อนแท่นไปโซนที่ 2 และล็อกสลักกับพื้น	●					3.49
6. Robot พ่นสีโซนที่ 2	●					1.60
7. ถอดสลักและเลื่อนแท่นไปโซนที่ 3 และล็อกสลักกับพื้น	●					3.33
8. Robot พ่นสีโซนที่ 3	●					1.70
9. ถอดสลักและเลื่อนแท่นออกมานอกห้องพ่นสี	●					3.35
10. รถโฟล์คลิฟท์ยกงานกลับด้านแล้ววางบนแท่นรองชิ้นงาน	●					3.47
11. พนักงานชิ้นงานเข้าห้องพ่นสีให้ตรงตำแหน่งโซนที่ 4		●				1.58
12. ล็อกสลักกับพื้น	●					3.03
13. Robot พ่นสีโซนที่ 4	●					1.60
14. ถอดสลักและเลื่อนแท่นไปโซนที่ 5 และล็อกสลักกับพื้น	●					3.25
15. Robot พ่นสีโซนที่ 5	●					1.60
16. ถอดสลักและเลื่อนแท่นไปโซนที่ 6 และล็อกสลักกับพื้น	●					2.97
17. Robot พ่นสีโซนที่ 6	●					1.65
18. ถอดสลักและเลื่อนแท่นออกมานอกห้องพ่นและยกชิ้นงานออก	●					3.14
19. รอสีแห้ง					●	75.00
รวมเวลา						120.00

หมายเหตุ: ○ = การปฏิบัติงาน ⇒ = การเคลื่อนที่ D = การรอคอย □ = การตรวจสอบ ▽ = การจัดเก็บ



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ปัญหาการพ่นสีล่าช้าใช้เวลานาน ด้วยแผนภูมิแก๊งปลา

การวิเคราะห์ปัญหาการพ่นสีล่าช้าใช้เวลานาน ด้วยแผนภูมิแก๊งปลา โดยการจำแนกสาเหตุเป็น 4 หมวดตามหลัก 4M ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุ (Material) และวิธีการ (Method) สาเหตุหลักในด้านคนพบว่า พนักงานต้องเคลื่อนย้ายชิ้นงานหลายครั้ง และมีการทำงานลักษณะเดิมซ้ำๆ ในด้านเครื่องจักรพบว่า Robot ต้องหยุดรอการทำงานจากขั้นตอนการเคลื่อนย้ายชิ้นงานและขั้นตอนอื่น ๆ ประกอบด้วยขั้นตอนที่ 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 16 และ 18 เป็นเวลารวม 35.35 นาที (ไม่รวมขั้นตอนการรอสีแห้ง) ส่งผลให้กระบวนการทำงานขาดความต่อเนื่อง และไม่สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในด้านวิธีการพบว่าขั้นตอนการทำงานมีหลายขั้นตอน และการเปลี่ยนตำแหน่งพ่นสีต้องใช้แรงงานคน

ในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหาล่าช้าในกระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าว โดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา มาประเมินร่วมกับเครื่องมือเมทริกซ์ผลกระทบและความยาก (Impact-Difficulty Matrix) แสดงดังรูปที่ 4 เพื่อคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณาจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ผลกระทบต่อกระบวนการผลิต และ 2) ความยากง่ายในการแก้ไขปัญา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A คือ ผลกระทบสูง สามารถแก้ไขง่าย กลุ่ม B คือ ผลกระทบต่ำ สามารถแก้ไขง่าย กลุ่ม C คือ ผลกระทบสูง สามารถแก้ไขยาก และ กลุ่ม D คือ ผลกระทบต่ำ สามารถแก้ไขยาก



Difficulty (Easy->Hard)	(D) Low impact/Hard - การจ้างพนักงานเพิ่มในกระบวนการ	(C) High impact/Hard - สร้างอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติ
	(B) Low impact/Easy - จัดหาอุปกรณ์เซฟตี้ (PPE) เพื่อลดความเหนื่อยล้าและความเสี่ยงจากสารเคมี - ทำ SOP มาตรฐานการผสมสีเพื่อลดปัญหาสีไม่สม่ำเสมอ	(A) High impact/Easy

Impact (Low->High)

รูปที่ 4 การวิเคราะห์แบบตารางจัดรัส
(Impact-Difficulty Matrix)

จากการประเมินพบว่า แนวทางการแก้ไขปัญหามีเบื้องต้น เช่น การปรับปรุงมาตรฐานการทำงาน (Method) หรือการจัดการอุปกรณ์ จัดเป็นแนวทางที่ดำเนินการได้ง่าย (Low Difficulty) แต่ส่งผลกระทบต่อ การแก้ปัญหาในระดับต่ำ (Low Impact) เนื่องจากไม่สามารถแก้ไขข้อจำกัดหลักเรื่องความต่อเนื่องในกระบวนการพ่นสีและน้ำหนักของชิ้นงานได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาเชิงโครงสร้าง โดยเลือกแนวทางการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) แบบเคลื่อนที่อัตโนมัติ ซึ่งแม้จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มแนวทางที่มีความท้าทายและใช้ทรัพยากรในการพัฒนาสูง (High Difficulty - Major Projects) เนื่องจากต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีทางวิศวกรรม ทั้งมอเตอร์ ระบบเกียร์ทด และระบบควบคุม PLC ซึ่งแนวทางดังกล่าวถูกประเมินว่าจะส่งผลกระทบเชิงบวกในระดับสูงมาก (High Impact) ต่อกระบวนการผลิตโดยรวม เนื่องจากสามารถจัดการความสูญเสียเปล่า (Wastes) จากการรอคอยในกระบวนการพ่นสี ลดปัญหาด้านแรงงานได้อย่างเป็นรูปธรรม

2.3 แนวทางการแก้ปัญหา

จากผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา กระบวนการพ่นสีล่าช้าใช้เวลานาน คณะผู้วิจัยจึงได้พิจารณาเลือกแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบที่สามารถแก้ไขสาเหตุหลักดังกล่าว ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติ เนื่องจากลดความจำเป็นของขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน โดยเฉพาะการเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่เดิมต้องใช้แรงงานคนจำนวนมาก ส่งผลให้การพ่นสีเครื่องนวดข้าวสามารถดำเนินไปอย่างต่อเนื่องในทั้งสองด้าน นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวยังช่วยแก้ไขข้อจำกัดในด้านเครื่องจักร (Machine) เนื่องจากเมื่ออุปกรณ์จับยึด (Fixture) สามารถเคลื่อนที่และหมุนชิ้นงานได้เอง หุ่นยนต์พ่นสีก็สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ลดเวลาหยุดรอคอย และเพิ่มศักยภาพการทำงานของระบบอัตโนมัติให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในด้านแรงงานคน (Man) การนำอุปกรณ์จับยึด (Fixture) แบบอัตโนมัติมาใช้สามารถลดภาระการทำงานหนัก เช่น การดัน และหมุนชิ้นงาน ซึ่งเป็นการลดปัญหาที่เกิดจากความเหนื่อยล้าของผู้ปฏิบัติ นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของกระบวนการพ่นสีผ่านตำแหน่งหยุดแบบอัตโนมัติทั้ง 6 โซนที่กำหนดด้วยเซนเซอร์ ทำให้การพ่นสีมีความแม่นยำและคงที่มากขึ้นกว่าการจัดตำแหน่งด้วยแรงงานคน ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและคุ้มค่าที่สุดในการแก้ไขข้อขาดของกระบวนการพ่นสี ทั้งในแง่ของการลดเวลาการทำงาน การลดภาระของแรงงานคน การเพิ่มความต่อเนื่องของระบบหุ่นยนต์ และการยกระดับคุณภาพของกระบวนการผลิตโดยรวม



คณะผู้วิจัยมีแนวทางการแก้ปัญหา โดยกำหนดแนวทางการออกแบบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติในกระบวนการพ่นสี ได้แก่ 1) อุปกรณ์จับยึดสามารถรองรับน้ำหนักเครื่องนวดข้าวขนาดสูงสุด 2 ตัน เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงบนรางเพื่อเข้า-ออกห้องพ่นสี ระยะทาง 8 เมตร และสามารถหมุนได้ 180 องศา แบบไป-กลับ เพื่อพ่นสีเครื่องนวดข้าวได้ทั้ง 2 ด้าน และ 2) การทำงานแบบอัตโนมัติ ควบคุมด้วยระบบ PLC อุปกรณ์จับยึดสามารถวิ่งเข้าออกห้องพ่นสีได้ ควบคุมการหมุนได้ 180 องศา และสามารถหยุดในตำแหน่งที่พ่นสีได้ 6 ตำแหน่ง (6 โซน) แบบอัตโนมัติ โดยทำงานร่วมกับระบบหุ่นยนต์ (Robot) พ่นสีที่มีอยู่เดิม

ในการออกแบบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) ใช้โปรแกรมออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ SIEMENS NX ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และใช้โปรแกรมออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนไหวของระบบ เพื่อตรวจสอบการทำงานและหาจุดที่อาจมีปัญหา ก่อนการผลิตจริง [12] หลังจากการผลิตอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติในกระบวนการพ่นสีแล้วเสร็จ จะมีการตรวจสอบคุณภาพใน 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การตรวจสอบวัสดุ 2) การตรวจสอบระหว่างการผลิต และ 3) การตรวจสอบก่อนใช้งาน สำหรับการติดตั้งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การติดตั้งโครงสร้างและระบบกลไกการทำงาน 2) การติดตั้งระบบไฟฟ้าและควบคุม และ 3) การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์จับยึด (Fixture) หลังการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์

2.4 การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบและประเมินผลในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบการเก็บข้อมูลและประเมินผล มีแนวทางดังนี้

1) การออกแบบการทดลอง การเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ก่อนการปรับปรุง (Before) และหลังการปรับปรุง (After) โดยในแต่ละช่วงทำการทดลองจำนวน 10 รอบ ($n = 10$) ซึ่งแต่ละรอบเป็นการวัดเวลาการพ่นสีครบกระบวนการผลิตเครื่องนวดข้าว 1 เครื่อง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอในการวิเคราะห์เชิงสถิติ

2) วิธีการเก็บข้อมูล ทำการบันทึกเวลาการทำงานในแต่ละขั้นตอนตามแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต (Flow Process Chart) ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 โดยใช้หน่วยเป็นนาที และดำเนินการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาการทำงานปกติของโรงงาน (8 ชั่วโมงต่อวัน) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อม 3) ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยของเวลาการผลิต (Mean) และ ร้อยละการปรับปรุง (% Improvement) และ 4) การวิเคราะห์ทางสถิติใช้การทดสอบสมมติฐานแบบ Paired Sample t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลชุดเดียวกันในสถานะที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ สมมติฐานการวิจัย H_0 : ค่าเฉลี่ยเวลาการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงไม่แตกต่างกัน H_1 : ค่าเฉลี่ยเวลาการผลิตหลังการปรับปรุงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



2.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 คือ มูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ 1) ผลประหยัดด้านการลดเวลาการพ่นสี 2) กำไรจากการเพิ่มผลผลิตเครื่องนวดข้าว จากการเพิ่มผลผลิต และ 3) ต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดจากการใช้งานของชุดอุปกรณ์จับยึด คำนวณจากกำลังไฟฟ้า ส่วนที่ 2 คือการคำนวณระยะเวลาการคืนทุนจากการใช้เงินลงทุนในการพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวในกระบวนการพ่นสี โดยนำมูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานจากส่วนที่ 1 มาคำนวณเทียบเงินลงทุนในการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องนวดข้าว เพื่อประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน

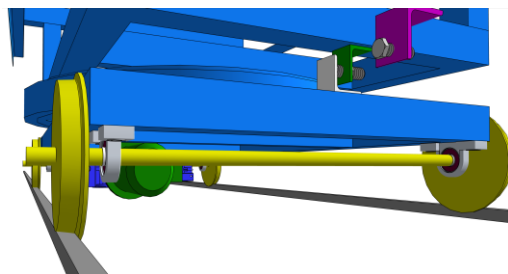
3. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น ผลการออกแบบอุปกรณ์จับยึด ผลการทดสอบอุปกรณ์จับยึด ผลการปรับปรุงกระบวนการพ่นสี และผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ แสดงรายละเอียดดังนี้

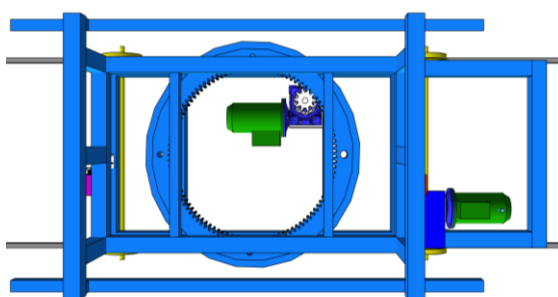
3.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์จับยึด

3.1.1 การออกแบบเชิงกล

การออกแบบเชิงกลประกอบด้วย โครงสร้างหลักจากเหล็ก SS400 ขนาดยาว 2,200 มิลลิเมตร กว้าง 1,200 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร ออกแบบล้อรองรับน้ำหนัก จำนวน 4 ล้อ มีลักษณะคล้ายล้อรถไฟเพื่อใช้ในระบบการเคลื่อนที่บนราง โดยจะมีขอบนูน (Flange) อยู่ด้านในของล้อ ผิวสัมผัสล้อ (Tread) เป็นทรงเอียงมุม 2 องศา ดังรูปที่ 5 เพื่อป้องกันล้อหลุดรางขณะวิ่งเป็นเส้นตรงหรือเข้าโค้ง โดยโครงสร้างดังกล่าวสามารถรองรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 2,000 กิโลกรัม



รูปที่ 5 การออกแบบชุดล้อเคลื่อนที่



รูปที่ 6 การออกแบบชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเข้า-ออกห้องพ่นสี และการหมุน 180 องศา

การออกแบบระบบการเคลื่อนที่และระบบการหมุน ดังรูปที่ 6 จะใช้มอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทด อัตราทด 1:40 มีความเร็วการเคลื่อนที่ 0.5 เมตรต่อนาที ระยะการเคลื่อนที่บนราง 8 เมตร ระบบการหมุนใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทด อัตราทด 1:50 เพื่อหมุนขับเคลื่อนเฟืองวงแหวน (Ring Gear) อัตราทด 1:60 มุมการหมุน 180 องศา ค่าความเผื่อ backlash 1 องศา เวลาการหมุนตั้งแต่ 0-180 องศาใช้เวลา 30 วินาที

3.1.2 การควบคุมระบบอัตโนมัติ

การควบคุมระบบอัตโนมัติของอุปกรณ์จับยึดเพื่อทำการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงบนรางเพื่อเข้า-ออก



บทความวิจัย

ห้องพ่นสี สามารถหมุนได้ 180 องศา แบบไป-กลับ โดยทำงานร่วมกับระบบหุ่นยนต์ (Robot) พ่นสี มี 6 ตำแหน่งในการหยุดเคลื่อนที่เพื่อให้ระบบหุ่นยนต์พ่นสีในตำแหน่งดังกล่าว

การออกแบบระบบควบคุมใช้ PLC Mitsubishi มีจำนวน Input 16 จุด และ Output 16 จุดเพื่อเชื่อมต่อกับระบบ Robot พ่นสีที่มีอยู่เดิม มีอุปกรณ์ตรวจจับประกอบด้วย Limit Switch 6 ตัว ใช้สำหรับกำหนดตำแหน่งการหยุดเพื่อทำการพ่นสี ติดตั้ง Proximity Sensor จำนวน 4 ตัว ใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งการหมุนของอุปกรณ์จับยึด (Fixture) และมี Emergency Stop 3 ตัว ใช้สำหรับการป้องกันอุบัติเหตุ โดยผลการออกแบบและการวางตำแหน่งการหยุดของอุปกรณ์จับยึดเครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติเพื่อทำการพ่นสี แสดงดังรูปที่ 7 และ 8

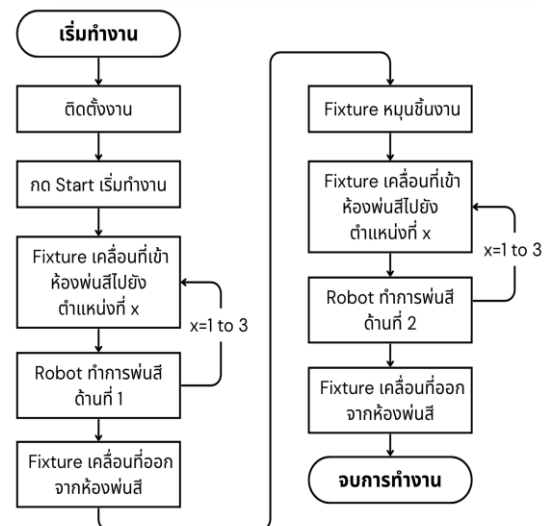
ระบบการทำงานของอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติในกระบวนการพ่นสีที่พัฒนาขึ้น มีลำดับขั้นตอนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 9 เริ่มจากติดตั้งชิ้นงานโดยรถโฟล์คคลิฟท์วางเครื่องนวดข้าวบนอุปกรณ์จับยึด (Fixture) จากนั้นอุปกรณ์จับยึด (Fixture) จะเคลื่อนที่เข้าห้องพ่นสีด้วยระบบอัตโนมัติ ทำการพ่นสีด้านที่ 1 โดย Robot ทำการพ่นสี 3 ตำแหน่ง จากนั้นเคลื่อนที่ออกจากห้องพ่นสีด้วยระบบอัตโนมัติ มีระบบการหมุนชิ้นงานโดยหมุนเครื่องนวดข้าว 180 องศา แล้วเข้าห้องพ่นสีครั้งที่ 2 โดยเคลื่อนที่เข้าห้องพ่นสีอีกครั้ง ทำการพ่นสีด้านที่ 2 โดย Robot พ่นสี 3 ตำแหน่ง จากนั้นเคลื่อนที่ออกจากห้องพ่นสี และเคลื่อนที่มายังพื้นที่รอสีแห้งด้วยระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 7 ตำแหน่งการหยุดเพื่อทำการพ่นสี



รูปที่ 8 อุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติที่แล้วเสร็จ



รูปที่ 9 ขั้นตอนการทำงานระบบอัตโนมัติของอุปกรณ์จับยึด (Fixture)

3.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์จับยึด

การทดสอบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) ระบบแบ่งเป็น 3 แบบ คือ 1) การทดสอบแบบไม่มีโหลด พบว่าการเคลื่อนที่ปกติที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อนาที การหมุนปกติโดยหมุน 180 องศาใน 30 วินาที และระบบควบคุมทำงานถูกต้องตามโปรแกรม 2) การทดสอบแบบมีโหลด ด้วยเครื่องนวดข้าว 4 ฟุต มีน้ำหนัก 1,500 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าการเคลื่อนที่ปกติ ไม่มีการสั่นสะเทือน การหมุนปกติและแรงบิดเพียงพอ ความแม่นยำอยู่ในช่วงบวกลบ 2 มิลลิเมตรในแนวราบและบวกลบ 1 องศาในการหมุน และ 3) การทดสอบแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าไม่มีความผิดพลาดในการทำงาน (คิดเป็นร้อยละ 100 ของความถูกต้อง)

3.3 ผลการปรับปรุงกระบวนการพ่นสี

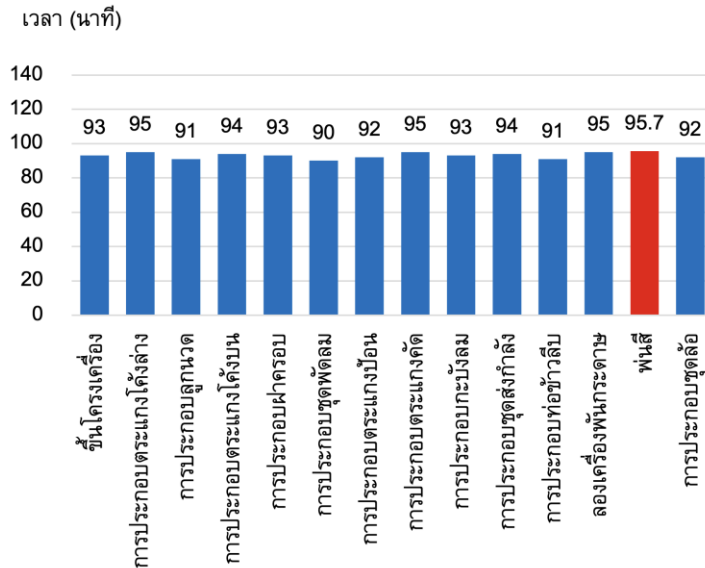
หลังจากคณะผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติ ในกระบวนการพ่นสีและนำมาทดสอบการทำงาน พบว่าขั้นตอนการทำงานลดลงเหลือ 13 ขั้นตอน แสดงดังตารางที่ 2 เริ่มจากรถโฟล์คลิฟท์ยกเครื่องนวดข้าวมาวางบนอุปกรณ์จับยึด (Fixture) ใช้เวลา 3.42 นาที อุปกรณ์จับยึด (Fixture) เคลื่อนที่เข้าห้องพ่นสีตำแหน่งที่ 1 แบบอัตโนมัติใช้เวลา 1.12 นาที พ่นสีโซนที่ 1 โดย Robot ใช้เวลา 1.50 นาที เคลื่อนที่และพ่นสีตำแหน่งที่ 2 แบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 1.90 นาที เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 3 แบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 2.00 นาที อุปกรณ์จับยึด (Fixture) เคลื่อนที่ออกนอกห้องแบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 1.50 นาที อุปกรณ์จับยึด (Fixture) หมุนชิ้นงาน 180 องศาแบบอัตโนมัติ ใช้เวลา



รูปที่ 10 การทดสอบระบบและเก็บข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์จับยึด (Fixture)

1.00 นาที และอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เคลื่อนที่เข้าห้องพ่นสีตำแหน่งที่ 4 แบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 1.48 นาที พ่นสีโซนที่ 4 โดย Robot ใช้เวลา 1.60 นาที เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 5 แบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 1.90 นาที เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 6 แบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 1.95 นาที อุปกรณ์จับยึด (Fixture) เคลื่อนที่ออกนอกห้องแบบอัตโนมัติ ใช้เวลา 1.40 นาที และรอสีแห้งใช้เวลา 75.00 นาที รวมเวลาของกระบวนการพ่นสีทั้งหมด 95.77 นาที

จากตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง และรูปที่ 11 พบว่าจำนวนขั้นตอนของกระบวนการพ่นสีลดลงจาก 19 ขั้นตอน ลดเหลือ 13 ขั้นตอน คิดเป็นการลดลง 6 ขั้นตอน หรือลดลงร้อยละ 31.58 เวลาดำเนินงาน (ไม่รวมรอสีแห้ง) ลดลงจาก 45.00 นาที เหลือ 20.77 นาที คิดเป็นการลดลง 24.23 นาทีหรือร้อยละ 53.84 เวลารวมการผลิตกระบวนการพ่นสีลดลงจาก 120.00 นาที ลดเหลือ 95.77 นาที คิดเป็นการลดลง 24.23 นาที หรือร้อยละ 20.19 ผลการทดสอบความแตกต่างของเวลาการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงด้วย Paired Sample t-test แสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 11 แสดงเวลาการผลิตเครื่องนวดข้าว (หลังปรับปรุง)

ตารางที่ 2 แผนภูมิการไหลของกระบวนการพ่นสีเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 ฟุต (หลังปรับปรุง)

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	สัญลักษณ์					เวลา (นาที)
	○	➡	◻	◻	▽	
1. รถโฟล์คลิฟท์ยกงานมาวางบนแท่นรองขึ้นงาน	●					3.42
2. รถเข็นเคลื่อนที่เข้าห้องพ่นสีให้ตรงตำแหน่งโซนที่ 1	●	●				1.12
3. พ่นสีโซนที่ 1	●					1.50
4. เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 2	●					1.90
5. เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 3	●					2.00
6. รถเข็นเคลื่อนที่ออกมานอกห้องพ่นสี	●	●				1.50
7. Fixture หมุนขึ้นงาน	●					1.00
8. รถเข็นเคลื่อนที่เข้าห้องพ่นสีให้ตรงตำแหน่งโซนที่ 4	●	●				1.48
9. พ่นสีโซนที่ 4	●					1.60
10. เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 5	●					1.90
11. เคลื่อนที่และพ่นสีโซนที่ 6	●					1.95
12. รถเข็นเคลื่อนที่ออกมานอกห้องพ่น	●	●				1.40
13. รอสีแห้ง					●	75.00
รวมเวลา						95.77

หมายเหตุ: ○ = การปฏิบัติงาน, ➡ = การเคลื่อนที่, ◻ = การรอคอย, ◻ = การตรวจสอบ, ▽ = การจัดเก็บ



ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ร้อยละการปรับปรุง
1) ขั้นตอนดำเนินงาน	19	13	- 31.58
2) เวลารวมกระบวนการพ่นสี (นาทีก)	120	95.77	- 20.19

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความแตกต่างของเวลาการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง

ตัวแปร	Mean ก่อนปรับปรุง (นาทีก)	Mean หลังปรับปรุง (นาทีก)	Mean Difference (นาทีก)	SD ของความ แตกต่าง	t	df	p-value
เวลา การผลิต	120	95.77	24.23	4.1	18.72	9	< 0.001

พบว่า ค่าเฉลี่ยเวลาการผลิตหลังการปรับปรุงลดลงจาก 120.00 นาที เหลือ 95.77 นาที โดยมีความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 24.23 นาที ค่า $t = 18.72$ ที่ระดับอิสระ $df = 9$ และค่า $p\text{-value} < 0.001$ ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha = 0.05$) ดังนั้น สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ซึ่งสรุปได้ว่าการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้อุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติในกระบวนการพ่นสีส่งผลให้เวลาการผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3.4 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ [8] จากงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 มูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ 1) ผลประหยัดด้านการลดเวลาการพ่นสี โดยก่อนปรับปรุงเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงผลิตได้ 4 เครื่องต่อวัน หลังปรับปรุงผลิตได้ 5 เครื่องต่อวัน ทำให้เวลาที่ใช้ในการพ่นสีต่อเครื่องลดลง 2) กำไรจากการเพิ่มผลผลิตเครื่องนวดข้าว จากการเพิ่มผลผลิตได้ 1 เครื่องต่อวัน หรือเพิ่มขึ้น 25% และ 3)

ต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดจากการใช้งานของชุดอุปกรณ์จับยึด คำนวณจากกำลังไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์ เวลาการใช้งาน 6 ชั่วโมงต่อวัน ทำงาน 240 วันต่อปี ค่าไฟฟ้า 4 บาทต่อหน่วย โดยทั้ง 3 ด้านนี้สามารถนำมาคำนวณมูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานนี้ ดังแสดงในสมการที่ (1) และ ในส่วนที่ 2 คือการคำนวณระยะเวลาการคืนทุนจากการใช้เงินลงทุนในการพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวในกระบวนการพ่นสี ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$V = TS + PV - EC \quad (1)$$

เมื่อ

V คือ มูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน (บาทต่อปี)

TS คือ ผลประหยัดด้านการลดเวลาการพ่นสี (บาทต่อปี)

PV คือ กำไรจากการเพิ่มผลผลิตเครื่องนวดข้าว (บาทต่อปี)

EC คือ ต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานของชุดอุปกรณ์จับยึด (Fixture) (บาทต่อปี)



ด้านที่ 1 พิจารณาผลการประหยัดด้านการลดเวลาการพ่นสี จะพิจารณาเป็นค่าแรงต่อหน่วยการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงที่แตกต่างกัน ซึ่งก่อนปรับปรุงผลิตเครื่องนวดข้าวได้ 4 เครื่องต่อวัน หลังการปรับปรุงผลิตได้ 5 เครื่องต่อวัน โดยมีแนวคิดที่ว่า หากลดเวลาการทำงานของคนงานลงได้ ก็จะสามารถเทียบเป็นต้นทุนค่าแรงงานที่ลดลงได้ โดยคิดเป็นมูลค่าต่อปี สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 TS &= \text{ค่าแรงต่อหน่วยก่อนปรับปรุง} - \text{ค่าแรงต่อหน่วยหลังปรับปรุง} \\
 &= [(ค่าแรงต่อวัน \div \text{จำนวนเครื่องนวดข้าวที่ผลิตได้ก่อนปรับปรุง}) - (ค่าแรงต่อวัน \div \text{จำนวนเครื่องนวดข้าวที่ผลิตได้หลังปรับปรุง})] \times \text{วันทำงานต่อปี} \\
 &= [(400 \div 4) - (400 \div 5)] \times 240 \\
 &= [100 - 80] \times 240 \\
 &= 4,800 \text{ บาทต่อปี}
 \end{aligned}$$

ด้านที่ 2 พิจารณากำไรจากการเพิ่มผลผลิตเครื่องนวดข้าวที่สามารถเพิ่มผลผลิตได้ 1 เครื่องต่อวัน โดยคิดเป็นมูลค่าต่อปี สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 PV &= \text{จำนวนเครื่องนวดข้าวที่เพิ่มขึ้นต่อวัน} \times \text{จำนวนวันทำงานต่อปี} \times \text{กำไรจากการขายต่อเครื่อง} \\
 &= 1 \text{ เครื่องต่อวัน} \times 240 \text{ วันทำงานต่อปี} \times 15,000 \text{ บาทต่อเครื่อง} \\
 &= 3,600,000 \text{ บาทต่อปี}
 \end{aligned}$$

ด้านที่ 3 พิจารณาจากต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานของชุดอุปกรณ์จับยึด (Fixture) การคำนวณต้นทุนด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจาก

การใช้งานของมอเตอร์ 5 แรงม้าและระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จับยึด (Fixture) โดยค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทำงานของมอเตอร์ 5 HP และคิดประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ 80% อยู่ที่ประมาณ 3 kW การใช้งานของอุปกรณ์จับยึด (Fixture) คิดที่ 6 ชั่วโมงต่อวัน คิดค่าไฟฟ้าต่อหน่วย 4 บาท สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 &= 3 \text{ กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง} \times 6 \text{ ชั่วโมงต่อวัน} \times 240 \text{ วันต่อปี} \times 4 \text{ บาทต่อหน่วย} \\
 &= 17,280 \text{ บาทต่อปี}
 \end{aligned}$$

ภายหลังจากการพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าวในกระบวนการพ่นสี สามารถคำนวณมูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน (V) คือ ด้านที่ 1 + ด้านที่ 2 - ด้านที่ 3 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= 4,800 \text{ บาทต่อปี} + 3,600,000 \text{ บาทต่อปี} - 17,280 \text{ บาทต่อปี} \\
 &= 3,587,520 \text{ บาทต่อปี}
 \end{aligned}$$

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน และระยะเวลาการคืนทุน [8] ดังแสดงในสมการที่ (2) โดยใช้เงินลงทุนในการพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าว 570,000 บาท ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$PB = C / V \quad (2)$$

เมื่อ

- PB* คือ ระยะเวลาการคืนทุน (ปี)
C คือ เงินลงทุนในการพัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) เครื่องนวดข้าว (บาท)
V คือ มูลค่าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน (บาทต่อปี)



$$PB = 570,000 \text{ บาท} / 3,587,520 \text{ บาทต่อปี}$$

$$= 0.16 \text{ ปี หรือประมาณ 2 เดือน}$$

ผลการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนพบว่า มีระยะเวลาการคืนทุน 0.16 ปี หรือประมาณ 2 เดือน อย่างไรก็ตาม ยังไม่รวมถึงมูลค่าที่เกิดจากการเพิ่มโอกาสทางการค้าที่สามารถผลิตเพิ่มได้อีก 1 เครื่องต่อวัน หรือ 240 เครื่องต่อปี คิดเป็นมูลค่า 30,600,000 บาทต่อปี เมื่อคิดมูลค่าเครื่องนวดข้าวเครื่องละ 127,500 บาท

4. การอภิปรายผล

งานวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยเฉพาะการลดเวลาในกระบวนการพ่นสีได้ร้อยละ 20.19 ความสำเร็จของโครงการเกิดจากการใช้แนวทางการวิจัยที่เป็นระบบ เริ่มตั้งแต่การศึกษาปัญหาด้วยเทคนิคการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time Study) การวิเคราะห์กระบวนการทำงานด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) และการวิเคราะห์สาเหตุด้วยเครื่องมือแผนภูมิแก๊งปลา [13] การออกแบบที่คำนึงถึงข้อจำกัดของระบบเดิม และการทดสอบอย่างเป็นระบบ

ผลของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัย [14] ที่พัฒนาระบบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) สำหรับงานเจาะซึ่งสามารถลดเวลาได้ร้อยละ 62.89 อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่พัฒนาระบบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) ในกระบวนการผลิตไม้กวาด [15] ซึ่งสามารถลดเวลาได้ร้อยละ 13.04 นอกจากนี้ การนำระบบอัตโนมัติมาใช้อังยังสามารถเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพในอุตสาหกรรม และสามารถลดข้อผิดพลาดจากการทำงาน [16] เพิ่มความแม่นยำ มี

ประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการนำไปใช้งานของระบบการพ่นสีอัตโนมัติในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ [17]

ปัจจัยความสำเร็จของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยปัจจัยภายในหลายประการ ได้แก่ การศึกษาปัญหาอย่างละเอียดทำให้เข้าใจปัญหาอย่างถ่องแท้ การออกแบบที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของพื้นที่และระบบเดิม การทดสอบอย่างเป็นระบบ ทั้งไม่มีโหลดและมีโหลด รวมถึงการทดสอบแบบต่อเนื่อง และมีคณะผู้วิจัยที่หลากหลาย มีทั้งผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ ระบบควบคุมและการผลิต ปัจจัยภายนอกที่สำคัญ เช่น ความร่วมมือของสถานประกอบการที่เจ้าของกิจการให้ความสำคัญร่วมมือเป็นอย่างดี และการสนับสนุนจากหน่วยงานที่ได้รับงบประมาณสนับสนุนที่เพียงพอ

ผลกระทบในวงกว้างต่อองค์กรในด้านการผลิตที่เพิ่มกำลังการผลิตจาก 4 เครื่อง เป็น 5 เครื่องต่อวัน คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ด้านการเงินที่เพิ่มมูลค่าการผลิตได้ 3,587,520 บาทต่อปี และการเพิ่มรายได้จากโอกาสทางการค้า 30,600,000 บาทต่อปี รวมถึงด้านการบริหารจัดการที่สามารถจัดการกำลังคนได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ด้านการแข่งขันที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน และการตอบสนองความต้องการตลาด ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมพบว่าเป็นต้นแบบสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรประเภทอื่น ๆ และการยกระดับมาตรฐานการผลิตในอุตสาหกรรม ตลอดจนการกระตุ้นให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังส่งผลเชิงบวกต่อความยั่งยืนขององค์กรในระยะยาว โดยช่วยลดต้นทุนต่อหน่วย เพิ่มความยืดหยุ่นในการดำเนินงาน และรองรับการขยายธุรกิจในอนาคตได้อย่างมั่นคง



5. บทสรุป

การวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์จับยึดเครื่องนวดข้าวแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติในกระบวนการฟนสีได้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ด้วยงบการลงทุน 570,000 บาท สามารถลดเวลาในกระบวนการฟนสีจากเดิม 120 นาที เหลือ 95.77 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 20.19 และลดขั้นตอนการทำงานจาก 19 ขั้นตอน เหลือ 13 ขั้นตอน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 31.58 งานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มมูลค่าการผลิต 3,587,520 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 0.16 ปี หรือประมาณ 2 เดือน แสดงให้เห็นว่ามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูง นอกจากนั้นยังเป็นการช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของการผลิต และการเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไปในระยะสั้น 1-2 ปี ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพระยะยาว โดยการติดตามประสิทธิภาพของระบบในระยะยาวและปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ในระยะกลาง 3-5 ปี ควรมีการพัฒนาระบบอัจฉริยะโดยใช้ IoT และ AI ในการควบคุมและตัดสินใจ การขยายไปยังผลิตภัณฑ์อื่น โดยประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรชนิดอื่น และการพัฒนาระบบแบบโมดูลาร์โดยออกแบบระบบที่สามารถประกอบและปรับเปลี่ยนได้ง่าย ในระยะยาว 5-10 ปี ควรมีการพัฒนาโรงงานอัจฉริยะโดยบูรณาการระบบทั้งโรงงานให้เป็น Smart Factory การศึกษาผลกระทบทางสังคมโดยศึกษาผลกระทบของระบบอัตโนมัติต่อการจ้างงานและสังคม และการพัฒนามาตรฐานโดยพัฒนามาตรฐานระบบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) อัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรมไทย

งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์เชิงวิชาการในหลายด้าน ได้แก่ การพัฒนาองค์ความรู้ด้านการออกแบบระบบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) อัตโนมัติที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมไทย การสร้างวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิต ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค Motion and Time Study ร่วมกับเทคโนโลยีอัตโนมัติ การพัฒนาแนวทางการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการอัตโนมัติในบริบทของ SMEs ไทย การสร้างต้นแบบการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ และเป็นการส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรม 4.0 ในประเทศไทยให้มีความเข้มแข็งและยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก โครงการแพลตฟอร์มบริหารจัดการทรัพยากรผู้มีส่วนเกี่ยวข้องของกลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลเพื่อปฏิรูประบบการพัฒนากำลังคนของประเทศ (TRM PLATFORM) ปีงบประมาณ 2566 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ฝึกศึกษาที่เอื้อเพื่อสถานที่ และข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ช่วยสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/agricultural-machinery/io/agriculture-machinery-2024-2026>.

(Accessed on 8 July 2024) (in Thai)



- [2] M.Y. Dakhole, P.G. Mehar and V.N. Mujbaile, Design of automated moving fixture for conveyORIZED special purpose machine, International Journal of Engineering Research and Technology, 2012, 1(5), 1-8.
- [3] M. Saez and P. Spicer, Robot-to-robot collaboration for fixtureless assembly: Challenges and opportunities in the automotive industry, ASME 2020 15th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2020), Proceeding, 2020, 8460, V002T07A012.
- [4] J. Zhang, Research on automatic loading and unloading path design and fixture design for industrial robots, 2024 International Conference on Artificial Intelligence and Digital Technology (ICAIDT), Proceeding, 2024, 301-305.
- [5] R. Bhalamurugan and S. Prabhu, Performance characteristic analysis of automated robot spray painting using Taguchi method and gray relational analysis, Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 40(6), 1657-1667.
- [6] S. Narkbovornwijit and P. Klomjit, Improvement work method for defect reduction in marking brake pad process, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(2), 104-120. (in Thai)
- [7] W. Ngamsaard, P. Nakseedee and N. Ingprasert, Garment production process improvement to increase Production Efficiency: A case study of ABC Co., Ltd., The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 160-176. (in Thai)
- [8] M. Donmuen, Y. Suriyamas, J. Kumphumee and P. Dhinnabutra, Tractor-mounted animal feed chopper and mixer, Industrial Technology Journal, 2024, 9(1), 179-189. (in Thai)
- [9] B. Lathashankar, G. Ashritha, S. Asma, K. Shivam and K. Nitesh, Cycle time reduction in manufacturing industry by designing a dedicated fixture: A case study, International Journal of Engineering Science and Technology, 2018, 10(3), 34-42.
- [10] S. Itsaranuwat, Y. Jongjun, S. Prateepchanachai, D. Sornsuphap and S. Somwan, Increasing productivity in automotive parts welding: A case study on clamping device design at Progress Part and Die Co., Ltd., Journal of Engineering and Innovation, 2025, 18(2), 117-131. (in Thai)
- [11] P. Jaichomphu and P. Jewpanya, Production time loss reduction in boat rudder production process: A case study of Bangkok diecasting and injection Co., Ltd., Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal, 2021, 13(18), 99-110. (in Thai)



- [12] C. Johansson, T. Larsson and S. Tatipala, Product-service systems for functional offering of automotive fixtures: Using design automation as enabler, *Procedia CIRP*, 2017, 64, 411-416.
- [13] S. Tumrongsuk, Improving production efficiency in hot coil plate production process, *The Journal of Industrial Technology*, 2025, 21(2), 107-122. (in Thai)
- [14] N.A. Said, M.A. Roslan, N. Ngah, A.J. Mohamad, U.N. Roslan, R.M.R. Mamat, N.B. Baba, M.H. Ibrahim, K.A. Abd Aziz and M.F.A. Yusof, Design and fabrication of jig and fixture for drilling machine in the manufacturing industry to improve time productivity, *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 2023, 29(2), 304-313.
- [15] K. Wajanawichakonl, Waste reduction for efficiency improvement in broom production processes: A case study of community enterprise bungwai, Ubon Ratchathani, *Journal of Engineering and Innovation*, 2020, 13(1), 141-152. (in Thai)
- [16] M. Sithole, A. Telukdarie and T. Katsumbe, Quality performance improvement through robotic process automation in rail manufacturing, 2023 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), *Proceeding*, 2023, 1-8.
- [17] E.A. Gülirmak and Z. Bingül, Determining robot trajectory planning using image processing for wood painting, 2023 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), *Proceeding*, 2023, 1-6.



การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือเพื่อจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ในอุตสาหกรรมเครื่องตัด

ปิยะวัชร ลิขิตลือชา* และ ชุติศักดิ์ พรสิงห์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม 73000

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: likhitluecha_p@silpakorn.edu

วันที่รับบทความ: 25 มกราคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 3 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 5 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: อุตสาหกรรมการผลิตและการบำรุงรักษาเครื่องตัดทั้งแบบบรรจุขวดและบรรจุกระป๋องต้องอาศัยความต่อเนื่องและความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร การบริหารจัดการคงคลังอะไหล่จึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มความพร้อมของเครื่องจักรและลดความสูญเสีย อย่างไรก็ตามความหลากหลายของอะไหล่ทำให้จำเป็นต้องจัดลำดับความสำคัญ โดยคำนึงถึงทั้งปัจจัยเชิงปริมาณที่สามารถวัดได้และปัจจัยเชิงคุณภาพที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ระหว่างกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือ (Fuzzy Analytic Hierarchy Process: Fuzzy AHP) และการวิเคราะห์แบบ ABC (ABC Analysis) เพื่อพัฒนาแนวทางการบริหารจัดการคงคลังอะไหล่ ข้อมูลการวิเคราะห์ครอบคลุมอะไหล่ 806 รายการ จากข้อมูลการใช้งานย้อนหลัง 60 เดือน พบว่าอะไหล่ที่ไม่เคลื่อนไหวเกิน 6 เดือนมี 448 รายการ คิดเป็นมูลค่า 53.77% ของทั้งหมด โดยผลการประเมินด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือ ภายใต้เกณฑ์ทั้ง 5 ด้าน พบว่าสามารถจัดอะไหล่เป็นกลุ่ม A, B และ C ในสัดส่วน 20.10%, 29.90% และ 50.00% ขณะที่การวิเคราะห์แบบ ABC จัดได้ 19.48%, 21.09% และ 59.43% ตามลำดับ จากนั้นนำผลการจัดลำดับของทั้งสองวิธีไปกำหนดนโยบายคงคลังและจำลองการควบคุมอะไหล่คงคลังระยะเวลา 12 เดือน พบว่านโยบายที่อิงกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือมีระดับการให้บริการเฉลี่ย 81.00% สูงกว่านโยบายที่อิงการวิเคราะห์แบบ ABC ซึ่งมีค่า 79.86% (เพิ่มขึ้น 1.14 เปอร์เซนต์) มีจำนวนครั้งที่อะไหล่ขาดสต็อก 1,552 ครั้ง เทียบกับ 1,645 ครั้งของการวิเคราะห์แบบ ABC และช่วยลดมูลค่าสินค้าคงคลังรวมได้ 1.48% รวมทั้งลดต้นทุนการจัดการอะไหล่ได้ 235,209 บาท สะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือเหมาะสมกว่าสำหรับการจัดลำดับความสำคัญและกำหนดนโยบายอะไหล่คงคลัง

คำสำคัญ: การจัดการวัสดุคงคลัง; กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือ; การวิเคราะห์แบบ ABC

An Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Spare Parts Prioritization in the Beverage Industry

Piyawat Likhitluecha* and Choosak Pornsing

Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000

* Corresponding author, E-mail: likhitluecha_p@silpakorn.edu

Received: 25 January 2026; Revised 3 May 2026; Accepted: 5 June 2026

Online Published: 19 August 2026

Abstract: Beverage production and packaging operations, including both bottling and canning lines, rely heavily on the continuity and reliability of equipment, making effective spare parts inventory management critical for improving machine availability and reducing potential losses. However, the large variety of spare parts necessitates a rational prioritization approach that accounts for both quantitative and qualitative factors. This study aims to compare spare parts prioritization methods based on the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (fuzzy AHP) and conventional ABC analysis in order to develop improved spare parts inventory management policies. The analysis covers 806 spare part items based on 60 months of historical usage data. Items with no issuance for more than six months account for 448 items and represent 53.77% of the total inventory value. Using Fuzzy AHP under five evaluation criteria, the items were classified into A, B, and C classes with proportions of 20.10%, 29.90%, and 50.00%, respectively, compared with 19.48%, 21.09%, and 59.43% from traditional ABC analysis. The resulting priority classes from both methods were then used to define inventory policies and to simulate 12 months of inventory control. The fuzzy AHP-based policy achieved an average service level of 81.00%, higher than the 79.86% obtained under the ABC-based policy (an improvement of 1.14 percentage points), reduced stockout occurrences from 1,645 to 1,552, and reduced the total inventory value by 1.48% as well as spare parts management costs by 235,209 THB. These results indicate that fuzzy AHP is more suitable than standard ABC analysis for spare parts prioritization and inventory policy design in beverage production and packaging operations.

Keywords: Inventory Management; Fuzzy Analytic Hierarchy Process; ABC Analysis



1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องตีเป็นหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมที่มีการเติบโตและมีแนวโน้มการขยายตัวของตลาดทั้งในและต่างประเทศ ผู้ประกอบการจึงต้องเผชิญกับแรงกดดันจากต้นทุนวัตถุดิบที่สูงขึ้น ส่งผลให้การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเพื่อรักษาความสามารถในการแข่งขันกลายเป็นประเด็นสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสำเร็จ

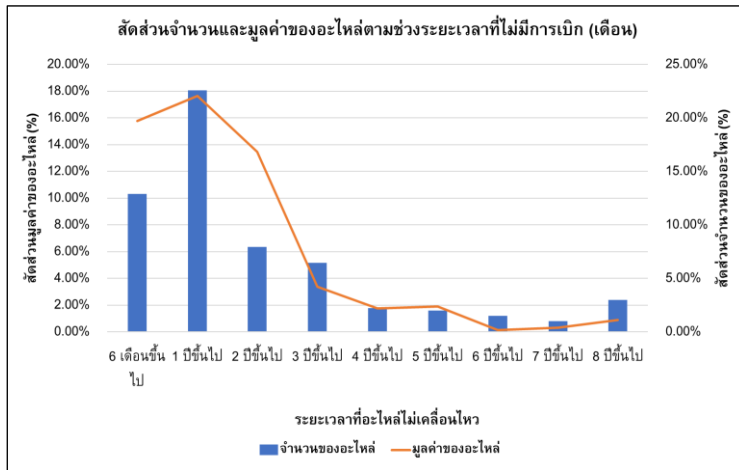
งานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นว่าการหยุดเดินเครื่องโดยไม่คาดคิด ในอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องสามารถส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการผลิตลดลง และกระทบต่อความสามารถในการส่งมอบสินค้าได้ตรงเวลา Pintelon and Parodi-Herz (2008) รายงานว่าต้นทุนการหยุดผลิตโดยไม่วางแผนอาจสูงถึงร้อยละ 5–20 ของมูลค่าการผลิตทั้งหมด [1] Sterman (2000) ชี้ให้เห็นว่าความไม่มีประสิทธิภาพในระบบสินค้าคงคลัง ส่งผลต่อความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการของการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ [2] ในขณะที่ Kennedy et al. (2002) ได้สรุปว่าการบริหารอะไหล่สำรองที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการลดเวลาหยุดเครื่องในโรงงานอุตสาหกรรม [3]

เนื่องจากการที่เครื่องจักรหยุดเดินโดยไม่คาดคิดก่อให้เกิดการหยุดชะงักของการผลิตและกระทบต่อการส่งมอบสินค้า การบำรุงรักษาเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพจึงต้องได้รับการสนับสนุนจากการบริหารจัดการอะไหล่สำรองอย่างเหมาะสม [3, 4] ในทางปฏิบัติการบริหารอะไหล่คงคลังมีความซับซ้อน

เนื่องจากต้องสร้างสมดุลระหว่างการลดความเสี่ยงจากการขาดแคลนอะไหล่และการควบคุมต้นทุนการถือครอง โดยการสำรองมากเกินไปก่อให้เกิดต้นทุนและความเสี่ยงด้านการเสื่อมสภาพ ในขณะที่การสำรองไม่เพียงพออาจส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตและความเสียหายทางธุรกิจ

โรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นผู้ผลิตเครื่องตีประสบปัญหาการบริหารจัดการอะไหล่อย่างชัดเจน โดยข้อมูล ณ สิ้นปี พ.ศ. 2567 พบว่าสายการบรรจุ (Filling Line) ซึ่งประกอบด้วยแผนกซ่อมบำรุงสายการบรรจุขวดและสายการบรรจุกระป๋อง มีการจัดเก็บอะไหล่รวม 806 รายการ จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนไหวย้อนหลังพบว่าอะไหล่จำนวน 448 รายการ (ร้อยละ 55.58) ไม่มีการเบิกใช้งานในช่วงเวลาที่ศึกษา และคิดเป็นมูลค่าสินค้าคงคลังรวมร้อยละ 53.77 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับปัญหาที่พบในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีการบริหารอะไหล่โดยไม่ใช้เกณฑ์หลายมิติ [4, 5]

ปัญหาดังกล่าวเกิดจากความหลากหลายของอะไหล่ ซึ่งมีความแตกต่างทั้งด้านราคา ความถี่ในการใช้งาน ระยะเวลาเข้า และผลกระทบเมื่อเกิดการขาดแคลน การประเมินความสำคัญของอะไหล่จึงต้องพิจารณาหลายมิติที่อาจขัดแย้งกัน เช่น อะไหล่ราคาสูงอาจมีผลกระทบต่ำ ขณะที่อะไหล่ใช้งานไม่บ่อยแต่มีระยะเวลานำเข้ายาวอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ เกณฑ์บางด้านยังเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพที่ต้องอาศัยดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญและไม่สามารถแปลงเป็นค่าตัวเลขได้โดยตรง



รูปที่ 1 จำนวนและมูลค่าของอะไหล่ตามระยะเวลาที่ไม่มีการเคลื่อนไหว

โดยทั่วไปการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่มักใช้ ABC Analysis ซึ่งอ้างอิงมูลค่าการใช้สะสมตามหลักพาเรโต Flores and Whybark (1987) เป็นผู้บุกเบิกการใช้เกณฑ์หลายมิติใน ABC Analysis และพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคงคลัง [5] Gong et al. (2022) ได้ประยุกต์ใช้ ABC Analysis ร่วมกับ FMECA เพื่อจัดลำดับชิ้นส่วนวิกฤตในระบบเบรกของยานยนต์ และพบว่าสามารถระบุชิ้นส่วนที่มีความสำคัญสูงได้อย่างมีระบบ [6] อย่างไรก็ตาม ABC Analysis มีข้อจำกัดสำคัญตรงที่พิจารณาเพียงมูลค่าการใช้งานเป็นหลัก และไม่สามารถสะท้อนความสำคัญเชิงเทคนิคต่อความต่อเนื่องของการผลิตได้ โดยเฉพาะในกรณีที่อะไหล่ราคาต่ำแต่มีผลกระทบสูงต่อกระบวนการผลิต [6, 7]

ในทางกลับกัน Fuzzy AHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) เป็นวิธีการตัดสินใจหลายเกณฑ์ที่สามารถผสมผสานข้อมูลเชิงปริมาณ เชิงคุณภาพ และความไม่แน่นอนของดุลยพินิจผู้เชี่ยวชาญเข้าด้วยกัน Chang

(1996) ได้เสนอวิธี Fuzzy Extent Analysis ซึ่งเป็นรากฐานของการคำนวณค่าน้ำหนักใน Fuzzy AHP [8] Ilgin (2019) พบว่า Fuzzy AHP ร่วมกับ Taguchi loss function ให้ผลการประเมินความสำคัญของอะไหล่ที่ดีกว่า ABC Analysis แบบดั้งเดิมในอุตสาหกรรมการผลิต [9] นอกจากนี้ Torre et al. (2025) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้เกณฑ์หลายมิติในการจำแนกอะไหล่ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าให้ผลลัพธ์ที่ครอบคลุมและสะท้อนความเป็นจริงมากกว่าการใช้เกณฑ์เดียว [7]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง Fuzzy AHP และ ABC Analysis ในบริบทของอุตสาหกรรมเครื่องตัดยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาที่นำผลการจัดลำดับไปกำหนดนโยบายควบคุมคงคลังและประเมินประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบผ่านการจำลองสถานการณ์ ช่องว่างงานวิจัยดังกล่าวทำให้ผู้ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมขาดแนวทางที่ชัดเจนในการเลือกวิธีจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ที่เหมาะสมกับบริบทของตน



งานวิจัยนี้จึงมุ่งเปรียบเทียบผลการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ด้วย Fuzzy AHP และ ABC Analysis โดยใช้ข้อมูลจริงจากอะไหล่ 806 รายการครอบคลุมระยะเวลา 60 เดือน เพื่อเปรียบเทียบผลการจัดลำดับความสำคัญระหว่างสองวิธี โดยนำผลที่ได้ไปใช้กำหนดนโยบายควบคุมคงคลัง และประเมินผลลัพธ์เชิงเปรียบเทียบผ่านการจำลองสถานการณ์เป็นระยะเวลา 12 เดือน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีจัดลำดับอะไหล่ที่เหมาะสมสำหรับโรงงานที่ใช้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

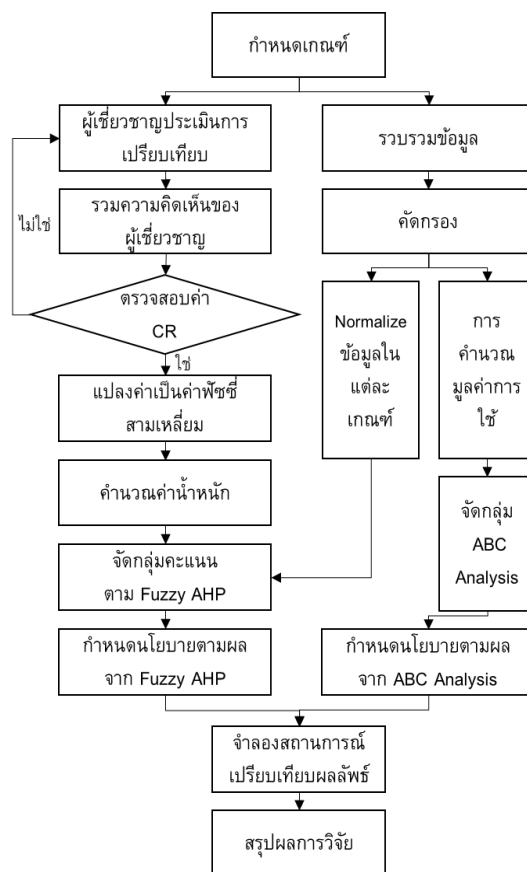
งานวิจัยนี้วิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างเทคนิค Fuzzy AHP และ ABC Analysis เพื่อประเมินความแตกต่างของการจัดกลุ่มและระดับความสอดคล้องของผลลัพธ์ทั้งนี้ขั้นตอนการดำเนินงานสรุปไว้ในรูปที่ 2

2.1 การกำหนดเกณฑ์

เพื่อให้การจำแนกอะไหล่มีความครอบคลุมและสะท้อนความสำคัญในหลายมิติ งานวิจัยกำหนดเกณฑ์ประเมิน 5 เกณฑ์ โดยอ้างอิงจาก ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดการกำหนดเกณฑ์ผ่านการตรวจสอบจากผู้เชี่ยวชาญ (ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.1) เกณฑ์ทั้ง 5 ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1

2.2 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลเชิงปริมาณ และข้อมูลเชิงคุณภาพ เพื่อใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่และเปรียบเทียบผลระหว่าง Fuzzy AHP และ ABC Analysis



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ข้อมูลเชิงปริมาณ รวบรวมจากระบบ SAP และฝ่ายจัดซื้อ ครอบคลุมระยะเวลานำเข้า จำนวนผู้จัดจำหน่าย ราคา และความถี่การใช้งานอะไหล่
- 2) ข้อมูลเชิงคุณภาพเป็นการประเมินระดับความสำคัญของเครื่องจักรโดยผู้ปฏิบัติงานและผู้เกี่ยวข้องในสายการผลิต ตามเกณฑ์ 6 ด้าน ซึ่งรายละเอียดระดับการประเมินแสดงในตารางที่ 2



ตารางที่ 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกอะไหล่ [6, 7]

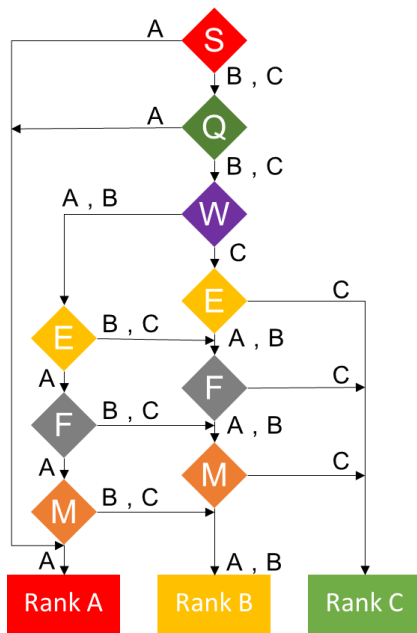
เกณฑ์	คำอธิบาย	แหล่งอ้างอิง
ด้านโลจิสติกส์ (Logistics)		
ระยะเวลานำเข้า (LT)	ระยะเวลาที่ใช้ในการสั่งซื้อหรือจัดหาอะไหล่จนถึงการรับเข้าคลัง	Torre et al. (2025)
จำนวนผู้จัดจำหน่าย (NS)	จำนวนผู้จัดจำหน่ายอะไหล่ที่สามารถจัดหาได้	Torre et al. (2025)
ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic)		
ราคา (P)	มูลค่าของอะไหล่	Torre et al. (2025)
ด้านการบำรุงรักษา (Maintenance)		
ความสำคัญของเครื่องจักร (MC)	ระดับความสำคัญของเครื่องจักรที่อะไหล่ชิ้นนั้นติดตั้งอยู่	Gong et al. (2022)
ความถี่ในการใช้งาน (UF)	ความถี่การเบิกใช้งานในช่วงเวลาที่กำหนด	Gong et al. (2022)

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินความสำคัญของเครื่องจักร (S-Q-W-E-F-M) [10]

เกณฑ์	ระดับ A	ระดับ B	ระดับ C
Safety	บาดเจ็บรุนแรงหรือเสียชีวิต	บาดเจ็บต้องรักษาในโรงพยาบาล	บาดเจ็บเล็กน้อยหรือไม่รุนแรง
Quality	กระทบต่อความปลอดภัยผู้บริโภค (Critical)	กระทบต่อคุณภาพสินค้า (Major)	ข้อบกพร่องเล็กน้อย (Minor)
Working Condition	เดินเครื่องต่อเนื่อง 24 ชม.	เดินเครื่อง 7-24 ชม.	เดินเครื่องเป็นครั้งคราว
Effect	ไม่มี Buffer	มี Buffer 0-10%	Buffer > 10%
Frequency	BD > 30 ครั้ง/เดือน	BD 20 ครั้ง/เดือน	BD < 10 ครั้ง/เดือน
Maintenance	ซ่อม > 43 นาที/วัน	ซ่อม 33-42 นาที/วัน	ซ่อม < 33 นาที/วัน

2.1) การประเมินระดับความสำคัญของเครื่องจักร การประเมินระดับความสำคัญของเครื่องจักร ดำเนินการตามเกณฑ์ S-Q-W-E-F-M โดยรวบรวมข้อมูลจากผู้แทน 5 หน่วยงาน ที่เกี่ยวข้องกับการเดินเครื่องและการซ่อมบำรุง ได้แก่ แผนกซ่อมบำรุง แผนกบรรจุ แผนกควบคุมคุณภาพ แผนกความ

ปลอดภัย และแผนกวิศวกรรม จากนั้นนำผลการประเมินมาประมวลและจัดระดับ (A, B, C) ด้วยกระบวนการ Decision Tree เพื่อกำหนดระดับความสำคัญโดยรวมของเครื่องจักร (Equipment Rank) เป็น Rank A, Rank B และ Rank C ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการตัดสินใจลำดับความสำคัญของเครื่องจักร

จากการประเมินระดับความสำคัญของเครื่องจักรในสายการผลิตบรรจุเครื่องดื่ม 2 สายการผลิต ได้แก่ สายการบรรจุขวด (MB Line) และสายการบรรจุกระป๋อง (MC Line) ครอบคลุมเครื่องจักรทั้งหมด 39 เครื่อง ผลการประเมินสรุปจำนวนเครื่องจักรในแต่ละระดับความสำคัญ (Rank A, Rank B และ Rank C) แยกตามสายการผลิตแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปจำนวนเครื่องจักรตามระดับความสำคัญ แยกตามสายการผลิต

Line	Rank A	Rank B	Rank C	Total
MB	4	10	6	20
MC	9	2	8	19

2.3 การคัดกรองและตรวจสอบข้อมูล

ก่อนการวิเคราะห์ ได้ดึงข้อมูลอะไหล่จากระบบ SAP ของโรงงานกรณีศึกษา ย้อนหลัง 60 เดือน (พ.ศ. 2563 – 2567) โดยคัดเลือกเฉพาะอะไหล่ของสายการบรรจุกระป๋อง (MC Line) และสายการบรรจุขวด (MB Line) ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยรหัสและชื่ออะไหล่ ประวัติการเบิกจ่าย ปริมาณการใช้งาน ราคาต่อหน่วย จำนวนผู้จัดจำหน่าย และระยะเวลานำเข้า เพื่อให้ข้อมูลสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การควบคุมความพร้อมของเครื่องจักร งานวิจัยพิจารณาเฉพาะรายการที่เกี่ยวข้องกับงานซ่อมบำรุงแบบไม่มีแผน (Unplanned Maintenance) เช่น การซ่อมฉุกเฉินและการเปลี่ยนอะไหล่จากการใช้งานจริง พร้อมตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูลตัวแปรหลักก่อนนำไปวิเคราะห์

นอกจากนี้ ได้ตรวจสอบค่าผิดปกติของข้อมูลการใช้งานด้วยวิธี Z-Score ตามสมการ (1) โดยกำหนดเกณฑ์ $|Z| > 3$ เป็นค่าที่ต้องตรวจสอบเพิ่มเติม และยืนยันสาเหตุร่วมกับหน่วยงานซ่อมบำรุงก่อนปรับปรุงชุดข้อมูลให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

โดยที่ x คือค่าการใช้งานรายเดือนของอะไหล่, μ คือค่าเฉลี่ยของการใช้งานย้อนหลัง และ σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลการใช้งาน

2.4 การจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ด้วยเทคนิค Fuzzy AHP

การจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุรายการอะไหล่ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรและกระบวนการผลิต



2.4.1 ผู้เชี่ยวชาญในการประเมิน

การประเมินในขั้นตอนนี้อาศัยความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญจำนวน 4 ท่าน จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการอะไหล่ ของโรงงานกรณีศึกษา รายละเอียดผู้ประเมินแสดงไว้ในตารางที่ 4

2.4.2 การเปรียบเทียบแบบจับคู่

ผู้เชี่ยวชาญทำการประเมินความสำคัญของเกณฑ์หลักทั้ง 5 เกณฑ์ด้วยวิธีการเปรียบเทียบแบบจับคู่ (Pairwise Comparison) โดยใช้มาตราส่วนการให้คะแนนของ Saaty (1990) ในช่วง 1-9 เพื่อสะท้อนระดับความสำคัญสัมพัทธ์ระหว่างเกณฑ์ [11] จากนั้นนำผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 4 ท่านมาสรุปผลดังแสดงในตารางที่ 5

2.4.3 การรวมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

จากผลการประเมินแบบจับคู่ในตารางที่ 5 ทำการรวมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้วยค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) ตามแนวทางของ Forman และ Peniwati (1998) เพื่อสร้างเมทริกซ์การเปรียบเทียบรวม [12] ดังแสดงในสมการ (2)

$$\tilde{A}_{ij} = \left[\prod_{k=1}^K \tilde{A}_{ij}^{(k)} \right]^{\frac{1}{K}} \quad (2)$$

โดยที่ $\tilde{A}_{ij}$ คือ ค่าการเปรียบเทียบรวมระหว่างเกณฑ์ i และ j , K คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ และ $\tilde{A}_{ij}^{(k)}$ คือ ค่าประเมินเชิงคู่ของผู้เชี่ยวชาญคนที่ k

2.4.4 การตรวจสอบค่าความสอดคล้อง

เพื่อให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือ ได้ทำการตรวจสอบความสอดคล้องของเมทริกซ์การเปรียบเทียบแบบจับคู่ โดยใช้อัตราความสอดคล้องซึ่งคำนวณจากสมการ (3) และ (4)

ตารางที่ 4 ข้อมูลผู้เชี่ยวชาญที่ใช้ในการประเมินเกณฑ์ความสำคัญของอะไหล่

No.	หน่วยงาน / ตำแหน่ง	ประสบการณ์ (ปี)
1	หัวหน้าแผนกซ่อมบำรุง (MB Line)	3
2	หัวหน้าแผนกซ่อมบำรุง (MC Line)	7
3	หัวหน้าแผนกจัดซื้อ	7
4	หัวหน้าแผนกคลังอะไหล่	8

ตารางที่ 5 ผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ

คู่เกณฑ์ที่เปรียบเทียบ			No.1	No.2	No.3	No.4
LT	vs	NS	4	7	3	5
LT	vs	P	1/3	7	4	4
LT	vs	UF	1/6	6	5	3
LT	vs	MC	1/6	1	1/3	1/5
NS	vs	P	1/3	3	3	3
NS	vs	UF	1/3	1/7	2	2
NS	vs	MC	1/6	1/7	1/4	1/6
P	vs	UF	1/3	1/7	2	2
P	vs	MC	1/6	1/7	1/5	1/5
UF	vs	MC	1/6	7	1/6	1/7

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

เมื่อ $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$

โดยที่ CR คืออัตราความสอดคล้อง, CI คือดัชนีความสอดคล้อง, RI คือค่า Random Index ตามขนาดเมทริกซ์ (ตารางที่ 6), λ_{max} คือค่าเอกลักษณะสูงสุดของเมทริกซ์ และ n คือ จำนวนเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 6 ค่ามาตรฐาน Random Index (RI) ตามขนาดเมทริกซ์ [13]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

ผลการประเมินยอมรับได้เมื่อ $CR \leq 0.1$ หาก $CR > 0.1$ ต้องให้ผู้เชี่ยวชาญทำการประเมินใหม่ [14, 15]

2.4.5 การแปลงค่าการให้คะแนนเป็นค่าฟัซซีสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Numbers: TFN)

เมื่อเมทริกซ์การเปรียบเทียบที่ผ่านการตรวจสอบความสอดคล้อง จะแปลงค่าจากสเกลการให้คะแนนให้อยู่ในรูปของค่าฟัซซีสามเหลี่ยม เพื่อรองรับความไม่แน่นอนในการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งกำหนดค่าต่ำสุด (l), ค่ากลาง (m) และค่าสูงสุด (u) ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การแปลงค่าสเกล Saaty เป็นค่าตัวเลขเชิงฟัซซี (TFN) [9]

ตัวเลข AHP	Triangular Fuzzy Scale	Reciprocal Scale
1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
2	(5/6, 1, 5/4)	(5/6, 1, 5/4)
3	(2/3, 1, 3/2)	(2/3, 1, 3/2)
4	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
5	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
6	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
7	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
8	(3, 7/2, 4)	(1/4, 2/7, 1/3)
9	(7/2, 4, 9/2)	(2/9, 1/4, 2/7)

2.4.6 การคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธี Fuzzy Extent Analysis

หลังจากแปลงค่าการให้คะแนนเป็นค่า TFN แล้ว งานวิจัยคำนวณค่าน้ำหนักของเกณฑ์ด้วยวิธี Fuzzy Extent Analysis ตามแนวทางของ Chang (1996) โดยสรุปประกอบด้วย 4 ขั้นตอน [8] ดังนี้

1) คำนวณค่า synthetic extent ของแต่ละเกณฑ์ (S_i)

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right)^{-1} \quad (5)$$

โดยที่ S_i และ S_j คือ ค่าการวิเคราะห์ขอบเขตสังเคราะห์ของเกณฑ์ที่ i และ j ตามลำดับ, M_{gi}^j คือ ค่าตัวเลขเชิงฟัซซีสามเหลี่ยม จากเมทริกซ์การเปรียบเทียบของเกณฑ์ที่ i, m คือ จำนวนเกณฑ์ที่นำมาเปรียบเทียบ, n คือ ขนาดของเมทริกซ์, $\otimes$ คือ สัญลักษณ์การดำเนินการคูณแบบฟัซซี

2) การคำนวณค่าความเป็นไปได้ $V(S_i \geq S_j)$ ระหว่างคู่เกณฑ์

$$V(S_i \geq S_j) = \begin{cases} 1, & \text{ถ้า } l_j \leq u_i \\ 0, & \text{ถ้า } m_i \leq l_j \\ \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}, & \text{อื่น ๆ} \end{cases} \quad (6)$$

โดยที่ $V(S_i \geq S_j)$ คือ ระดับความเป็นไปได้ที่ S_i จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ S_j , l, m, u คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวเลขฟัซซีสามเหลี่ยม ประกอบด้วย ค่าต่ำสุด, ค่ากลาง และค่าสูงสุดตามลำดับ



3) หาค่าน้ำหนักเบื้องต้นจากค่าความเป็นไปได้ต่ำสุด

$$W'_i = \min V (S_i \geq S_j), \quad \forall j \neq i \quad (7)$$

โดยที่ W'_i คือ ค่าน้ำหนักเบื้องต้น ของแต่ละเกณฑ์

4) ปรับค่าน้ำหนักให้อยู่ในรูปมาตรฐานเพื่อให้ผลรวมเท่ากับ 1

$$W_i = \frac{w'_i}{\sum_{i=1}^n w'_i} \quad (8)$$

โดยที่ W_i คือ ค่าน้ำหนักที่ปรับให้เป็นมาตรฐานแล้ว ของเกณฑ์ที่ i

2.4.7 ปรับค่าข้อมูลของอะไหล่ (Normalization)

เพื่อให้ข้อมูลอะไหล่ในแต่ละเกณฑ์สามารถเปรียบเทียบและนำมาคำนวณร่วมกันได้ ข้อมูลถูกปรับให้อยู่ในช่วง 0-1 ด้วยวิธี Normalization โดยพิจารณาทิศทางความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ ตามสมการ (9) และ (10)

1) กรณีที่ค่ามากหมายถึงความสำคัญสูง

$$p_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (9)$$

2) กรณีที่ค่ามากหมายถึงความสำคัญต่ำ

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (10)$$

โดยที่ x_{ij} คือ ค่าของอะไหล่รายการที่ i ภายใต้อนุพันธ์ j และ p_{ij} คือค่าที่ผ่านการปรับให้อยู่ในช่วง 0-1 ทั้งนี้กำหนดให้ MC, LT, UF และ P เป็นเกณฑ์ที่ค่ามากหมายถึงความสำคัญสูง ขณะที่ NS เป็นเกณฑ์ที่ค่าน้อยหมายถึงความสำคัญสูง

2.4.8 การคำนวณคะแนนรวมของอะไหล่

การคำนวณคะแนนรวมของอะไหล่แต่ละรายการ ทำโดยนำค่าน้ำหนักของเกณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ Fuzzy AHP มาคูณกับค่าข้อมูลที่ผ่านมาการปรับให้อยู่ในช่วง 0-1 แล้วรวมผลตามสมการ (11)

$$Score_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot p_{ij} \quad (11)$$

โดยที่ w_j คือค่าน้ำหนักของเกณฑ์จาก Fuzzy AHP และ p_{ij} คือค่าข้อมูลของอะไหล่รายการที่ i ภายใต้อนุพันธ์ j หลังปรับสเกล

2.4.9 การจัดกลุ่มอะไหล่ตามคะแนนรวม

ผลคะแนนรวมที่ได้จากสมการ (11) จะถูกนำมาจัดกลุ่มอะไหล่ตามระดับความสำคัญ ซึ่งแบ่งลำดับความสำคัญออกเป็น 3 กลุ่มหลัก แสดงในตารางที่ 8

2.5 การจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ด้วยวิธี ABC Analysis

วิธี ABC Analysis จัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ตามมูลค่าการใช้ (Usage Value) ตามแนวคิด Pareto โดยคำนวณมูลค่าการใช้ของอะไหล่แต่ละรายการ (ACV) จากปริมาณการใช้งานเฉลี่ยและราคาต่อหน่วย จากนั้นจัดเรียงค่า ACV จากมากไปน้อย คำนวณสัดส่วนสะสม และแบ่งกลุ่ม A-B-C ตามเกณฑ์ในตารางที่ 9

2.5.1 การคำนวณมูลค่าการใช้

มูลค่าการใช้ของอะไหล่แต่ละรายการคำนวณจากปริมาณการใช้งานเฉลี่ยย้อนหลัง 60 เดือนและราคาต่อหน่วย ตามสมการ (12)



ตารางที่ 8 การจัดกลุ่มอะไหล่ตามระดับความสำคัญ

กลุ่ม	สัดส่วนคะแนนรวม สะสม	ระดับ ความสำคัญ
A	20–30% แรกของคะแนนรวมทั้งหมด	สูงมาก
B	30–40% ของคะแนนรวมถัดมา	ปานกลาง
C	ส่วนที่เหลือ	ต่ำ

ตารางที่ 9 เกณฑ์การจำแนกกลุ่มอะไหล่ตามวิธี ABC Analysis

กลุ่ม	สัดส่วนของจำนวนรายการ	สัดส่วนของมูลค่าการใช้รวม
A	5% – 15%	70% – 80%
B	ประมาณ 30%	ประมาณ 15%
C	มากกว่า 50%	5% – 10%

$$ACV_i = \bar{D}_i \times P_i \quad (12)$$

โดยที่ $\bar{D}_i$ คือปริมาณการใช้งานเฉลี่ยของอะไหล่รายการที่ i และ P_i คือ ราคาต่อหน่วย

2.5.2 การจัดอันดับและแบ่งกลุ่ม ABC

ค่า ACV ถูกจัดเรียงจากมากไปน้อยและแบ่งกลุ่ม A, B และ C ตามสัดส่วนมูลค่าการใช้สะสม ที่แสดงในตารางที่ 9

2.6 นโยบายควบคุมสินค้าคงคลัง

งานวิจัยกำหนดนโยบายควบคุมสินค้าคงคลังจากผลการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ด้วยวิธี ABC Analysis และ Fuzzy AHP โดยแบ่งอะไหล่ออกเป็น Class A, B และ C เพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลุ่ม และนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อประเมินผลกระทบของนโยบาย [16]

2.6.1 นโยบายสำหรับอะไหล่กลุ่ม Class A

อะไหล่ในกลุ่ม Class A เป็นอะไหล่ที่มีความสำคัญสูงและส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต เมื่อเกิดการขาดสต็อกอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของโรงงาน งานวิจัยจึงกำหนดใช้นโยบายควบคุมสินค้าคงคลังแบบจุดสั่งซื้อ (ROP) ร่วมกับระดับความปลอดภัย เพื่อรักษาความพร้อมใช้งานของอะไหล่ โดยกำหนดจุดสั่งซื้อจากความต้องการเฉลี่ยและระยะเวลานำเข้า พร้อมเพิ่มระดับความปลอดภัยตามสมการ (13)

$$ROP = (D \times LT) + SS \quad (13)$$

เมื่อ ROP คือ จุดสั่งซื้อ, D คือ ความต้องการใช้งานอะไหล่เฉลี่ยต่อหน่วยเวลา, LT คือ ระยะเวลานำเข้าของอะไหล่, SS คือ ระดับสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัย

ระดับความปลอดภัยถูกกำหนดให้สูงกว่ากลุ่มอื่นเพื่อรองรับความผันผวนของความต้องการและความไม่แน่นอนของระยะเวลานำเข้า โดยคำนวณจากสมการที่ (14)

$$SS = Z \times \sigma_d \sqrt{LT} \quad (14)$$

เมื่อ Z คือ ค่าสถิติมาตรฐาน (Z-score) ที่สอดคล้องกับระดับความเชื่อมั่นหรือระดับการให้บริการที่กำหนด, σ_d คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการอะไหล่

2.6.2 นโยบายสำหรับอะไหล่กลุ่ม Class B

อะไหล่ในกลุ่ม Class B เป็นอะไหล่ที่มีความสำคัญระดับปานกลางและมีความต้องการค่อนข้างสม่ำเสมอ งานวิจัยจึงเลือกใช้นโยบายควบคุมสินค้าคงคลังแบบ



EOQ-ROP โดยกำหนดปริมาณการสั่งซื้อจากแบบจำลอง EOQ ตามสมการ (15) และใช้หลักการกำหนดจุดสั่งซื้อเช่นเดียวกับกลุ่ม Class A เพื่อรักษาสมดุลระหว่างต้นทุนการสั่งซื้อและต้นทุนการถือครอง

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (15)$$

เมื่อ D คือความต้องการรวมต่อปี, S คือค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อหนึ่งครั้ง และ H คือค่าถือครองต่อหน่วยต่อปี

2.6.3 นโยบายสำหรับอะไหล่กลุ่ม Class C

อะไหล่ในกลุ่ม Class C เป็นอะไหล่ที่มีมูลค่าต่ำ ความสำคัญต่อการผลิตไม่สูง และมีรูปแบบการใช้งานไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยจึงกำหนดใช้นโยบายควบคุมสินค้าคงคลังแบบ Min-Max โดยกำหนดระดับขั้นต่ำ (Min) และระดับสูงสุด (Max) ของแต่ละรายการจากข้อมูลการใช้งานจริงและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน เมื่อระดับสินค้าคงคลังต่ำกว่า Min จะทำการสั่งซื้อเพื่อเติมให้กลับไปยังระดับ Max ตัวอย่างพารามิเตอร์ Min-Max แสดงในตารางที่ 10

ทั้งนี้ นโยบาย Min-Max เดิมของโรงงานถูกใช้เป็นนโยบายฐาน (Baseline Policy) เพื่อเปรียบเทียบกับนโยบายที่ได้จากการจัดกลุ่มอะไหล่ด้วย ABC Analysis และ Fuzzy AHP ในการจำลองสถานการณ์

2.7 แบบจำลองการจำลองสถานการณ์

งานวิจัยสร้างแบบจำลองสินค้าคงคลังด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพนโยบายที่ได้จากการจัดกลุ่มด้วย Fuzzy AHP และ ABC Analysis โดยจำลองแบบรายเดือนตลอด 12 เดือนจากข้อมูลการใช้งานจริงของโรงงานกรณีศึกษา

ตารางที่ 10 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ Min-Max เดิมของโรงงานสำหรับอะไหล่กลุ่ม Class C

Material No.	รายการอะไหล่	Min	Max
SP-660	Adhesive Tape	25	50
SP-703	As-Interface	1	2
SP-774	Bevel Gear Motor	1	1
...	...	...	...

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	หน่วย
ระยะเวลาจำลอง	12 (360 วัน)	เดือน
ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ	2,000	บาท/ครั้ง
อัตราต้นทุนการถือครอง	25	% ต่อปี
ระดับความเชื่อมั่น	95 ($Z=1.645$)	%
ระยะเวลานำเข้า	ตามจริงรายชิ้น	วัน

2.7.1 สมมติฐานของแบบจำลอง

แบบจำลองใช้สมการสมดุลวัสดุเพื่อคำนวณปริมาณสินค้าคงคลังปลายงวด ดังสมการ (16)

$$I_t = \max(0, I_{t-1} + Q_{in} - D_t) \quad (16)$$

โดยที่ I_{t-1} คือปริมาณสินค้าคงคลังยกมา, Q_{in} คือปริมาณสินค้ารับเข้า และ D_t คือปริมาณความต้องการในงวด t

2.7.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

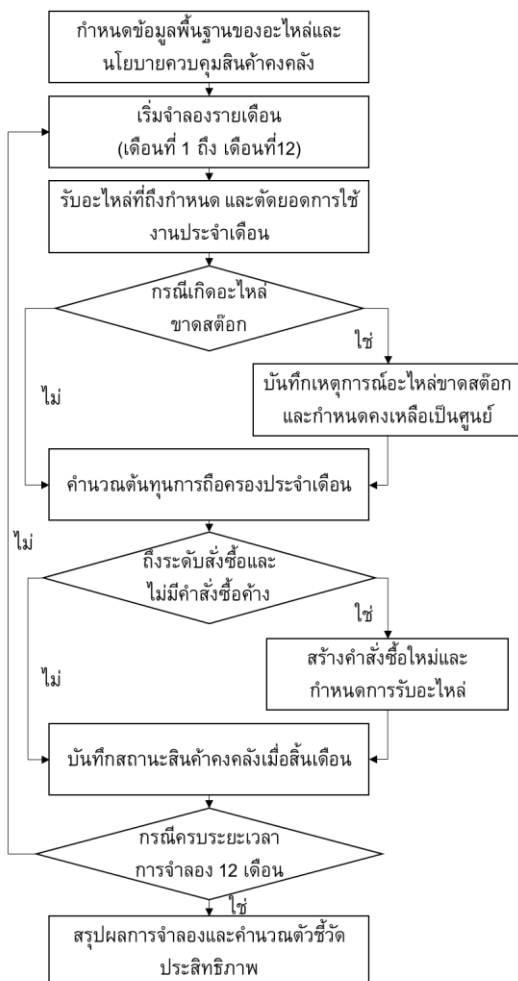
เพื่อให้การคำนวณต้นทุนและการวัดผลมีความถูกต้องตามบริบทของโรงงานกรณีศึกษา งานวิจัยนี้ใช้พารามิเตอร์คงที่ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 11

2.7.3 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง

แบบจำลองการจำลองสถานการณ์ดำเนินการในรูปแบบรายเดือน โดยเริ่มจากการอัปเดตสินค้าคงคลังจากปริมาณรับเข้าและหักความต้องการออกจากสต็อก



จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขการสั่งซื้อและสร้างคำสั่งซื้อใหม่ตามนโยบายที่กำหนด (ROP, EOQ-ROP หรือ Min-Max) พร้อมคำนวณต้นทุนและบันทึกตัวชี้วัดประสิทธิภาพในแต่ละงวด กระบวนการดังกล่าวทำซ้ำจนครบระยะเวลาจำลอง 12 เดือน โดยลำดับขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กระบวนการทำงานของแบบจำลองคงคลัง

2.7.4 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

งานวิจัยประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของนโยบายสินค้าคงคลังจากผลการจำลองตลอดระยะเวลา 12 เดือน โดยใช้ตัวชี้วัด 4 ด้าน ได้แก่ ต้นทุนรวมในการจัดการสินค้าคงคลัง ระดับการให้บริการ จำนวนครั้งที่ขาดสต็อก และมูลค่าสินค้าคงคลังเฉลี่ย

ต้นทุนรวมในการจัดการสินค้าคงคลังคำนวณจากสมการ (17)

$$TC = \sum_{i=1}^N (C_O + C_H) \quad (17)$$

ระดับการให้บริการคำนวณจากสมการ (18)

$$SL = \left(\frac{D_{Total} - S_{Total}}{D_{Total}} \right) \times 100 \quad (18)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวมในการจัดการสินค้าคงคลัง, C_O คือต้นทุนการสั่งซื้อ, C_H คือต้นทุนการถือครอง, D_{Total} คือปริมาณความต้องการรวมทั้งหมด และ S_{Total} คือปริมาณสินค้าที่ขาดแคลนรวม ส่วนจำนวนครั้งที่ขาดสต็อกและมูลค่าสินค้าคงคลังเฉลี่ยได้จากผลการจำลองในแต่ละงวด

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ด้วยเทคนิค Fuzzy AHP

การจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ดำเนินการด้วยเทคนิค Fuzzy AHP โดยใช้เกณฑ์ 5 ด้าน ได้แก่ MC, LT, UF, P และ NS ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญกรวมด้วยค่าเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ตรวจสอบความสอดคล้อง และคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธี Fuzzy Extent Analysis เพื่อนำไปใช้คำนวณคะแนนรวมของอะไหล่



3.1.1 ค่าความสอดคล้องของเมทริกซ์รวม

เมทริกซ์การเปรียบเทียบแบบคู่ของเกณฑ์ทั้ง 5 สร้างจากความคิดเห็นรวมของผู้เชี่ยวชาญ และผ่านการตรวจสอบความสอดคล้อง โดยค่า CR ต่ำกว่า 0.1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 12

3.1.2 ค่าน้ำหนักของเกณฑ์

หลังจากทำ Fuzzy Extent Analysis และ Defuzzification จะได้ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ซึ่งสะท้อนลำดับความสำคัญตามมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ เมื่อ Normalize แล้วค่าน้ำหนักรวมจะเท่ากับ 1 แสดงดังตารางที่ 13

3.1.3 คะแนนรวมของอะไหล่

เมื่อนำค่าน้ำหนักที่ได้จาก Fuzzy AHP ไปคำนวณคะแนนรวมกับค่าที่ Normalize แล้วของอะไหล่ทั้ง 806 รายการ จะได้คะแนนรวมของอะไหล่ ที่แสดงลำดับความสำคัญของอะไหล่แต่ละ โดยอะไหล่ที่มีคะแนนสูงจะจัดอยู่ในกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุด

ตารางที่ 14 ตัวอย่างค่า Composite Score ของอะไหล่

ลำดับที่	Material No.	MC	LT	P	UF	NS	คะแนนรวม
1	SP-117	3.00	237.00	394.72	0.55	1.00	0.8159
2	SP-804	3.00	237.00	7,831.14	0.10	1.00	0.8157
3	SP-553	3.00	130.00	850,000.00	0.01	1.00	0.7726
4	SP-447	3.00	130.00	755,100.00	0.33	1.00	0.7660
...	...	...	...	...	...	...	...
803	SP-599	1.00	55.00	32,792.25	0.00	2.00	0.0450
804	SP-022	1.00	40.00	3,632.31	0.00	2.00	0.0287
805	SP-159	1.00	25.00	5,368.69	0.00	2.00	0.0146
806	SP-182	1.00	25.00	1,035.30	0.00	2.00	0.0143

ตารางที่ 12 ค่าความสอดคล้องของเมทริกซ์รวม

รายการ	ค่า
Consistency Index (CI)	0.043
Random Index	1.12
Consistency Ratio (CR)	0.039

ตารางที่ 13 ค่าน้ำหนักของเกณฑ์จากการวิเคราะห์ด้วย Fuzzy AHP

เกณฑ์	ค่า TFN	น้ำหนัก	Normalized Weight
MC	(4.91, 5.43, 7.00)	1.000	0.528
LT	(3.07, 4.09, 5.08)	0.408	0.216
UF	(3.09, 4.21, 5.48)	0.182	0.096
P	(4.25, 4.42, 5.52)	0.169	0.089
NS	(7.14, 9.83, 11.87)	0.135	0.071

ขณะที่คะแนนต่ำแสดงถึงความสำคัญลดลง แสดงดังตารางที่ 14



3.1.4 การแบ่งกลุ่มอะไหล่จากค่าคะแนนรวม

ผลการวิเคราะห์พบว่าเกณฑ์ Machine Criticality และ Lead Time มีน้ำหนักสูงที่สุด สะท้อนว่าอะไหล่ที่กระทบต่อความต่อเนื่องของการผลิตและมีความเสี่ยงด้านเวลาในการจัดหามีความสำคัญสูง เมื่อคำนวณคะแนนรวมของอะไหล่ทั้ง 806 รายการ พบว่าค่าคะแนนอยู่ในช่วง 0.0143–0.8159 และสามารถจัดกลุ่มความสำคัญเป็น A, B และ C ตามเกณฑ์ที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 15

ผลการจำแนกกลุ่มพบว่าอะไหล่กลุ่ม A มีความสำคัญสูงและต้องบริหารจัดการอย่างใกล้ชิด ขณะที่กลุ่ม B มีความสำคัญปานกลาง และกลุ่ม C มีความสำคัญต่ำกว่า โดยสามารถกำหนดนโยบายควบคุมสินค้าคงคลังตามระดับความสำคัญได้

3.2 ผลการจัดลำดับความสำคัญของอะไหล่ด้วยวิธี ABC Analysis

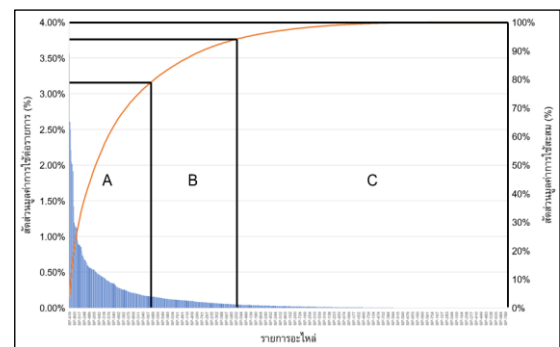
การจัดกลุ่มอะไหล่ด้วย ABC Analysis ใช้มูลค่าการใช้ประจำปีของอะไหล่ทั้ง 806 รายการ เพื่อจัดอันดับและแบ่งกลุ่มเป็น A, B และ C ตามหลักพาเรโต ซึ่งแสดงว่าอะไหล่จำนวนน้อยสร้างมูลค่ารวมส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 5

จากกราฟพบว่าเส้นมูลค่าสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แสดงว่าอะไหล่กลุ่ม A แม้มีจำนวนไม่มากแต่มีสัดส่วนมูลค่ารวมสูงที่สุด ส่วนกลุ่ม B อยู่ในช่วงกลาง และกลุ่ม C เป็นรายการส่วนใหญ่แต่มีมูลค่าต่ำ แสดงในตารางที่ 16

ผลลัพธ์ช่วยระบุอะไหล่ที่ควรให้ความสำคัญสูงสุดด้านการจัดการ เช่น กลุ่ม A มีผลต่อมูลค่ารวมของระบบมากที่สุด ขณะที่กลุ่ม C สามารถใช้วิธีควบคุมแบบผ่อนคลายเป็นได้มากกว่า

ตารางที่ 15 การจำแนกกลุ่มอะไหล่ตามคะแนนรวมจาก Fuzzy AHP

กลุ่ม	ช่วงคะแนน	จำนวน	ร้อยละ
A	≥ 0.604	162	20.10 %
B	0.368 – 0.603	241	29.90 %
C	< 0.368	403	50.00 %



รูปที่ 5 กราฟ ABC แสดงมูลค่าการใช้สะสมของอะไหล่

ตารางที่ 16 ผลการจำแนกอะไหล่ตาม ABC Analysis

กลุ่ม	รายการ	สัดส่วนรายการ	สัดส่วนมูลค่า
A	157	19.48 %	60.06 %
B	170	21.09 %	15.81 %
C	479	59.43 %	23.59 %

3.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การจัดกลุ่ม

งานวิจัยเปรียบเทียบผลการจัดกลุ่มอะไหล่จำนวน 806 รายการ ระหว่างวิธี ABC Analysis และ Fuzzy AHP เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างและระดับความสอดคล้องของการจัดกลุ่ม โดยสรุปผลในรูปแบบเมทริกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 17



ตารางที่ 17 เมทริกซ์เปรียบเทียบจำนวนรายการ
อะไหล่ระหว่างวิธี ABC Analysis และ Fuzzy AHP

	ABC Analysis	รวม		
		A	B	C (Fuzzy AHP)
Fuzzy AHP				
A		38	46	78
B		51	46	144
C		68	78	257
รวม (ABC)		157	170	479

ตารางที่ 18 สรุปนโยบายคงคลังตามคลาสของอะไหล่

วิธีจัด กลุ่ม	กลุ่ม	จำนวน รายการ	นโยบายที่ใช้
Fuzzy AHP	A	162	ROP + Safety Stock
	B	241	EOQ – ROP
	C	403	Min – Max
ABC Analysis	A	157	ROP + Safety Stock
	B	170	EOQ – ROP
	C	479	Min – Max

จากตารางที่ 17 พบว่า อะไหล่จำนวน 341 รายการ (ร้อยละ 42.3) ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันทั้งสองวิธี โดยแบ่งเป็นกลุ่ม A จำนวน 38 รายการ กลุ่ม B จำนวน 46 รายการ และกลุ่ม C จำนวน 257 รายการ ขณะที่อะไหล่อีก 465 รายการ (ร้อยละ 57.7) ถูกจัดให้อยู่ต่างกลุ่ม สะท้อนให้เห็นว่าวิธี ABC Analysis และ Fuzzy AHP มีความสอดคล้องกันในระดับปานกลาง

นอกจากนี้เมทริกซ์เปรียบเทียบยังแสดงให้เห็นว่าการใช้ Fuzzy AHP ส่งผลให้ลำดับความสำคัญของอะไหล่เปลี่ยนไปจากวิธี ABC Analysis โดยให้ความสำคัญกับปัจจัยเชิงเทคนิคและผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากขึ้น ส่งผลให้อะไหล่ที่มีความสำคัญเชิงเทคนิคสูงแม้มูลค่าการใช้ไม่มาก ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่ม A หรือ B ในขณะที่บางรายการซึ่งมีมูลค่าการใช้สูงแต่มีผลกระทบต่อการผลิตต่ำ ถูกจัดลดระดับลงไปอยู่ในกลุ่ม B หรือ C

3.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากแบบจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ถูกใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพนโยบายสินค้าคงคลังภายใต้การจัดกลุ่มอะไหล่ด้วยวิธี Fuzzy AHP และ ABC Analysis โดยใช้นโยบายเดียวกันในการจำลอง ได้แก่ กลุ่ม A ใช้ ROP ร่วมกับ Safety Stock สูง กลุ่ม B ใช้ EOQ–ROP และกลุ่ม C ใช้ Min–Max ก่อนการจำลองได้จัดกลุ่มอะไหล่ให้สอดคล้องกับนโยบายที่กำหนดและสรุปจำนวนรายการในแต่ละกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 18

ผลการจำลองนโยบายสินค้าคงคลังตามกลุ่มอะไหล่แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างวิธี Fuzzy AHP และ ABC Analysis โดยประเมินจากระดับการให้บริการ จำนวนครั้งขาดสต็อก ระดับสินค้าคงคลังเฉลี่ย และต้นทุนรวมของระบบ ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการจำลองสถานการณ์ของ Fuzzy AHP และ ABC Analysis

ตัวชี้วัด	Fuzzy AHP	ABC Analysis	ผลต่าง
ระดับการให้บริการ (%)	81.00 %	79.86 %	+1.14 %
จำนวนอะไหล่ที่ขาดสต็อก	1,552	1,645	-93
สัดส่วนมูลค่าคงคลังเทียบฐาน ABC (%)	98.52 %	100 %	-1.48 %
ต้นทุนการจัดการอะไหล่	9,978,141	10,213,350	-235,209

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์อะไหล่จำนวน 806 รายการจากสายการบรรจุกระป๋องและสายการบรรจุขวดพบว่า วิธี Fuzzy AHP ซึ่งพิจารณาปัจจัยด้านความสำคัญของเครื่องจักร ระยะเวลาเข้า ความถี่การใช้งาน ราคา และจำนวนผู้จัดจำหน่าย สามารถสะท้อนความสำคัญเชิงเทคนิคของอะไหล่ได้ครอบคลุมกว่า ABC Analysis ที่พิจารณาเฉพาะมูลค่าการใช้งาน โดย Fuzzy AHP จัดอะไหล่เป็นกลุ่ม A, B และ C ในสัดส่วน 20.10%, 29.90% และ 50.00% ขณะที่ ABC Analysis จัดได้ 19.48%, 21.09% และ 59.43% สะท้อนถึงความแตกต่างของหลักเกณฑ์การประเมิน โดยเฉพาะอะไหล่ที่มีมูลค่าต่ำแต่มีความสำคัญต่อความต่อเนื่องของการผลิต

ผลการจำลองสถานการณ์ 12 เดือนพบว่านโยบายสินค้าคงคลังที่อ้างอิง Fuzzy AHP ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าวิธี ABC Analysis ในทุกตัวชี้วัด โดยมีระดับการให้บริการเพิ่มเป็น 81.00% (สูงกว่า 1.14 จุดเปอร์เซ็นต์) จำนวนครั้งที่อะไหล่ขาดสต็อกลดลง 93 ครั้ง (จาก 1,645 ครั้ง เหลือ 1,552 ครั้ง) และสัดส่วนมูลค่าคงคลังรวมกับต้นทุนรวมของระบบลดลง 1.48% และ 2.30% ตามลำดับ

ผลดังกล่าวสะท้อนนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติอย่างชัดเจน โดย Fuzzy AHP ให้น้ำหนักสูงสุดกับเกณฑ์ความสำคัญของเครื่องจักร ($MC = 0.528$) และระยะเวลานำเข้า ($LT = 0.216$) แสดงว่าอะไหล่ที่มีผลต่อความต่อเนื่องของสายการผลิตและมีความเสี่ยงด้านการจัดหา ควรได้รับการควบคุมเป็นลำดับแรก แม้ว่ามูลค่าการใช้งานจะไม่สูงก็ตาม ขณะเดียวกันการที่อะไหล่ร้อยละ 57.7 ถูกจัดลำดับแตกต่างกันระหว่างสองวิธี ชี้ให้เห็นว่า การใช้ ABC Analysis เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการสะท้อนความเสี่ยงเชิงปฏิบัติการที่แท้จริง สอดคล้องกับผลที่พบว่าการประยุกต์ใช้ Fuzzy AHP สามารถลดต้นทุนการจัดการอะไหล่ได้ 235,209 บาทต่อปี ซึ่งยืนยันถึงความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ของการใช้วิธีจัดลำดับที่ครอบคลุมหลายเกณฑ์มากขึ้น

สรุปได้ว่า Fuzzy AHP เป็นวิธีการจัดลำดับความสำคัญอะไหล่ที่เหมาะสมกว่าในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่ม เนื่องจากสามารถสะท้อนความสำคัญเชิงเทคนิคของเครื่องจักร ลดความเสี่ยงจากการหยุดผลิต และสนับสนุนการกำหนดนโยบายสินค้าคงคลังที่ช่วยลดต้นทุนและเพิ่มระดับการให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



4.2 ข้อเสนอแนะ

1.เพิ่มการจำลองภายใต้ความไม่แน่นอน โดยกำหนดให้ความต้องการ และระยะเวลานำเข้า เป็นตัวแปรสุ่ม รวมถึงเพิ่มรอบการจำลอง เพื่อประเมินความทนทานของนโยบายสินค้าคงคลังภายใต้ความผันผวน

2.ควรเพิ่มเกณฑ์ประเมินด้านผลกระทบทางธุรกิจ โดยนำต้นทุนการหยุดเครื่องจักร ความรุนแรงของผลกระทบต่อคุณภาพ หรือความยากในการซ่อมมารวมพิจารณา เพื่อให้การจัดลำดับความสำคัญสะท้อนความเสี่ยงเชิงธุรกิจได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

3.ทดสอบเปรียบเทียบนโยบายสินค้าคงคลังรูปแบบอื่น เพิ่มเติม เช่น นโยบายแบบ (s,S), Base-stock หรือ Periodic review (T,S) เพื่อค้นหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดกับลักษณะการใช้งานของอะไหล่แต่ละประเภท

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Pintelon and A. Parodi-Herz, Maintenance: An evolutionary perspective, Handbook of Maintenance Management and Engineering, Springer, London, UK, 2008, 21–48.
- [2] J.D. Sterman, Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world, McGraw-Hill, NY, USA, 2000.
- [3] W.J. Kennedy, J.W. Patterson and L.D. Fredendall, An overview of recent literature on spare parts inventories, International Journal of Production Economics, 2002, 76(2), 201–215.
- [4] J. Huiskonen, Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices, International Journal of Production Economics, 2001, 71(1–3), 125–133.
- [5] B.E. Flores and D.C. Whybark, Implementing multiple criteria ABC analysis, Journal of Operations Management, 1987, 7(1–2), 79–85.
- [6] J. Gong, Y. Luo, Z. Qiu and X. Wang, Determination of key components in automobile braking systems based on ABC classification and FMECA, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 9(1), 69–77.
- [7] N. M. M. Torre, V. A. P. Salomon and A.K. Florek-Paszkowska, Multi-criteria classification of spare parts in the steel industry, Brazilian Journal of Operations and Production Management, 2025, 22(1), e20252344.
- [8] D.Y. Chang, Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, European Journal of Operational Research, 1996, 95, 649–655.
- [9] M.A. Ilgin, A spare parts criticality evaluation method based on fuzzy AHP and Taguchi loss functions, Eksploatacja i Niezawodność, 2019, 21(1), 145–152.

- [10] Japan Institute of Plant Maintenance, JIPM-TPM 600 forms manual: Sample formats for the 12 steps of TPM, Japan, 1995.
- [11] T.L. Saaty, How to make a decision: The analytic hierarchy process, European Journal of Operational Research, 1990, 48(1), 9–26.
- [12] E. Forman and K. Peniwati, Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process, European Journal of Operational Research, 1998, 108, 165–169.
- [13] T.L. Saaty, A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15, 234–281.
- [14] J.A. Alonso and M.T. Lamata, Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2006, 14(4), 445–459.
- [15] T.L. Saaty, The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, NY, USA, 1980.
- [16] T. Chunpong and P. Chaovalitwongse, Inventory management for integrated circuit packaging material under variable demand, Engineering Journal Chiang Mai University, 2022, 29(1), 43–55. (in Thai)



การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางพลวัตของตัวหน่วงรางที่พัฒนาจาก ส่วนผสมยางธรรมชาติและตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน

ทรงศักดิ์ สุราษฎร์ประดิษฐ์¹ ธนภฤต คำณิ¹ รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา¹ และ เขมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล²

¹ ศูนย์วิจัยระบบรางและโครงสร้างพื้นฐาน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: rattapoohm.pa@kmitl.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 2 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 5 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การสั่นสะเทือนจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางเป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนขณะรถไฟวิ่ง การลดเสียงที่แหล่งกำเนิดด้วยการติดตั้งตัวหน่วงรางจึงกลายเป็นวิธีแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปตัวหน่วงรางมักผลิตจากวัสดุโพลียูรีเทน (PU) อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติ (NR) ถูกมองว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจทดแทนโพลียูรีเทนได้ เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า แต่กระนั้นยังมีการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางพลวัตของวัสดุทั้งสองชนิดในงานประยุกต์การหน่วงรางอยู่น้อยมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางของตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากส่วนผสมยางธรรมชาติผสมในสัดส่วนเชิงมวลที่แตกต่างกันได้แก่ 0%, 30%, 50% และ 70% เปรียบเทียบตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยอาศัยการตอบสนองทางพลวัตผ่านการวิเคราะห์โมดัล เพื่อประเมินคุณลักษณะการสั่นสะเทือน และการทดสอบวัดอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง ตามมาตรฐาน BS EN 15461 และ BS EN ISO 3095 ผลการทดสอบพบว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติที่สัดส่วน 50% เชิงมวล ให้สมรรถนะการหน่วงที่ดีที่สุด โดยสามารถปรับจูนและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ 400–1,000 Hz และ 1,600–3,000 Hz นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มให้ผลการลดทอนที่มีเสถียรภาพและสูงกว่าชนิดโพลียูรีเทนอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 2,000 ถึง 3,000 Hz การศึกษานี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของยางธรรมชาติในฐานะทางเลือกที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในการหน่วงรางรถไฟ

คำสำคัญ: ตัวหน่วงราง; การสั่นสะเทือนของราง; ยางธรรมชาติ; ยางสังเคราะห์; อัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง

Comparative Study on the Dynamic Performance of Natural Rubber-Based and Polyurethane Rail Dampers

Songsak Suthasupradit ¹, Thanakrit Kummanee ¹, Rattapoohm Parichatprecha ^{1*} and Khemapat Tontiwattanakul ²

¹ Rail and Infrastructure Research Center, Department of Civil Engineering, Rail and Infrastructure Research Center, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

² Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author, Email: rattapoohm.pa@kmitl.ac.th

Received: 7 August 2025; Revised: 2 April 2026; Accepted: 5 June 2026

Online Published: 19 August 2026

Abstract: Wheel-rail interaction is the primary source of railway rolling noise, which is commonly mitigated at the source by installing Tuned Rail Dampers (TRDs). While polyurethane (PU) is the conventional material used, natural rubber (NR) offers a more sustainable and eco-friendlier alternative; however, comparative studies on their dynamic performance remain limited. This study evaluates and compares the track vibration attenuation of NR-based dampers developed with NR mass proportions of 0%, 30%, 50%, and 70% against that of commercial PU dampers. Dynamic responses and vibration characteristics were assessed through modal analysis and Track Decay Rate (TDR) measurements in accordance with the BS EN 15461 and BS EN ISO 3095 standards. The results indicate that the 50% NR formulation achieved optimal damping performance, effectively tuning and reducing vibrations within critical frequency bands (400–1,000 Hz and 1,600–3,000 Hz). Notably, the 50% NR damper provided higher and more stable vibration attenuation than the commercial PU damper, particularly in the high-frequency range of 2,000–3,000 Hz. These findings confirm the potential of natural rubber as a viable, sustainable, and highly effective alternative for modern railway noise control.

Keywords: Rail damper; vibration; Natural rubber; Isobutylene-isoprene rubber; Track decay rate



1. บทนำ

ระบบขนส่งทางรถไฟเป็นรูปแบบการขนส่งที่สำคัญ เพราะสะดวกสบาย ประหยัดพลังงาน และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการขนส่งรูปแบบอื่น [1] แต่รถไฟทั่วไปที่วิ่งด้วยความเร็วปกติจะมีการสั่นสะเทือนและเสียงดังรบกวน [2] จากการศึกษาทั้งในเชิงทฤษฎีและการวัดจริง พบว่าสาเหตุหลักของเสียงรบกวนมาจาก การสั่นสะเทือนของรางบริเวณที่ล้อสัมผัสกับราง [3-5] ซึ่งเกิดจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ การสั่นสะเทือนจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบช่วงล่างรถไฟและระบบโครงสร้างทาง [6,7] และการสั่นสะเทือนจากความไม่ราบเรียบของล้อหรือราง ซึ่งเสียงประเภทนี้จะเกิดขึ้นในช่วงย่านความถี่ตั้งแต่ 100–5,000 Hz เพื่อให้การลดเสียงมีประสิทธิภาพวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดการสั่นสะเทือนคือการมุ่งเน้นตรงที่แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงมีเลือกการใช้ตัวหน่วงราง (Tuned Rail Damper) ในการลดการสั่นสะเทือน โดยหลักการคือตัวหน่วงรางจะทำงานโดยใช้การสั่นสะเทือนทางกล การสั่นสะเทือนของรางจะถ่ายเข้าสู่ตัวหน่วงราง เกิดการสั่นพ้องที่ย่านความถี่ที่ต้องการ [8] ซึ่งหลักการดังกล่าวเรียกว่า Tuned Mass Damper, TMD [9] สำหรับการติดตั้งตัวหน่วงรางเข้ากับรางรถไฟนั้น วิธีที่นิยมจะเป็นการใช้วัสดุประสาน เพื่อยึดติดกับบริเวณผิวสัมผัสของตัวหน่วงรางและเอวรางเข้าด้วยกันรวมทั้งเพิ่มแรงกดในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสด้วยการติดตั้งคลิปสปริง จากการทดสอบภาคสนามในการติดตั้งตัวหน่วงรางพบว่าเสียงรบกวนจากรถไฟลดลง 1.5 dBA [10] หรือระดับเสียงในพื้นที่อยู่อาศัยและในห้องโดยสารรถไฟ ลดลง 5.7 dBA และ 3.4 dBA ตามลำดับ [11]

แม้วิธีการประเมินประสิทธิภาพตัวหน่วงรางในอดีตจะให้ผลลัพธ์ที่เป็นรูปธรรม แต่การพึ่งพาการทดสอบในภาคสนาม (Field Measurements) เพียงอย่างเดียวก่อให้เกิดข้อจำกัดทั้งในแง่การควบคุมตัวแปรสภาพแวดล้อม การรบกวนระบบการเดินรถ และงบประมาณในการดำเนินงานที่สูงมาก ยิ่งไปกว่านั้น การดำเนินงานเพื่อคัดเลือกวัสดุทางเลือกใหม่อย่างยวธรรมชาติ ยังคงขาดขั้นตอนการทดสอบเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบเพื่อระบุสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดก่อนการนำไปใช้งานจริง การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งปิดช่องว่างทางวิชาการดังกล่าว โดยให้ความสำคัญกับการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการเป็นหลัก ทั้งนี้ การปรับเปลี่ยนแนวทางมาประเมินผลในห้องปฏิบัติการเพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายและทดแทนการขาดแคลนเกณฑ์มาตรฐานของการวัดผลหน่วยงานจริงนั้น มีความสอดคล้องอย่างยิ่งกับแนวทางของโครงการความร่วมมือระหว่างประเทศอย่าง STARDAMP ที่ริเริ่มขึ้นเพื่อพัฒนาวิธีประเมินมาตรฐานโดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งใช้งานบนรางจริงทั้งหมด [12]

ในการออกแบบตัวหน่วงราง ได้มีการเลือกใช้ส่วนผสมจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ประเภท Isobutylene Isoprene แทนที่วัสดุเดิมจากยางสังเคราะห์โพลียูรีเทน โดยยางธรรมชาติจะให้คุณสมบัติเด่นหลายประการเช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว และยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี รวมถึงจะมีค่า Damping Factor ที่สูงกว่าโพลียูรีเทน ในส่วนยางไอโซพรีน-ไอโซพรีนหรือบิวไทล์ มีคุณสมบัติทนต่อการขัดถูได้ดี และให้ค่าการกระด้างกระดอน (Rebound Resilience) ต่ำที่อุณหภูมิห้องจึงทำให้ยางประเภทนี้สามารถดูดซับพลังงานกลได้ดีและการสั่นสะเทือนได้ดี

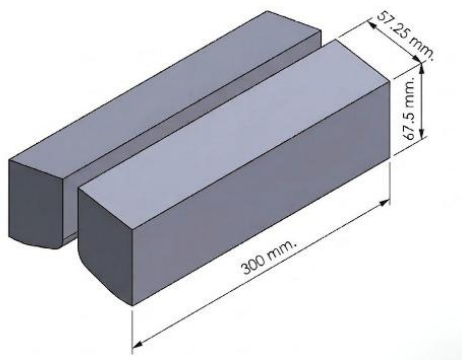


งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการสลายพลังงานของตัวหน่วงรางที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูตรส่วนผสมแตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร เปรียบเทียบตัวหน่วงรางที่ทำจากโพลียูรีเทน และเปรียบเทียบกรณีไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงราง โดยอาศัยกระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ติดตั้งบนรางรถไฟรางชนิด 60E1 ความยาว 6 เมตร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์โมดัล ตามมาตรฐาน BS EN 15461 [13] เพื่อหาฟังก์ชันตอบสนองความถี่ (Frequency Response Function) วิเคราะห์หาค่าอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง (Track Decay Rate) ตามมาตรฐาน EN ISO 3095 [14] รวมถึงเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างทางรถไฟที่ติดตั้งตัวหน่วงรางชนิดต่างๆในงานวิจัยนี้ต่อไป

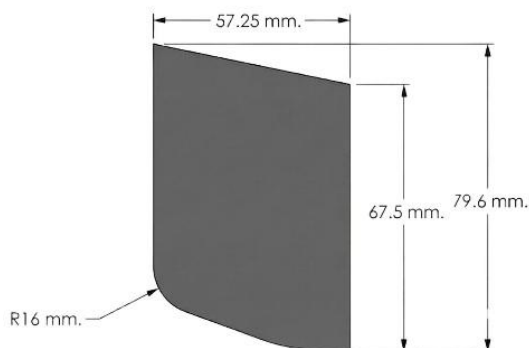
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ตัวหน่วงราง

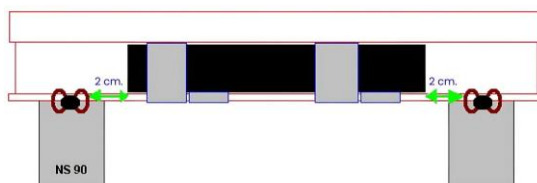
ตัวหน่วงรางได้ทำการขึ้นรูปตามรูปแบบหล่อที่ออกแบบไว้ ซึ่งประกอบด้วยแท่งเหล็กที่ถูกหุ้มด้วยโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (Elastomeric polymer) และออกแบบให้รองรับกับรางชนิด 60E1 ดังรูปที่ 1 และ 2 ตัวหน่วงรางมีขนาดความกว้าง 57.25 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร และความสูง 67.5 มิลลิเมตร โดยจะติดตั้งตัวหน่วงราง 2 ชิ้นไว้ทั้งสองด้านของรางในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างหมอนรองรางแต่ละตัว พร้อมติดตั้งคลิปล็อคยึดตัวหน่วงรางกับราง [15] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 แบบตัวอย่างของตัวหน่วงราง



รูปที่ 2 หน้าตัดของตัวหน่วงราง



รูปที่ 3 ระยะเวลาการยึดติดตัวหน่วงรางระหว่างหมอนรองราง



2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวหน่วงราง

กระบวนการผลิตตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนและชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์ มีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยการผลิตตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน จะใช้โพลียูรีเทนในรูปแบบของเหลวฉีดเข้าไปในพิมพ์หล่อที่ได้ออกแบบตามชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ในขณะที่กระบวนการผลิตตัวหน่วงรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์จะใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (Compression Molding) เพื่อให้ยางคงรูปเป็นก้อนตัวหน่วงรางตามที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 5

จากผลการขึ้นรูปจะได้ตัวหน่วงรางต้นแบบเพื่อทำการติดตั้งกับรางและทำการทดสอบพบว่าตัวหน่วงรางจะมีค่าน้ำหนักโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 6.8 ถึง 7.1 กิโลกรัม ดังตารางที่ 1

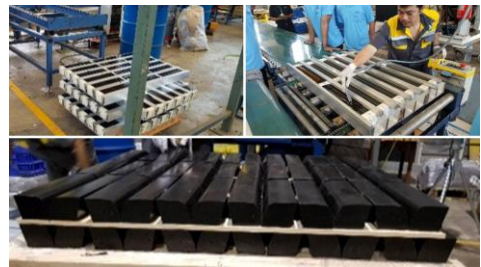
2.3 วัสดุตัวหน่วงราง

2.3.1 ตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน

วัสดุตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการติดตั้งใช้งานมาแล้วในต่างประเทศ สามารถลดเสียงและการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดได้ 3–7 dB โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน Silent Track™ [16] ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับตัวหน่วงรางชนิดที่มีส่วนผสมจากยางธรรมชาติ รูปตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนที่มีการติดตั้งใช้งานจริงแสดงดังรูปที่ 6

ตารางที่ 1 น้ำหนักโดยเฉลี่ยของตัวหน่วงราง

ชนิด	น้ำหนักโดยเฉลี่ย (กิโลกรัม)
Polyurethane (PU)	7.11
NR 0%	6.87
NR 30%	6.90
NR 50%	6.87
NR 70%	6.88



รูปที่ 4 การขึ้นรูปตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน



รูปที่ 5 เครื่องอัดแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปตัวหน่วงรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับบิวไทล์



รูปที่ 6 การติดตั้งตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน



2.3.2 ตัวหน่วยรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์

วัสดุจากยางธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว ความต้านทานต่อการขีดข่วนสูง และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดีจึงสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายมาก รวมถึงมีส่วนผสมยางบิวไทล์ ที่เป็นยางสังเคราะห์ให้คุณสมบัติเด่น คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก นอกจากนี้ยังเป็นฉนวนไฟฟ้ารวมถึงการทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และยางบิวไทล์ มีค่าการกระด้างกระดอน (Rebound Resilience) ต่ำที่อุณหภูมิห้อง จึงทำให้สามารถดูดซับพลังงานกลและการสั่นสะเทือนได้ดี โดยได้ดำเนินการการออกแบบส่วนผสมตัวหน่วยรางที่มีปริมาณยางธรรมชาติและยางบิวไทล์ที่มีสัดส่วนตามน้ำหนักที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร ตามตารางที่ 2 ได้แก่ NR 0%, NR 30%, NR 50% และ NR 70% ในรูปที่ 7

2.4 ขั้นตอนการทดสอบ

2.4.1 การทดสอบและวิเคราะห์โมดัล

การวิเคราะห์โมดัลเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมพลวัตของโครงสร้างที่ทำการทดสอบ โดยการทดสอบดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ทั้งในสถานะที่มีการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนภายนอก หรือในขณะที่วัตถุอยู่ในสภาวะการทำงานจริง การทดสอบและวิเคราะห์โมดัล จะมีพารามิเตอร์พื้นฐานคือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ทำการหาความถี่ที่ตัวหน่วยรางแต่ละชนิดที่เกิดการสั่น รูปแบบการสั่นพ้อง (Mode Shapes) เพื่อดูรูปแบบ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมตัวหน่วยรางที่มีปริมาณยางธรรมชาติและยางบิวไทล์สัดส่วนตามน้ำหนัก

รูปแบบ	ส่วนผสม	สัดส่วนยางธรรมชาติ (%)	สัดส่วนยางบิวไทล์ (%)
1	NR 0%	0	100
2	NR 30%	30	70
3	NR 50%	50	50
4	NR 70%	70	30



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7 ตัวหน่วยรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์: (ก) ตัวหน่วยรางสูตร NR 0%; (ข) ตัวหน่วยรางสูตร NR 30%; (ค) ตัวหน่วยรางสูตร NR 50% และ (ง) ตัวหน่วยรางสูตร NR 70%

การสั่นของตัวหน่วยรางว่าเป็นอย่างไรในแต่ละความถี่ธรรมชาติ และค่าการหน่วง (Damping Ratio) เป็นค่าที่แสดงระดับการลดลงของแรงสั่นสะเทือน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและเพิ่มประสิทธิภาพของตัวหน่วยรางให้เหมาะสมและมีคุณสมบัติทางพลวัตตามที่ออกแบบไว้จริง ก่อน



นำไปติดตั้งบนรางจริง โดยในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์โมดัลแบบเชิงทดลอง (Experimental Modal Analysis - EMA) การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบได้ใช้งานวิจัยของ I. Haladin, S และคณะ [17] เป็นแนวทาง ในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้การสั่นสะเทือนจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง สัญญาณความเร่งและแรงกระตุ้นจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเพื่อหาฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response Function) [18] และนำไปคำนวณค่าการลดทอนการสั่นสะเทือน (TDR) ของรางต่อไป



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งในทิศทางตามแนวตั้งและแนวด้านข้างในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 9 การกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค้อนกระตุ้นตามแนวตั้งในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 10 การกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค้อนกระตุ้นตามแนวด้านข้าง

2.4.2 การทดสอบค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง

การทดสอบค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง (Track Decay Rate) เป็นการทดสอบอัตราการสลายพลังงานของทางวิ่งที่ติดตั้งตัวหน่วงราง ทั้งนี้การทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 15461 [13] ซึ่งมีการใส่แรงกระแทกเข้าไปสู่ผิวรางดังแสดงในรูปที่ 11 จากนั้นจึงทำการตรวจสอบค่าความเร่งที่แผ่ออกไปตามความยาวของราง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างออกไปจากจุดที่ทำการกระแทก โดยผลลัพธ์สามารถแสดงผลได้ในรูปแบบของค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง (Track Decay Rate) การลดทอนการสั่นสะเทือนในรางเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถของการสลายพลังงานเมื่อคลื่นการสั่นสะเทือนเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของราง โดยจะแสดงในรูปแบบของสเปกตรัมแบนด์หนึ่งในสามออกเตฟของค่าการลดทอน (1/3 Octave) การคำนวณค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนของรางในแต่ละย่านความถี่ คำนวณได้จาก สมการที่ (1)

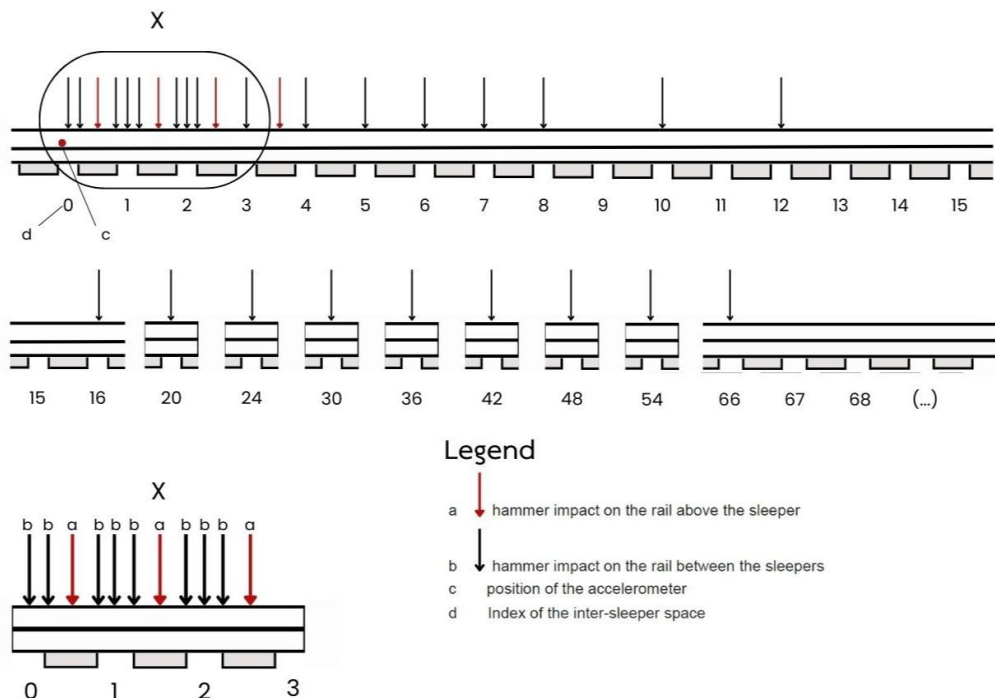


$$DR = \frac{4.343}{\sum_{x_0}^{x_{max}} \frac{|A(x_n)|^2}{|A(x_0)|^2} \Delta x_n} \quad (1)$$

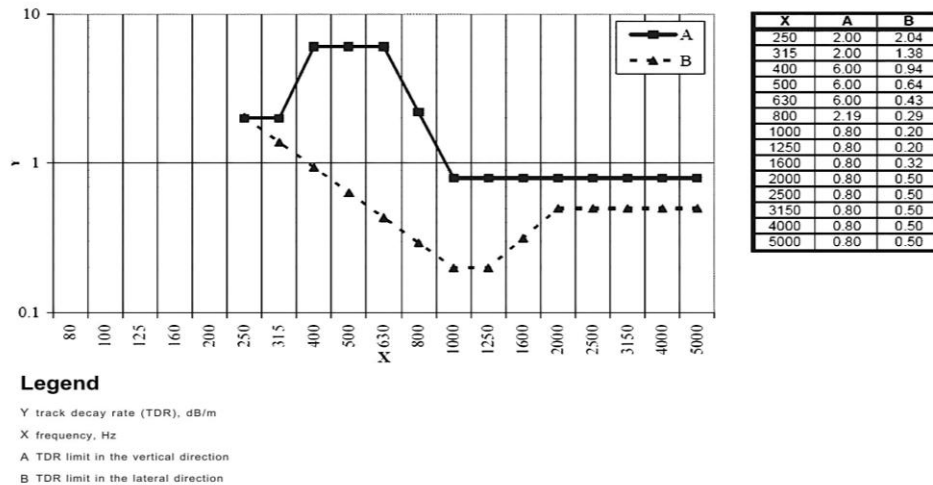
เมื่อ DR คือค่า Track Decay Rate ที่ย่านความถี่สเปกตรัมแบนด์หนึ่งในสามออกเตฟ (1/3 Octave) (เดซิเบลต่อเมตร) x_n คือตำแหน่งบนรางที่ทำการตรวจวัดค่าฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ (เมตร) และ $A(x_0)$, $A(x_n)$ คือค่าฟังก์ชันการตอบสนองต่อความถี่แบบแอกเซอเรชันซ์ (Accelerance) ในรูปแบบออกเตฟหนึ่งในสาม โดยค่าคงที่ 4.343 คือตัวคูณสำหรับแปลงการลดทอนพลังงานแบบเอกซ์โพเนนเชียลให้อยู่ในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ที่ได้กำหนดไว้ใน

มาตรฐาน BS EN 15461 [13] ในขณะที่การวิเคราะห์ข้อมูลถูกจัดกลุ่มในย่านความถี่ 1/3 Octave Band เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่สอดคล้องกับการรับรู้ของมนุษย์และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3095 [14]

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของทางรถไฟในงานวิจัยนี้ จะถูกประเมินจากค่าอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือน Track Decay Rate (DR) โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO 3095 [14] โดยมาตรฐานดังกล่าวจะกำหนดคุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อการสลายพลังงานจากการสั่นสะเทือนไว้ในรูปแบบแผนภูมิขีดจำกัดล่างดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ตำแหน่งการกระตุ้นบนทางรถไฟตามมาตรฐาน BS EN 15461 [13]



รูปที่ 12 ขีดจำกัดล่างของ Track Decay Rate สำหรับทางรถไฟตามมาตรฐาน ISO 3095 [14]

2.4.3 รูปแบบการทดสอบ

โดยดำเนินการทดสอบทั้งหมด 6 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ดำเนินการติดตั้งตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0%, 30%, 50% และ 70% เชิงมวล และรูปแบบที่ดำเนินการติดตั้งตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน และไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง [19] ดังตารางที่ 3 ในระหว่างการทดสอบโมดัลแต่ละรูปแบบได้ทำการเคาะซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละจุด

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

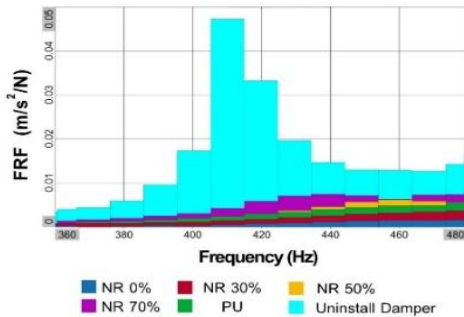
3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ในราง

ค่าฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ เป็นผลจากการวิเคราะห์โมดัลเชิงทดลอง (EMA) ตามหัวข้อ 2.4.1 โดยจุดพิกัดของกราฟแสดงถึงค่าความถี่ธรรมชาติที่นำมาใช้จำแนกรูปแบบการสั่นพ้อง (Resonance Modes) ของระบบรางในแต่ละย่านความถี่ได้อย่าง

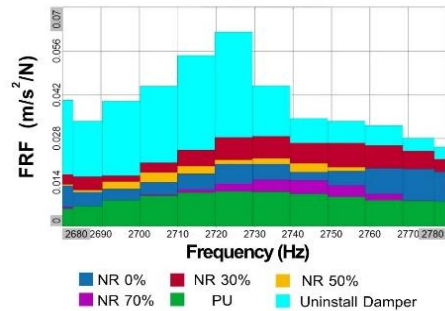
ตารางที่ 3 รูปแบบทดสอบการวิเคราะห์โมดัล

รูปแบบ	การดำเนินการทดสอบ
1	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตรNR 0%
2	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตรNR 30%
3	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตรNR 50%
4	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตรNR 70%
5	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางชนิด PU
6	ทดสอบบนรางที่ไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง

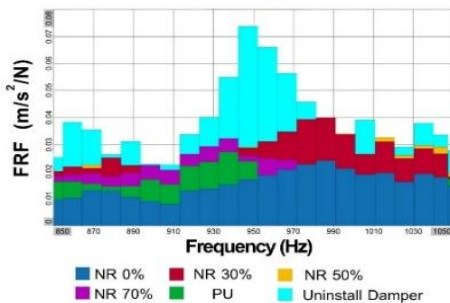
ชัดเจน โดยได้ทำการเลือกช่วงย่านความถี่ทั้งหมด 4 โหมด คือความถี่ 410 Hz, 950 Hz, 2,725 Hz และ 3,400 Hz สามารถนำมาแสดงในรูปแบบแผนภูมิในรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 16 สามารถสรุปเปรียบเทียบรูปแบบการสั่นพ้องและความถี่ธรรมชาติระหว่างกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งตัวหน่วงรางแต่ละชนิด ได้ดังตารางที่ 4



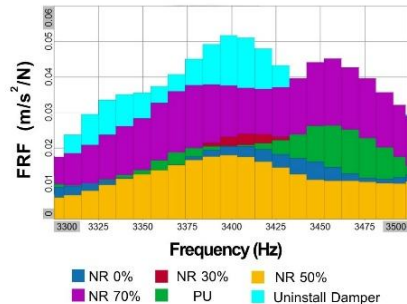
รูปที่ 13 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 410 Hz



รูปที่ 15 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 2,725 Hz



รูปที่ 14 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 950 Hz



รูปที่ 16 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 3,400 Hz

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ตัวหน่วงราง
สูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0% ไม่สามารถทำงานได้
อย่างมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ต่ำที่ 350–450 Hz
อย่างไรก็ตาม ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ
0%, 30% และ 50% มีรูปแบบการสั่นพ้องที่ใกล้เคียง
หรือสอดคล้องกับกรณีไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง
โดยเฉพาะสูตร 50% ที่ให้รูปแบบการสั่นพ้องตรงกัน
ในย่านความถี่กลางถึงสูงตั้งแต่ 950–3,400 Hz หาก

พิจารณาการสั่นพ้องรูปแบบ Pin-Pin resonance
ในช่วงย่านความถี่ 800–1,000 Hz [20,21] จะพบว่า
ตัวหน่วงรางทุกสูตรจะมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ที่
940 และ 980 Hz กล่าวคือตัวหน่วงรางสามารถช่วย
ลดการสั่นสะเทือนและช่วยสลายพลังงานในย่าน
ความถี่ของการสั่นสะเทือนของรางในรูปแบบ
Pin-Pin Resonance ได้ และหากพิจารณาการสั่นพ้อง
รูปแบบ Railhead Corrugation ในย่านความถี่สูงที่



3,000 Hz ขึ้นไป จะพบว่า ตัวหน่วงรางทุกสูตรยกเว้น สูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 70% และชนิดโพลียูรีเทน จะมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ประมาณ 3,400 Hz กล่าวคือ ตัวหน่วงรางเหล่านี้สามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนและช่วยสลายพลังงานในย่านความถี่ของการสั่นสะเทือนของรางในรูปแบบ Railhead Corrugation ได้เช่นกัน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ตัวหน่วงรางสูตรยางธรรมชาติ 50% ให้สมรรถนะในการลดทอนแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุด และมีความเสถียรในทุกย่านความถี่ พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการโหมดการสั่น (Modal Coupling) ทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวหน่วงถูกปรับจน เข้ากับโหมดการสั่นวิกฤตของรางได้อย่างแม่นยำ(เช่น โหมด Pin-Pin Resonance ที่ 950

Hz) ตัวหน่วงจึงทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับทางพลวัต ที่รับและสลายพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด นอกจากนี้ ความสมดุลงดังกล่าวยังช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโหมดการสั่นพ้องใหม่ในย่านความถี่สูง ซึ่งแตกต่างจากสูตร NR 70% ที่เนื้อยางมีความอ่อนเกินไปจนเกิดรูปแบบการสั่นพ้องใหม่ที่ความถี่ 3,450 Hz ส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงลดลง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ในราง จะถูกนำไปคำนวณหาค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการสลายพลังงานการสั่นสะเทือนของรางในแต่ละย่านความถี่ และผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบรูปแบบการสั่นพ้องและความถี่ธรรมชาติของรางในแต่ละย่านความถี่

ช่วงความถี่	รูปแบบการสั่นพ้อง	ความถี่ที่เกิด (Hz) กรณีไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง	ความถี่ที่เกิด (Hz) กรณีติดตั้งตัวหน่วงรางแต่ละสูตร	พฤติกรรมที่สังเกตได้
350–400 Hz	Rail-sleepers resonance [20]	410	460 (NR 50%) 440 (NR 70%)	สูตร NR 0%, 30% และ PU ไม่พบรูปแบบการสั่นพ้องชัดเจน
800–1,000 Hz	Pin-Pin resonance [20,21]	950	980 (NR 0%, 30% และ 50%) 940 (NR 70% และ PU)	NR 50% สามารถลดทอนแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุด
2,725 Hz	Rail Corrugation	2,725	2,735	ทุกสูตรให้รูปแบบการสั่นพ้องใกล้เคียงกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง
มากกว่า 3,000 Hz	Railhead corrugation	3,400	3,400 (NR 0% และ 50%) 3,410 (NR 30%) 3,460 (NR 70% และ PU)	-



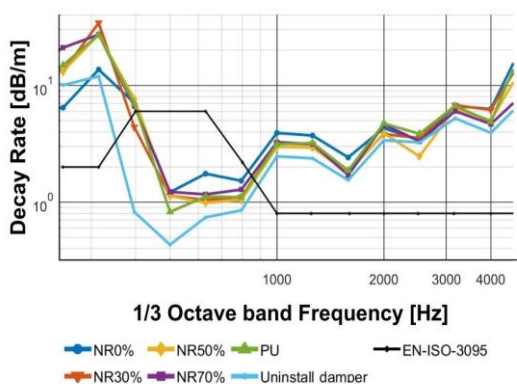
3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนต่อความถี่ของผลิตภัณฑ์ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติตั้งแต่ 0%, 30%, 50%, และ 70% ทั้ง 4 สูตรและตัวหน่วงรางชนิด

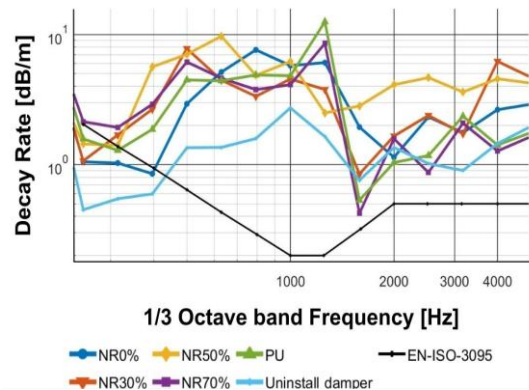
Polyurethane (PU) ในแนวดิ่งและแนวด้านข้าง ในรูปที่ 17 และ 18 แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวหน่วงรางทุกชนิดช่วยเพิ่มค่า TDR ได้ดีกว่ากรณีไม่ติดตั้ง ในช่วงความถี่ย่านกลางถึงสูง (1,000–4,000 Hz) โดยสามารถสรุปเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวหน่วงรางแต่ละสูตรได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวดิ่งและแนวด้านข้าง

ช่วงความถี่	ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนแนวดิ่ง (Vertical)	ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนแนวด้านข้าง (Lateral)	หมายเหตุ
ความถี่ต่ำ 250–800 Hz	ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะ NR 30% มีค่าสูงสุดที่ 315 Hz	ทุกสูตรให้ค่าสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งอย่างชัดเจน	ช่วงความถี่ที่เกิดเสียงรบกวนหลัก
ความถี่กลาง 800–2,000 Hz	ทุกสูตรให้ค่าการลดทอนต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน	NR 50% มีความเสถียรสูงที่สุด	สูตร PU ให้ค่าการลดทอนที่สูงกว่าที่ความถี่ 1,260 Hz
ความถี่สูง 2,000–4,000 Hz	PU ให้ค่าสูงกว่า NR 50% ในบางจุด (2,000 และ 3,000 Hz)	NR 50% ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า PU อย่างมีนัยสำคัญ	NR 50% คุมการสั่นสะเทือนแนวด้านข้างได้ดีกว่า



รูปที่ 17 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวดิ่ง



รูปที่ 18 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวด้านข้าง



ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวหน่วงรานั้นสามารถยกระดับการสลายพลังงานของทางวิ่ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะช่วงความถี่ที่ 250 ถึง 2,000 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่เสี่ยงจากการสั่นของล้อรถไฟเกิดขึ้นมากที่สุด จากการภาพจะเห็นว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีสมรรถนะโดยรวมสูงสุด

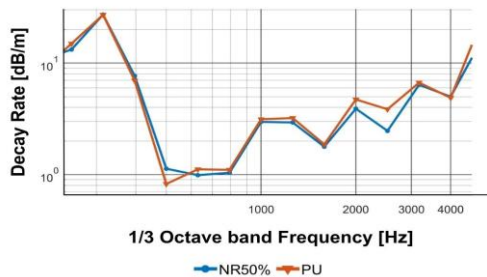
การศึกษาประสิทธิภาพค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนของตัวหน่วงรานั้นได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนกับชนิดชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์ โดยทำการเลือกตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% กับตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน มาทำการวิเคราะห์ในแนวดิ่งและแนวด้านข้างดังรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ พบว่าตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีความโดดเด่นด้านเสถียรภาพของค่าการลดทอนพลังงานสั่นสะเทือน โดยเฉพาะในแนวด้านข้างซึ่งเป็นทิศทางหลักของการเกิดเสียงรบกวนขณะรถไฟวิ่ง แม้ในแนวดิ่ง ตัวหน่วงรางชนิด PU จะให้ค่าที่สูงกว่าในบางความถี่ แต่ในแนวด้านข้าง PU กลับมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมากในช่วงความถี่ 1,600 Hz

พฤติกรรมนี้ยืนยันว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีแนวโน้มให้ผลการลดทอนที่มีเสถียรภาพและสูงกว่าชนิด PU โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงที่ตั้งแต่ 2,000–3,000 Hz ในขณะที่ตัวหน่วงรางชนิด PU มีค่าการลดทอนต่ำกว่า ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ทั้งนี้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้ผลการทดสอบน่าจะมาจากปัจจัยหลัก 4 ด้านคือ 1) การปรับจูนมวลและความถี่ธรรมชาติ ตัวหน่วงรางจะ

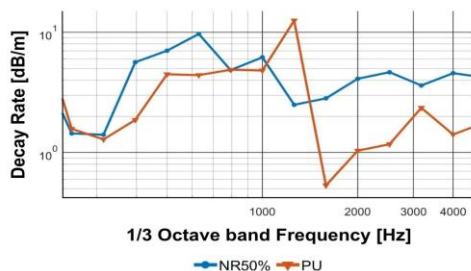
ทำงานตามหลักการของตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนทางพลวัต ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ธรรมชาติของตัวหน่วงราง ถูกปรับจูนให้ตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนวิกฤตของราง ในสูตร NR 50% สัดส่วนระหว่างมวลและความแข็งเกร็งของวัสดุโพลีเมอร์มีความเหมาะสมที่สุด ทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวหน่วงสอดคล้องกับโหมดการสั่นที่สำคัญ เช่น Pin-Pin Resonance 1,600–3,000 Hz ซึ่งเป็นย่านที่เสียงรบกวนจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางมีความเข้มข้นสูงที่สุด 2) คุณสมบัติการหน่วงเชิงหนืดและแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เมื่อนำมาผสมกับยางบิวไทล์ ในสัดส่วน 50:50 จะสร้างสมดุลระหว่างความยืดหยุ่นและการสลายพลังงาน โดยโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวไทล์ที่มีกลุ่มเมทิลหนาแน่น จะสร้างแรงเสียดทานภายในที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโพลียูรีเทน ทำให้ค่าตัวประกอบการสูญเสีย (Loss factor) สูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานจลน์จากการสั่นสะเทือนของรางถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 2,000 Hz ขึ้นไป ซึ่งสูตร NR 50% แสดงค่าการลดทอนที่สูงกว่าวัสดุ PU 3) โหมดการสั่นและการถ่ายโอนพลังงาน ในเชิงกลศาสตร์สัดส่วนสูตร NR 50% ทำให้เกิดโหมดการสั่นระหว่างรางและตัวหน่วงที่สมบูรณ์ พลังงานสั่นสะเทือนจากรางจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวหน่วงราง และสลายทั้งได้ทันทีในขณะที่สูตรที่มีปริมาณยางสูงเกินไป (เช่น สูตร NR 70%) วัสดุจะมีความแข็งเกร็งต่ำเกินไป จนสูญเสียความสามารถในการควบคุมรูปแบบการสั่น และอาจทำให้เกิดโหมดการสั่นพ้องใหม่ในย่านความถี่สูงที่ 3,450 Hz ซึ่งส่งผลต่อการลดทอนสมรรถนะโดยรวมของระบบ



และ 4) อัตราการลดทอนที่มีเสถียรภาพ สูตร NR 50% ให้ค่าอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือน(TDR) ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ISO 3095 และมีความเสถียรทั้งในแนวตั้งและแนวด้านข้าง ความสมดุลของพารามิเตอร์ทางกลศาสตร์ในสูตรนี้ช่วยป้องกันพฤติกรรมความแข็งแรงส่วนเกิน ที่มักพบในสูตรที่มีปริมาณยางน้อย (เช่น NR 0% หรือ 30%) ซึ่งทำให้ตัวหนังสือไม่สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ ดังนั้น สูตร NR 50% จึงเป็น "จุดเหมาะสมที่สุด" ที่ทำให้พารามิเตอร์เชิงกลศาสตร์ทำงานสอดคล้องกันเพื่อสลายพลังงานสั่นสะเทือนได้สูงสุดในทุกย่านความถี่วิกฤต



รูปที่ 19 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวตั้งเปรียบเทียบระหว่างตัวหนังสือสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% กับ PU



รูปที่ 20 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนว

ด้านข้างเปรียบเทียบระหว่างตัวหนังสือสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% กับ PU

4. สรุปผล

ตัวหนังสือรางทุกส่วนผสมจากยางธรรมชาติให้ค่าประสิทธิภาพฟังก์ชันการตอบสนองต่อความถี่ของรางที่แตกต่างกันตามย่านความถี่ โดยตัวหนังสือรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0% ไม่สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ ช่วงย่านความถี่ 350–450 Hz ขณะที่ตัวหนังสือรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0%, 30% และ 50% มีรูปแบบการสั่นที่ใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับการสั่นไม่ได้ติดตั้งตัวหนังสือราง โดยเฉพาะสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ที่มีรูปแบบการสั่นพ้องตรงกับกรณีไม่ได้ติดตั้งตัวหนังสือรางในย่านความถี่ 980 Hz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของการสั่นพ้องในโหมด Pin-Pin และย่านความถี่สูง 3,400 Hz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของการสั่นพ้องในโหมด Railhead corrugation สะท้อนให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวัสดุหนังสือรางขึ้นกับสัดส่วนการผสมและคุณสมบัติเชิงกลของตัวหนังสือ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการควบคุมรูปแบบการสั่นสะเทือนของราง

ตัวหนังสือรางทุกสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติให้ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางที่ดีกว่าในย่านความถี่ 1,000 ถึง 4,000 Hz โดยเฉพาะตัวหนังสือรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ให้ค่าการลดทอนแรงสั่นสะเทือนสูงสุดในช่วงความถี่ในย่าน 400 ถึง 3,150 Hz ในแนวด้านข้าง ในขณะที่ค่าการลดทอนในแนวตั้งที่ความถี่ 315 Hz สูงถึง 30 dB/m และลดลงเหลือ 1 dB/m ในช่วง 500 ถึง 800 Hz ก่อนเพิ่มขึ้นอีกครั้งในย่านความถี่สูง



การติดตั้งตัวหน่วงตัวรางบนรางรถไฟ ช่วยเพิ่มค่าลดทอนของการสั่นสะเทือนของรางทั้งในแนวดิ่งและแนวด้านข้างได้ในช่วงความถี่ต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในย่านความถี่ 200 ถึง 4,000 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่เสี่ยงจากการสั่นของล้อรถไฟเกิดขึ้นมากที่สุด และผลการทดสอบบ่งชี้ว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการสั่นสะเทือน

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบยังพบอีกว่าตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ให้ประสิทธิภาพในสลายพลังงานในแนวด้านข้างได้ดีกว่าตัวหน่วงรางชนิด PU ในขณะที่ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานในแนวดิ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวหน่วงรางชนิด PU ซึ่งจากผลดังกล่าวสามารถนำตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากส่วนผสมยางธรรมชาติมาใช้ทดแทนตัวหน่วงรางชนิด PU ได้

จากผลการศึกษาที่มีการควบคุมตัวแปรในห้องปฏิบัติการ สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกสูตรวัสดุตัวหน่วงรางให้เหมาะสมกับช่วงความถี่เป้าหมายของปัญหาเสียงรบกวน โดยจากผลงานวิจัยยังพบอีกว่าตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากยางธรรมชาติมีสมรรถนะเทียบเคียงได้กับวัสดุโพลียูรีเทน สนับสนุนการส่งเสริมการสร้างมูลค่าเพิ่มของสินค้าเกษตรในประเทศ ทั้งนี้การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานภายใต้สภาวะการใช้งานจริงผ่านการทดสอบภาคสนามจะเป็นทิศทางการวิจัยในขั้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมและหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Thompson, Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control, 2nd Ed., Elsevier, London, UK, 2024.
- [2] T. Xin, S. Wang, L. Gao, H. Huo, Y. Ding, P. Wang, P. Chen and P. Liu, Field measurement of rail corrugation influence on environmental noise and vibration: A case study in China, Measurement, 2020, 164, 108084.
- [3] P.J. Remington, Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis, The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6), 1805 – 1823.
- [4] P.J. Remington, Wheel/rail rolling noise, II: Validation of the theory, The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6), 1824 – 1832.



- [5] D.J. Thompson, Wheel-rail noise generation, part I: Introduction and interaction model, *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 161(3), 387 – 400.
- [6] T. Srisawat, R. Parichatprecha and S. Suthasupradit, Analysis of train-bridge dynamic interaction by using finite element method and multibody co-simulation model: Case study of Thailand Airport Rail Link project, *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2023, 33(1), 69 – 80. (in Thai)
- [7] S. Suthasupradit, T. Petcharat, K.-D. Kim and R. Parichatprecha, Application of multibody dynamics simulation in approximation of rail vehicle dynamic envelope, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2023, 26(12), 843 – 855.
- [8] D.J. Thompson, B. Hemsworth and N. Vincent, Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1: Description of the model and method, *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1), 123 – 135.
- [9] W. Li, A. Wang, X. Gao, L. Ju and L. Liu, Development of multi-band tuned rail damper for rail vibration control, *Applied Acoustics*, 2021, 184, 108370.
- [10] A. Parker and C. Weber, Rail dampers-the first Australian field trial, *The 20th International Congress on Acoustics 2010 (ICA-Australia 2010)*, Proceeding, 2010, 2243 – 2248.
- [11] J. Jin, H. Kim, H.-I Koh and J. Park, Railway noise reduction by periodic tuned particle impact damper with bounce and pitch-coupled vibration modes, *Composite Structures*, 2022, 284, 115230.
- [12] H. Venghaus, D. Thompson, M. Toward, D. Bumke, P. Kiston, B. Asmussen and M. Stranberg, Assessment of the efficiency of rail dampers using laboratory methods within the STARDAMP project, *The 38th German Annual Conference on Acoustics (DAGA-Germany 2012)*, Online Proceeding, 2012, 671 – 672.
- [13] BS EN 15461:2008+A1:2010, Railway applications-Noise emission-Characterization of the dynamic properties of track selections for pass by noise measurements, 2010.
- [14] BS EN ISO 3095:2013, Acoustics-Railway applications-Measurement of noise emitted by rail bound vehicles (ISO 3095:2013), 2013.
- [15] M. Dumitriu and I.C. Cruceanu, On the rolling noise reduction by using the rail damper, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2017, 10(6), 87 – 95.



- [16] https://uic.org/IMG/pdf/2012_dampers_grinding_lowbarriers.pdf. (Accessed on 19 October 2025)
- [17] I. Haladin, S. Lakušić and J. Koščak, Measuring vibration damping level on conventional rail track structures, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 2016, 68(6), 461 – 476.
- [18] H. Zhang, W. Liu, W. Liu and Z. Wu, Study on the cause and treatment of rail corrugation for Beijing metro, *An International Journal on the Science and Technology of Wear*, 2014, 317(1-2), 120 – 128.
- [19] G. Csontos, F. Augusztinovicz and L. Kazinczy, Examination of rail dampers with respect to noise and vibration mitigation, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020, 64(3), 658 – 667.
- [20] J. Morais, E. Fortunato, D. Ribeiro, R. Calçada and J. Mendes, Railway track support condition assessment-Methodology validation using numerical simulations, *Engineering Failure Analysis*, 2023, 152, 107483.
- [21] W. Ho, D. Tse, P. Wong, W. Wong and G. Soltanieh, Suppression of corrugation growth by rail damper, *The 27th International Congress on Sound and Vibration 2021 (ICSV-USA 2021)*, Online Proceeding, 2021, 4098 – 4105.

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อความหนาของชั้นสีเกินมาตรฐานในการเคลือบสีกันสนิมของฝากระโปรงรถยนต์

ชลิดา ชาญวิจิตร¹ อภิชาติ ชัยชวลิต^{2*} และ โพธิวัฒน์ งามขจรวิวัฒน์²

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

² สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: apichartcha@pim.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 มกราคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 1 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบบทความ: 9 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเคลือบสีกันสนิมสำหรับชิ้นส่วนฝากระโปรงหน้ารถยนต์ เพื่อแก้ไขปัญหาความหนาของชั้นสีเกินค่ามาตรฐานซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและต้นทุนการผลิต โดยงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนในการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดความหนาของชั้นสีเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งปัจจัยประกอบด้วยผลกระทบของ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า 250-300 โวลต์ อุณหภูมิ 32-35 องศาเซลเซียส และปริมาณสารเคมีไปโอไซด์ 200-400 ลิตร ผลการทดลองพบว่าทั้งสามปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ แรงดันไฟฟ้า 252 โวลต์ อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และสารเคมีไปโอไซด์ 345 ลิตร จากการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์ค่าความหนาเท่ากับ 1.32 เปอร์เซ็นต์ ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบสีกันสนิมสำหรับชิ้นส่วนฝากระโปรงหน้ารถยนต์ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้

คำสำคัญ: การเคลือบสีกันสนิม; การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน; ความหนาของชั้นสี

Experimental Design for Optimization of Conditions Affecting Over-Standard Paint Thickness in Car Hood Electrodeposition Process

Chalida Chanwijitch¹ Apichart Chaichawalit^{2*} and Potiwat Ngamkajornwiwat²

¹ Department of Industrial Engineering and Mangement, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

² Department of Robotics and Automation Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

* Corresponding author, E-mail: apichartcha@pim.ac.th

Received: 12 January 2026; Revised 1 May 2026; Accepted: 9 June 2026

Online Published: 20 August 2026

Abstract: The objective of this research is to determine the optimal conditions for the electrodeposition (ED) painting process of car hoods to address the issue of over-standard paint thickness, which adversely affects product quality and production costs. This study applies the Box-Behnken Design to investigate factors influencing the occurrence of over-standard paint thickness. The three key factors examined include voltage (250–300 V), temperature (32–35 °C), and biocide concentration (200–400 L). The experimental results indicate that all three factors are statistically significant at a 95% confidence level. Through mathematical modeling and optimization, the optimal conditions were found to be a voltage of 252 V, a temperature of 32 °C, and a biocide concentration of 345 L. Confirmatory experiments were conducted to validate the accuracy of the mathematical model by comparing actual experimental values with predicted values. The results showed a percentage error of 1.32%, which is within the 5% limit. This demonstrates that the optimal conditions for the ED painting process of car hoods derived from the mathematical model are reliable and suitable for practical application.

Keywords: Electrodeposition painting; Box-Behnken Design; Submission procedure; Paint thickness



1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน อุตสาหกรรมยานยนต์มีการแข่งขันที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านสมรรถนะรถยนต์ การใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ รวมถึงความสวยงามของรูปลักษณ์ภายนอกก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญลำดับแรก โดยเฉพาะสีของรถยนต์ที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค ซึ่งกระบวนการทำสีรถยนต์ที่ส่งผลต่อความสวยงามนอกจากกระบวนการเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation) กระบวนการเคลือบสี (Painting Process) ถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากทำให้สีจริงยึดเกาะได้ดี ป้องกันการกัดกร่อน และช่วยให้สีสม่ำเสมอ ปัญหาการผลิตที่มีความวิกฤต (Critical Process) [1] ได้แก่ สีแตก ความหนาไม่สม่ำเสมอ จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพความงาม (Appearance) และความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะกระบวนการชุบเคลือบสีกันสนิมด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition: ED) ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มฐานรากในการป้องกันการกัดกร่อนของตัวถังรถยนต์ นอกจากเรื่องคุณภาพแล้ว การควบคุมความหนาสียังส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณการสูญเสียอันตรายและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทาง Green Manufacturing ในอุตสาหกรรมยานยนต์ปัจจุบัน [2, 3]

อย่างไรก็ตาม ปัญหาคุณภาพที่พบบ่อยครั้งในกระบวนการนี้คือความผันแปรของความหนาชั้นสี (Film Thickness Variation) ซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear system) และมีความซับซ้อนของตัวแปร จากการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลของเสีย (Defect Data Analysis) ในสายการผลิตกรณีศึกษาช่วง 6 เดือนที่ผ่านมา พบว่า



รูปที่ 1 ฝากระโปรงหน้ารถยนต์

ปัญหาอันดับหนึ่งคือ ความหนาของสีในกระบวนการเคลือบสีกันสนิมเกินค่ามาตรฐาน (Over-standard Thickness) คิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 47.9% ของของเสียทั้งหมด โดยเฉพาะบริเวณฝากระโปรงหน้ารถยนต์ (Car Hood) ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่และเป็นจุดปะทะสายตา การที่ความหนาของสีเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 25 ไมโครเมตร ไม่เพียงแต่เป็นการสิ้นเปลืองวัตถุดิบสี แต่ยังนำไปสู่ข้อบกพร่องต่อเนื่อง (Sequential Defects) ในขั้นถัดไป เช่น ปัญหาผิวส้ม (Orange Peel) และสีไหลย้อย (Sagging) เนื่องจากฟิล์มสีที่หนาเกินไปจะอึดตัวทำละลายไว้มากเกินไปพอที่ รวมถึงปัญหาสีเดือด (Boiling) ในขั้นตอนการอบแห้ง [4]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

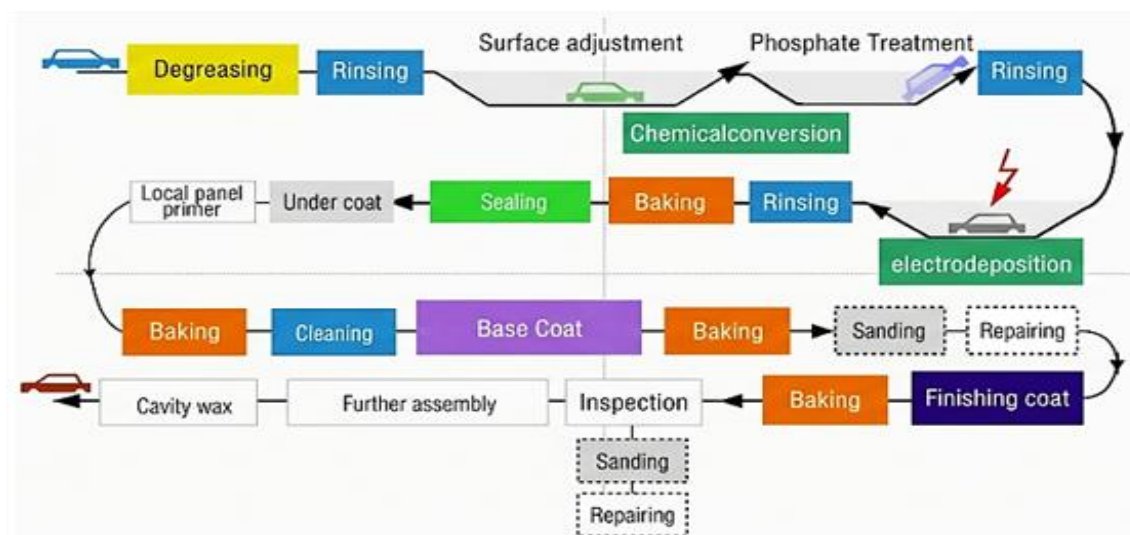
2.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ ฝากระโปรงหน้ารถยนต์ (Car Hood) รุ่น AP32 ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เมื่อเข้าสู่กระบวนการเคลือบสีตัวถังรถยนต์จะมีขั้นตอนดังรูปที่ 2 ฝากระโปรงหน้ารถยนต์จะต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมผิว (Pre-Treatment) ล้างไขมันและเคลือบฟอสเฟตตาม



มาตรฐานอุตสาหกรรม ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการชุบสีกันสนิมในบ่อชุบระบบปิด (Closed System Tank) ขั้นตอนเคลือบสีกันสนิม (Electro Deposition: ED) จะเป็นบ่อที่นำฝากระโปรงหน้ารถยนต์ที่เป็นโครงเหล็กลงชุบในบ่อสีกันสนิมด้วยแรงดันไฟฟ้า กระบวนการทำงานของระบบการเคลือบสีกันสนิมจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ คือ อุณหภูมิภายในบ่อกันสนิม และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบสีกันสนิม ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการควบคุมความหนาของสี เพื่อควบคุมการเกิดสนิมทั้งภายในภายนอก โดยในแต่ละลำดับการเคลือบสีและวัสดุในการพ่นสีมีความแตกต่างกันในแต่ละทุกชั้นสี และจะมีความสัมพันธ์กันในทุกชั้น รายละเอียดดังรูปที่ 3 เช่น ถ้าชั้นสีกันสนิมมีความหนาเกินไป หรือพื้นผิวที่หนามากจะส่งผลให้ชั้นสี

รองพื้น (Primer) มีความหนา และทำให้ฝากระโปรงหน้ารถยนต์ที่เคลือบสีมีความหนา โดยค่าความหนาของการเคลือบสีกันสนิม (ED) อยู่ระหว่าง 15 -25 ไมโครเมตร [5] การวัดค่าความหนาของสี ใช้เครื่องมือวัดความหนาสี (Coating Thickness Gauge) ระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ยี่ห้อ Fischer รุ่น Dualscope ซึ่งได้รับการสอบเทียบ (Calibration) ตามมาตรฐาน ISO 2178 และตรวจสอบความถูกต้องด้วยแผ่นฟิล์มมาตรฐาน (Standard Foil) ที่มีความหนาอ้างอิง 24 ไมโครเมตร และ 50 ไมโครเมตร ก่อนการวัดทุกครั้ง เพื่อยืนยันว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมืออยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (± 1 ไมโครเมตร)



รูปที่ 2 กระบวนการเคลือบสีตัวถังรถยนต์



รูปที่ 3 ความหนาของชั้นสี

2.2 การกำหนดตัวแปรและออกแบบการทดลอง

จากการระดมสมอง (Brainstorming) ร่วมกับวิศวกรฝ่ายผลิตและศึกษาข้อมูลย้อนหลัง (Historical Data) โดยกำหนดตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อความหนาสี 3 ปัจจัย และกำหนดช่วงระดับการทดลอง (Levels) ตามแนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักร รวมถึงความเป็นไปได้ในการผลิตจริง ดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้า (X1) กำหนดช่วง 250 - 300 โวลต์ โดยค่าปกติของการผลิต (Baseline) อยู่ที่ 275 โวลต์ การเพิ่มแรงดันจะเพิ่มแรงขับเคลื่อนของประจุ แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ฟิล์มแตก (Rupture) [6]
2. อุณหภูมิ (X2) กำหนดช่วง 32 - 35 องศาเซลเซียส โดยค่าปกติอยู่ที่ 33.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิมีผลต่อความหนืดและการเคลื่อนที่ของอนุภาคสี (Ion Mobility) [7]
3. สารเคมีไบโอไซด์ (X3) เป็นปัจจัยนี้ถูกนำมาศึกษาเพื่อควบคุมการปนเปื้อนทางชีวภาพที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของบ่อสี [8,9] และมีสำคัญของบ่อเคลือบสีกันสนิม หากปล่อยให้แบคทีเรียหรือเชื้อราเติบโตในระบบสี จะทำให้ค่า pH ของสีไม่คง ส่งผลต่อการแตกตัวของเนื้อสี เกิดจุด (Seed) รูเข็ม (Pinholes) หรือสีไม่เรียบเนียนบนชิ้นงาน [10] โดยกำหนดช่วง

ตารางที่ 1 ระดับของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
แรงดัน (โวลต์)	250	275	300
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	32	33.5	35
สารเคมีไบโอไซด์ (ลิตร)	200	300	400

200 - 400 ลิตร ค่าปกติอยู่ที่ 300 ลิตร งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ปัจจัย ($k=3$) [11,12] ซึ่งประกอบด้วยจุดแฟกทอเรียลและจุดกึ่งกลาง (Center points) จำนวน 3 ซ้ำ รวมจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 สิ่งทดลอง (Runs) ดังตารางที่ 2 และแสดงรหัสระดับตัวแปรในตารางที่ 1 โดยกำหนดค่าผลตอบแทนเป็นค่าความหนาของสี (Y)

2.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab เวอร์ชัน 19 ซึ่งเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับความนิยมในงานวิศวกรรมในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (X) และค่าตอบสนอง (Y) ที่มีความสัมพันธ์ส่วนโค้งจะเลือกใช้การวิเคราะห์การถดถอยกำหนด



แบบจำลองอันดับสอง (Second – Order Model) รูปแบบสมการทั่วไปแสดงดังสมการ (1) [13, 14]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

โดยมีลำดับการการวิเคราะห์ดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) โดยพิสูจน์จากการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effects) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction Effects) ที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

3. การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยเลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer

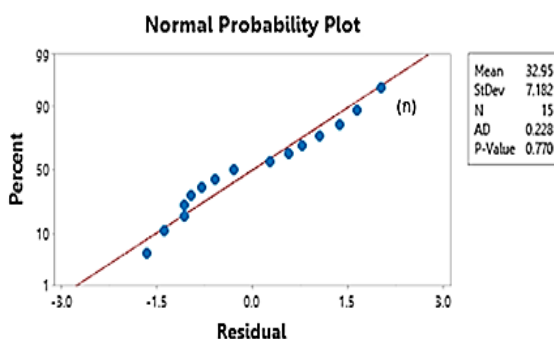
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการดำเนินการทดลองตามแผนแบบ แบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ทั้ง 15 สิ่งทดลอง ภายใต้สภาวะการผลิตจริงร่วมกับฝ่ายผลิต ผลลัพธ์ค่าความหนาของสีกันสนิมที่วัดได้ (Thickness) แสดงดังตารางที่ 2

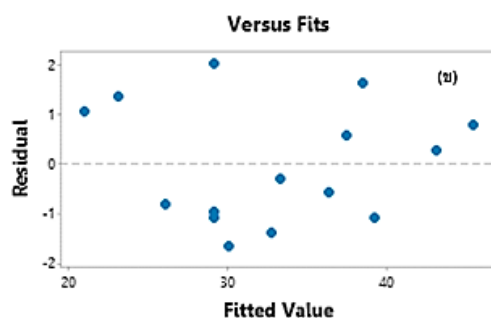
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการทดลอง โดยรูปแบบของการทดลองจะต้องเป็นไปตามหลักการ 3 ประการ ประกอบด้วย

1) การตรวจสอบข้อมูลมีการแจกแจงปกติ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ด้วยกราฟแสดงการแจกแจงข้อมูลปกติ (Normality Plot) จากรูปที่ 4 โดยพิจารณาจากค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่มีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงระบุได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ 2) การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง (Variance Stability) พิจารณาด้วยกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับค่าที่พยากรณ์ (Residual Versus Fitted Value) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การตรวจสอบการแจกแจงปกติ



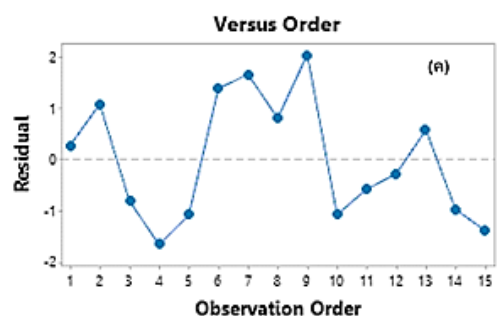
รูปที่ 5 การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง



ตารางที่ 2 ผลการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	แรงดันไฟฟ้า (X_1) (โวลต์)	อุณหภูมิ (X_2) (องศาเซลเซียส)	ไบโอไซด์ (X_3) (ลิตร)	ความหนา (Y) (ไมโครเมตร)
1	250	32.0	300	22.1
2	275	32.0	200	25.3
3	275	33.5	300	28.2
4	275	32.0	400	28.4
5	300	35.0	300	38.2
6	250	35.0	300	31.4
7	275	35.0	400	46.3
8	250	33.5	400	38.1
9	275	35.0	200	40.2
10	300	33.5	400	43.4
11	250	33.5	200	33.1
12	275	33.5	300	31.2
13	300	33.5	200	35.8
14	300	32.0	300	24.5
15	275	33.5	300	28.1

ซึ่งการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างกระจายรอบแนวแกนศูนย์ และไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนที่คงที่ 3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างด้วยกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residual Versus Observation) รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีการกระจายเป็นบวก และลบบอย่างสม่ำเสมอไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปร่างที่แน่นอนจึงระบุได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 6 การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง



3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 92.31% ซึ่งมีค่าสูงจึงอธิบายได้ว่าแต่ละปัจจัยในการทดลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ถึง 92.31% และการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.430 ซึ่งมากกว่าค่านัยสำคัญดังตารางที่ 3 แสดงว่าถดถอยพหุนามกำลังสองมีความสมรูปกับข้อมูล จากตารางที่ 3-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาสีกันสนิม เพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดที่ส่งผล ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิม พบว่า แรงดัน ไฟฟ้ามีค่า P-Value 0.028 อุณหภูมิมีค่า P-Value 0.000 และ ไบโอดีมีค่า P-Value 0.012 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่ามีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ 2) การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังสองที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิม พบว่า ปัจจัยไบโอดีมีค่า P-Value 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่ามีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ 3) การวิเคราะห์ปัจจัยอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิม พบว่าไม่มีปัจจัยอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบลดรูป (Reduced Model) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปของ Regression Equation in coded Units โดยจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย ค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0 แสดงดังสมการที่ (2)

$$Y = -269 - 2.05X_1 + 34.8X_2 - 0.645X_3 + 0.000722X_3^2 \quad (2)$$

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย ในสมการที่ (2) จะได้ แรงดันไฟฟ้ามีสัมประสิทธิ์ เป็น - หมายถึงว่า ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลให้ค่าความหนาสีกันสนิมมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิมีสัมประสิทธิ์ สูงขึ้น +34.8 หมายความว่าอุณหภูมิยิ่งสูงค่าความหนาสีกันสนิมยิ่งเพิ่มขึ้น และไบโอดีมีสัมประสิทธิ์ +0.000722 ถ้าเพิ่มสูงขึ้น อัตราการลดลงของความหนาจะเริ่มชะลอตัวลง

3.3 การหาค่าที่เหมาะสมและการยืนยันผล

ในการค้นหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อให้ได้ค่าความหนาสีกันสนิมที่เหมาะสมจากการศึกษากระบวนการผลิตเดิม พบว่าค่าความหนาสีกันสนิมจะมีค่าเกินขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนเกิน 25 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 7 ดังนั้นเพื่อลดการแก้ไขงานจึงกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 23.0 ไมโครเมตร เนื่องจากเป็นค่าความหนาของสีกันสนิมที่น้อยสุดที่ทำให้ได้และป้องกันค่าความหนาของสีเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ภายใต้สภาวะดังกล่าวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายว่าค่าความหนาสีจะอยู่ที่ 23 ไมโครเมตร โดยมีช่วงความเชื่อมั่นของการพยากรณ์ที่ระดับ 95% (95% Prediction Interval: PI) อยู่ในช่วง 16.26 – 29.74 ไมโครเมตรโดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน ความพึงพอใจ (Desirability Function Approach: D) ของ Harrington ซึ่งเป็นเทคนิคที่เปลี่ยนการตอบสนองหลายตัวแปรให้เป็นค่าดัชนีเดียวที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า D ที่เข้าใกล้ 1 แสดงถึงสภาวะที่น่าพึงพอใจสูงสุด

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

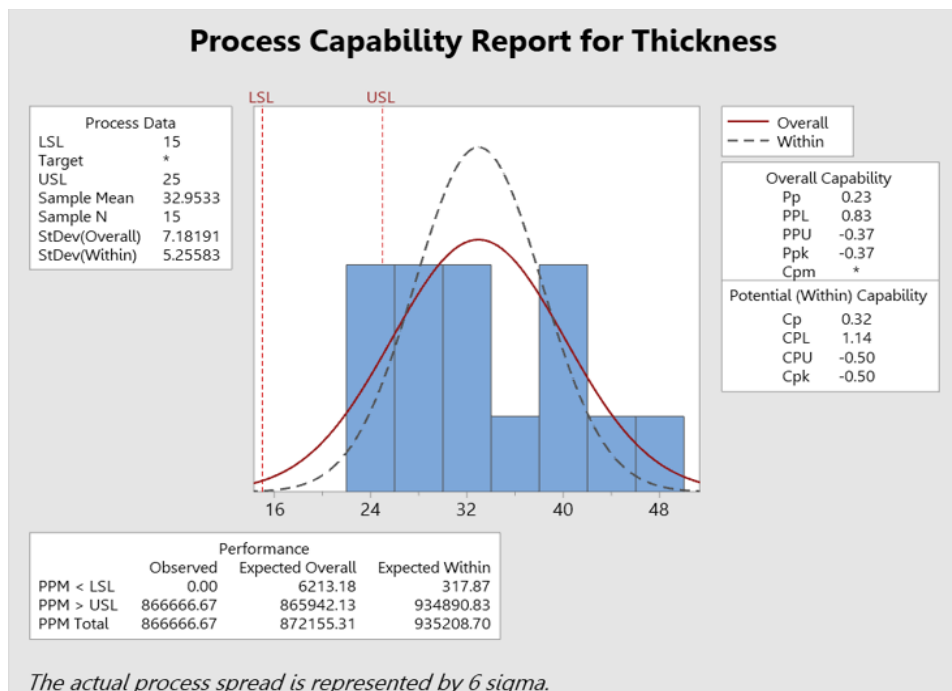
Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value
Model	9	702.281	78.031	19.67	0.002*
Linear	3	485.590	161.863	40.80	0.001*
X_1 - Voltage	1	36.980	36.980	9.32	0.028*
X_2 - Temp	1	389.205	389.205	98.10	0.000*
X_3 - Biocide	1	59.405	59.405	14.97	0.012*
Square	3	207.911	69.304	17.47	0.004*
X_1^2	1	5.466	5.466	1.38	0.293
X_2^2	1	6.564	6.564	1.65	0.255
X_3^2	1	192.296	192.296	48.47	0.001*
2-Way Interaction	3	8.780	2.927	0.74	0.573
$X_1 * X_2$	1	4.840	4.840	1.22	0.320
$X_1 * X_3$	1	1.690	1.690	0.43	0.543
$X_2 * X_3$	1	2.250	2.250	0.57	0.485
Error	5	19.837	3.967	-	-
Lack-of-Fit	3	13.630	4.543	1.46	0.430
Pure Error	2	6.207	3.103	-	-
Total	14	727.117	-	-	-
Model Summary	S	R - Sq	R - Sq (adj)	R - Sq (Pred)	
	1.99182	97.25 %	92.31 %	67.87 %	



ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยในรูปหน่วยรหัส (Coded Coefficients)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-269	599	-0.45	0.672	
X_1	-2.05	1.28	-1.60	0.171	2065.22
X_2	34.8	31.8	1.09	0.324	4583.74
X_3	-0.645	0.256	-2.52	0.053*	1318.56
X_1^2	0.00195	0.00166	1.17	0.293	1049.68
X_2^2	-0.593	0.461	-1.29	0.255	4323.75
X_3^2	0.000722	0.000104	6.96	0.001*	79.01
$X_1 * X_2$	0.0293	0.0266	1.10	0.320	1240.56
$X_1 * X_3$	0.000260	0.000398	0.65	0.543	261.00
$X_2 * X_3$	0.00500	0.00664	0.75	0.485	1016.56

หมายเหตุ * หมายถึงค่าที่มีผลต่อค่าความหนาของสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05)



รูปที่ 7 ความสามารถของกระบวนการ



จากนั้นทำการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยวิธีวิธีพื้นผิวตอบสนองซึ่งเลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยที่ทำการทดลองดังแสดงรูปที่ 8

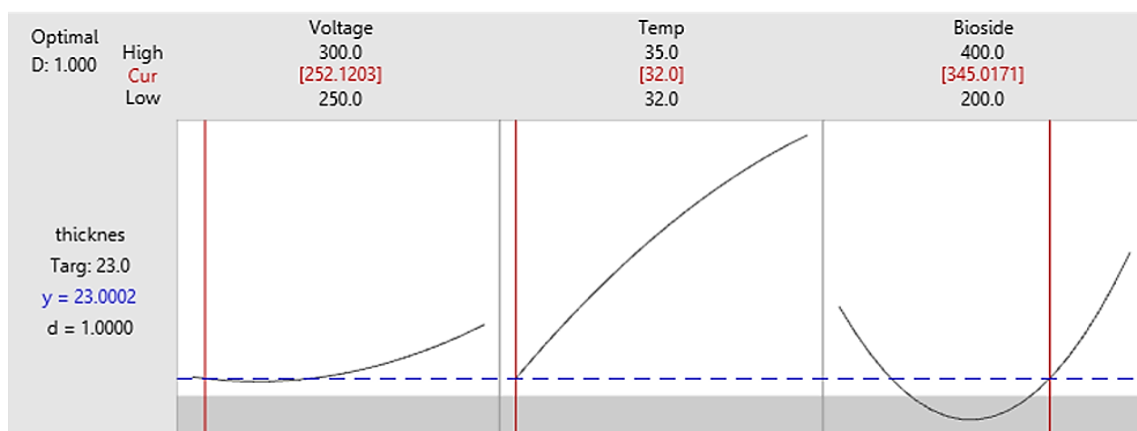
จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่ให้ค่าความพึงพอใจรวม (Composite Desirability: D) เท่ากับ 1.0000 ซึ่งเป็นค่าอุดมคติ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ 252 โวลต์ อุณหภูมิที่ 32 องศาเซลเซียส และสารเคมีไบโอไซด์ 345 ลิตร ภายใต้สภาวะดังกล่าว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายว่าค่าความหนาจะอยู่ที่ 23 ไมโครเมตร โดยมีช่วงความเชื่อมั่นของการพยากรณ์ที่ระดับ 95% (95% Prediction Interval: PI) อยู่ในช่วง 16.26 - 29.74 ไมโครเมตร เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและการปรับปรุงกระบวนการจึงดำเนินการทดลองยืนยันผล (Confirmatory Experiment) โดยปรับตั้งเครื่องจักรตามค่าที่เหมาะสมและเก็บข้อมูลชิ้นงานจำนวน 15 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยตามคู่มือเทคนิคของชั้นสีรองพื้นกันสนิมด้วยวิธีประจุไฟฟ้า (Cathodic Electrocoat) สำหรับตัวถังรถยนต์

จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 15-25 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS D 0202 ซึ่งนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ด้วยวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) แสดงดังสมการที่ (3) [15]

$$\begin{aligned} \text{MAPE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{|A_i|} \times 100 \\ &= \frac{19.862}{15} = 1.32 \% \end{aligned} \quad (3)$$

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ในการแก้ปัญหาวิกฤตเรื่องสีหนาเกินมาตรฐาน (Over-standard Thickness) ในกระบวนการชุบสี ED ของฝากระโปรงหนักรถยนต์ ซึ่งเป็นปัญหาเรื้อรังที่คิดเป็นสัดส่วนของเสียสูงถึง 47.9% พบว่ากระบวนการเดิมประสบปัญหาจากวิธีการปรับตั้งค่าแบบลองผิดลองถูก (Trial-and-Error) และการขาดองค์ความรู้เรื่องอิทธิพลของปัจจัยทาง



รูปที่ 8 กำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสม



เคมีชีวภาพ (Biochemical Factors) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้ค่า pH ของสีไม่นิ่ง ส่งผลต่อการแตกตัวของเนื้อสีที่มีนัยสำคัญต่อความหนาสี ซึ่งแตกต่างจากเดิมที่มุ่งเน้นเพียงการปรับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลให้กระบวนการขาดเสถียรภาพ

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การปรับตั้งค่า พารามิเตอร์ใหม่ที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) คือ แรงดันไฟฟ้าที่ 252 โวลต์ อุณหภูมิที่ 32 องศาเซลเซียส และสารเคมีไบโอไฮดรอกไซด์ 345 ลิตร สามารถลดความหนาสีกันสนิมจากค่าเฉลี่ยเดิม 39.33 ไมโครเมตร ลงเหลือ 23.30 ไมโครเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายคือ 23 ไมโครเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความหนาสีไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองหาค่า MAPE เท่ากับ 1.32 เปอร์เซ็นต์ การปรับปรุงนี้ไม่เพียงแต่แก้ปัญหาคุณภาพได้ 100% (Zero Defect) แต่ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตจากการสูญเสียและลดเวลาในการแก้ไขงาน (Rework) ได้อย่างเป็นรูปธรรมในอนาคต ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้สามารถองค์ความรู้และระเบียบวิธีวิจัยจากงานนี้ไปขยายผล (Horizontal Deployment) ปรับใช้กับชิ้นส่วนยานยนต์อื่นๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพซับซ้อน หรือใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเจดสีใหม่ๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดไปสู่การศึกษาวิจัยขั้นสูง เช่น การนำระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ Real-time (Real-time Process Control) มาใช้ร่วมกับสมการทำนายที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อให้

กระบวนการผลิตสามารถปรับตัวตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] H.J. Streibberger and K.F. Dössel, Automotive paints and coatings, 2nd Ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008.
- [2] P. Chaturvedi, M. Parvez and P. Pachauri, A systematic review on green manufacturing of automotive parts, 2023 6th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Proceeding, 2023, 2144-2151.
- [3] Y.W. Chek and D.T.-C. Ang, Progress of bio-based coatings in waterborne system: Synthesis routes and monomers from renewable resources, Progress in Organic Coatings, 2024, 188, 108190.
- [4] M.M. Almomani, Y.O. Mayyas, O.H. Alomari, G.M. Tashtoush, S. Cherdkeattikul and N.K. Akafuah, Augmenting energy efficiency in automotive paint ovens: a review of future prospects and potential for lean, six sigma, AI, and IoT integration, Management of Environmental Quality: An International Journal, 2026, 37(2), 474-497.
- [5] B. Müller and U. Poth, Coatings Formulation: An International Textbook, 3rd Ed., Vincentz Network, Hanover, Germany, 2017.

- [6] X. Qiao, H. Li, W. Zhao and D. Li, Effects of deposition temperature on electrodeposition of zinc-nickel alloy coatings, *Electrochimica Acta*, 2013, 89, 771-777.
- [7] M. Assadian, M.R. Shirdar, M.H. Idris, S. Izman, D. Almasi, M.M. Taheri and M.R.A. Kadir, Optimisation of electrophoretic deposition parameters in coating of metallic substrate by hydroxyapatite using response surface methodology, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40, 923-933.
- [8] R. Jia, T. Unsal, D. Xu, Y. Lekbach and T. Gu, Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 137, 42-58.
- [9] T. Nguyen, F.A. Roddick and L. Fan, Biofouling of water treatment membranes: A review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures, *Membranes*, 2012, 2(4), 804-840.
- [10] A.R. Elkais, M.M. Gvozdenović, B.Z. Jugović and B.N. Grgur, The influence of thin benzoate-doped polyaniline coatings on corrosion protection of mild steel in different environments, *Progress in Organic Coatings*, 2013, 76, 670-676.
- [11] S. Roy, A.K. Saha, S. Panda and G. Dey, Optimization of turmeric oil extraction in an annular supercritical fluid extractor by comparing BBD-RSM and FCCD-RSM approaches, *Materials Today: Proceedings*, 2023, 76, 47-55.
- [12] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David and G.C. Brandão, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, *Analytica Chimica Acta*, 2007, 597(2), 179-186.
- [13] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th Ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2019.
- [14] H.M. Nazha, B. Ammar, M.A. Darwich and M. Assaad, Response surface analysis of Zn-Ni coating parameters for corrosion resistance applications: a Plackett-Burman and Box-Behnken design of experiments approach, *Journal of Materials Science*, 2023, 58, 12465-12480.
- [15] A. de Myttenaere, B. Golden, B. Le Grand and F. Rossi, Mean Absolute Percentage Error for regression models, *Neurocomputing*, 2016, 192, 38-48.

คุณสมบัติคอนกรีตพูนที่ผสมเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

วันโชค เครือหงษ์ ปัญญา คล่องอักษรกุล* ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์ วราวุธ ณรงค์อินทร์
อภิวัฒน์ แสงแก้ว และ ปิติพงษ์ ทองดาว

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวาย,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: panya_kl@rmutto.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 กันยายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 5 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 6 กรกฎาคม 2569
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาคอนกรีตพูนด้วยการนำเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมคอนกรีตพูน การนำเส้นใย PVA มาใช้เนื่องจากมีกำลังรับแรงดึงที่ดี เมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าวขนาดเล็กเส้นใยจะทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างรอยร้าวได้ จึงทำการศึกษาสมบัติทางกลและกายภาพ เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเท่ากับ 10:90 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวมหยาบได้เลือกหินที่ค้างตะแกรงเบอร์ # 8 และเบอร์ # 3/4 มาใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาผลของขนาดมวลรวมที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน ทดสอบการดูดซึมน้ำ ความพูน หน่วยน้ำหนัก แรงอัด และ แรงดัด ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าร้อยละ 9.00 ถึง 18.70 ความพูนมีค่าร้อยละ 4.50 ถึง 9.60 หน่วยน้ำหนักมีค่า 2,027 ถึง 2,335 กก.ต่อลบ.ม.และ กำลังรับแรงอัดมีค่า 7.89 ถึง 16.30 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 28 วัน การผสมเส้นใย PVA ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ส่งผลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน โดยเส้นใย PVA ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายเสริมแรงภายในที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Capacity) และเพิ่มความต่อเนื่องของวัสดุประสานรอบมวลรวมหยาบ แม้ว่าเส้นใยจะส่งผลต่อความหนืดและการเกิดช่องว่าง แต่การเลือกใช้ขนาดมวลรวมละเอียด (Grading) ที่เหมาะสม เช่นในส่วนผสม S5 สามารถชดเชยข้อด้อยดังกล่าวและเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงสุดถึง 16.30 MPa ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปสำหรับคอนกรีตพูน

คำสำคัญ: เถ้าลอย; พอลิไวนิลแอลกอฮอล์; คอนกรีตพูน

Properties of Pervious Concrete Containing Fly Ash and Polyvinyl Alcohol Fibers

Wunchock Kroehong, Panya Klongaksornkul*, Sattawat Haruehansapong,
Warayut Narong-in¹, Apiwat Saengkaew¹ and Pitiphong Thongdao

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture Uthenthawai Campus,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok

* Corresponding author, E-mail: panya_kl@rmutto.ac.th

Received: 25 September 2025; Revised 5 May 2026; Accepted: 6 July 2026

Online Published: 20 August 2026

Abstract: This study focuses on the development of pervious concrete by incorporating fly ash and polyvinyl alcohol (PVA) fibers. PVA fibers were utilized due to their high tensile strength; when micro-cracks occur within the concrete matrix, these fibers function as a bridging mechanism across the cracks. Consequently, the mechanical and physical properties of the concrete were investigated. Fly ash was used to replace cement at a ratio of 10:90 by weight of binder, while PVA fibers were added at 0.5% by weight of cement. For the coarse aggregate, stone particles retained on sieve sizes No. #8 and No. #3/4 were selected to investigate the effect of different aggregate sizes on the properties of pervious concrete. The experimental program included tests on water absorption, porosity, unit weight, compressive strength, and flexural strength at 28 days of curing. The results indicated that water absorption values ranged from 9.00% to 18.70%, porosity ranged from 4.50% to 9.60%, unit weight ranged from 2,027 to 2,335 kg/m³, and compressive strength values ranged from 7.89 to 16.30 MPa at 28 days of curing. The incorporation of 0.5% PVA fibers by weight, together with 10% fly ash as a cement replacement, yielded a significant positive impact on the mechanical properties of pervious concrete. The PVA fibers acted as an internal reinforcing network that enhanced flexural capacity and improved binder continuity around the coarse aggregates. Although fiber inclusion affected the viscosity of the concrete mixture and void formation, the selection of an appropriate aggregate grading, such as Mix S5, effectively compensated for these drawbacks and achieved the highest compressive strength of 16.30 MPa, which exceeds the standard criteria generally established for pervious concrete.

Keywords: Fly ash; Polyvinyl alcohol; Pervious concrete



1. บทนำ

คอนกรีตพรุน (Pervious Concrete) เป็นวัสดุซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีเนื่องจากไม่มีมวลรวมละเอียดจึงทำให้มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่มีความต่อเนื่องภายใน คุณสมบัติดังกล่าวจึงนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนน ทางเท้า ตลอดจนสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ แทนการใช้คอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตามข้อจำกัดสำคัญของคอนกรีตพรุนก็คือมีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากความพรุนในเนื้อวัสดุ [1] ปัจจุบันมีการศึกษาโดยการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมาผสมในคอนกรีตพรุนเพื่อทำให้การระบายน้ำได้ดีมากขึ้น [2] คอนกรีตพรุนนั้นประกอบไปด้วยวัสดุ 3 ส่วน คือ วัสดุประสานซึ่งอาจเป็นปูนซีเมนต์อย่างเดียวหรือมีวัสดุป่อโซลลานด้วยก็ได้ มวลรวมหยาบ และ น้ำ คอนกรีตพรุนโดยทั่วไปจะมีอัตราการไหลผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.14 ถึง 1.22 เซนติเมตรต่อวินาที และมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 2.80 ถึง 28.0 เมกะปาสคาล [3]

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้มาจากการกระบวนการเผาถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกันอย่างแพร่หลายซึ่งเถ้าลอยนี้เมื่อนำมาผสมคอนกรีตจะทำให้ช่องว่างที่เกิดในคอนกรีตมีจำนวนลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาป่อโซลลานขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในระยะยาวมีค่ามากขึ้นสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Yang and Jiang [4] พบว่าคอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมขนาด 5-10 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 13.8 เมกะปาสคาล ขณะที่คอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวม

ขนาด 10-20 และ 15-30 มม. ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 9.8 และ 7.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ คุณสมบัติของเถ้าลอยยังช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานดีขึ้นเนื่องมาจากการใช้น้ำลดลง ในขณะเดียวกันก็ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดน้อยลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน [5] ปัจจุบันนี้ได้มีการคิดค้นนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) มาผสมกับคอนกรีตเพื่อพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้นเช่นกัน โดยเมื่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาผสมกับปูนซีเมนต์ ทราย และ วัสดุมวลรวมหยาบพบว่าคอนกรีตมีการยึดเกาะเหนียวแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าว เส้นใย PVA ที่กระจายตัวอยู่จะช่วยป้องกันการขยายตัวของรอยร้าว และ เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดได้ดี อย่างไรก็ตาม เส้นใย PVA ก็มีข้อจำกัดเช่นกันกล่าวคือเมื่อนำเส้นใย PVA มาผสมกับคอนกรีตจะทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตมากขึ้นเนื่องจากเส้นใย PVA นั้นเพิ่มความหนืดให้กับน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ทำให้เกิดฟองอากาศในขณะผสมคอนกรีตซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการพัฒนา กำลังของคอนกรีตพรุนที่ผสมเถ้าลอยและ เส้นใย PVA เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกในการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยในการลดผลกระทบต่องสิ่งแวดล้อมและป้องกันการทำลายสมดุลของระบบนิเวศจากการลดลงของการซึมผ่านน้ำลงดิน ผลการศึกษาจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งทางด้านเศรษฐกิจในการลดต้นทุนด้านการผลิตคอนกรีตพรุนเนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม ด้านสิ่งแวดล้อมช่วยในการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน



2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้วิจัย

2.1.1 ปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสาน

ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 1 มีคุณสมบัติตามมาตรฐานมอก.15-2562 [6] เป็นวัสดุประสานเมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาแข็งตัวและมีความคงทนในน้ำได้ โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 3.15 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญในการคำนวณปริมาณการใช้งานและควบคุมคุณภาพคอนกรีต

2.1.2 หิน

เนื่องจากคอนกรีตพูนจำเป็นต้องมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้น้ำไหลผ่านได้อย่างสะดวก จึงใช้หินที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Uniform-Sized-Aggregate) อย่างหิน #8 และ หิน #3/4 ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดหินมีขนาดสม่ำเสมอและต่อเนื่องกันมากกว่าการใช้หินขนาดกะทัดรัดไปอุดช่องว่างได้ ขนาดของหิน #8 และ หิน #3/4 เป็นขนาดหินที่เหมาะสมในการสร้างช่องว่างที่มีขนาดใหญ่พอที่จะยอมให้น้ำไหลผ่านได้ดีแต่ก็ไม่ใหญ่จนเกินไปทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงอย่างมาก

2.1.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ในงานวิจัยนี้ได้นำเส้นใย PVA ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีขนาดประมาณ 6 มม. ถึง 9 มม. และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 1 นำมาผสมกับคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพและสามารถติดไฟได้ เส้นใย PVA เป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากพลาสติกโดยใช้กระบวนการทางพอลิเมอร์ในการปรับปรุงคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมี โดยเส้นใย PVA

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำและประเภทค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงซึ่งเป็นเส้นใย PVA ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีความสำคัญต่อการเสียรูปเมื่อคอนกรีตรับแรงอัด และการยึดตัวเมื่อคอนกรีตแตกร้าวในขณะเดียวกันเส้นใย PVA ก็มีส่วนสำคัญในการช่วยเสริมกำลังรับแรงดัดให้คอนกรีต

2.1.4 แก้วลอย

แก้วลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แก้วลอยที่นำมาใช้เป็นแก้วลอย Class F องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของแก้วลอยได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของเส้นใย PVA

วัสดุ	กำลังรับแรงดึง (กิกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กิกะปาสคาล)	ร้อยละการยืดตัว	ความถ่วงจำเพาะ
PVA	0.88-1.60	25 – 40	6 – 10	1.3



รูปที่ 1 เส้นใย PVA ที่ใช้ในงานคอนกรีตพูน



2.2 ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตพูน

การออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตพูนโดยใช้วัสดุประสานซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมหยาบ 1 ลบ.ม. จะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม น้ำ 152 กิโลกรัม มวลรวมหยาบ 1,380 กิโลกรัม ซึ่งจะได้ น้ำหนักรวมทั้งหมด 1,900 กิโลกรัมสำหรับทดสอบผสมและปรับแก้ส่วนผสม

2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลโดยใช้ส่วนผสมของคอนกรีตพูน ปริมาณเส้นใย PVA เท่ากับร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.38 ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ (FA/C) เท่ากับ 10:90 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การเลือกใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นช่วงที่เหมาะสมซึ่งสามารถเพิ่มความทนทานและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดในช่วงต้นมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งการใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่มากเกินไปจะทำให้การพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นนั้นค่อนข้างช้า การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพูนโดยการกำหนดปริมาณซีเมนต์เพสต์จากช่องว่างของหินแต่ละขนาดเท่ากับ 0.15 อัตราส่วนของคอนกรีตพูนโดยการแทนที่เถ้าลอยและเส้นใย PVA เป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 2 งานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตพูนที่ผสมเถ้าลอยและเส้นใย PVA โดยคัดเลือกขนาดของหินที่ค่าจตะแกรง #3/4 (19 มม.) และ #8 (9.5 มม.) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบต่างกัน

ส่วนผสม ที่	ปูน (กก)	หิน (กก.)		น้ำ (กก)	เส้น ใย (กก)	เถ้า ลอย (กก)
		#3/4	#8			
S1	400	0	1380	152	2	40
S2	400	1380	0	152	2	40
S3	400	690	690	152	2	40
S4	400	1035	345	152	2	40
S5	400	345	1035	152	2	40

โดยในแต่ละสัดส่วนผสมนำมาหาค่าการทดสอบเฉลี่ย ซึ่งสมบัติที่ต้องทดสอบจะประกอบไปด้วย การดูดซึมของคอนกรีตพูน, ความพรุนของคอนกรีตพูน, หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูน, กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน และ กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เตรียมแบบหล่อสำหรับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ โดยทาน้ำมันที่แบบหล่อขนาด กว้างxยาวxสูง 10x10x10 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบหากล้างรับแรงอัด และ แบบหล่อขนาด กว้างxลึกxยาว 15x15x45 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบแรงดัด

2. เตรียมส่วนผสมสำหรับคอนกรีตพูนผสมเถ้าลอยและเส้นใย PVA ตามการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 2

3. ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตเมื่อส่วนผสมเข้ากันได้ดีแล้วจึงนำไปเทเข้าแบบหล่อคอนกรีตโดยทิ้งไว้ 24 ชม. แล้วทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตแข็งตัวดีแล้ว



4. นำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตพูนที่ผสมเกล็ดลอยและเส้นใย PVA ที่ถอดแบบเรียบร้อยแล้วไปบ่มในน้ำให้มีอายุ 28 วัน

5. นำตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น การดูดซึมน้ำของคอนกรีตพูน, ความพูนของคอนกรีตพูน, หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูน, กำลังรับแรงอัด และ กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน เป็นต้น

2.4 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

2.4.1 การดูดซึมน้ำ, ความพูน, หน่วยน้ำหนัก

นำตัวอย่างไปใส่ในเครื่องเก็บสูญญากาศแล้วทำการดูดอากาศออกหลังจากนั้นเติมน้ำลงไปให้ท่วมชิ้นงานแล้วทำการอัดแรงดันในสภาพสูญญากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยความดันในสภาพสูญญากาศออกและทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักในสภาพผิวแห้ง, ชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างในน้ำ แล้วนำชิ้นตัวอย่างเข้าอบเพื่อหาค่าน้ำหนักอบแห้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยของชิ้นตัวอย่าง ทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพูนตามมาตรฐาน ASTM C642 [7] และคำนวณค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูนจากมวลและปริมาตรของชิ้นตัวอย่างที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete)

2.4.2 กำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างคอนกรีตพูนไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างสามารถรับได้ โดยทดสอบหาลำดับกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39[8]

2.4.3 กำลังรับแรงดัด

นำตัวอย่างคอนกรีตพูนไปทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางความยาวของชิ้นงานแล้ววัดค่าการแอ่นตัวของชิ้นงานและคำนวณหาค่าหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นโดยทดสอบหาลำดับกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 [9]

3. ผลการทดสอบ

3.1 การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพูนผสมเกล็ดลอยและเส้นใย PVA ทั้ง 5 ชุด แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม การใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียวทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นในระดับหนึ่ง ด้วยค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.40 แม้หินขนาดเล็กจะจัดเรียงตัวได้ดี แต่การขาดมวลรวมขนาดใหญ่ทำให้ยังมีช่องว่างบางส่วน ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม ส่วนผสมนี้มีการดูดซึมน้ำสูงสุดถึงร้อยละ 18.70 การใช้หินขนาดใหญ่ทั้งหมดส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างมวลรวม โครงสร้างมีความพูนสูง และน้ำ สามารถซึมผ่านได้ง่ายที่สุด ส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ #3/4 อย่างละร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้แสดงค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดที่ร้อยละ 9.00 ซึ่งเห็นว่าการผสมหินขนาดเล็กและใหญ่ในสัดส่วนที่สมดุลช่วยให้มวลรวมจัดเรียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ การเพิ่มสัดส่วนหิน #3/4 เป็นร้อยละ 75

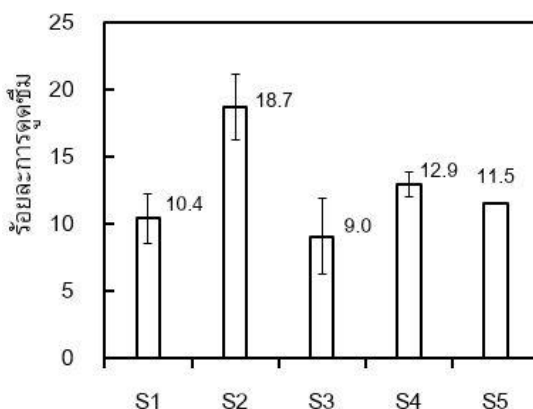


ทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 12.90 สะท้อนถึงการกระจายตัวของมวลรวมที่ไม่สมดุลเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ S3 ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ

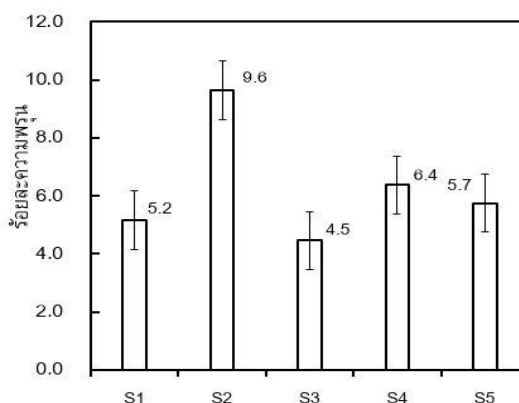
การเพิ่มสัดส่วนหิน #8 เป็นร้อยละ 75 ช่วยลดช่องว่างได้ดีกว่าส่วนผสม S2 และ S4 แต่ยังคงดูดซึมน้ำร้อยละ 11.50 ซึ่งสูงกว่าส่วนผสม S3 เนื่องจากสัดส่วนหินขนาดใหญ่ยังไม่เพียงพอต่อการเติมเต็มช่องว่างอย่างสมบูรณ์

3.2 ความพรุน

รูปที่ 3 แสดงค่าความพรุนของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้ส่วนผสมอัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม การใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียวทำให้คอนกรีตมีความพรุนค่อนข้างต่ำที่ร้อยละ 5.20 เนื่องจากหินขนาดเล็กสามารถจัดเรียงตัวได้แน่นและช่วยลดช่องว่างได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งส่งผลดีต่อความแข็งแรงและการกันซึม ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้มีค่าความพรุนสูงที่สุดที่ร้อยละ 9.60 การใช้หินขนาดใหญ่ทั้งหมดทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดมวลรวมเป็นจำนวนมาก โครงสร้างมีความพรุนสูง ส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ # 3/4 อย่างละร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้ให้ค่าความพรุนต่ำที่สุดที่ร้อยละ 4.50 แสดงให้เห็นว่าการผสมหินทั้งขนาดเล็กและใหญ่ในสัดส่วนที่เท่ากันช่วยให้มวลรวมจัดเรียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างได้อย่างสมบูรณ์ [10]



รูปที่ 2 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม



รูปที่ 3 ความพรุนของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม

ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับค่าความพรุนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6.40 เมื่อสัดส่วนของหินขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น การเติมเต็มช่องว่างด้วยหินขนาดเล็กไม่เพียงพอ ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ ที่มีหิน #8 มากกว่า ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของ



น้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวมตามลำดับ มีค่าความพรุนอยู่ที่ร้อยละ 5.70 ซึ่งยังคงดีในระดับหนึ่ง เนื่องจากมีสัดส่วนของหินขนาดเล็กเพียงพอที่จะช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีกว่าส่วนผสมที่ S2 และ S4 แม้จะไม่สมดุลเท่าส่วนผสมที่ S3

ผลการทดสอบพบว่าค่าความพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 4.5 - 9.6 ซึ่งต่ำกว่าช่วงทั่วไปของคอนกรีตพรุน (ร้อยละ 15 - ร้อยละ 20) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างยังคงมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected Voids) ซึ่งอาจยังคงสามารถระบายน้ำได้ในระดับหนึ่ง ทั้งนี้ควรมีการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ (Permeability) เพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไป

3.3 หน่วยน้ำหนัก

ในการศึกษาองค์ประกอบของคอนกรีตพรุนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและสัดส่วนของมวลรวมกับค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ได้มีการทดสอบ 5 ส่วนผสมหลัก โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้หิน #8 และหิน #3/4 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจดังนี้ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมการใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียว ส่วนผสมที่ S1 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2,142 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลาง ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าหินขนาดเล็กสามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างแน่น ช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีพอสมควร ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้ให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงที่สุดที่ 2,335 กก./ตอลบ.ม. แม้การทดสอบความพรุนจะแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีช่องว่างค่อนข้างมาก แต่ด้วยขนาดและน้ำหนักที่มากกว่าของหิน #3/4 จึงส่งผลให้หน่วยน้ำหนักรวมของคอนกรีตสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ

ส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ #3/4 อย่างละร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมที่มีการลดขนาดมวลรวมในสัดส่วนเท่ากันนี้มีหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2,155 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางและใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ S1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผสมมวลรวมลดขนาดในสัดส่วนที่เท่ากันนี้ ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับส่วนผสมนี้มีหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2,213 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูงและใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ S2 เนื่องจากมีสัดส่วนของหิน #3/4 ที่สูงกว่า หินที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจึงส่งผลให้หน่วยน้ำหนักโดยรวมของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับส่วนผสมนี้มีหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดที่ 2,027 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีหินขนาดเล็กในสัดส่วนมากก็ช่วยลดความพรุนได้ดีซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 เนื่องจากว่าส่วนผสม S2 นั้นใช้มวลรวมขนาดใหญ่ทำให้มีชั้นฟิล์มซีเมนต์เพสต์ที่หนาส่งผลให้มีหน่วยน้ำหนักที่สูงที่สุดแม้จะมีความพรุนสูง ในทางกลับกันส่วนผสม S5 มีมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสูงเกินกว่าที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์จะเคลือบให้หนาแน่นได้ซึ่งก่อให้เกิดโพรงขนาดเล็กและความพรุนภายในเนื้อวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มาให้น้ำหนักมวลรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญแม้ความพรุนที่วัดได้จะต่ำก็ตาม แม้ว่าสัดส่วนวัสดุเริ่มต้นจะมีน้ำหนักรวมประมาณ 1,900 กก./ตอลบ.ม. แต่ค่าหน่วยน้ำหนักที่วัดได้อยู่ในช่วง 2,027 - 2,335 กก./ตอลบ.ม. อาจเกิดจากการอัดแน่นของมวลรวมระหว่างการขึ้นรูปการดูดซึมน้ำ

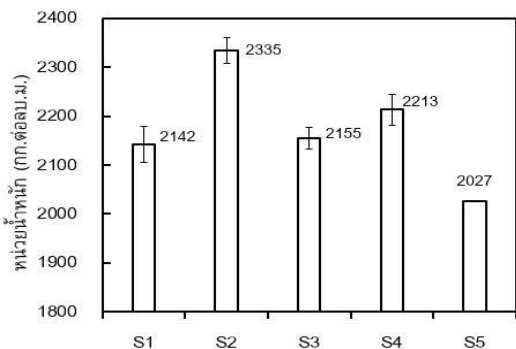


ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการดูดซึม ความพรุน หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุน 5 ส่วนผสม

ส่วนผสม	สัดส่วนหิน #8: #3/4	ผลการทดสอบ		
		การดูดซึม (%)	ความพรุน (%)	หน่วยน้ำหนัก กก./ม. ³
S1	100: 0	10.4	5.2	2142
S2	0: 100	18.7	9.6	2335
S3	50: 50	9.0	4.5	2155
S4	25: 75	12.9	6.4	2213
S5	75: 25	11.5	5.7	2027

เข้าสู่โครงสร้างรูปพรุน และน้ำที่คงค้างภายในตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักที่วัดได้สูงกว่าค่าทางทฤษฎี

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการดูดซึม ความพรุน และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนทั้ง 5 ส่วนผสม ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 3 จากตารางเปรียบเทียบการดูดซึม ความพรุน และ หน่วยน้ำหนัก พบว่าขนาดของมวลรวมที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนผสมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมา อิทธิพลของมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนเมื่อเพิ่มสัดส่วนของหิน #3/4 (มวลรวมขนาดใหญ่) ในส่วนผสมที่ S2 (หิน #3/4 ร้อยละ 100) และส่วนผสมที่ S4 (หิน #3/4 ร้อยละ 75) ค่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากหิน #3/4 มีน้ำหนักมาก อย่างไรก็ตาม ความพรุนและการดูดซึมนกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในส่วนผสมที่ S2 ที่ใช้หิน #3/4 เพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าการดูดซึมและความพรุนสูงที่สุด เมื่อเพิ่มสัดส่วนของหิน #8 (มวลรวมขนาดเล็ก) ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้หิน #8 ในสัดส่วนที่มากกว่า เช่น ในส่วนผสมที่ S1 (หิน #8 ร้อยละ 100) และส่วนผสมที่ S5 (หิน #8



รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆทั้ง 5 ส่วนผสม

ร้อยละ 75) โครงสร้างคอนกรีตสามารถ ลดความพรุนลงได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากหินขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าเต็มช่องว่างได้ดีขึ้น แต่ หน่วยน้ำหนักโดยรวมจะลดลง เนื่องจากหิน #8 มีน้ำหนักน้อยกว่าหิน #3/4

3.4 กำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมทั้ง 5 ส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 5 ผลการทดสอบจากการใช้อัตราส่วนหิน #8 และ หิน #3/4 ที่แตกต่างกันต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ณ อายุการบ่ม 28 วัน เป็นดังแสดงในตารางที่ 4

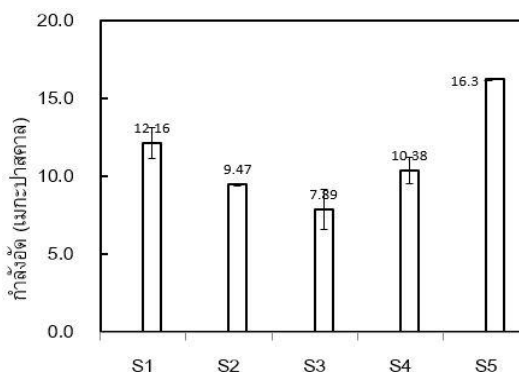
ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม การใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียวแสดงกำลังอัดที่ 12.16 เมกะปาสกาล ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าหินขนาดเล็กสามารถเรียงตัวได้อย่างหนาแน่น ทำให้โครงสร้างคอนกรีตพัฒนาความแข็งแรงได้ดีในระยะยาว แม้ว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกอาจไม่เต็มที่ แต่เมื่อครบอายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดที่ได้ก็อยู่ในระดับที่สูงพอสมควรและไม่ใช้ค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม



ตารางที่ 4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด น้ำหนักบรรทุก และการแอ่นตัว ของคอนกรีตพูน 5 ส่วนผสม

ส่วนผสม	สัดส่วนหิน #8: #3/4	ผลการทดสอบ		
		แรงอัด (เมกะปาสคาล)	น้ำหนักบรรทุก (นิวตัน)	การแอ่นตัว (มม.)
S1	100: 0	12.16	1900	2.01
S2	0: 100	9.47	1780	2.20
S3	50: 50	7.89	1300	1.12
S4	25: 75	10.38	1800	0.97
S5	75: 25	16.30	2300	1.57

ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้ให้กำลังอัดอยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับทุกส่วนผสม โดยมีค่ากำลังอัดที่ 9.47 เมกะปาสคาล การใช้หินขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตมีความพรุนสูง และการยึดเกาะของเนื้อปูนไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงทำให้คอนกรีตมีขีดจำกัดในการรับแรงอัด แม้เวลาผ่านไปกำลังอัดก็ยังคงอยู่ในระดับต่ำส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ #3/4 อย่างละคร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมที่มีการลดขนาดมวลรวมในสัดส่วนเท่ากันนี้ ส่วนผสมนี้แสดงกำลังอัดที่ 7.89 เมกะปาสคาล แม้ผลการทดสอบก่อนหน้านี้จะระบุว่าส่วนผสมนี้มีความพรุนต่ำที่สุด กลับทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้อยู่ในระดับต่ำที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของเนื้อปูนที่ไม่สมดุล หรือช่องว่างภายในโครงสร้างไม่ได้ช่วยเสริมประสิทธิภาพในการรับแรงอัดอย่างเต็มที่ สะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดในการพัฒนาความแข็งแรง



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆทั้ง 5 ส่วนผสม

ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ กำลังอัดของส่วนผสมนี้อยู่ที่ 10.38 เมกะปาสคาล ส่วนผสมนี้แสดงการพัฒนากำลังอัดที่ชัดเจนจากช่วงต้นจนถึงอายุ 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการพัฒนาโครงสร้างภายในเมื่อปูนซีเมนต์มีการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แม้จะมีสัดส่วนของหินขนาดใหญ่ในปริมาณมาก แต่ยังคงสามารถกระจายแรงอัดได้ดีในระยะยาว ส่งผลให้กำลังอัดอยู่ในระดับที่ค่อนข้างดี ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวมตามลำดับ ส่วนผสมนี้ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกส่วนผสม โดยมีกำลังอัดที่ 16.30 เมกะปาสคาล

การรวมกันของหินขนาดเล็กที่ช่วยให้โครงสร้างแน่น และหินขนาดใหญ่ในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยให้การกระจายตัวของมวลรวมมีความสมดุลมากที่สุด ทำให้โครงสร้างภายในมีความหนาแน่นและสามารถพัฒนาความแข็งแรงได้สูงทั้งในระยะสั้นและระยะยาว



จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดสูงและความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าตัวอย่างคอนกรีตพูนทั้ง 5 ส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 7.89 ถึง 16.30 เมกะปาสคาล ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคอนกรีตพูนทั่วไปที่กำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 2.8 ถึง 28 เมกะปาสคาล จะเห็นได้ว่าคอนกรีตพูนทุกส่วนผสมในงานวิจัยนี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและสามารถนำไปใช้งานได้

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความพูนและกำลังรับแรงอัด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน 5 ส่วนผสม (S1-S5) ดังแสดงในรูปที่ 6 มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนพบว่าคอนกรีตที่มีความพูนสูงจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ เนื่องมาจากช่องว่างที่มากจะทำให้พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพในการรับแรงลดลงส่งผลให้ค่าสตีเฟนลดลง

2. ส่วนผสมที่ S2 มีค่าความพูนสูงสุดแต่กำลังรับแรงอัดไม่ต่ำที่สุด แม้ว่าส่วนผสม S3 จะมีความพูนต่ำที่สุด แต่กำลังอัดกลับต่ำที่สุดเช่นกัน ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงความหนาของเพสต์ (Paste Thickness) ที่ไม่เพียงพอต่อการเคลือบผิวมวลรวมอย่างทั่วถึง ส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone: ITZ) มีความอ่อนแอ ทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงอัดลดลง ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่ายังมีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจาก

ความพูน เช่น สัดส่วนของมวลรวมมีบทบาทต่อกำลังรับแรงอัดอย่างมาก

3. แนวโน้มโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและกำลังรับแรงอัดเป็นแบบผกผันหรือแบบปฏิภาคกลับ แต่จากกราฟนี้แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น การกระจายตัวของขนาดช่องว่าง เป็นต้น ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ของแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

3.6 กำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนหลังการบ่มเป็นเวลา 28 วันภายใต้สภาวะการรับแรงดัดแบบแรงกระทำ 3 จุด ซึ่งใช้เครื่องทดสอบที่บันทึกค่าแรงสูงสุดและการโก่งตัวของชิ้นงานระหว่างการรับแรงกดคอนกรีตดัดแสดงในรูปที่ 7 ส่วนผสมที่ S1 นี้แสดงพฤติกรรมการรับแรงดัด ค่ากำลังรับแรงดัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและยังคงแสดงพฤติกรรมที่มีสตีเฟนส์ที่ดีและมั่นคง ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่ที่กระทำสูงสุด 1,900 นิวตัน มีการแอ่นตัว 2.01 มม. หลังบ่ม 28 วัน คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก #8 เพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตามความแปรปรวนยังคงมีอยู่ในส่วนผสมนี้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมวลรวมขนาดเล็กอาจเกิดช่องว่างที่ไม่สม่ำเสมอได้ง่าย

ส่วนผสมที่ S2 ซึ่งใช้มวลรวมหยาบหิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมหลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าตัวอย่างคอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 1,780 นิวตัน แสดงพฤติกรรม

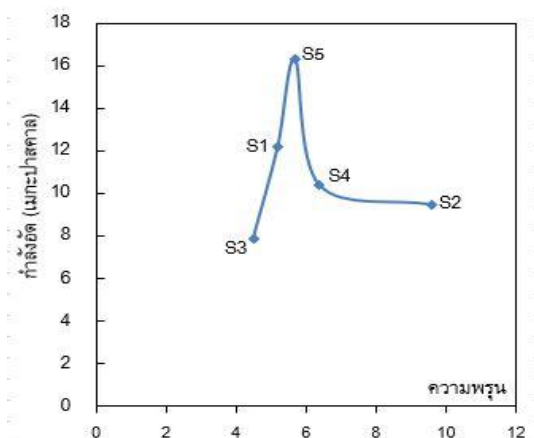


การรับแรงและการแอ่นตัวโดยมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 2.34 มม. ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง ผลทดสอบบ่งชี้ว่าคอนกรีตมีพฤติกรรมแข็งแรงและเสียรูปน้อยมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ส่งผลให้โครงสร้างภายในของคอนกรีตพูนมีความหนาแน่นและกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสม [11]

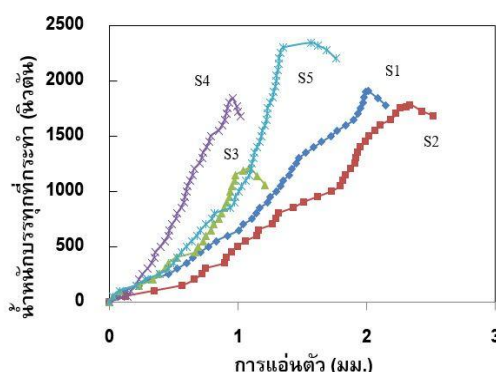
ส่วนผสมที่ S3 มีค่ากำลังน้ำหนักรวมทุก 1300 นิวตัน มีการแอ่นตัว 1.12 มม. แสดงพฤติกรรมการรับแรงที่ราบรื่นและมั่นคงในขณะที่ส่วนผสมที่ S1 และ S2 ก็มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน คุณสมบัติด้านความสม่ำเสมอนี้เป็นข้อได้เปรียบสำคัญสำหรับการนำส่วนผสมนี้ไปใช้งานจริงที่ต้องการคุณภาพคอนกรีตที่คงที่ จากการทดสอบกำลังแรงดัดของคอนกรีตพูน

ส่วนผสมที่ S4 ซึ่งประกอบด้วยมวลรวมหิน #8 ร้อยละ 25 และหิน #3/4 ร้อยละ 75 หลังจากบ่มครบ 28 วัน โดยให้ค่าน้ำหนักกระทำสูงสุดเท่ากับ 1,800 นิวตัน ซึ่งถือเป็นค่าที่อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับบรรดาสารผสมทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ ส่วนผสมที่ S4 ซึ่งเน้นมวลรวมขนาดใหญ่ ให้ค่าการแอ่นตัว 0.97 มม. ซึ่งให้ผลการทดสอบกำลังแรงดัดหลังบ่ม 28 วันที่ดีเด่นในเรื่องของสตีเฟเนส

แม้ส่วนผสมที่ 4 จะมีการแอ่นตัวที่น้อย แต่ส่วนผสมที่ 4 ก็มีพฤติกรรมที่มีความเหนียวและสตีเฟเนสที่ดีในเวลาเดียวกัน โครงสร้างมีความหนาแน่นที่ดี รองรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงและสามารถดูดซับพลังงานได้ดีก่อนการแตกหัก จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูงและเสถียรภาพระยะยาวจากการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละความพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม



รูปที่ 7 น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน ที่ส่วนผสมที่ S1-S5

ส่วนผสมที่ S5 ซึ่งประกอบด้วยมวลรวมหิน #8 ร้อยละ 75 และหิน #3/4 ร้อยละ 25 หลังจากบ่มครบ 28 วัน พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างให้ค่าอยู่ในระดับสูงอย่างโดดเด่น โดยค่าน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 2,300 นิวตัน มีค่าการแอ่นตัว 1.57 มม. ถือเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ ที่ได้ทดสอบมา



จากกราฟจะพบว่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่อายุ 28 วันของส่วนผสมนี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการพัฒนากำลังของสูตรผสมนี้ได้อย่างต่อเนื่องและเกินความคาดหมายเมื่อเทียบกับสูตรผสมอื่น ๆ

ลักษณะเด่นของส่วนผสมที่ S5 นี้อยู่ที่ความสมดุลระหว่างมวลรวมขนาดเล็ก (หิน #8) และขนาดใหญ่ (หิน #3/4) ซึ่งช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของเม็ดมวลรวมที่แน่นหนา พร้อมทั้งยังคงพื้นที่ช่องว่างสำหรับระบายน้ำตามคุณสมบัติของคอนกรีตพรุน ส่งผลให้ได้เนื้อคอนกรีตที่แข็งแรง เหนียว และมีพฤติกรรมที่สม่ำเสมอในทุกตัวอย่างที่ทดสอบ

3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงดัด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพรุนและ กราฟน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตพรุนที่มีความพรุนต่ำมีแนวโน้มที่จะรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าคอนกรีตพรุนที่มีความพรุนสูง อย่างไรก็ตามอาจมีปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากความพรุนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ส่วนผสม หรือ กระบวนการบ่ม เป็นต้น

2. โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีความพรุนสูงมักจะมีความแข็งแรงและความทนทานต่ำกว่าซึ่งส่งผลให้เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจะเกิดการแอ่นตัวได้มากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำกว่าเมื่อรับน้ำหนักที่เท่ากัน

อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่ S2 และ S4 เป็นคอนกรีตพรุนที่มีความพรุนสูงมีการแอ่นตัว 2.2 มม. และ 0.97 มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มี

ความพรุนสูงมีแนวโน้มที่จะถึงจุดวิบัติได้เร็วขึ้น และไม่สามารถรับการเสียรูปได้มากเท่ากับคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้นเสมอไป ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เข้ามามีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตพรุน ในการศึกษาครั้งนี้การเติมเส้นใย PVA ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและอาจทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเป็นปัจจัยลดทอนกำลังของคอนกรีตพรุน แต่ข้อจำกัดนี้ถูกชดเชยด้วยการใช้เกล็ดลอยแทนปูนซีเมนต์ซึ่งเกล็ดลอยได้เข้าไปเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กและช่วยเพิ่มกำลังรับแรงในระยะยาว

4. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตพรุนจำนวน 5 ตัวอย่าง (ส่วนผสมที่ S1 – ส่วนผสมที่ S5) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความพรุน หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด และ กำลังรับแรงดัด อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างส่วนผสม S1 มีค่าการดูดซึมน้ำ ความพรุน และ หน่วยน้ำหนักในระดับปานกลาง ซึ่งแสดงพฤติกรรมความเหนียว (Ductility) และ ความยืดหยุ่นที่ดี ในขณะที่การแอ่นตัวอยู่ในระดับปานกลางและสามารถดูดซับพลังงานได้ดี จึงเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ต้องรองรับแรงกระแทกหรือพลศาสตร์ เช่น แรงสั่นสะเทือน

2. ตัวอย่างส่วนผสม S2 มีค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด จึงควรมีหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดแต่เนื่องจาก ตัวอย่างส่วนผสม S2 นั้นใช้มวลรวมขนาดใหญ่ทำให้มีชั้นฟิล์มซีเมนต์เพสต์ที่หนาส่งผลให้มีหน่วย



น้ำหนักมากที่สุด แม้คุณสมบัติทางกำลังจะไม่โดดเด่น แต่มีความเหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตพูนทั่วไปที่เน้นประสิทธิภาพการระบายน้ำและต้องการเสถียรภาพทางโครงสร้าง เช่น ทางเท้า ทางจักรยานและ ลานอเนกประสงค์

3. ตัวอย่างส่วนผสม S3 มีค่าความพูนและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดโดยมีหน่วยน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เหมาะสำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่สูงมาก หรือ งานที่ไม่ได้ให้ความสำคัญกับพฤติกรรมการเสียรูปก่อนการแตกร้าว

4. ตัวอย่างส่วนผสม S4 ค่าการดูดซึมน้ำ ความพูน และ หน่วยน้ำหนักค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากการใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามส่วนผสมนี้มีจุดเด่นในด้านความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียวโดยให้ความเค้นและความสามารถในการดูดซับพลังงานในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง จึงเหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำแบบซ้ำ เช่น พื้นลานโรงงาน, โรงงานอุตสาหกรรมหนัก, ลานจอดรถ และ ถนน

5. ตัวอย่างส่วนผสม S5 ค่าการดูดซึมน้ำและความพูนลดลงมาอยู่ในระดับปานกลาง แต่หน่วยน้ำหนักยังต่ำอยู่เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสูงเกินกว่าที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์จะเคลือบให้หนาแน่นได้ซึ่งก่อให้เกิดโพรงขนาดเล็กและความพูนภายในเนื้อวัสดุทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงต่ำที่สุด

จุดเด่นสำคัญของตัวอย่างส่วนผสม S5 คือ ให้ค่าความเค้นสูงที่สุด แต่มีการแอ่นตัวน้อยซึ่งบ่งชี้ถึงพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ จึงเหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องรับแรงดัดแบบคงที่ในระดับสูง เช่น พื้นที่รองรับเครื่องจักร

การเพิ่มสมรรถนะของคอนกรีตพูนในงานวิจัยนี้อาศัยคุณสมบัติของเถ้าลอยและเส้นใย PVA โดยผลการศึกษาพบว่า เส้นใย PVA สามารถช่วยเพิ่มกำลังและการยึดเกาะของคอนกรีตพูนอย่างมีนัยสำคัญ และ เถ้าลอยยังช่วยลดช่องว่างในคอนกรีตและพัฒนากำลังได้ในระยะยาว การใช้วัสดุทั้งสองชนิดจึงเป็นแนวทางที่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในมิติการเพิ่มกำลัง มิติทางเศรษฐกิจ และ มิติของการบริหารจัดการวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (control mix) ที่ไม่มีส่วนผสมเถ้าลอยและเส้นใย PVA ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของการศึกษา ดังนั้นการเปรียบเทียบผลกระทบของวัสดุผสมเพิ่มเติมจึงอาศัยการอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา และ งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำโดยตรง (Permeability) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตพูน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันวิศวกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวายที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Abousnina, F. Aljuaydi, B. Benabed, M.H. Almabrok, and V. Vimonsatit, A state-of-the-art review on the influence of porosity on the compressive strength of porous concrete for infrastructure applications, Buildings, 2025, 15(13), 2311.

- [2] K. Triphone, R. Thep Wong, A study of water permeability on porous concrete using recycled coarse aggregates, The 25th National Convention on Civil Engineering, Proceeding, 2020, MAT13, 1-7. (in Thai)
- [3] ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete, American Concrete Institute, USA, 2010.
- [4] J. Yang and G. Jiang, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3), 381-386.
- [5] Y. Aoki, R.S. Ravindrarajah, and H. Khabbaz, Properties of pervious concrete containing fly ash, Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1), 1-11.
- [6] TIS 15-2562: Portland Cement, Ministry of Industry, Thailand, 2019. (in Thai)
- [7] ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [8] ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [9] ASTM C78/C78M-18 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete, ASTM International, Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [10] V.V. Hung, S.Y. Seo, H.Y. Kim and G.C. Lee, Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material, Sustainability, 2021, 13(1), 426.
- [11] H. Bilal, X. Gao, L. Cavaleri., A. Khan, and M. Ren, Mechanical, durability, and microstructure characterization of pervious concrete incorporating polypropylene fibers and fly ash/silica fume, Journal of Composites Science, 2024, 8(11), 456.

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาโดยประยุกต์ใช้ การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ

อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{*} ชาดรี หอมเขียว¹ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร¹
ทิพย์สุคนธ์ บุญญโส¹ และ ชัยวัฒน์ภัทร เลาสัตย์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² สาขาวิชาการออกแบบ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

^{*} ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 22 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 29 มิถุนายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 8 กรกฎาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาโดยประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ การวิจัยเริ่มด้วยการสำรวจและแปลงความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายผู้หญิง การประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) ในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้าในรูปแบบข้อกำหนดเชิงเทคนิค จากนั้นได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering) ที่มีการวิเคราะห์เชิงสถิติในกลุ่มทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 สำหรับแปลงข้อมูลเชิงคุณภาพเป็นเชิงปริมาณ ผลการวิจัยพบว่าการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในส่วนของการวิเคราะห์การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพได้รับการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบคุณภาพ วัสดุ การใช้งาน และราคา ซึ่งสะท้อนข้อกำหนดเชิงเทคนิคอย่างเหมาะสม ในส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทที่ 1 ได้รับการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ในด้านของลดลายการสาน รูปทรง ขนาด และขนาดของสายสะพาย ดังนั้นการออกแบบและพัฒนากระเป๋าสะพายย่านลิเภา พบว่าลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านความประณีตและความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์มากที่สุด เป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 พร้อมทั้งมีความพึงพอใจด้านความรู้สึกมีสนิมอยู่ในระดับดีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.37 ซึ่งผลการวิจัยในครั้งนี้ถือเป็นแนวทางสำคัญในการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ใหม่ให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน รวมถึงการใช้ประโยชน์จากวัสดุพื้นถิ่นในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: กระเป๋าสะพาย; ย่านลิเภา; การออกแบบผลิตภัณฑ์; การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ; วิศวกรรมคันเซ

Design and Development of the Lygodium Shoulder Bags through the Integration of Quality Function Deployment and Kansei Engineering

Apichon Thongmung Kamnerdwam¹, Surasit Rawangwong^{1*}, Chatree Homkhiew¹,
Chainarong Srivabut¹, Thipsukon Boonyaso¹ and Chaiwattanapat Laosat²

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Department of Product Design, Faculty of Fine Arts, Songkhla Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

Received: 22 July 2025; Revised: 29 June 2026; Accepted: 8 July 2026

Online Published: 20 August 2026

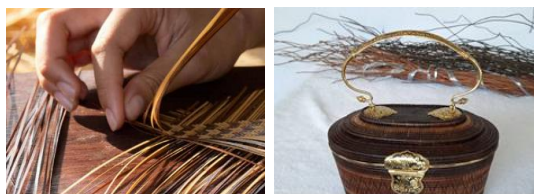
Abstract: This research aims to design and develop lygodium shoulder bags through the Integration of Quality Function Deployment and Kansei Engineering. It explores and converts customer needs into factors influencing product purchase decisions. The results were analyzed using Quality Function Deployment within the product planning matrix. It focuses on converting customer requirements into technical specifications. Kansei Engineering was used for statistical analysis, and Quantification Theory Type I was applied to convert qualitative data into quantitative data. The results showed that product development based on quality function deployment analysis led to changes in design, quality, materials, functionality, and price, which were appropriately reflected in the technical requirements. Quantification Theory Type I led to changes in product characteristics such as weaving patterns, shapes, dimensions, and shoulder strap sizes. Therefore, in the design and development of lygodium shoulder bags, customers were most satisfied with the weaving method, which was identified as the top priority. The satisfaction level regarding the weaving method was very high (average = 4.51), and the sense of elegance also received a good rating (average = 4.37). The findings provide an important foundation for developing new products that meet user needs while promoting the future utilization of locally available weeds.

Keywords: Shoulder bags; Lygodium; Product Design; Quality Function Deployment; Kansei Engineering

1. บทนำ

ย่านลิเภา เป็นวิชาชีพชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ต้นตอมีหน้าที่ปิดดินให้ชุ่มชื้น และเกิดขึ้นเองโดยเฉพาะทางภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งมีฝนตกบ่อย แม้ว่าทั้งให้แก่กับต้นก็จะมีตัวแมลงมากัดกิน ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่นิยมและเหมาะแก่การนำมาจักสานเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ ดังรูปที่ 1 ภูมิปัญญาศิลปหัตถกรรมย่านลิเภาของจังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นหนึ่งในมรดกทางวัฒนธรรมที่ล้วนสืบทอดมายาวนาน เป็นภูมิปัญญาด้านการจักสานโดยนำวัชพืชในท้องถิ่นที่มีเส้นใยทนทาน มีความเหนียว ไม่มีแมลงกัดกิน สามารถจักสานเป็นภาชนะและเครื่องใช้พื้นบ้านได้ดี เนื่องจากมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน

จากการลงพื้นที่สำรวจพบว่า ผลิตภัณฑ์ย่านลิเภาที่ขายในประเทศโดยทั่วไปจะมีหลายระดับคุณภาพ ความประณีต และราคาที่แตกต่างกัน เพื่อให้ลูกค้าในแต่ละกลุ่มได้เกิดการเลือกสรรตามวัตถุประสงค์ของการใช้สอย เนื่องจากความต้องการของลูกค้าในแต่ละกลุ่มไม่เหมือนกัน อาทิเช่น กลุ่มผู้ใช้งานต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทน แข็งแรง ความประณีตสวยงาม ส่วนกลุ่มนักสะสมบางกลุ่มจะเน้นราคาที่ไม่สูงมากนัก และในส่วนของกลุ่มนักท่องเที่ยวอาจจะไม่ค่อยพิถีพิถันเกี่ยวกับความประณีตและรูปแบบการผลิตมากนัก ดังนั้น จึงทำให้กลุ่มผู้ผลิตย่านลิเภากรณีศึกษา มีความต้องการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายเพื่อรองรับความต้องการของลูกค้าในแต่ละกลุ่มและเพิ่มช่องทางการตลาดสำหรับนักท่องเที่ยวและลูกค้าทั่วไปที่กว้างขวางมากขึ้น



รูปที่ 1 เส้นย่านลิเภาและผลิตภัณฑ์ย่านลิเภา

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เป็นเทคนิคการพัฒนาคุณภาพการออกแบบที่มุ่งสร้างความพึงพอใจแก่ลูกค้า อีกทั้งเป็นการวางแผนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากที่สุด กระบวนการจะเริ่มต้นจากการแปลงความต้องการของลูกค้ามาเป็นผลิตภัณฑ์อย่างเป็นทางการเป็นขั้นตอนและมีระบบ โดยอาศัยหลักการและเทคนิคทางวิศวกรรมเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการ เพื่อเจาะลึกไปยังส่วนประกอบต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ในด้านคุณภาพที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ จากการค้นคว้าผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ พบว่าได้ศึกษาปัญหาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องหนังและหาเสนอแนวทางแก้ไขโดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD จากนั้นได้รวบรวมข้อมูลความต้องการลูกค้า (Voice of Customer: VOC) นำมาสร้างบ้านคุณภาพ (House of Quality: HOQ) เพื่อวางแผนการออกแบบ พบว่าได้แนวทางการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องหนังที่ตรงใจลูกค้ามากขึ้นและมีคุณภาพสูงขึ้น [1] ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ด้วยการจัดการสนทนากลุ่มโดยผู้เชี่ยวชาญ



และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่ผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้าและสร้างจุดเด่นที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะ [2] และได้นำเอาบ้านคุณภาพ ซึ่งเป็นแมทริกซ์หนึ่งในเทคนิค QFD สำหรับการเชื่อมโยงความต้องการของลูกค้าสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับของชำร่วยงานแต่งงานและของขวัญ/ของฝาก [3] ส่วนวิศวกรรมคันเซ (KE) เป็นเทคนิคเชิงวิศวกรรมในการแปลความหมายจากอารมณ์ความรู้สึกและความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ แล้วนำมากำหนดเป็นตัวแปรที่นำมาใช้ในการออกแบบหรือรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ของลูกค้า และกำหนดเป็นตัวแบบการพยากรณ์เชิงคณิตศาสตร์ของความต้องการเชิงอารมณ์ที่มีผลต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [4] ได้มีการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซและขนาดสัดส่วนร่างกายสำหรับการออกแบบเก้าอี้ตามความเหมาะสมทางกายภาพการใช้งานของนักศึกษา [5] ได้มีการหาความต้องการของผู้บริโภคและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เก้าอี้รับประทานอาหาร ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อเก้าอี้รับประทานอาหาร ประกอบด้วย 3 คำ คือ ดูสบาย อ่อนโยน และทันสมัย โดยงานวิจัยนี้มีความคาดหวังว่าจะช่วยให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น [6] ได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบเบ้นพิมพ์ยางในรถยนต์ ผลการวิจัยได้นำไปใช้ในการจัดทำรายการข้อกำหนดและแนวทางสำหรับการสร้างและการประเมินเบ้นพิมพ์ยาง [7] และได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องหนึ่งกระเป๋าสานพายหลัง งานวิจัยนี้พบว่าสามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความต้องการของ

ผู้บริโภคในกลุ่มของความรู้สึก 3 รูปแบบ คือ เรียบง่าย หุหุระ และแปลกใหม่ [8]

จากผลงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นและการค้นพบปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้าของกลุ่มผู้ผลิตย่านลิภากรณีศึกษา จึงเป็นที่มาของการวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสานพาย่านลิภาสำหรับผู้หญิงโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ ของกลุ่มผู้ผลิตย่านลิภา กรณีศึกษา จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ การออกแบบผลิตภัณฑ์นี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค และกลุ่มผู้ผลิตย่านลิภา กรณีศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าตามช่วงวัยต่าง ๆ และสำหรับการจำหน่ายต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD)

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการออกแบบและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า โดยนำข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้หรือลูกค้ามาระบุความต้องการที่แท้จริงของลูกค้า อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ รูปแบบพื้นฐานของ QFD ประกอบด้วย 4 เฟส แสดงดังรูปที่ 2 แต่ละเฟสจะแสดงผลของข้อกำหนดสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้มาจากข้อมูลเบื้องต้นในแต่ละส่วน และความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดกับข้อมูลในการให้คะแนนความสัมพันธ์แบบเมทริกซ์ หลังจากนั้นนำค่าคะแนนแบบเมทริกซ์ใน



รูปแบบตัวเลขไปกำหนดความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น เพื่อจัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดในการออกแบบ [9]

2.2 ทฤษฎีวิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering)

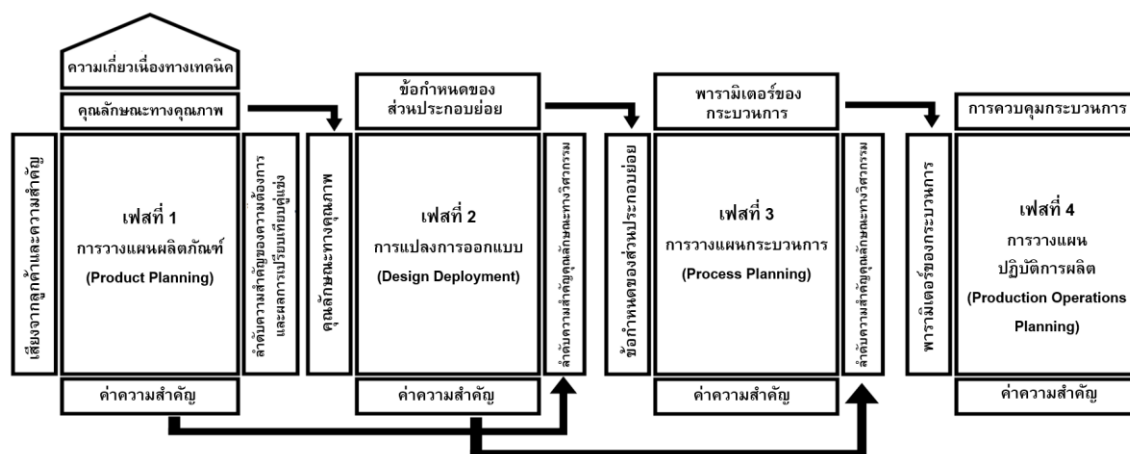
วิศวกรรมคันเซ (KE) เป็นการแปลความรู้สึก ความประทับใจ และความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ให้เป็นแนวทางการออกแบบหรือข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ วิศวกรรมคันเซได้รวบรวมอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งหลักการทั่วไปของวิศวกรรมคันเซ มีดังนี้ [10] (1) การเลือกกลุ่มตลาดหรือผลิตภัณฑ์ ควรเริ่มจากการตัดสินใจที่จะสร้างหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเฉพาะ (2) การกำหนดกรอบด้านความรู้สึก รวบรวมคำแสดงความรู้สึกที่เกี่ยวข้องกับตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการศึกษา (3) การกำหนดกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ระบุออกเป็นเชิงกายภาพให้ตรงกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดโดยสามารถทำคู่ขนานกับการกำหนดกรอบด้านความรู้สึกของผลิตภัณฑ์ (4) การสังเคราะห์ คือการเชื่อมโยงกันระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับ

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และ (5) ทวนสอบความถูกต้อง และการสร้างแบบจำลอง คือ การนำผลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้อง โดยทำการสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปสอบถามกลุ่มเป้าหมายอีกครั้ง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการคัดเลือกจากการสังเคราะห์มาทำการทวนสอบอีกครั้ง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ ใช้แบบสอบถามการวิจัย จำนวน 6 ชุด ดังต่อไปนี้

แบบสอบถามที่ 1 สำหรับศึกษาความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา ประกอบด้วย เพศหญิงช่วงวัยทำงาน ผู้ผลิตหรือตัวแทนจำหน่าย และผู้บริโภคผู้สนใจผลิตภัณฑ์ หัตถกรรมจักสานในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช แบบสอบถามที่ 2 สำหรับสำรวจระดับคะแนนของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์แบบสอบถามที่ 3 สำหรับการกำหนด



รูปที่ 2 รูปแบบพื้นฐาน QFD



ขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกแบบสอบถามที่ 4 สำหรับกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ แบบสอบถามที่ 5 สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อกำหนดแบบคุณลักษณะที่สามารถตอบสนองต่อความรู้สึกของลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแบบสอบถามที่ 6 สำหรับการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย่านลิเกา

นอกจากนี้ ในส่วนของกลุ่มผู้ประเมินแบบสอบถามได้กำหนดขอบเขตผู้ประเมินที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และระยะเวลาการตอบแบบสอบถาม โดยสามารถจัดกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มเป้าหมายที่เป็นลูกค้าเพศหญิง วัยช่วงวัยทำงาน ผู้ผลิตสินค้า หรือตัวแทนจำหน่าย และผู้บริหาร/ผู้สนใจผลิตภัณฑ์หัตถกรรมจักสานจากย่านลิเกาในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช จำนวน 245 คน แสดงการคำนวณดังสมการที่ 1 เนื่องจากผู้ตอบแบบสอบถามในกลุ่มนี้ สามารถให้ข้อมูลในส่วนของความต้องการ ระดับคะแนนของปัจจัยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์จึงสามารถประเมินในส่วนของแบบสอบถามที่ 1 แบบสอบถามที่ 2 แบบสอบถามที่ 4 และแบบสอบถามที่ 6

กลุ่มที่ 2 กลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ ด้านการขึ้นรูปหัตถกรรมจักสานย่านลิเกา นักวิชาการ และนักการตลาด ในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช และจังหวัดสงขลา เนื่องจากผู้ประเมินแบบสอบถามในกลุ่มนี้จำเป็นต้องเป็นผู้มี

ประสบการณ์ ความรู้ และความเชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ ด้านการขึ้นรูปหัตถกรรมจักสาน ย่านลิเกา และการตลาด ดังนั้นผู้วิจัยได้สำรวจด้วยแบบสอบถาม จากกลุ่มตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญด้านต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จำนวน 51 คน โดยดำเนินการประเมินในส่วนของแบบสอบถามที่ 3

กลุ่มที่ 3 กลุ่มเป้าหมายที่เป็นลูกค้าเพศหญิง วัยทำงาน ผู้ผลิตสินค้า หรือตัวแทนจำหน่าย และผู้สนใจผลิตภัณฑ์หัตถกรรมจักสานจากย่านลิเกาในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 แต่เนื่องด้วยกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามในกลุ่มนี้มีการกำหนดขนาดน้อยกว่ากลุ่มที่ 1 เนื่องจากสาเหตุที่ว่าแบบสอบถามที่ใช้ในกลุ่มนี้มีระยะเวลาการตอบแบบสอบถามที่มากกว่าแบบสอบถามในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องลดขนาดกลุ่มตัวอย่างเหลือเพียง 85 คน โดยดำเนินการประเมินในส่วนของแบบสอบถามที่ 5

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้

1) การสำรวจความต้องการของลูกค้าเพื่อหาเสียงเรียกร้องของลูกค้า

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการสำรวจด้วยการเก็บแบบสอบถามแบบปลายเปิด และการสัมภาษณ์ โดยคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้า ซึ่งได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% และใช้สมการของ W.G. Cochran ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [3] กล่าวคือในการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง กรณีไม่ทราบจำนวนประชากรแสดงดังสมการที่ 1



$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

$$n = \frac{0.20(1-0.20)1.96^2}{0.05^2} = 245$$

เมื่อค่า n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ ค่า P คือ สัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม (กำหนดใช้ P = 0.20) ค่า Z คือ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (กำหนดใช้ Z = 1.96 เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 95%) ค่า d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้น (กำหนดใช้ d = 0.05 เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 95%) จากสูตรสามารถคำนวณกลุ่มตัวอย่างได้ จำนวน 245 ตัวอย่าง ซึ่งถือว่าเป็นจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เพียงพอในการดำเนินงานวิจัย

ดังนั้น ในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้าด้วยแบบสอบถามที่ 1 ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้า (Voice of Customer: VOC) จำนวน 245 ตัวอย่าง เพื่อจัดเรียงถ้อยคำใหม่ พร้อมทั้งจัดกลุ่มคุณลักษณะความต้องการของลูกค้า จากนั้นใช้เครื่องมือทางคุณภาพ คือ แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง และแผนผังต้นไม้ สำหรับการคัดกรองข้อมูล ไม่ให้เกิดความสับสน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำแบบสอบถามสำรวจระดับคะแนนของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสายานลีเกาต่อไป

2) การประยุกต์เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD)

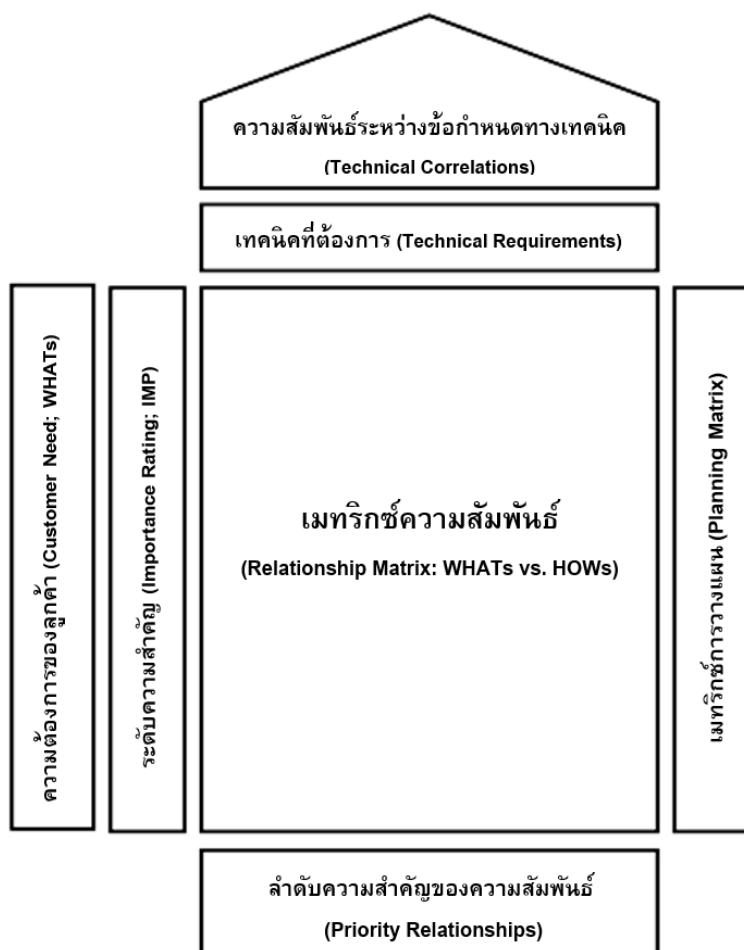
หลังจากที่ได้จัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นการนำข้อมูลเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ (HOQ) ประกอบด้วยเมทริกซ์ย่อย 7 ข้อหลักๆ แสดง

ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย (1) ความต้องการของลูกค้า (Customer Need: WHATs) จากการสอบถามความต้องการของลูกค้าโดยทำแบบสอบถามและสัมภาษณ์ความต้องการในผลิตภัณฑ์ จำนวน 245 คน มาจัดถ้อยคำใหม่ (2) ระดับความสำคัญ (Important: IMP) คือ ข้อมูลสำหรับนำไปจัดทำแบบสอบถามที่ 2 เพื่อสำรวจระดับคะแนนความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ และคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญ (3) เมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) เป็นการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์รูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ เพื่อกำหนดอัตราการปรับปรุงในผลิตภัณฑ์ โดยลักษณะของเมทริกซ์การวางแผน (4) เทคนิคที่ต้องการ (Technical Requirement: HOWs) เป็นการเปลี่ยนความต้องการของลูกค้า ให้เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพทางเทคนิคหรือคุณลักษณะทางวิศวกรรมโดยเกิดจากการแปลภาษาของลูกค้าให้เป็นภาษาทางเทคนิคและมีหน่วยวัดหรือเป็นคำอธิบายทั่วไปของผลิตภัณฑ์ (5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships: WHATs vs. HOWs) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้ากับคุณลักษณะทางคุณภาพหรือทางวิศวกรรมทำให้สามารถมองเห็นว่าลักษณะทางคุณภาพต่าง ๆ มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้ามากน้อยเพียงใด โดยค่าคะแนนเป็นตัวเลข 0 คือ ไม่มีความสัมพันธ์ 1 คือ มีความสัมพันธ์น้อย 3 คือ มีความสัมพันธ์ปานกลาง และ 9 คือ มีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ (6) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Correlations) เป็นส่วนของหลังคาบ้าน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพหรือทางวิศวกรรมประเด็นต่าง ๆ ด้วยการ



ระดมสมองฝ่ายที่เกี่ยวข้อง มีสัญลักษณ์แทนความสัมพันธ์ (O) คือ มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก (X) คือ มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และไม่มีสัญลักษณ์ คือ ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน และ (7) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) เป็นส่วนอยู่ใต้ฐานบ้าน เป็นส่วนที่แสดงถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ผู้พัฒนาทราบว่าการต้องการ

ใดและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพใดที่ต้องได้รับการเอาใจใส่มากขึ้น โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และส่วนของค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ โดยข้อกำหนดของที่มีความสำคัญจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเกาต่อไป



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเมทริกซ์การวางแผน



3) การประยุกต์เทคนิควิศวกรรมคันเซ (KE)

วิศวกรรมคันเซเป็นเทคนิคที่ช่วยในการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองความต้องการ อารมณ์ ความรู้สึก และของลูก้า โดยมี 5 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย ดังนี้

3.1) การเลือกขอบเขตการศึกษา เป็นการศึกษาผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา โดยมีขอบเขตของกลุ่มเป้าหมายเป็นกลุ่มนักท่องเที่ยว ผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ ผู้จำหน่าย และกลุ่มผู้สนใจผลิตภัณฑ์หัตถกรรมจักสาน โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำการพัฒนา คือ กระเป๋าสะพาย ย่านลิเภา

3.2) การกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เป็นการรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย โดยจัดทำแบบสอบถามที่ 3 เพื่อหาค่าแสดงความรู้สึก โดยมีผู้ประเมินแบบสอบถาม จำนวน 51 คน จากนั้นทำการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC) โดยค่า IOC ต้องมีค่ามากกว่า 0.5 เพื่อแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเที่ยงตรงและยอมรับได้ตามหลักเครื่องมือในการวิจัย [11]

3.3) การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หรือความเกี่ยวเนื่องระหว่างความต้องการของลูก้าต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เป็นการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาจากนิตยสารสื่ออินเทอร์เน็ต สิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ หรือผู้เชี่ยวชาญด้านย่านลิเภา และการสร้างแนวความคิดใหม่ที่ได้จากการผสมผสานของผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน จากนั้นสร้างแบบสอบถามที่ 4 โดยมีผู้ประเมินแบบสอบถาม จำนวน 245 คน จึงนำข้อมูลจากแบบสอบถามมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ย

และทำการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

3.4) การกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์หรือคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ เป็นการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มีรูปแบบหลากหลายและมีความแตกต่างกัน จากนั้นใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) ในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ตรงกับกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดใช้เป็นภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบในแบบสอบถามที่ 5

3.5) การประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล เป็นการสังเคราะห์ผลจากแบบสอบถามที่ 5 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โดยวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมาก คือ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type I: QT1) คือ วิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อหาค่า R-Square Adjust หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (Square Multiple Correlation Coefficient: MCC²) [11] โดยทั่วไปแล้วค่า MCC² จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า MCC² > 0.7 จึงสามารถยอมรับผลได้ และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มากและมีค่า P-Value < 0.05 โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แยกส่วน (Partial Correlation Coefficient: PCC) เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก จากนั้น



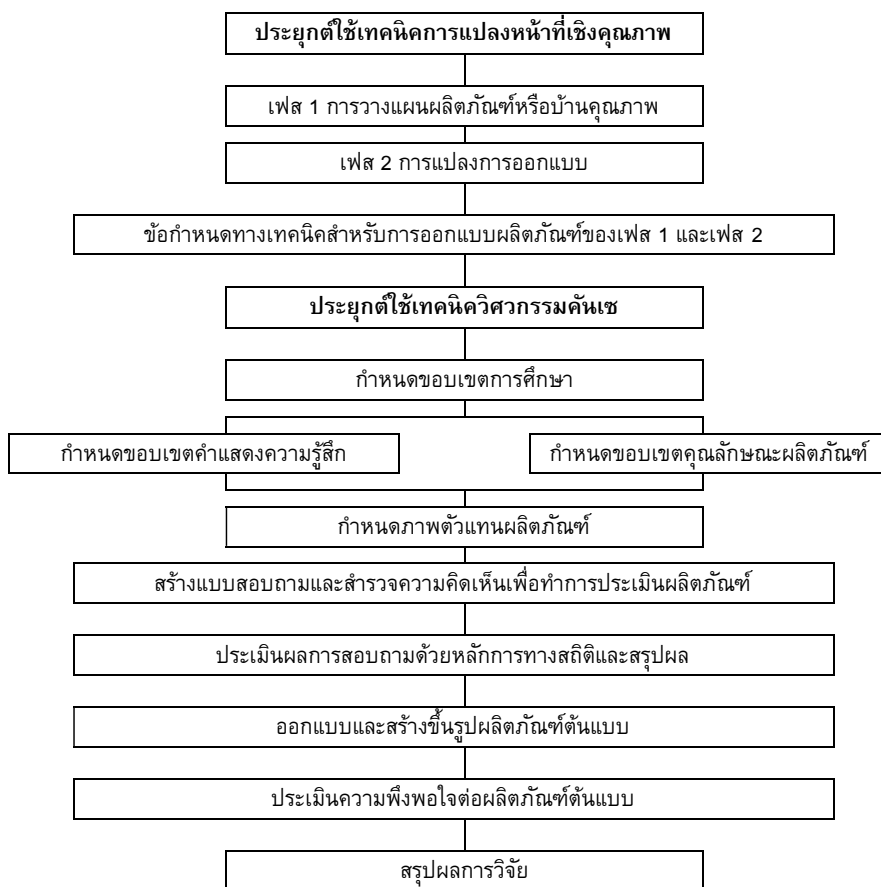
วิเคราะห์คะแนนหมวดหมู่ Category Score (CS) เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยในระดับหมวดหมู่ สุดท้ายผลการวิเคราะห์ทั้งสองประเภทจะช่วยกำหนดแนวทางที่ช่วยให้นักออกแบบมีข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ พร้อมทั้งสนับสนุนการเลือกคุณลักษณะสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ให้สื่อถึงความรู้สึกตามที่ต้องการอย่างแม่นยำ

4) การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

ตรวจทานข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงความรู้สึกเพื่อส่งข้อมูลให้กับทีมออกแบบสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

5) การประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

สำรวจความพึงพอใจของกลุ่มลูกค้าเป้าหมายที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายยานลิเกาแบบใหม่ โดยการลงพื้นที่เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 6 จำนวน 245 คน โดยสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 4 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัย



4. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ร่วมกับวิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ กระเป๋าสะพายย่านลิเภา สามารถสรุปผลการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการประยุกต์การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

4.1.1 ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ นำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่ เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์พบว่า มีรายละเอียด ของผลการดำเนินงาน 7 ส่วน แสดงดังรูปที่ 5 ดังนี้

1) ความต้องการของลูกค้าจากการสัมภาษณ์ ผู้ประเมินแบบสอบถามที่ 1 พบว่ามีความต้องการของ ลูกค้า 6 กลุ่มหลัก คือ รูปแบบ วัสดุ การใช้งาน คุณภาพ ความสะดวก และอื่น ๆ โดยมีความต้องการ ทั้งหมด 23 ความต้องการ ในส่วนนี้จะอยู่ด้านซ้ายของ บ้านคุณภาพ

2) ระดับความสำคัญ ผลจากการให้คะแนน ความสำคัญกับความพึงพอใจในกลุ่มด้านวัสดุที่ทำ จากธรรมชาติมากที่สุด โดยมีระดับความสำคัญ เฉลี่ย 4.58 คะแนน ในส่วนนี้อยู่ภายในบ้านคุณภาพ

3) เมทริกซ์การวางแผน หลังจากได้ผลความต้องการของลูกค้าและนำผลของค่า IMP หรือค่าเฉลี่ย ราคาคณิตไปใส่ในบ้านคุณภาพ

4) เทคนิคที่ต้องการ เป็นข้อกำหนดที่ได้จากการ ระดมสมองของทีมนักวิจัย ผู้เชี่ยวชาญด้านการ ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และผู้ผลิตย่านลิเภา เพื่อหาความสัมพันธ์และข้อกำหนดที่สามารถ ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ อีกทั้งยังกำหนด เป้าหมายทางเทคนิคหรือเป็นค่าเป้าหมายที่สามารถ วัดได้ โดยมีข้อกำหนดทางเทคนิคทั้งหมด 21 ข้อกำหนด

5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ เป็นการให้คะแนน ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าและ ข้อกำหนดเทคนิคที่ต้องการ พบว่าได้ผลการให้ คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการให้คะแนน ได้ทำการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ ๆ โดยใช้การระดม สมองของทีมนักวิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการ ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และผู้ผลิตย่านลิเภา

6) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิค ผลจากการระดมสมองของฝ่ายที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนด ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดที่จะนำไปใช้ในการ ออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาและตรง ต่อความต้องการของลูกค้า

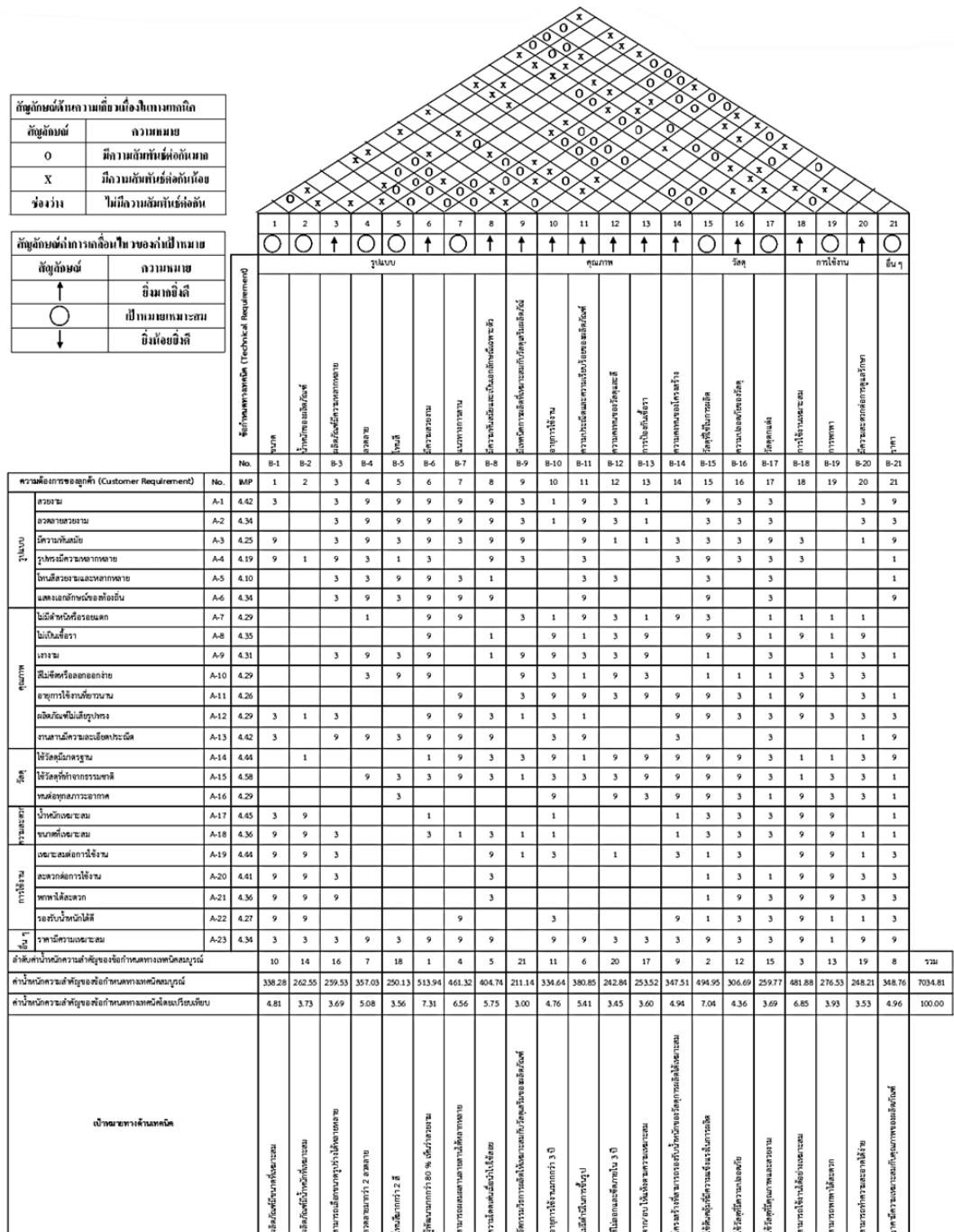
7) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ พบว่าจากการ ประยุกต์ใช้แผนภาพพาเรโตและหลักการ 80: 20 เพื่อ ช่วยในการคัดกรองข้อกำหนดที่ผู้ผลิตต้องให้ ความสำคัญ และใส่ใจลำดับต้น ๆ ในการออกแบบ ผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภา ประกอบด้วย ลำดับคะแนนลำดับแรก ๆ 15 ข้อ แสดงดังรูปที่ 6

4.2 ผลการประยุกต์เทคนิควิศวกรรมคันเซ

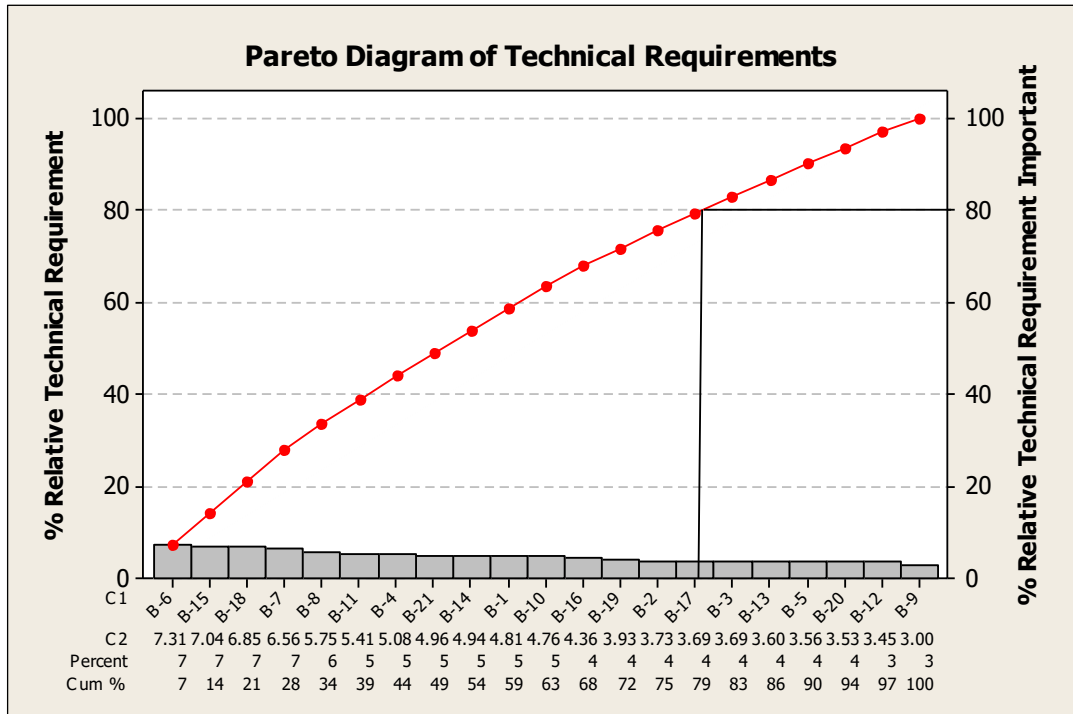
4.2.1 ผลการกำหนดกรอบด้านความรู้สึกที่มีต่อ ผลิตภัณฑ์ จากการสำรวจในกลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ กระเป๋าสะพายย่านลิเภาได้แสดงออกทางความ ต้องการด้านความรู้สึกสูงสุด 13 คำแสดงความรู้สึก จากทั้งหมด 28 คำแสดงความรู้สึก ซึ่งเป็นคำแสดง ความรู้สึกผ่านการคัดกรองจากผู้เชี่ยวชาญ พร้อมทั้ง ผ่านการประเมินโดยมีค่า IOC > 0.5 และตัดคำแสดง ความรู้สึก จำนวน 15 คำ เพราะพบว่าคำเหล่านั้นไม่ สัมพันธ์ถึงผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย

สัญลักษณ์ความหมายเชิงนิเวศวิทยา	
สัญลักษณ์	ความหมาย
O	มีลักษณะเด่นที่เด่นชัด
X	มีลักษณะเด่นที่เด่นชัด
ว่าง	ไม่มีลักษณะเด่นที่เด่นชัด

สัญลักษณ์การเคลื่อนย้ายของเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	มีแนวโน้ม
○	เป้าหมายระยะสั้น
↓	มีแนวโน้ม



รูปที่ 5 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสายย่างนา



รูปที่ 6 แผนภาพพาราโตสำหรับจัดลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ผลิตภัณฑ์กระเป๋ายานลิเกา

4.2.2 ผลการกำหนดความเกี่ยวเนื่องระหว่างความต้องการของลูกค้าต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จำนวนทั้งหมด 14 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และ 36 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย โดยคัดเลือกเฉพาะคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยทั้งหมดของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสำรวจข้อมูล คือ 4.30 จากนั้น นำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้มาระดมสมองเพื่อคัดกรองคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสายพานลิเกาโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่า คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดกรอง โดยมีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 9 คุณลักษณะ และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย 22

4.2.3 การคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ พบว่า ภาพผลิตภัณฑ์กระเป๋าสายพานในแต่ละคุณลักษณะมีความแตกต่างกันหลากหลายแบบ แต่เนื่องจากภาพตัวอย่างผลิตภัณฑ์มีจำนวนมากเกินไป จึงได้ดำเนินการคัดเลือกเพื่อให้เหลือเพียงภาพที่สามารถตอบโต้และควบคุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์ก่อนหน้าได้มากที่สุด จึงระดมสมองกับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ผลการระดมสมองสามารถ สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์กระเป๋าสายพานตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุด 5 ภาพ แสดงดังรูปที่ 7 โดยควบคุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ผ่านเกณฑ์ก่อนหน้าได้มากที่สุด จำนวน 11 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย



รูปที่ 7 ตัวแทนผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาที่ผ่านการคัดเลือก

4.2.4 ผลการแสดงถึงระดับคะแนนค่าเฉลี่ยของค่าแสดงความรู้สึกที่มีต่อภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 1 ดังนั้นผลการวิจัยสำหรับคะแนนค่าเฉลี่ยพบว่าในแต่ละค่าแสดงความรู้สึกเมื่อพิจารณาจากภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์แล้ว ค่าแสดงความรู้สึกนั้น ๆ มีความโดดเด่นในภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 คือ ผลจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (MCC^2) ของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย โดยเป็นค่าที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคะแนนค่าแสดงความรู้สึก จำนวน 13 ค่า และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ จำนวน 5 ภาพ แสดงดังตารางที่ 1 ผลการวิจัยสำหรับความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า MCC^2 มากกว่า 0.7 (เกณฑ์การยอมรับ) พบว่าความรู้สึกมีรสนิยมนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจนกับรูปที่ 3 โดยแสดงค่าเฉลี่ยร่วมกับค่า MCC^2 สูงสุด ($\bar{x} = 4.34$, $MCC^2 = 0.721$) ขณะที่ความรู้สึกการมีดีไซน์ก็มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจนกับรูปที่ 5 โดยแสดงค่าเฉลี่ยร่วมกับค่า MCC^2 สูงสุด ($\bar{x} = 4.46$, $MCC^2 = 0.734$) ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าแสดงความรู้สึกและภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 สามารถเป็นตัวแทนที่เด่นชัดที่

กลุ่มผู้บริโภคให้ความสำคัญในผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภา

นอกจากนี้ได้ค้นพบแบบจำลองทางสถิติในรูปแบบสมการถดถอย 2 สมการ แสดงดังสมการที่ 2 และสมการที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนในมิติความความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับองค์ประกอบเชิงกายภาพหรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 ($P < 0.05$) โดยตารางที่ 2 แสดงตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยของกระเป๋าสะพายย่านลิเภาทั้งหมด 22 ตัวแปร

$$\begin{aligned} \text{ดีไซน์เก๋} &= 2.38 + 0.705 x_2 - 0.328 x_3 \\ &+ 1.59 x_7 - 0.569 x_{11} + \\ &0.048 x_{14} + 1.39 x_{15} - 1.10 \\ &x_{17} + 0.931 x_{19} - 0.980 x_{21} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{มีรสนิยมน} &= 3.36 + 0.336 x_1 + 0.161 x_2 \\ &+ 0.164 x_3 + 0.236 x_4 + \\ &0.930 x_7 + 1.54 x_8 + 0.792 \\ &x_{10} + 0.777 x_{11} + 0.714 x_{13} \\ &+ 1.30 x_{14} - 1.88 x_{15} - 1.97 \\ &x_{16} + 0.020 x_{17} \end{aligned} \quad (3)$$

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย และค่า MCC^2 ของผลิตภัณฑ์

ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์	ภาพที่ 1		ภาพที่ 2		ภาพที่ 3		ภาพที่ 4		ภาพที่ 5	
ค่าแสดงความรู้สึก	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2
แข็งแรง	3.87	0.351	4.39*	0.444	4.27	0.537	4.28	0.414	3.91	0.529
แปลกใหม่	3.80	0.617	3.99	0.621	4.02	0.687	3.81	0.583	4.11*	0.630
สวยงาม	4.05	0.603	4.64*	0.637	4.28	0.673	4.11	0.599	4.09	0.603
ประทับใจ	4.09	0.669	4.21	0.632	4.31*	0.690	4.06	0.667	4.06	0.653
มีเสน่ห์	4.08	0.592	4.26	0.639	4.35*	0.572	4.11	0.653	4.01	0.660
สร้างสรรค์	4.47*	0.585	4.21	0.545	4.35	0.634	4.20	0.690	4.31	0.667
ทันสมัย	4.11	0.665	4.27	0.674	4.40*	0.660	4.13	0.530	4.13	0.611
ดีไซน์เก๋	4.02	0.520	4.05	0.689	4.39	0.609	3.95	0.667	4.46*	0.734***
โดดเด่น	3.99	0.568	4.20	0.776**	4.34	0.646	4.02	0.651	4.42*	0.600
เอกลักษณ์	4.22	0.597	4.52*	0.625	4.40	0.626	4.16	0.625	4.29	0.663
ประณีต	4.19	0.699	4.40	0.766**	4.28	0.658	4.51*	0.531	4.07	0.663
มีรสนิยม	4.16	0.898	4.32	0.904	4.34*	0.721***	4.19	0.717**	4.09	0.716**
น่าสนใจ	4.18	0.888**	4.31	0.929**	4.46*	0.676	4.08	0.686	4.09	0.725**

* แสดงค่าคะแนนเฉลี่ยระดับสูงสุด

** แสดงค่า MCC^2 มากกว่า 0.7*** แสดงค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า MCC^2 มากกว่า 0.7 (เกณฑ์การยอมรับ)

ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 สำหรับผลิตภัณฑ์กระเป๋าสายพานิลิภา แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ภาพที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบแยกส่วน (Partial Correlation Coefficient: PCC) และค่าความถูกต้องในการจำแนกหมวดหมู่ (Category Score: CS) [9] ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มากอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.05$) เมื่อเทียบกับภาพอื่น ๆ โดยเฉพาะในตัวแปรด้านรูปทรงผลิตภัณฑ์ ขนาดของสายสะพาย ขนาดของกระเป๋า และลวดลายการสาน มี

ผลกระทบทางบวกต่อความรู้สึกมีรสนิยมอย่างชัดเจน ส่งผลให้ภาพที่ 3 ได้รับการคัดเลือกเป็นต้นแบบแนวทางการออกแบบสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ เนื่องจากสามารถสะท้อนองค์ประกอบเชิงกายภาพหรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับความคาดหวังด้านความรู้สึกของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับหลักการออกแบบเชิงอารมณ์



ตารางที่ 2 ตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยของกระเป๋าสะพายข้างย่านลิเภา ทั้งหมด 22 ตัวแปร

ตัวแปร	ความหมาย
X_1	ลักษณะผลิตภัณฑ์แบบโค้ง
X_2	ลักษณะผลิตภัณฑ์แบบเหลี่ยม
X_3	ใช้สายโซ่ทำสายสะพาย
X_4	ใช้หนังทำสายสะพาย
X_5	ใช้ผ้าทำสายสะพาย
X_6	ใช้เชือกทำสายสะพาย
X_7	สายสะพายขนาดเล็ก
X_8	สายสะพายขนาดกลาง
X_9	สายสะพายขนาดใหญ่
X_{10}	กระเป๋าขนาดเล็ก
X_{11}	กระเป๋าขนาดปานกลาง
X_{12}	กระเป๋าขนาดใหญ่
X_{13}	ลวดลายการสานดั้งเดิม
X_{14}	ลวดลายการสานประยุกต์
X_{15}	กระเป๋าลักษณะข้างขยาย
X_{16}	กระเป๋าลักษณะก้นขยาย
X_{17}	กระเป๋าโทนสีอ่อน
X_{18}	กระเป๋าโทนสีทึบ
X_{19}	ใช้วัสดุสังเคราะห์เสริมบนผลิตภัณฑ์
X_{20}	ใช้วัสดุธรรมชาติเสริมบนผลิตภัณฑ์
X_{21}	น้ำหนักเบา
X_{22}	น้ำหนักปานกลาง



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 สำหรับผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภา

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ					คำแสดง		MCC ²
		PCC	P-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	P-Value	ความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์	ภาพแนวทางการออกแบบ	
1	รูปทรง	0.294	0.022	แบบโค้ง	0.336	0.010	มีรสนิยม		0.721
2	ขนาดสายสะพาย	1.035	0.000	ขนาดเล็ก	0.930	0.000	มีรสนิยม		0.721
				ขนาดกลาง	1.538	0.000			
3	ขนาดกระเป๋า	0.764	0.000	ขนาดเล็ก	0.792	0.000	มีรสนิยม		0.721
				ขนาดกลาง	0.777	0.000			
4	ลวดลายการสาน	1.167	0.012	ลายประยุกต์	1.299	0.004	มีรสนิยม		0.721

4.2.6 ผลการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย ย่านลิเภา เป็นการแปลงความต้องการของลูกค้าด้วย เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เพื่อการ ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย ย่านลิเภา พบว่าได้ข้อกำหนดทางเทคนิคด้านต่าง ๆ ส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้าน คุณภาพได้ 15 ข้อ เนื่องจากเทคนิค QFD เป็นเพียง การมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้า ผู้วิจัยจึง นำเทคนิควิศวกรรมคั่นเขมาสนับสนุนการวิเคราะห์ เพิ่มเติมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึง อารมณ์และความรู้สึกของลูกค้า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญใน การพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยสิ่งที่ได้คือข้อกำหนดในการ ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดย สามารถสื่อถึงอารมณ์และความรู้สึกของลูกค้าเข้าไป ในกระบวนการวิเคราะห์ จึงสามารถกำหนดข้อกำหนด เชิงคุณลักษณะที่สื่อถึงความรู้สึกมีรสนิยม พร้อมนำ

แรงบันดาลใจในการออกแบบ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ ตอบสนองความต้องการของลูกค้า จึงสามารถสรุป ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพาย ย่านลิเภาได้จำนวน 17 ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 19 ข้อ เนื่องจากมีข้อกำหนด 2 ประเด็นที่คล้ายกันคือ ลวดลายการสาน และขนาดของกระเป๋าสะพาย ดังนั้น จึงสามารถสรุปข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์ กระเป๋าสะพายจากย่านลิเภา จำนวน 17 ข้อกำหนด จากจำนวนทั้งหมด 19 ข้อกำหนด แสดงดังตารางที่ 4

จากนั้นได้เอาข้อกำหนดทางเทคนิคและ ข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะ รวม 17 ข้อข้างต้น ไปทำ การออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายจากย่านลิเภา โดยรูปแบบของผลิตภัณฑ์เพื่อรองรับการใช้งานที่ หลากหลาย ทั้งในด้านความสะดวกสบายและความ เหมาะสม มีรสนิยมเข้ากับสถานการณ์ต่าง ๆ และทำ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 8



ตารางที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายจากย่านลิเภา

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
ข้อกำหนดทางเทคนิคของเทคนิค QFD		
1	ผลิตภัณฑ์ที่มีความสวยงาม	ออกแบบที่มีความสวยงามในหลากหลายมิติ เกิดจากการใช้วัสดุธรรมชาติเพื่อส่งเสริมวัสดุในท้องถิ่น
2	วัสดุที่ใช้ในการผลิต	ขึ้นรูปโดยใช้วัสดุธรรมชาติที่มีความแข็งแรง มีลักษณะเหนียวและดูเป็นธรรมชาติ
3	การใช้งานเหมาะสม	มีลักษณะการใช้งานที่เหมาะสม เช่น มีการจัดเก็บได้ง่าย พกพาสะดวก เป็นต้น อีกทั้งมีการใช้งานที่เข้ากับโอกาส ต่าง ๆ และสามารถใช้สำหรับเป็นของฝากที่ระลึกได้อย่างเหมาะสม
4	แนวทางการสาน	มีลักษณะแนวการสานที่ผสมผสานกันอย่างลงตัว
5	ความทันสมัยและเป็นเอกลักษณ์	ออกแบบให้มีความทันสมัยและเป็นเอกลักษณ์ท้องถิ่น
6	ความประณีตและความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีสภาพเรียบร้อย ไม่มีตำหนิที่เกิดจากการขึ้นรูป
7	ราคาของผลิตภัณฑ์	มีการกำหนดราคาที่เหมาะสมตามต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยคำนึงถึงราคาของชิ้นส่วน ราคาวสดุตกแต่ง ให้อยู่ในเกณฑ์ราคาที่จับต้องได้และราคาที่เหมาะสม
8	ความคงทนของโครงสร้าง	มีการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการสานแบบทึบ ซึ่งอาจจะนำหยาบขุดมาขึ้นรูปโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ เพื่อสามารถที่จะรองรับน้ำหนักอย่างเหมาะสม
9	อายุการใช้งาน	มีการออกแบบที่สามารถใช้งานได้มากกว่า 3 ปี เนื่องจากย่านลิเภามีความแข็งแรง มีความเหนียว พร้อมทั้งมีการใช้วัสดุเคลือบผิวที่มีคุณภาพ
10	ความปลอดภัยของวัสดุ	การออกแบบใช้วัสดุที่มีคุณภาพ และปลอดภัยของผู้ใช้งาน
11	การพกพาของผลิตภัณฑ์	การออกแบบให้สามารถพกพาสะดวก และมีความกะทัดรัดที่สามารถเข้ากับโอกาสต่าง ๆ
12	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์	มีการเลือกใช้วัสดุหรือชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเหมาะสม ไม่เบาหรือหนักเกินไป เพื่อความเหมาะสมของการใช้งาน
13	วัสดุตกแต่ง	มีการใช้วัสดุตกแต่งเป็นหนังแท้ที่สวยงาม เพื่อสามารถตกแต่งผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายให้มีความสวยงามมากยิ่งขึ้น
14	ลวดลายของผลิตภัณฑ์	มีการเลือกใช้ลวดลายเป็นลวดลายดั้งเดิมผสมผสานกับลวดลายที่เกิดจากกลุ่มผู้ผลิตซึ่งมีความสวยงามเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์
15	ขนาดของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีขนาดกลาง โดยมีลักษณะทรงโค้ง ขนาด 4 x 8 x 10 นิ้ว เนื่องจากตอบโจทย์ตัวอย่างทำงานในช่วงอายุ 25-45 ปี และพัฒนาให้ต่างจากกระเป๋าสะพายทรงดั้งเดิม
16	รูปทรงของกระเป๋า	มีลักษณะภาพรวมเป็นรูปทรงโค้ง ให้ความรู้สึกน่าพกพา แตกต่างจากกระเป๋าสะพายแบบดั้งเดิม
17	ขนาดของสายสะพาย	ได้รับการออกแบบให้มี 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ สายหู้หัว และสายสะพายขนาดกลาง

กระเป๋าสะพายย่านลิเภาได้รับการออกแบบขนาดของสายสะพาย 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ สายหูก้าว และสายสะพายขนาดกลาง โดยรูปแบบดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับการใช้งานที่หลากหลาย ในด้านความสะดวกสบายและความเหมาะสมมีสนิมเข้ากับสถานการณ์ต่าง

กระเป๋าสะพายย่านลิเภาได้รับการพัฒนาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ด้านลวดลายที่มีความสร้างสรรค์ โดยการผสมผสานลวดลายดั้งเดิมกับลวดลายที่เกิดจากความคิดสร้างสรรค์ของกลุ่มผู้ผลิต



กระเป๋าสะพายย่านลิเภาได้รับการพัฒนาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดกลาง

รูปที่ 8 ผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภา

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการพิจารณาเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาได้ โดยนำข้อกำหนดทั้ง 13 ข้อ ในมิติต่าง ๆ ของกระเป๋าสะพาย ประกอบด้วย ความสวยงาม วัสดุที่ใช้ในการผลิต ความเหมาะสมในการใช้งาน แนวทางการสาน ความทันสมัยและเป็นเอกลักษณ์เฉพาะความประณีต ระดับราคา ความคงทนของโครงสร้างอายุการใช้งาน ความปลอดภัยของวัสดุ การพกพาของผลิตภัณฑ์ น้ำหนักที่เหมาะสม และวัสดุตกแต่งที่สวยงาม จากนั้นจึงทำการพิจารณาถึงข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่แสดงถึงอารมณ์ ความรู้สึกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์ต่อลูกค้ามากขึ้น โดยพบว่า

องค์ประกอบด้านความรู้สึกที่ลูกค้าให้ความสำคัญคือความรู้สึกมีสนิม ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความต้องการในเชิงภาพลักษณ์และการแสดงออกถึงตัวตนของลูกค้าที่ชื่นชอบผ่านการใช้งานผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีการออกแบบกระเป๋าสะพายให้มีลักษณะที่ตอบสนองต่อความรู้สึกดังกล่าว โดยปรับปรุงทรงของตัวกระเป๋าให้มีความโค้งมน เพื่อเสริมสร้างความนุ่มนวล และในส่วนของขนาดของสายสะพายถูกกำหนดให้มี 2 รูปแบบ ได้แก่ สายหูก้าว และสายสะพายขนาดกลาง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งาน พร้อมทั้งขนาดโดยรวมของกระเป๋าสะพายออกแบบที่มีขนาดกลาง ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในชีวิตประจำวัน อีกทั้งยังมีการเลือกใช้ลวดลายการสานแบบประยุกต์ เพื่อแสดง



ถึงความร่วมสมัยผสมผสานกับความเป็นเอกลักษณ์ของวัสดุและงานฝีมือ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาจากข้อกำหนดเทคนิคและข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะนี้จะสามารถช่วยให้ภาพรวมของกระเป๋าสะพายมีความโดดเด่นและสามารถถ่ายทอดความรู้สึกมีรสนิยมตามความต้องการเชิงอารมณ์ของกลุ่มลูกค้าเป้าหมายได้อย่างชัดเจน

ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ สอดคล้องกับงานวิจัยของได้มีการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ โดยมีค่าแสดงความรู้สึกที่ใช้ในการออกแบบ 3 คำหลัก คือ เรียบง่าย สร้างสรรค์ และสวยงาม ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟา ทั้งนี้มีค่าความพึงพอใจระดับดีมาก ในคุณลักษณะด้านรูปทรงหลากหลาย และด้านการใช้วัสดุจากธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [11] หลังจากนั้นได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD สำหรับออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชนขนมเปี๊ยะ พบว่าปัจจัยความต้องการที่ลูกค้าให้ความสำคัญ ประกอบด้วย วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีสินค้าให้เลือกหลายระดับราคา และช่วยยืดอายุการจัดเก็บขนม [12] ต่อมา มีการออกแบบเฟอร์นิเจอร์ไม้กลางแจ้ง ได้มีการเปลี่ยนแปลงในด้านรูปทรง ขนาด คุณภาพ และการใช้งาน [13] อีกทั้งการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับแปรงสีฟันไฟฟ้า [14] หลังจากนั้นมีการประยุกต์เทคนิควิศวกรรมคันเซในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องหนังกระเป๋าเป้สะพายหลังสำหรับผู้หญิง พบว่าสามารถกำหนดคุณลักษณะและออกแบบผลิตภัณฑ์ที่

สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคในกลุ่มของความรู้สึก 3 รูปแบบ คือ เรียบง่าย หูหรรษา และแปลกใหม่ [8] และได้ออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุจากวัสดุประกอบไม้พลาสติกด้วยวิศวกรรมคันเซ ผลการวิจัยพบว่า คุณภาพ ลูกเล่น ความสวยงาม ความสบายตาเพลิดเพลิน ไม่ซับซ้อน และความปลอดภัย สามารถเข้าถึงการตอบสนองทางอารมณ์ของผู้สูงอายุที่มีต่อผลิตภัณฑ์ได้ [15]

4.2.7 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์ หลังจากทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายย่านลิเภาแบบใหม่ แล้วนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของลูกค้าที่เป็นกลุ่มเป้าหมายเดิม เพื่อศึกษาระดับคะแนนความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า ลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านความประณีตและความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์มากที่สุด เป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 และมีความพึงพอใจด้านความรู้สึกมีรสนิยม โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.37

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นประยุกต์ใช้กระบวนการเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซเพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายจากย่านลิเภา เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า และสามารถลดข้อร้องเรียนจากลูกค้า โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบ คุณภาพ วัสดุ การใช้งาน และราคา โดยเฉพาะในด้านวัสดุที่ทำจากธรรมชาติที่สามารถสร้างความพึงพอใจมากที่สุด



เป็นอันดับแรก โดยรวมการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้าในรูปแบบข้อกำหนดเชิงเทคนิค จากนั้นนำวิศวกรรมคั่นเซมาสนับสนุนการวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้า ผลการวิเคราะห์เทคนิควิศวกรรมคั่นเซ พบว่า คำแสดงความรู้สึกมีรสนิยมนิยมมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายยานลิเกา โดยผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้ทำการออกแบบตามคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์คือ รูปทรงผลิตภัณฑ์ ขนาดของสายสะพาย ขนาดของกระเป๋า และลวดลายการสาน จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ซึ่งมีค่าคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านความประณีตและความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์มากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 และมีความพึงพอใจด้านความรู้สึกมีรสนิยมนิยม โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.37 ซึ่งผลลัพธ์จากการออกแบบและพัฒนากระเป๋าสะพายจากยานลิเกา กลุ่มผู้ผลิตยานลิเกา จะได้ใช้เป็นแนวทางสำหรับผลิตกระเป๋าสะพายจากยานลิเกาเพื่อการจำหน่ายในอนาคต ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้ก่อให้เกิดองค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานและเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากวัชพืชพื้นถิ่นอย่างยั่งยืนในอนาคต

สำหรับข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ของกลุ่มผู้ผลิตยานลิเกา กรณีศึกษาเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ เนื่องจากยุคสมัย เศรษฐกิจ สังคม และความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนไป ดังนั้นกลุ่มผู้ผลิตยานลิเกา สามารถทำซ้ำวิธีการได้เพียงในบางส่วนเท่านั้น ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการสอบถามสำรวจความต้องการ และข้อร้องเรียนของลูกค้า เพื่อระบุเป็นเสียงเรียกร้องของลูกค้า แต่ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลและการระดมสมองกับผู้เชี่ยวชาญหลายฝ่าย ด้านจำจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญร่วมเป็นที่ปรึกษา เพื่อสร้างความมั่นใจในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และน่าเชื่อถือ อีกทั้งปัจจุบันสามารถนำเอาปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาช่วยในการวิเคราะห์ความรู้สึกของผู้บริโภคและออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2565

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Keawwande, An application of quality function development technique for the design and development of leather products, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 2002.

- [2] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, Application of a quality function deployment technique to design and develop furniture products, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2012 34(6), 663-668.
- [3] R. Sinthavalai and S. Ruengrong, An application of house of quality (HOQ) for designing rice product as a souvenir, Naresuan University Journal: Science and Technology, 2018, 26(3), 36-51.
- [4] A. Thongrak and S. Sitjongsataporn, Kansei engineering: product development methodology, RMUTP Research Journal Sciences and Technology, 2014, 8(1), 197-204.
- [5] A.T. Pambudi, M.R. Suryoputro, and A.D. Sari, R.D. Kurnia, Design of lesehan chair by using Kansei engineering method and anthropometry approach, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 1-9.
- [6] S. Yodwangjai, Product design and development for dinner chair of Kansei engineering, KCU Engineering Journal, 2014, 41(2), 191-200.
- [7] J. Vieira, J.M. Osorio, S. Mouta, P. Delgado, A. Portinha, J. F. Meireles, and J.A. Santos, Kansei engineering as a tool for the design of in-vehicle rubber keypads, Applied Ergonomics, 2017, 61, 1-11.
- [8] S. Rawangwong, C. Homkhiew, T. Pirom, A.T. Kamnerdwam and T. Boonyaso, An application of Kansei engineering technique for the design and development of leather product: A case study of leather manufacturer, Muang District, Songkhla Province, Journal of Engineering and Innovation, 2022, 15(1), 144-156.
- [9] S. Yodwangjai, Product design and development process, Journal of Engineering and Innovation, 2015, 8(1), 131-142.
- [10] M. Nagamachi, Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development, Applied Ergonomics, 2002, 33(3), 289-294.
- [11] S. Rawangwong, J. Rodjananugoon, C. Homkhiew and A.T. Kamnerdwam, Products design of bamboo sofa set using quality function deployment technique with kansei engineering, Ladkrabang Engineering Journal, 2022, 39(3), 11-28.
- [12] T. Bupakdee and P. Pachonklaew, Packaging design for Chinese pastries of community products by applying quality function deployment, Journal of Learning Innovation and Technology, 2022, 2(1), 72-84.

- [13] O. Chi and W.A. Kuei-Yang, DFA-based wood frame furniture design using quality function deployment: A case study in school open spaces, International Conference on Chemical, Material and Food Engineering, Proceeding, 2015, 517-520.
- [14] J.-C. Woo, F. Luo, Z.-H. Lin and Y-T. Chen, Research on the sensory feeling of product design for electric toothbrush based on Kansei engineering and back propagation neural network, Journal of Internet Technology, 2022, 23(4), 863-871.
- [15] T. Ratanawilai, N. Samaehadee, W. Denjak and T. Boonyaso, Product design of elderly toy from wood plastic composites with kansei engineering, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 191-207.



การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ สองเฟสด้วยสัญญาณพัลส์บิลิเอ็มแบบไซน์

สถาพร เสือเทศ¹ และ ประสพโชค โห้ทองคำ^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: prasopchok.hot@rmutr.ac.th

วันที่รับบทความ: 9 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 1 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 8 กรกฎาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสด้วยสวิตช์สองทิศทางจำนวนทั้งหมด 8 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์ ไอจีบีที 2 ตัวและไดโอดกำลัง 2 ตัว เพื่อแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ค่าความถี่และขนาดคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสองเฟสทำมุมกัน 90 องศา สามารถปรับความถี่เอาต์พุตได้ที่ 12.5 เฮิร์ตซ์, 25 เฮิร์ตซ์ และ 50 เฮิร์ตซ์ รวมทั้งปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยการปรับอัตราการมอดูเลตที่ค่าเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ของสัญญาณพัลส์บิลิเอ็มแบบไซน์ (SPWM) ผลการทดสอบด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบในห้องปฏิบัติการกับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสพิกัด 1HP ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตที่มีการปรับความถี่เอาต์พุต นอกจากนั้นทำการทดสอบการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสในสภาวะไร้อโหลด พบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นด้วยสัญญาณพัลส์บิลิเอ็มที่มีค่าอัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.8 เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานในการใช้งานของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ผลการทดสอบระบบมีสมรรถนะที่ดีและสามารถใช้งานได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ ซึ่งเป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัย เพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในงานวิจัยลำดับต่อไป

คำสำคัญ: เอชทูเอชคอนเวอร์เตอร์; เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส; มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

Two-phase Induction Motor Drive with Two-phase Matrix Converter with Sinusoidal PWM

Sataporn Suathed¹ Prasopchok Hothongkham^{2*}

¹ Department of Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering, Rajmangala University of Technology Rattanakosin

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajmangala University of Technology Rattanakosin

* Corresponding author, E-mail: prasopchok.hot@rmutr.ac.th

Received: 9 October 2025; Revised: 1 May 2026; Accepted: 8 July 2026

Online Published: 20 August 2026

Abstract: This paper presents a two-phase induction motor drive system with a two-phase matrix converter. The proposed topology employs a total of eight bidirectional switches, each switch using a 2 IGBT–2 diode configuration. The converter is transformation a fixed frequency and amplitude single-phase AC supply into a variable frequency and amplitude two-phase AC output with a 90° phase difference, operating at variable frequencies of 12.5 Hz, 25 Hz, and 50 Hz, as well as adjustable modulation indices of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0, utilizing sinusoidal pulse width modulation (SPWM). The system was modeled and verified through MATLAB/Simulink simulations, after which a laboratory prototype was developed and tested with a two-phase induction motor rated at 1HP. The measured waveforms of the input and output for voltage and current are shown for the testing. Moreover, the testing of motor speed can be examined under no-load conditions that it increasing with the frequency of the SPWM at modulation index of 0.8 for verification this converter performance. These results verify the good performance of the proposed converter and provide a foundation for future improvements in efficiency through the development for the high performance in the future works.

Keywords: AC to AC Converter; Two-Phase Matrix Converter; Two-Phase Induction Motor



1. บทนำ

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีการวิจัยกันในปัจจุบันเป็นการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองขั้นตอน คือ จากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC-DC-AC Converter) โดยต้องมีวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (DC Link) ซึ่งทำให้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าบางส่วนในกระบวนการนี้ ซึ่งงานวิจัยมีการดำเนินการวิจัยหลายแนวทางที่เกี่ยวข้อง เช่น การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบแรก คือ แหล่งจ่ายเป็นสัญญาณไซน์จากการไฟฟ้า แบบที่สอง คือ ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ที่นำเสนอในงานวิจัย [1] โดยมีการควบคุมแบบ V/f ทำการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส และแบบที่สาม คือ ควบคุมให้กระแสขดลวดช่วยคงที่ ขณะที่กระแสขดลวดหลักปรับตามโหลดในงานวิจัย [2] นำเสนอการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ 2 เฟส โดยใช้สัญญาณพัลส์บลิเอ็มแบบ SVPWM ในการขับนำสวิตช์เพื่อลดค่ารีปเปิลของกระแสเอาต์พุตในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส ในงานวิจัย [3] นำเสนอทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ 2 เฟส และ 3 เฟส ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานวิจัย [4] นำเสนอหลักการของเทคนิคพีดับบลิเอ็มแบบใหม่ที่ใช้กับ Space Vector Modulation PWM (SVPWM) เพื่อใช้ขับสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถควบคุมด้วยการปรับค่ามอดูเลชัน โดยหลักการนี้ใช้ในการนี้แรงดันเอาต์พุตแบบไม่สมมาตร ในงานวิจัย [5] นำเสนอการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส แบบ

ไม่สมมาตร ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 4 กิ่ง โดยมีทั้งการจำลองและทำการทดลองจริง โดยใช้การควบคุมแบบเปิดและการควบคุมอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าและความถี่ (V/F) ในงานวิจัย [6] นำเสนอการใช้ SVPWM ในการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 4 กิ่ง เพื่อขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้การควบคุมแบบ V/F แบบลูเปิด ซึ่งเทคนิคนี้สามารถลดค่าความสูญเสียในการสวิตช์ได้ ในงานวิจัย [7] นำเสนอหลักการของสัญญาณพีดับบลิเอ็มแบบคลื่นพาหะไม่สมมาตรสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 4 กิ่ง ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้การควบคุมแบบลูเปิดและแบบ V/F ในงานวิจัย [8] มีการนำเสนอหลักการควบคุมของวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสที่มีการทำงานสองขั้นตอนโดยใช้ FPGA ควบคุมการทำงานเพื่อทดสอบกับโหลดแบบ RL และมอเตอร์ไฟฟ้า และระบบทั้งหมดยังคงต้องมีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองขั้นตอนอยู่ในงานวิจัย [9,10] มีการนำเสนอเทคนิคการมอดูเลตแบบใหม่เพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตสองเฟสแบบสมมาตรจากแรงดันอินพุตที่ไม่สมมาตร แม้ต้องใช้สวิตช์ที่ศทางเดียวจำนวนมาก แต่ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากการจำลองการทำงานให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสองเฟสมีความสมมาตรที่ดี ในงานวิจัย [11] นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่สามารถนำมาใช้งานด้วยการขับเคลื่อนด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ได้เป็นอย่างดีและพิจารณาคูณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสในเชิงคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมาใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ในงานวิจัย [12] นำเสนอการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบไม่สมมาตร



ที่ใช้วงจร AC-DC-AC Converter ในการขับเคลื่อนที่ใช้หลักการสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ USVPWM-DTC ที่นำมาใช้ในการควบคุมทอร์คของมอเตอร์ให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น เพื่อเป็นการลด Current Loop Control ลงและเพิ่มผลการตอบสนองที่ดีขึ้นของความเร็วรอบของมอเตอร์ งานวิจัยดังกล่าวที่ผ่านมาใช้วงจร AC-DC-AC Converter ในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองขั้นตอน ซึ่งทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดและจากโหลดกลับสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าต้องผ่านชุดวงจรเชื่อมโยงดีซี (DC-Link) ที่ใช้อุปกรณ์แบบพาสซีฟ (ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ) ในการเชื่อมโยงในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นการลดทอนประสิทธิภาพโดยรวมและสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในส่วนนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสด้วยวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสที่มีการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพียงขั้นตอนเดียวหรือการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง (Direct AC Conversion) เพื่อลดปัญหาดังกล่าวของระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ทำการวิจัยพัฒนาอยู่ ในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบโดยตรงนั้น วงจรคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยสวิตช์แบบสองทิศทางมาใช้ในวงจรเพียงอย่างเดียวจำนวน 8 ชุด ซึ่งควบคุมด้วยสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SPWM ที่สามารถปรับอัตราการมอดูเลตและความถี่ได้ วงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส เพื่อทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ซึ่งมีการจำลองและการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า

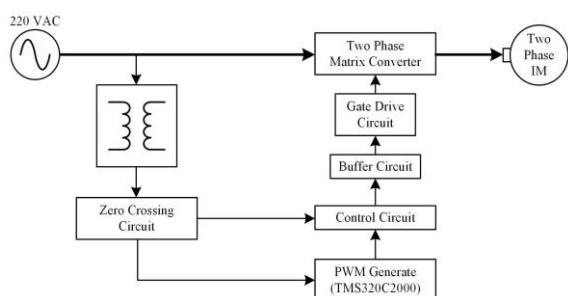
สองเฟส เพื่อเป็นการนำเสนอหลักการทำงานของระบบในเบื้องต้นเพื่อจะได้ทำให้เกิดการพัฒนางานวิจัยให้มีสมรรถนะและมีคุณภาพที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

2. วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส

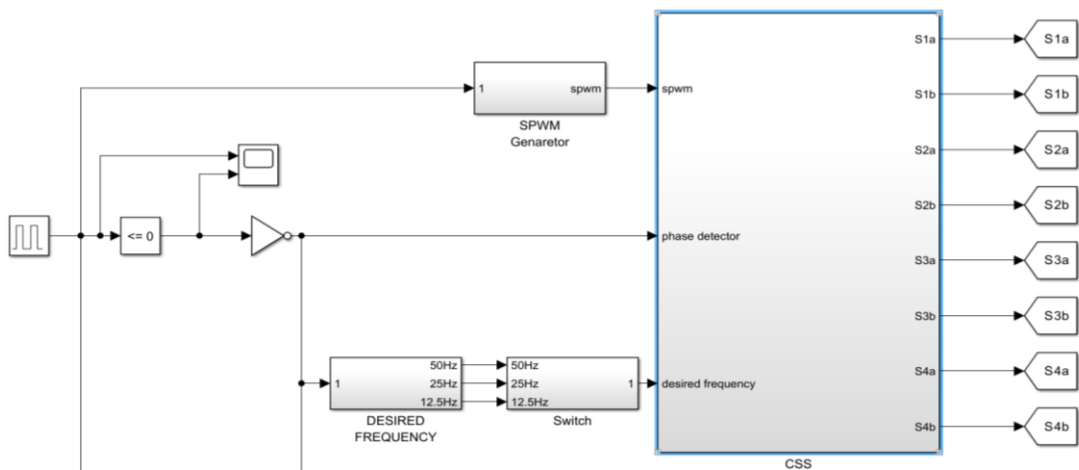
วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสมีโครงสร้างดังเสนอในงานวิจัย [13-15] ซึ่งสามารถออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีรายละเอียดในส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ (Zero Crossing Circuit)
- วงจรสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (Interrupt Circuit)
- วงจรควบคุม (Control Circuit)
- วงจรขับเกท (Gate Drive Circuit)
- วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส (Two-Phase Matrix Converter)

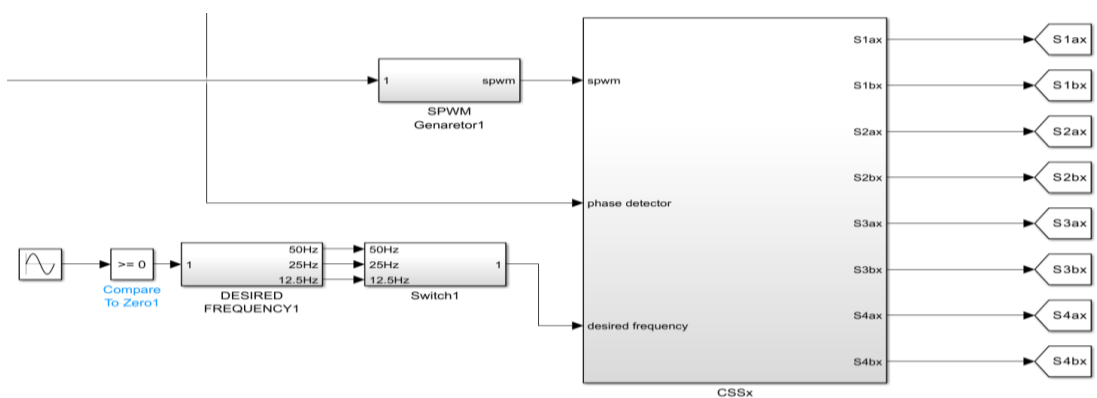
จากโครงสร้างในรูปที่ 1 สามารถทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส



สัญญาณับสวิตซ์สองทิศทางเฟส A

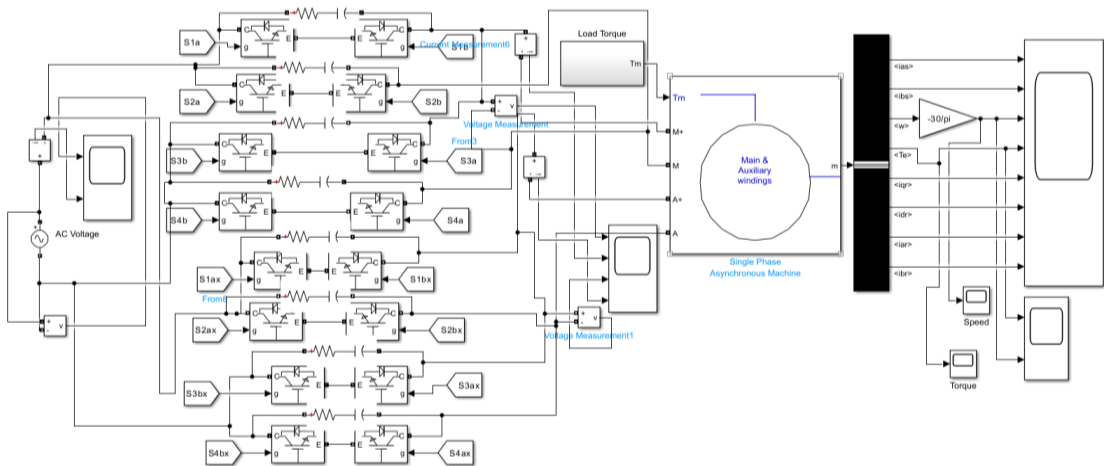


สัญญาณับสวิตซ์สองทิศทางเฟส B

รูปที่ 2 การสร้างสัญญาณ SPWM ที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทิศทาง

จากรูปที่ 2 เป็นส่วนของการสร้างสัญญาณเพื่อมาขับนำสวิตซ์สองทิศทางในแต่ละเฟส คือ เฟส A และเฟส B ส่วนในรูปที่ 3 เป็นลักษณะการเชื่อมต่อของสวิตซ์สองทิศทางทั้งเฟส A และเฟส B ซึ่งจากทั้ง 2

รูป เป็นการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจรต้นแบบจริงเพื่อทดสอบกับโหลดต่อไป



รูปที่ 3 วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส

2.1 สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Signals)

สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในการขับสวิตช์สองทิศทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสนั้นเป็นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบไซน์ซอชอยดอล (Sinusoidal PWM ; SPWM) มาจากการเปรียบเทียบของสัญญาณอ้างอิง (Reference signal) ที่เป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50Hz กับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณพาหะ (Carrier signal) ที่ค่าความถี่ 500Hz สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบไซน์สามารถปรับอัตราการมอดูเลตได้ที่ค่าเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 สัญญาณไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณไซน์ที่เฟส A จะมีค่ามุมเริ่มต้น ที่ 0 องศา ดังรูปที่ 4(ก) และสัญญาณไซน์ที่เฟส B จะมีการเลื่อนมุมเฟสไป 90 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4(ข) โดยเป็นไปตามสมการที่ (1) และสามารถปรับค่าความถี่และอัตราการมอดูเลตของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มได้ตามสมการที่ (2) และ (3) ซึ่งเป็นสัญญาณ SPWM ที่ใช้ในการขับสวิตช์สองทิศทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

สองเฟส เพื่อทำการตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับสองเฟสที่ใช้ในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองเฟส ซึ่งสวิตช์สองทิศทางที่ใช้จะมีจำนวน 2 ชุดๆ ละ 4 ตัว ประกอบด้วย ชุดเฟส A กับชุดเฟส B

$$v_a = V_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v_b = V_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{sine}} \quad (2)$$

โดยที่ m_f คือ อัตราการมอดูเลตทางความถี่

f_{tri} คือ ความถี่ของสัญญาณพาหะ

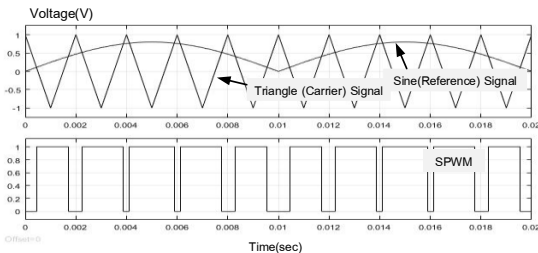
f_{sine} คือ ความถี่สัญญาณไซน์ซอชอยดอล

$$m_a = \frac{V_{m,sine}}{V_{m,tri}} \quad (3)$$

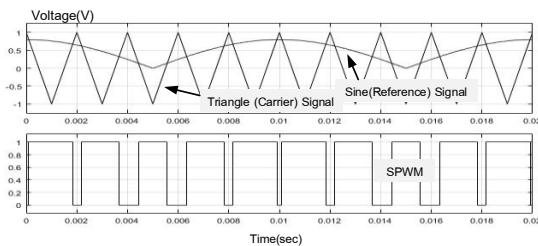
โดยที่ m_a คือ อัตราการมอดูเลตทางขนาด

$V_{m,tri}$ คือ แรงดันยอดของสัญญาณพาหะ

$V_{m,sine}$ คือ แรงดันยอดสัญญาณไซน์ซอชอยดอล

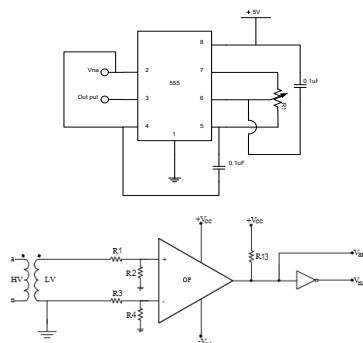


(ก) สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับสวิตช์สองทางเฟส A



(ข) สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับสวิตช์สองทางเฟส B

รูปที่ 4 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SPWM

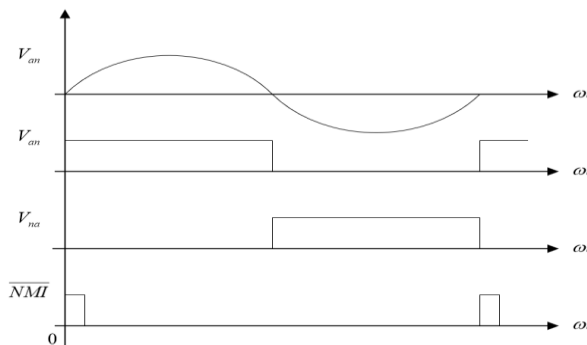
รูปที่ 5 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าตัดผ่านศูนย์
(Zero Crossing Voltage Detector)

2.2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ (Zero Crossing Voltage Detector Circuit)

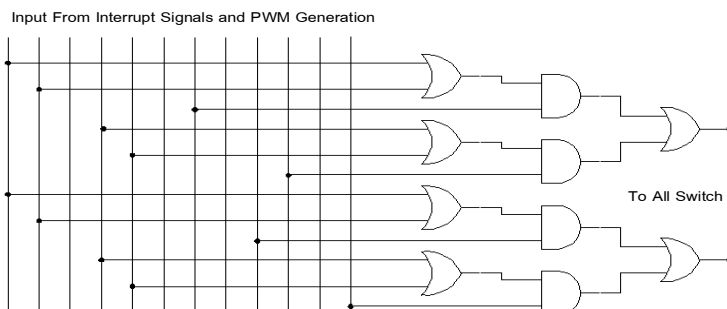
ส่วนของวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์จะทำหน้าที่แยกกราวด์และตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ โดยที่วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ของไฟเอชี่ไลน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยสัญญาณไฟเอชี่ที่ได้จากการลดระดับลงมาแล้วจากวงจรแยกกราวด์มาผ่านวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะได้สัญญาณพัลส์ที่มีความสัมพันธ์กับไฟเอชี่ไลน์และสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบจะนำไปเป็นสัญญาณอินพุตให้แก่วงจรโมนอสเตเบิล เพื่อให้ได้สัญญาณอินเตอร์รัพท์ที่มีสำคัญส่งไปยังไมโครโปรเซสเซอร์ต่อไป

2.3 วงจรสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (Interrupt Circuit)

การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อใช้ในวงจรเมตริกคอนเวอร์เตอร์สองเฟสนั้น เริ่มต้นของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแต่ละชุดจะต้องเริ่มจากตำแหน่งศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต ซึ่งเป็นการทำงานในลักษณะที่ซิงโครไนซ์กัน นั่นคือ ทำให้เฟสของแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตรงกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดการซิงโครไนซ์ขึ้น ซึ่งจำเป็นจะต้องทำการสร้างสัญญาณเพื่อทำการอินเตอร์รัพท์ให้กับไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อให้เริ่มสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ณ ตำแหน่งศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต โดยสัญญาณอินเตอร์รัพท์ที่ใช้เป็นการอินเตอร์รัพท์แบบสำคัญสูง (Non-maskable Interrupt : $\overline{NMI}$) สัญญาณอินเตอร์รัพท์ $\overline{NMI}$ นี้จะถูกสร้างโดยใช้วงจรโมนอสเตเบิล (Monostable Circuit) แสดงสัญญาณอินเตอร์รัพท์ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 สัญญาณอินเทอร์รัพท์ที่ได้มาจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 7 วงจรลอจิกที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละชุดในเฟส A และเฟส B

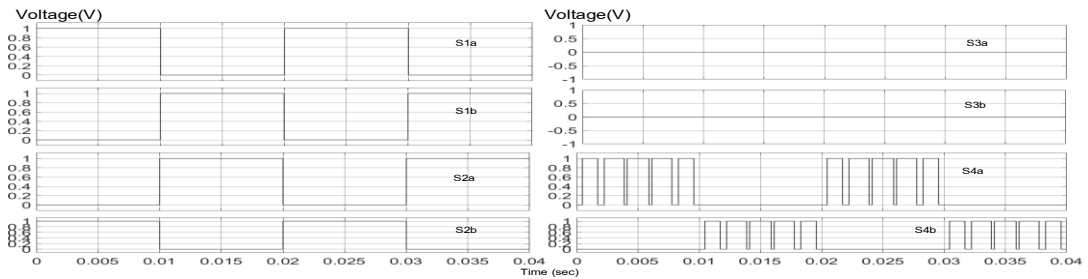
2.4 วงจรควบคุม (Control circuit)

วงจรควบคุมจะทำหน้าที่นำสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่สร้างจากไมโครโปรเซสเซอร์มาทำการผสมกันเพื่อให้ได้สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสให้ทำงานตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณ SPWM และสัญญาณอินเทอร์รัพท์เป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรควบคุมนี้ ซึ่งเป็นวงจรในส่วน of CSS/CSSx ที่แสดงในผังรูปที่ 1 ในส่วนของ Control Circuit เป็นการควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control) ที่วงจรประกอบด้วยวงจรลอจิกที่ทำการผสมสัญญาณแสดงดังรูปที่ 7 เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณเอาต์พุตไปควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทางทั้งเฟส

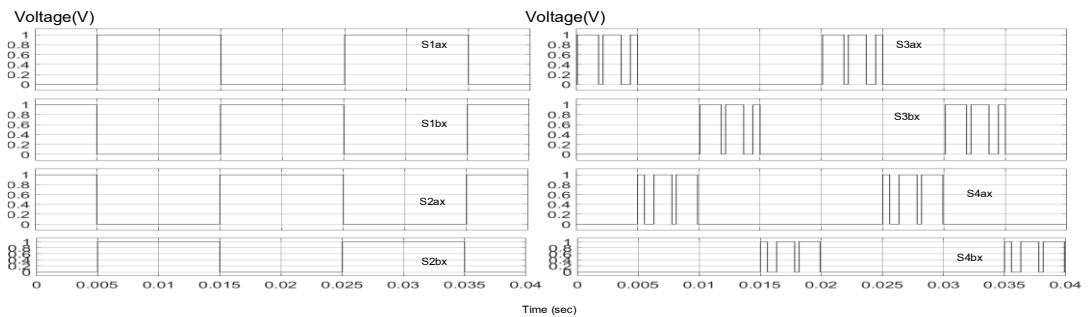
A และเฟส B ในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสต่อไป โดยมีลักษณะสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ควบคุมสวิตช์สองทั้ง 8 ชุด ทั้งสองเฟสแสดงรูปคลื่นได้รูปที่ 8

2.5 วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส (Two-Phase Matrix Converter)

วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสทำหน้าที่ตัดต่อแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีค่าความถี่และระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ โดยใช้สวิตช์สองทิศทางทั้งหมด 8 ชุด โดยที่สวิตช์ทั้ง 8 ชุดนั้น จะสลับการทำงานกันคือ 4 ชุดแรกเป็นเฟส A จะทำงานที่มุม 0 องศาส่วน 4 ชุดหลังเป็นเฟส B จะมีมุมเลื่อนเฟสไป 90 องศา โดยมีลักษณะการต่อของวงจรดังรูปที่ 9

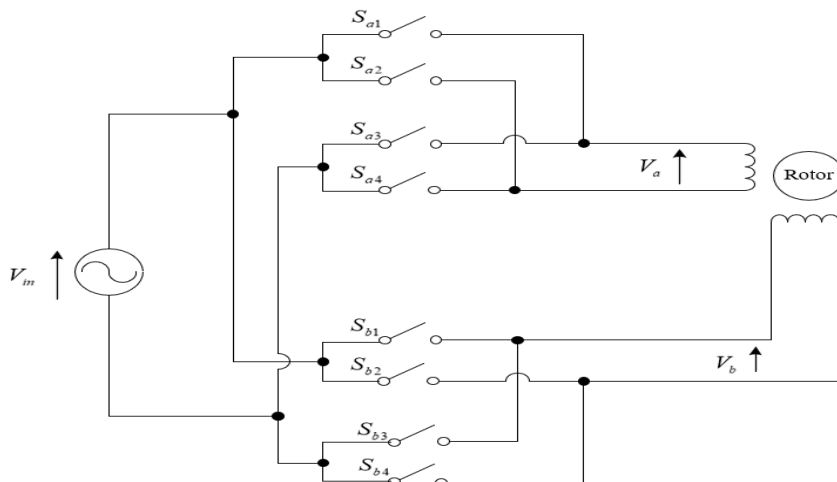


(ก) สัญญาณไฟดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับสวิตช์สองทางเฟส A



(ข) สัญญาณไฟดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับสวิตช์สองทางเฟส B

รูปที่ 8 สัญญาณไฟดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับสวิตช์สองทางทั้งสองเฟสที่ความถี่ 50 Hz อัตราการมอด 0.8

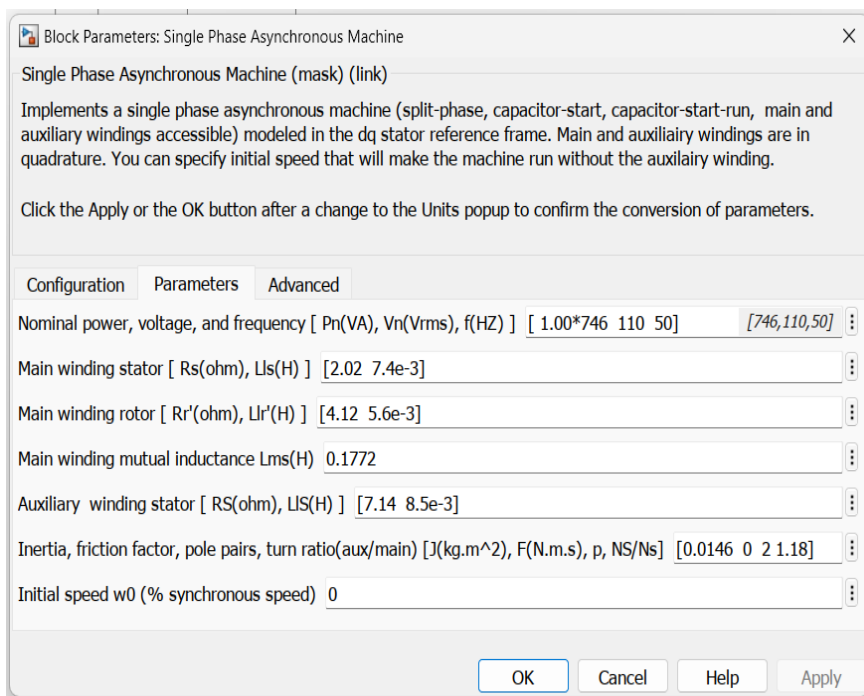


รูปที่ 9 ลักษณะการต่อของสวิตช์สองทิศทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส

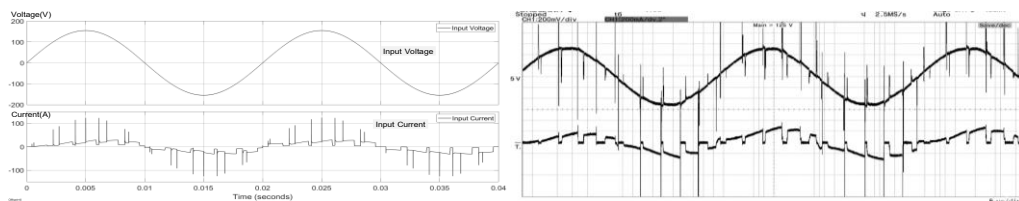
3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การจำลองและการทดสอบวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสเท่ากับ 100Vrms, ความถี่ 50Hz และใช้สัญญาณพัลส์บิลิเอ็มแบบไซน์ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 9 สัญญาณพัลส์บิลิเอ็มแบบ SPWM ที่ใช้สามมรตปรับอัตราการมอดูเลตได้ที่ค่าเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ใช้ความถี่สวิตช์เท่ากับ 500 Hz และมีค่าความถี่เอาต์พุตของวงจรที่ค่าเท่ากับ 12.5Hz, 25Hz, และ 50Hz (ในการกำหนดค่าความถี่ให้มีค่าดังกล่าวเนื่องจากสามารถสร้างและปรับค่าความถี่ได้สะดวก

เพราะได้มาจากการหารค่าความถี่จาก 50Hz ลงมาตามอัตราส่วน ซึ่งสามารถดำเนินการได้อย่างง่ายและสะดวกในการสร้าง) สามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ทำการจำลองและทำการทดสอบกับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ใช้เป็นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าหนึ่งเฟสมาทำการดัดแปลง โดยมีพิกัดเท่ากับ 1Hp และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสามารถแสดงดังรูปที่ 10) มีค่าความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 12.5Hz, 25Hz, และ 50Hz ตามลำดับ สามารถแสดงดังรูปที่ 11 และ 12

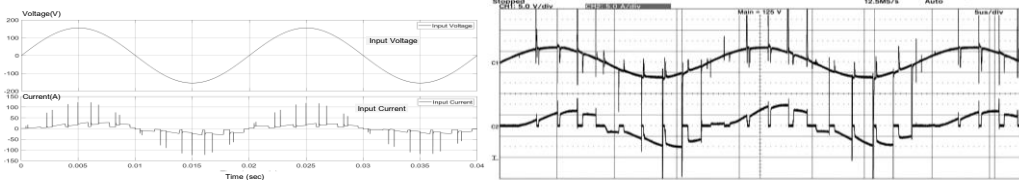


รูปที่ 10 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สองเฟสแบบไม่สมมาตร



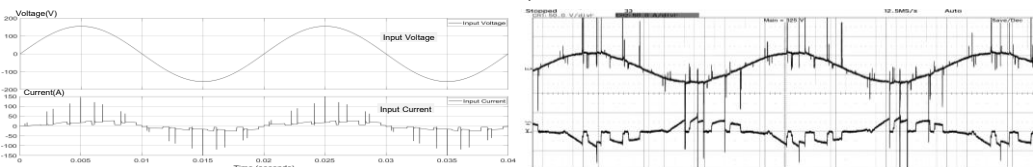
(Top: Voltage [100V/div], Bottom: Current [1A/div])

(ก) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 12.5Hz



(Top: Voltage [100V/div], Bottom: Current [1A/div])

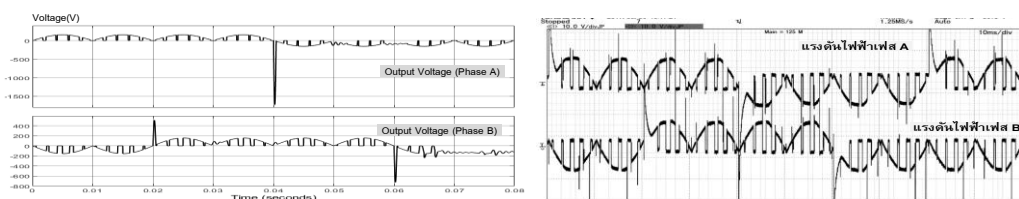
(ข) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 25Hz



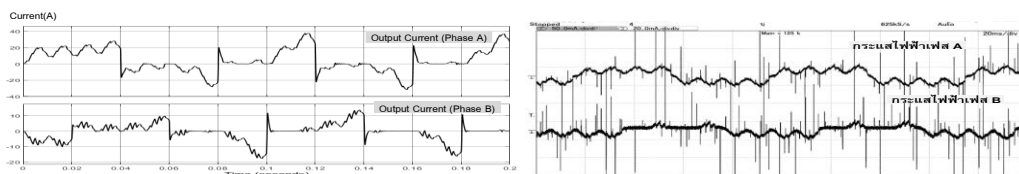
(Top: Voltage [100V/div], Bottom: Current [1A/div])

(ค) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 50Hz

รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตที่ความถี่เอาต์พุตต่างๆ จากการจำลองและการทดสอบ



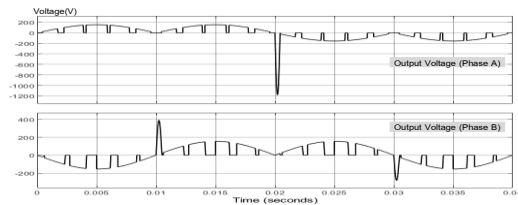
แรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B (50V/div)



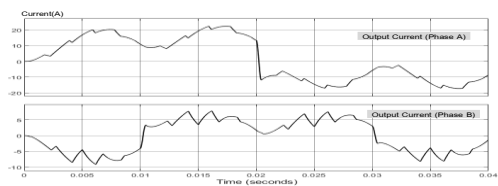
กระแสไฟฟ้าเฟส A และ B (1A/div)

(ก) ความถี่ 12.5 Hz

รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่ความถี่เอาต์พุตต่างๆ จากการจำลองและการทดสอบ

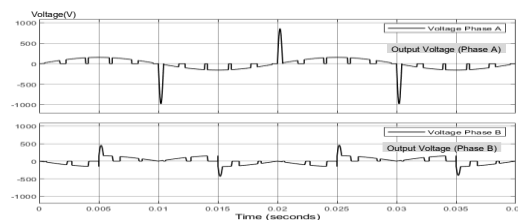
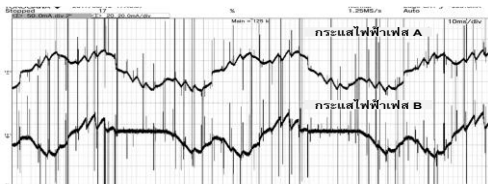
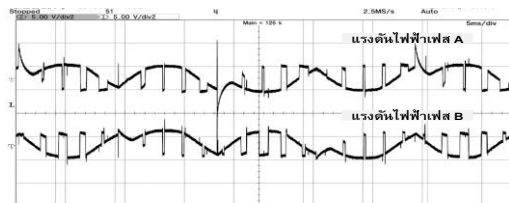


แรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B (50V/div)

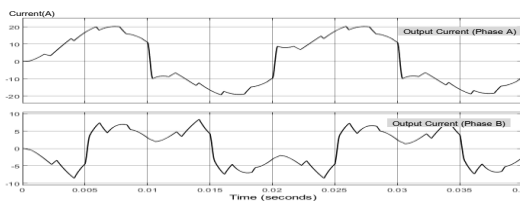


กระแสไฟฟ้าเฟส A และ B (1A/div)

(ข) ความถี่ 25 Hz

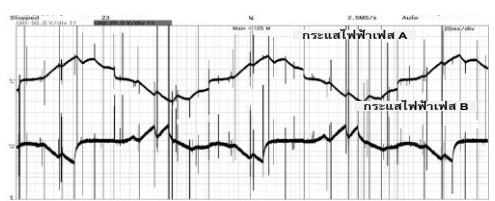
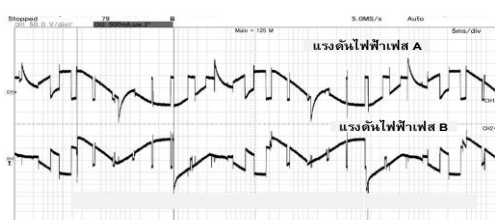


แรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B (50V/div)



กระแสไฟฟ้าเฟส A และ B (1A/div)

(ค) ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 12 (ต่อ)

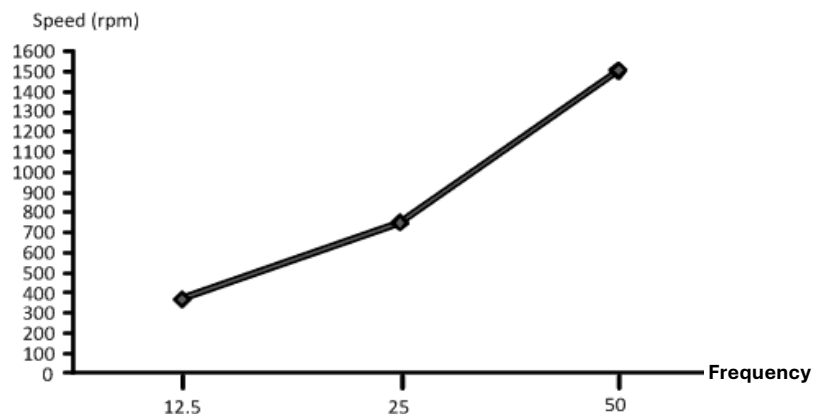


จากรูปที่ 13 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสที่สัญญาณพีดับบลิวเอ็มมีค่าอัตราการมอดเทเท่ากับ 0.8 และมีค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ (V/f control) ตามตารางที่ 1 พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการปรับความเร็วรอบของ

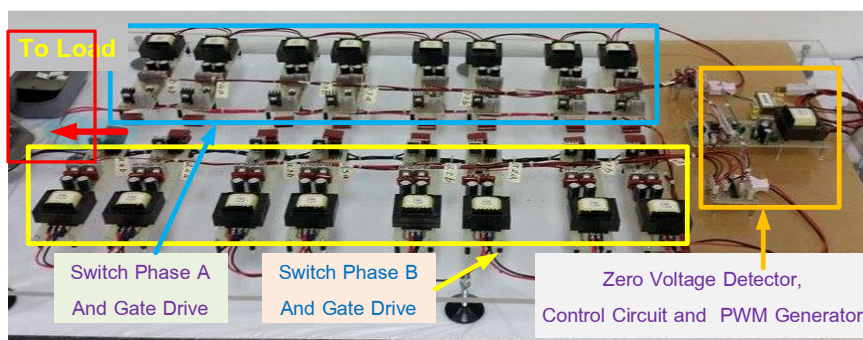
มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสได้ โดยวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสต้นแบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับค่าความถี่

Frequency (Hz)	Output Voltage (rms)
12.5	24.52
25	26.38
50	95.76



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ



รูปที่ 14 วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสเครื่องต้นแบบ



4. สรุปผล

จากการทดสอบการทำงานของระบบ พบว่าจากการจำลองและทดสอบวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสที่รับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายอินพุตจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยใช้สวิตช์สองทาง (Bi-directional Switches) ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยได้ทำการทดสอบกับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสที่มีการตัดแปลงมาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าหนึ่งเฟสให้มีหลักการทำงานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบสองเฟส วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสสามารถปรับความถี่เอาต์พุตได้ที่ค่า 12.5Hz, 25Hz และ 50Hz เนื่องจากการสร้างความถี่ค่าดังกล่าวกระทำได้ง่ายในการสร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสด้วยสภาวะไร้อะไรโหลด พร้อมกับสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสได้ โดยการปรับความถี่ของสัญญาณพัลส์แบบลิวเอ็มแบบ SPWM ที่ใช้ควบคุมสวิตช์สองทิศทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟส โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสทำงานในสภาวะไร้อะไรโหลด เพื่อเป็นการทดสอบให้เป็นไปตามหลักการเบื้องต้นที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยผลการทดลองได้ผลเป็นที่น่าพอใจทั้งจากการจำลองและการทดสอบ แต่งานวิจัยนี้ยังพบข้อต่อที่ต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาวงจรต้นแบบ เช่น ดำเนินการลดค่าฮาร์โมนิกของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าหรือค่าสไปร์คที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการออกแบบวงจรกรองทางด้านอินพุต (Input Filter) และดำเนินการออกแบบวงจรสับเบอ์ให้เหมาะสม เพื่อเป็นการลดและแก้ปัญหาดังกล่าวของการทำงานของวงจรที่นำมาใช้ใน

การแปลงผันพลังงานไฟฟ้าให้ลดลงเป็นที่น่าพอใจและยอมรับตามมาตรฐานสากล ซึ่งตามหลักการของการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงต้องมีการดำเนินการออกแบบเพิ่มเติมต่อไป โดยข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการศึกษาและวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะสนับสนุนการพัฒนางานวิจัยที่จะดำเนินการในขั้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ (ววน. 2567) สัญญาเลขที่ FRB6725/2567 รหัสโครงการ 192866 ปีงบประมาณ 2567

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Charumit, Carrier-based unbalanced phase voltage space vector PWM strategy for asymmetrical parameter type two-phase induction motor drives, Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, 2009.
- [2] J. Sinthusonthichat. and V. Kinnares, Performance evaluation of variable speed control of two-phase induction motors, International Conference on Power System Technology (PowerCon 2002), Proceeding, 2018, 2565-2568.

- [3] D. Jang and D. Yoon, Space-vector PWM technique for two-phase inverter-fed two-phase induction motors, IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2), 542-549.
- [4] F. Blaabjerg, F. Lugeanu, K. Skaug, and M. Tonnes, Two-phase Induction Motor Drive Low-cost topologies for TPIM drives in industrial applications, IEEE on Industry Applications Magazine, 2004, 10, 24–32.
- [5] V. Kinnarees and C. Charumit, Modulating functions of space vector PWM for three-leg VSI-fed unbalanced two-phase induction motor, IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4), 1135-1139.
- [6] Y. Kumsuwan, W. Srirattanawichaikul, S. Premrudeepreechacharn, and H.A. Toliyat, A four-leg voltage source inverter fed asymmetrical two-phase induction motor drives, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), Proceeding, 2010, 1-6.
- [7] H. Golwala and R. Chudamani, A modified three-dimensional space vector based PWM method for four-leg voltage source inverter fed asymmetrical two-phase induction motor, IEEE PEDS 2011, Proceeding, 2011, 573-578.
- [8] Y. Kumsuwan, S. Premrudeepreechacharn, and V. Kinnarees, A carrier-based unbalanced PWM method for four-leg voltage source inverter fed unsymmetrical two-phase induction motor, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2013, 60(5), 2031-2041.
- [9] O. Hock, J. Koscelnik, S. Kascak, and R. Havrila, Control of the two-stage two-phase matrix converter using a field programmable circuit, International Conference on Applied Electronics, Proceeding, 2013, 1-4.
- [10] A. Salimi, M. Esmaeili, A.M. Sati, H. Ziar, and E. Afjei, A Simple and Novel Modulation Technique used to Produce Two-Phase Symmetric Output from Two-Phase Asymmetric Input, 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion System (ECPECS), Proceeding, 2011, 1-5
- [11] M. Khan, M. Ahsan, Development and Performance Analysis of a Two-Phase Induction Motor in the Frame and Core of a Single-Phase Induction Motor, International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE 2014), Proceeding, 2014, 469-472.

- [12] W. Piyarat and V. Kinnarees, High performance unsymmetrical two-phase induction motor drive with direct torque control based on unbalanced SVPWM technique, IEEE Access, 2024, 12, 176895–176907.
- [13] P. Hothongkham, K. Poomphochana, Simulation and test of a two-phase matrix converter for the two-phase induction motor drive, Electrical Engineering Conference (EECON43), Proceeding, 2020, 194-197. (in Thai)
- [14] S. Sawangkla, P. Hothongkham, and F. Cheevasuvit, Performance evaluation of the two-phase matrix converter circuit tested with the passive loads, 16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024), Proceeding, 2024, 169-172. (in Thai)
- [15] P. Hothongkham, S. Sawangkla, and F. Cheevasuvit, Asymmetrical two-phase induction motor drive with two-phase matrix converter, 16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024), Proceeding, 2024, 173-176. (in Thai)



ผลของน้ำมันธรรมชาติต่อความคงสภาพเชิงออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับสารแคนนาบีไดออลสูงภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน

เบญจมาภรณ์ ล้อมลาย¹ สุภาภรณ์ พันวิสัย² และธรรมบุญ ทวีชัย^{2*}

¹ องค์การเภสัชกรรม, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

² ฝ่ายวิชาการ, วิทยาลัยบูรณาการศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thammanoon.tha@ku.th

วันที่รับบทความ: 14 พฤษภาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 1 กรกฎาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 31 กรกฎาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: น้ำมันกัญชาตำรับสารแคนนาบีไดออลสูง (High Cannabidiol) มีองค์ประกอบสำคัญทั้งสารแคนนาบินอยด์และน้ำมันตัวพาซึ่งสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้เมื่อได้รับปัจจัยกระตุ้นระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะความร้อน แสง และออกซิเจนที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำมันจากธรรมชาติ 3 ชนิด ในการช่วยคงสภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาจากสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ น้ำมันเมล็ดผักชี น้ำมันกระเทียม และน้ำมันมะรุม โดยเปรียบเทียบกับวิตามินอี และสูตรควบคุมที่ใช้ น้ำมันงา โดยเติมน้ำมันธรรมชาติชนิดต่างๆ ลงในผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาที่ความเข้มข้น 20-80%w/w จากนั้นนำไปศึกษาความคงสภาพในสภาวะเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 14 วัน เปรียบเทียบกับกลุ่มเริ่มต้นที่ไม่ผ่านสภาวะเร่ง (Initial) จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Acidity Value: AV) ปริมาณเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value: PV) วิธีทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอช (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl: DPPH) และตรวจสอบปริมาณสารสำคัญสารแคนนาบีไดออล (Cannabidiol: CBD) ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-Performance Liquid Chromatography: HPLC) ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของน้ำมันมีผลต่อค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกสูตร ($p < 0.05$) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน สูตรน้ำมันกระเทียมและวิตามินอีมีแนวโน้มค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่าสูตรควบคุมน้ำมันงา ขณะที่สูตรน้ำมันมะรุมมีค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสะท้อนการเกิดออกซิเดชันที่มากขึ้น ผล DPPH พบว่าสูตรน้ำมันผักชีมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด ($IC_{50} = 0.20\% \text{ v/v}$) รองลงมาคือสูตรน้ำมันกระเทียม ($IC_{50} = 0.61\% \text{ v/v}$) ส่วนสูตรน้ำมันมะรุมและวิตามินอีอยู่ในระดับปานกลาง ($IC_{50} = 0.74\% \text{ v/v}$) และสูตรควบคุมน้ำมันงามีค่า IC_{50} สูงสุด ($1.54\% \text{ v/v}$) แสดงถึงการมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระที่น้อยที่สุด โดยสรุปน้ำมันเมล็ดผักชีและน้ำมันกระเทียมมีศักยภาพในการเป็นสารช่วยเพิ่มความคงสภาพของน้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบีไดออลสูงได้

คำสำคัญ: น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบีไดออลสูง; น้ำมันธรรมชาติ; แคนนาบีไดออล; สารต้านอนุมูลอิสระ

Effects of Natural Oils on the Oxidative Stability of a High Cannabidiol Cannabis Oil Formulation under Accelerated Thermal Conditions

Benjamaporn Lomlai¹, Supaporn Phanwilai² and Thammanoon Thaweechai^{2*}

¹ Government Pharmaceutical Organization (GPO), Bangkok, Thailand

² Academic Affairs Division, School of Integrated Science, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: thammanoon.tha@ku.th

Received: 14 May 2026; Revised 1 July 2026; Accepted: 31 July 2026

Online Published: 20 August 2026

Abstract: High Cannabidiol cannabis oil formulations contain both Cannabinoids and carrier oil which may undergo chemical changes when exposed to stress factors during storage, particularly heat, light, and oxygen. This study aimed to investigate the effects of three natural oils with antioxidant properties on the stability of High Cannabidiol cannabis oil formulations Coriander seed oil (CC) Garlic oil (CG) and Moringa oil (CM) in comparison with Vitamin E (CE) and a control formulation containing Sesame oil (CS). Each oil was incorporated into the Cannabis oil formulation at concentrations of 20–80% w/w. The samples were then subjected to accelerated thermal stress at 70°C for 14 days (Thermal) and compared with untreated initial samples (Initial). The stability of the formulations was evaluated based on Acidity Value Peroxide Value Antioxidant activity using the DPPH radical scavenging assay, and Cannabidiol (CBD) content determined by high-performance liquid chromatography (HPLC). The results showed that oil concentration significantly affected Acidity Value and Peroxide Value in all formulations ($p < 0.05$). Under thermal stress, the Garlic oil (CG) and vitamin E (CE) formulations tended to exhibit lower Acidity Value and Peroxide Value the values than the control formulation, indicating greater oxidative resistant properties. The DPPH radical-scavenging assay demonstrated that the Coriander seed oil exhibited the highest antioxidant activity, with an IC_{50} value of 0.20% v/v, followed by the garlic oil formulation, with an IC_{50} value of 0.61% v/v. The Moringa oil and Vitamin E formulations showed moderate antioxidant activity, with IC_{50} values of 0.74% v/v, whereas the Sesame oil control formulation exhibited the highest IC_{50} value of 1.54% v/v, indicating the lowest antioxidant activity. Overall, Coriander seed oil and Garlic oil demonstrated promising potential as natural stabilizing agents for enhancing the oxidative stability of High Cannabidiol cannabis oil formulations.

Keywords: High Cannabidiol cannabis oil formulation; Natural oil; Cannabidiol; Antioxidants

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาทางการแพทย์เป็นตำรับที่ประกอบด้วยสารสำคัญในกลุ่มแคนนาบินอยด์และน้ำมันพืชซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพา สามารถใช้บรรเทาอาการอักเสบของแผล ลดความเจ็บปวด และลดอาการชักเกร็งได้ ปัจจุบันองค์การเภสัชกรรมได้ดำเนินการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาทางการแพทย์จำนวน 4 ตำรับ และได้รับทะเบียนผลิตภัณฑ์ยาสมุนไพรจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา โดยหนึ่งในตำรับสำคัญ คือ น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอลลสูง ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ สารสำคัญจากกัญชา สารออกฤทธิ์แคนนาบิไดโอลล (Cannabidiol: CBD) และน้ำมันตัวพา (Carrier Oil) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายซึ่งทั้งสองส่วนประกอบนี้เป็นสารจากธรรมชาติ จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีเมื่อเก็บรักษาในระยะเวลาหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสัมผัสกับปัจจัยกระตุ้น [1, 2] เช่น แสง ความร้อน หรือออกซิเจน ที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนำไปสู่การเกิดกรดไขมันอิสระ รวมถึงผลิตภัณฑ์ออกซิเดชันระยะเริ่มต้น ส่งผลให้คุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง [3, 4]



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอลลสูง

การเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ยอมรับเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กลุ่มน้ำมัน อย่างไรก็ตาม การใช้สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์อาจก่อให้เกิดผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ต่อผู้บริโภค ก่อให้เกิดพิษและอาจเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง [4] การเลือกใช้สารต้านออกซิเดชันจากธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและปลอดภัย โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาจากสมุนไพร ซึ่งต้องการรักษาความเป็นธรรมชาติและสอดคล้องกับแนวทางของยาสมุนไพร

งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้น้ำมันธรรมชาติ ได้แก่ กระเทียม [5] เมล็ดผักชี [6] และมะรุม [7] ซึ่งมีรายงานว่ามีการต้านอนุมูลอิสระที่สามารถออกฤทธิ์ด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีเป้าหมายเพื่อประเมินศักยภาพและความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำมันจากธรรมชาติเหล่านี้ในการชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอลลสูงเพื่อให้ได้ข้อมูลประกอบการพัฒนาตำรับน้ำมันกัญชาที่มีความคงสภาพสูงขึ้น และเพิ่มอายุการเก็บ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาที่ผสมน้ำมันธรรมชาติ

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาที่ผสมน้ำมันธรรมชาติ (รูปที่ 1) เพื่อใช้ในการศึกษาความคงสภาพในสภาวะเร่งด้วยความร้อนในงานวิจัยนี้เตรียมได้จากการผสมน้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอลลสูงที่มีความเข้มข้นของ เท่ากับ 100 mg



ของสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ใน น้ำมันตัวพา 1 mL (% Labeled Amount = 106.73%) เข้ากับน้ำมันธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันกระเทียม (CG) น้ำมันเมล็ดผักชี (CC) และ น้ำมันมะรุม (CM) ที่ความเข้มข้นของน้ำมันธรรมชาติเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80% w/w ตามลำดับ (ตามตัวอย่างการเตรียมในตารางที่ 1) โดยเปรียบเทียบกับสารเติม Vitamin E (CE) ที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน และการเติมน้ำมันงา (CS) ที่ความเข้มข้นเดียวกันเพื่อใช้เป็นกลุ่มควบคุม (Control Sample) โดยจะมีการแบ่งตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) ตัวอย่างเริ่มต้นที่ไม่ผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน (Initial Sample) และ (2) ตัวอย่างที่ผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน (Thermal Sample) เพื่อศึกษาการคงสภาพของน้ำมันกัญชาในสภาวะเร่งโดยนำตัวอย่างเข้าตู้อบที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 14 วัน [9,10] ดังรูปที่ 2

จากนั้น นำตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม ไปวิเคราะห์การคงสภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แก่ ทดสอบปริมาณกรดไขมันอิสระ (Acidity Value: AV) ทดสอบปริมาณเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value: PV) ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยเทคนิค DPPH ตรวจสอบปริมาณสารสำคัญสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ตรวจสอบโดยเทคนิค (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) เพื่อเปรียบเทียบผลของน้ำมันจากธรรมชาติต่อความคงสภาพของตัวอย่างภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน



รูปที่ 2 น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอดสูงความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg CBD/ 1 mL (ซ้าย) และตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่ผสมน้ำมันธรรมชาติชนิดต่างๆ (ขวา)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างอัตราส่วนการเตรียมตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันเมล็ดผักชี ปริมาณ 10 กรัม

ตัวอย่างน้ำมัน กัญชาผสมน้ำมัน เมล็ดผักชี	ปริมาณ น้ำมัน กัญชา (g)	ปริมาณ น้ำมันเมล็ด ผักชี (g)
20% w/w	8.00	2.00
40% w/w	6.00	4.00
60% w/w	4.00	6.00
80% w/w	2.00	8.00

2.2 การศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติ

วิเคราะห์ปริมาณการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระของน้ำมันหรือไขมัน [11] ทำได้โดยการละลายสารตัวอย่าง 2.00 g ในเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) 10.00 mL แล้วไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.1 N NaOH จนได้สีชมพูคงตัว (รูปที่ 3) บันทึกปริมาณสาร 0.1 N NaOH ที่ใช้และนำไปคำนวณค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ (Acidity Value: AV) ดังสมการที่ 1



รูปที่ 3 การไทเทรตตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่ผสมน้ำมันธรรมชาติด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.1 N NaOH เพื่อการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

$$AV \text{ (mg KOH/g)} = (V \times N \times 56.1) / m \quad (1)$$

โดย N คือความเป็นปกติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), V คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml) และ m คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

2.3 การศึกษาปริมาณเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติ

การทดสอบปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืช บ่งบอกถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืน [11] ทดสอบโดยการเติมสารละลายผสมอะซิติค-คลอโรฟอร์ม (อัตราส่วน 3 : 2 โดยปริมาตร) 30 mL และสารละลายโพแทสเซียม ไอโอไดด์อิ่มตัว 0.5 mL ลงในสารตัวอย่าง 5.00 g เขย่าสารละลายเป็นเวลา 1 นาทีในที่มืด จากนั้นเติมน้ำกลั่นทันที 30 mL และไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)



รูปที่ 4 การไทเทรตตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่ผสมน้ำมันธรรมชาติด้วยสารละลาย 0.01 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เพื่อการวิเคราะห์ปริมาณเปอร์ออกไซด์

ความเข้มข้น 0.01 N จนสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน (รูปที่ 4) เติมสารละลายน้ำแบ่งความเข้มข้น 1% จำนวน 2 mL และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต และนำไปคำนวณค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value: PV) ดังสมการที่ (2)

$$PV \text{ (meq O}_2\text{/kg)} = [(S - B) \times N \times 1000] / W \quad (2)$$

โดย B คือ ปริมาตรของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต Blank (ml), S คือ ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (ml), N คือ ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N) และ W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g) โดยค่า PV จะแสดงในรูปของมิลลิลิควาเลนต์ของออกซิเจนที่มีฤทธิ์ (Active Oxygen) ต่อ กิโลกรัม ของตัวอย่าง (meq $\text{O}_2\text{/kg}$)



2.4 การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติด้วยวิธี DPPH

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging ทำโดยเตรียม DPPH 0.15 mM ในตัวทำละลาย 99% เอทิลแอลกอฮอล์ นำสารละลาย DPPH 100 μ l ผสมกับสารตัวอย่างที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 30% v/v ทำการหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่เติมน้ำมันธรรมชาติ เทียบกับความต้านทานอนุมูลอิสระของตัวอย่างที่เติมวิตามินอีที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน และตัวอย่างที่เติมน้ำมันงาที่เป็นตัวอย่างควบคุม นำสารตัวอย่างตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเก็บในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Double Beam UV-Visible Spectrophotometer รุ่น P8 ยี่ห้อ MAPADA ที่ความยาวคลื่น 517 nm คำนวณเปอร์เซ็นต์ยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH โดยใช้สมการที่ (3)

$$\% \text{Inhibition} = (A_{\text{control}} - A_{\text{sample}} \times 100) / A_{\text{control}} \quad (3)$$

โดย A_{control} หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่ไม่มีตัวอย่าง และ A_{sample} หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งค่าความเข้มข้นของตัวอย่างที่สามารถต้านอนุมูลอิสระ DPPH ที่ 50 %Inhibition หรือค่า IC_{50} สามารถคำนวณโดยใช้สมการเชิงเส้น กราฟของเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเทียบกับความเข้มข้นของสารทดสอบ โดยค่า IC_{50} ที่ต่ำกว่าบ่งชี้ว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่า [11,12]

2.5 การศึกษาปริมาณ สารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติ

ปริมาณสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ในตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่รับแคนนาบิไดโอดสูงที่สุดผสมน้ำมันธรรมชาติ ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค HPLC (Thermo®, Ultimate 3000) เพื่อหาปริมาณที่แท้จริงของสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ในตัวอย่าง ใช้คอลัมน์ Waters X Bridge C18 ขนาด 4.6 $\times$ 150 mm, ขนาดอนุภาค 3.5 μ m เฟสเคลื่อนที่ใช้ระบบวัฏภาคเคลื่อนที่แบบ Gradient Elution ประกอบด้วยตัวทำละลาย 2 ชนิด ได้แก่ Solvent A คือ สารละลาย 50 mM Ammonium formate ใน 0.15% v/v Formic acid และ Solvent B คือ 90% v/v Acetonitrile ในน้ำ (H_2O) ในการแยกสาร ตรวจสอบที่ความยาวคลื่น 228 nm ผลการวิเคราะห์ถูกนำมาคำนวณและรายงานปริมาณ สารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่แสดงบนฉลาก (% Label Amount: %L.A) เพื่อใช้ในการประเมินความสอดคล้องของปริมาณสารสำคัญในผลิตภัณฑ์ โดยอัตราการคงอยู่ของสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) หลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน (CBD Retention) การคำนวณ % CBD Retention โดยใช้สมการที่ (4)

$$\% \text{CBD retention} = \frac{\text{CBD หลัง thermal}}{\text{CBD initial ของสูตรเดียวกัน}} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ CBD initial คือ ปริมาณสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) เริ่มต้นก่อนผ่านสภาวะเร่งและ CBD thermal คือ ปริมาณ สารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) หลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน ในหน่วย (%Label amount: %L.A.) ตามลำดับ [13]



2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวแปรอิสระที่มีมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป เพื่อพิจารณาผลของตัวแปรต้นต่อค่าของตัวแปรตามที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ ANOVA เพื่อเปรียบเทียบชนิดน้ำมันธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันมะรุม น้ำมันเมล็ดผักชี่ และน้ำมันกระเทียม เป็นตัวแปรต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาสำหรับแคนนาบิไดรอลสูงโดยใช้ค่าทางเคมี เช่น ปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณเปอร์ออกไซด์ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเป็นตัวชี้วัดผล (ตัวแปรตาม) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) [8]

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติ

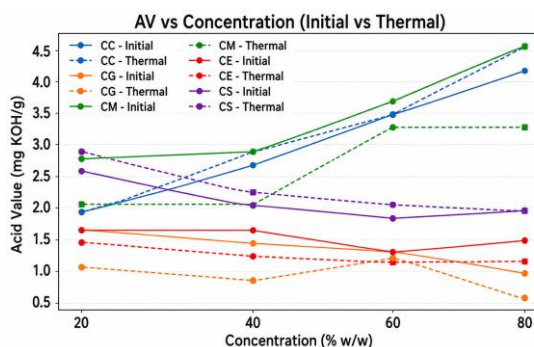
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Acidity Value: AV) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระของน้ำมันหรือไขมัน สามารถใช้ประกอบการประเมินความเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ผลการวิเคราะห์ Two-Way ANOVA แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของน้ำมันธรรมชาติที่เติมมีผลต่อค่าปริมาณกรดไขมันอิสระในทุกสูตรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2) สำหรับผลของปัจจัยด้านการคงสภาพต่อสภาวะเร่งด้วยความร้อนในสภาวะเริ่มต้น (Initial) และเร่งตัวอย่างด้วยความร้อน (Thermal) พบว่าสูตรน้ำมันมะรุม (CM)

และ Vitamin E (CE) มีค่า ปริมาณกรดไขมันอิสระระหว่างตัวอย่างที่สภาวะเริ่มต้นและสภาวะเร่งด้วยความร้อน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สะท้อนให้เห็นว่าสารประกอบ Bioactive ในน้ำมันมะรุม (CM) และ Vitamin E (CE) มีความไวต่อความร้อนสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่มีรายงานว่าน้ำมันมะรุมมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง [4] ในทางกลับกัน สูตรน้ำมันเมล็ดผักชี่ (CC), น้ำมันกระเทียม (CG) และน้ำมันงา (CS) ไม่พบความแตกต่างของค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ ระหว่างสภาวะเริ่มต้นและสภาวะเร่งด้วยความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าสูตรเหล่านี้มีแนวโน้มคงตัวต่อความร้อนได้ดีกว่า โดยอาจเป็นผลจากองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันที่มีสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ เช่น สารกลุ่ม Terpenes Phenolic Compounds และสารประกอบกำมะถัน ซึ่งสามารถช่วยลดการเกิดอนุมูลอิสระชะลอการเสื่อมสภาพของไขมัน และยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระได้อย่างต่อเนื่อง [3, 5, 6] น้ำมันเมล็ดผักชี่อาจมีบทบาทสำคัญจากสารกลุ่มเทอร์พีน โดยเฉพาะสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระบบน้ำมัน [3, 6] ขณะที่น้ำมันกระเทียมมีสารประกอบกำมะถันซึ่งมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและอาจช่วยยับยั้งการเสื่อมสภาพของไขมันได้ ส่วนสูตรน้ำมันงา ซึ่งเป็นสูตรควบคุมหรือระบบพื้นฐานของตำรับ อาจมีความคงตัวเนื่องจากองค์ประกอบของน้ำมันงาเองที่มีสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ เช่น Sesamin, Sesamol และ Tocopherol ซึ่งมีรายงานว่าสามารถช่วยเพิ่ม



ความเสถียรต่อความร้อนของน้ำมันได้ เมื่อพิจารณาโดยรวม ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเพียงชนิดของน้ำมันที่เติมเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำมันองค์ประกอบของกรดไขมัน ความเสถียรของสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ และความสามารถของระบบน้ำมันในการต้านทานความร้อน สูตรที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณกรดไขมันอิสระหลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน ได้แก่ น้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC), น้ำมันกระเทียม (CG) และน้ำมันงา (CS) จึงอาจมีศักยภาพในการใช้เป็นองค์ประกอบในตำรับน้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอดสูงเพื่อช่วยรักษาความคงตัวของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าสูตรที่มีความไวต่อความร้อน เช่น น้ำมันมะรุม (CM) และ Vitamin E (CE) อย่างไรก็ตาม การประเมินความคงตัวของตำรับควรพิจารณาพร้อมกับค่าชี้วัดอื่น เช่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) เพื่อให้สามารถสรุปประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพของตำรับได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น [1, 2, 6, 10, 12]

นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรน้ำมันมะรุม (CM) และ Vitamin E (CE) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและการคงสภาพต่อความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่าปริมาณกรดไขมันอิสระของสูตรน้ำมันมะรุม (CM) และ Vitamin E (CE) ขึ้นอยู่กับการได้รับความร้อน อาจเนื่องมาจากน้ำมันมะรุมมีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะความร้อน [7] ขณะที่



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าปริมาณกรดไขมันอิสระภายใต้สภาวะเริ่มต้น (Initial) และสภาวะเร่งด้วยความร้อน (Thermal 70°C เป็นเวลา 14 วัน)

Vitamin E แม้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Lipid Oxidation) ได้ แต่ประสิทธิภาพของสารดังกล่าวอาจขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ชนิดของระบบน้ำมัน และสภาวะการให้ความร้อน โดยภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน สารต้านอนุมูลอิสระอาจถูกใช้ไปหรือเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำมันลดลง [4, 6, 11] นอกจากนี้ ความร้อนยังอาจส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระและการเสื่อมสภาพของระบบน้ำมันที่มี Cannabinoids เป็นองค์ประกอบได้ [10] ในขณะที่ตัวอย่างน้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC) น้ำมันกระเทียม (CG) และ น้ำมันงา (CS) ไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและการคงสภาพต่อความร้อน สะท้อนความคงตัวที่สูงต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันแม้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการให้ความร้อน



ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ Two-Way ANOVA ของการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ตัวอย่าง น้ำมัน กัญชา	ความ เข้มข้น (p-value)	สภาวะศึกษา (Initial vs Thermal) (p-value)	ความ เข้มข้น × สภาวะ ศึกษา (p-value)
CC	p < 0.001	0.66	0.11
CG	p < 0.001	0.41	0.90
CM	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001
CE	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001
CS	p < 0.001	0.69	0.31

ดังนั้น ความเข้มข้นของน้ำมันธรรมชาติจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าปริมาณกรดไขมันอิสระของทุกสูตร ขณะที่ผลของความร้อนและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยนี้ขึ้นอยู่กับชนิดน้ำมันที่ใช้ผสมกับผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอลลูงโดยน้ำมันเมล็ดฝักชี่ น้ำมันกระเทียม และน้ำมันงามีความคงตัวต่อความร้อนสูง ในขณะที่น้ำมันมะรุมมีความไวต่อความร้อนมากกว่า ผลจากการวิเคราะห์มีนัยสำคัญต่อการเลือกชนิดสารต้านอนุมูลอิสระสำหรับสูตรผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอลลูงที่ต้องการความเสถียรในสภาวะเร่งการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

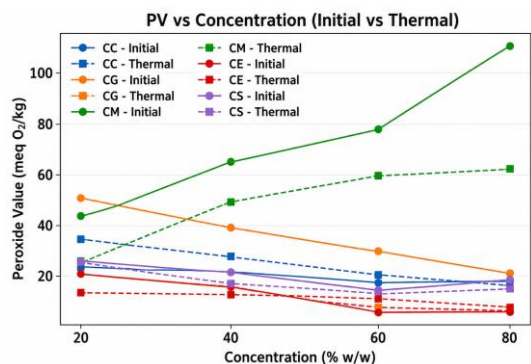
3.2 ผลการศึกษาปริมาณเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติ

ปริมาณเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value: PV) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมัน

ผลการวิเคราะห์ Two-Way ANOVA ของค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ ในตารางที่ 3 พบว่า ความเข้มข้นของน้ำมันที่เติมมีผลต่อค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ อย่างมีนัยสำคัญในทุกสูตรเช่นเดียวกับค่าปริมาณกรดไขมันอิสระหรืออาจกล่าวได้ว่าการปรับสัดส่วนของน้ำมันธรรมชาติเหล่านี้มีผลต่อการเกิดเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์

อย่างไรก็ตามค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์เป็นตัวชี้วัดของผลิตภัณฑ์ออกซิเดชันระยะเริ่มต้น ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ตามอัตราการเกิดและการสลายตัวของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (รูปที่ 6)

ในส่วนของปัจจัยด้านการคงสภาพต่อสภาวะเร่งด้วยความร้อน (Initial vs Thermal) พบว่าน้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC), น้ำมันกระเทียม (CG) และ น้ำมันงา (CS) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในขณะที่น้ำมันมะรุม (CM) และ Vitamin E (CE) ไม่พบความแตกต่างของปริมาณเปอร์ออกไซด์ระหว่างก่อนและหลังความร้อน ($p > 0.05$) แสดงว่าสูตรเหล่านี้มี



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ ภายใต้สภาวะเริ่มต้น (Initial) และสภาวะเร่งด้วยความร้อน (Thermal: 70°C เป็นเวลา 14 วัน)



ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ Two-way ANOVA ของการวิเคราะห์ปริมาณเปอร์ออกไซด์

ตัวอย่างน้ำมัน กัญชา	ความเข้มข้น (p-value)	สถานะศึกษา (Initial vs Thermal) (p-value)	ความเข้มข้น × สถานะ ศึกษา (p-value)
CC	p < 0.001	p < 0.001	0.02
CG	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001
CM	p < 0.001	0.17	0.01
CE	p < 0.001	0.40	0.01
CS	p < 0.001	0.04	0.25

เสถียรภาพต่อความร้อนสูง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความร้อน (Concentration × Condition) อย่างมีนัยสำคัญในสูตรผักชี (CC), น้ำมันกระเทียม(CG), น้ำมันมะรุม (CM) และ Vitamin E (CE) ($p < 0.05$) บ่งชี้ว่าผลของค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ จากสภาวะเร่งด้วยความร้อนขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำมันธรรมชาติที่เติม ซึ่งลักษณะนี้สอดคล้องกับธรรมชาติของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไขมัน ที่มีทั้งระยะการเกิด Hydroperoxide และระยะการสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ออกซิเดชันในลำดับถัดไป

การศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันธรรมชาติในผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์พบว่าน้ำมันกระเทียมและน้ำมันผักชีมีแนวโน้มความเป็นกรดลดลงหรือมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น [3] สำหรับน้ำมันมะรุมมีแนวโน้มกลับกัน คือทำให้ผลิตภัณฑ์ไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันมากขึ้น

ดังนั้น น้ำมันจากธรรมชาติที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์คือ น้ำมันกระเทียมและน้ำมันผักชี

ในด้านการเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ Two-Way ANOVA ทั้งปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์สรุปตรงกันว่าความเข้มข้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญในทุกสูตรและข้อมูลจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณ เปอร์ออกไซด์ สะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นน้ำมันธรรมชาติจาก 20% w/w ไป 80% w/w ไม่ได้ส่งผลให้ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์ หรือความคงสภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดีขึ้นในทุกชนิดน้ำมัน [8] บางชนิดกลับทำให้ทั้งปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์สูงขึ้นโดยเฉพาะกลุ่มที่ไวต่อความร้อนซึ่งมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (Polyunsaturated Fatty Acids: PUFA) สูง ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดควรเป็นความเข้มข้นระดับต่ำที่สุดที่ให้ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์ใกล้เคียงวิตามินอีที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน มากกว่าการเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันธรรมชาติมากจนอาจไปกระทบกับปริมาณสารแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol: CBD) ในสูตร

ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์ศักยภาพในการต้านการเสื่อมสภาพผลิตภัณฑ์จากค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่ผ่านมาร่วมกับการพิจารณาปัจจัยเรื่องของต้นทุนการผลิตพบว่าความเข้มข้น 20% w/w เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในสูตรตำรับโดยเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วย One-Way ANOVA ที่ความเข้มข้น 20% w/w (ตารางที่ 4) พบว่าใน



สภาวะ Initial สูตร CE มีค่าปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำที่สุด ขณะที่สูตร น้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC), น้ำมันกระเทียม (CG) และ น้ำมันมะรุม (CM) อยู่ในกลุ่มที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะ Thermal สูตรน้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC), น้ำมันกระเทียม (CG) ยังคงมีค่ากรดไขมันอิสระในระดับใกล้เคียงกับ วิตามินอี (CE) ในขณะที่สูตร CM มีค่า กรดไขมันอิสระสูงที่สุดอย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนว่า น้ำมันมะรุม (CM) มีความไวต่อสภาวะเร่งมากกว่า และไม่ควรเป็นตัวเลือกหลักที่ใช้ในการลดค่าปริมาณไขมันอิสระ ซึ่งสนับสนุนว่าอาจมีการเปลี่ยนแปลงและแปรสภาพของสารสำคัญบางชนิด ภายใต้ความร้อนทำให้ไม่เร่ง Hydrolysis เท่าเดิม ภาพรวมจึงสนับสนุนข้อสรุปเชิงสถิติว่าน้ำมันกระเทียมและเมล็ดฝักชี่ให้เสถียรภาพสูงสุดต่อการเกิดกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid: FFA) ทั้งก่อนและหลังความร้อน ขณะที่มะรุมมีความไวต่อ Hydrolysis สูงกว่า

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-Way ANOVA) ร่วมกับการทดสอบเปรียบเทียบรายคู่แบบ Tukey's HSD แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น 20% ค่ากรดไขมันอิสระและปริมาณเปอร์ออกไซด์ของแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติภายในแต่ละสภาวะ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4) โดยในสภาวะเริ่มต้น (Initial) สูตรที่เติม วิตามินอี (CE) ให้ค่ากรดไขมันอิสระต่ำที่สุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากสูตร น้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC), น้ำมันกระเทียม (CG) และ น้ำมันมะรุม (CM) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน (Thermal: 70°C 14 วัน) สูตรน้ำมัน

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าปริมาณ กรดไขมันอิสระ และปริมาณเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่เติมน้ำมันธรรมชาติ 20% w/w

ตัวแปร	สภาวะ	CC	CG	CM	CE
AV	Initial	1.966±0.17 ^B	1.851±0.06 ^B	2.095±0.12 ^B	1.473±0.18 ^C
	Thermal	1.743±0.25 ^B	1.705±0.16 ^B	2.806±0.13 ^A	1.743±0.05 ^B
PV	Initial	22.390±5.22 ^B	50.366±1.49 ^A	44.490±4.82 ^A	22.390±2.49 ^B
	Thermal	35.270±2.39 ^A	22.970±1.84 ^{B,C}	27.09±2.23 ^{A,B}	15.58±5.77 ^D

หมายเหตุ: ตัวอักษร (A–D) ที่กำกับเหนือค่าตัวเลข แสดงถึง กลุ่มความแตกต่างทางสถิติ โดยค่าที่มีตัวอักษรเหมือนกันภายในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และ ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันแสดงค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $p < 0.05$ (เช่น "B,C" หมายถึงค่าไม่แตกต่างจากทั้งกลุ่ม B และกลุ่ม C)

มะรุม (CM) ให้ค่ากรดไขมันอิสระสูงสุดและแตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนแนวโน้มการเกิดกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นมากกว่าสูตรอื่นในส่วน of ค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ภายใต้สภาวะเริ่มต้นพบว่าสูตร น้ำมันกระเทียม (CG) และน้ำมันมะรุม (CM) มีค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์สูงกว่าสูตร น้ำมันเมล็ดฝักชี่ (CC) และวิตามินอี (CE) อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อตัวอย่างอยู่ภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน สูตรวิตามินอี (CE)



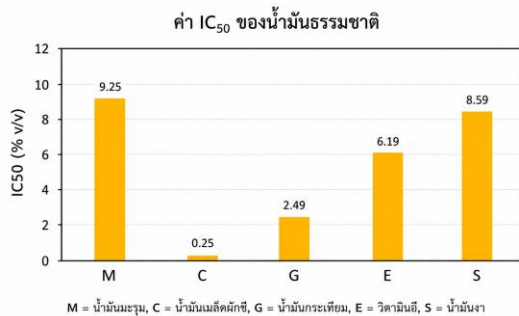
ให้ค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุดและแตกต่างจากสูตรอื่นอย่างชัดเจน แสดงประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดออกซิเดชันระยะเริ่มต้นได้ดีกว่า ขณะที่สูตร น้ำมันเมล็ดผักชี (CC) มีค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์สูงกว่าในสถานะเร่งเมื่อเทียบกับสูตรอื่น โดยภาพรวมผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดมีผลต่อสภาพของน้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบีไดโอดอลสูงแตกต่างกัน ทั้งในด้านการลดการเกิดกรดไขมันอิสระ ประเมินจากปริมาณกรดไขมันอิสระและการชะลอการเกิดออกซิเดชันระยะเริ่มต้น ประเมินจากปริมาณเปอร์ออกไซด์

3.3 ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติด้วยวิธี DPPH

การทดสอบ DPPH เป็นการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จากความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) ของสารต้านอนุมูลอิสระที่ต้องการทดสอบ ผลจากการวิเคราะห์สมบัติต้านอนุมูลอิสระในน้ำมันธรรมชาติที่เลือกมาศึกษาทั้ง 3 ชนิด พบว่า น้ำมันเมล็ดผักชี (C) ให้ค่า IC_{50} ต่ำที่สุด (0.25 % v/v) แสดงถึงความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระสูงที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่นๆ รองลงมาได้แก่ น้ำมันกระเทียม (G) ที่มี IC_{50} เท่ากับ 2.49% v/v วิตามินอี (IC_{50} = 6.19% v/v) และน้ำมันมะรุม (M) ที่มีค่า IC_{50} เท่ากับ 9.25% v/v ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 ผลการทดสอบศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบีไดโอดอลสูงที่ผสมน้ำมันจากธรรมชาติที่ความเข้มข้น 20% w/w (รูปที่ 8) พบว่า สูตรน้ำมันเมล็ดผักชี (CC) มี

ค่า IC_{50} ต่ำที่สุด (0.20% v/v) รองลงมาคือ น้ำมันกระเทียม (CG) (0.61% v/v) ส่วนน้ำมันมะรุม (CM) และ วิตามินอี (CE) มีค่า IC_{50} เท่ากันที่ 0.74% v/v และสูตรควบคุมที่ใช้ไขมันงา (CS) มีค่า IC_{50} สูงสุด (1.54% v/v) ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าสูตรที่เติมน้ำมันเมล็ดผักชีและน้ำมันกระเทียมเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันกัญชาตำรับแคนนา บีไดโอดอลสูงได้ดีกว่าวิตามินอีโดยเฉพาะน้ำมันเมล็ดผักชี (CC) ที่แสดงศักยภาพสูงสุด อย่างไรก็ตาม ผล DPPH ไม่ได้สอดคล้องกับผลปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ทุกกรณีเนื่องจาก DPPH เป็นการทดสอบการกำจัดอนุมูลอิสระเพียงชนิดเดียวในระบบตัวทำละลายซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบอนุมูลอิสระจากการเกิดออกซิเดชันจริงในเมทริกซ์น้ำมัน

แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติในแต่ละชนิด โดยน้ำมันเมล็ดผักชี ประกอบด้วยสารกลุ่ม เทอร์พีนอยด์ และสารฟีนอลิก (เช่น Linalool) ซึ่งสามารถให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีจึงเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระและให้ค่า IC_{50} ในเมล็ดผักชี (CC) ที่ต่ำ ขณะที่น้ำมันกระเทียมมีสารกลุ่มออร์กาโนซัลเฟอร์ซึ่งมีบทบาทในการต้านออกซิเดชันทำให้น้ำมันกระเทียม (CG) ให้ค่า IC_{50} ต่ำรองลงมา สำหรับน้ำมันมะรุม (CM) แม้มีสารออกฤทธิ์หลายชนิด แต่สารสำคัญบางกลุ่มอาจไวต่อความร้อน [5] เช่น ไอโซไทโอไซยาเนต (Isothiocyanates) และมีโอกาสสลายตัวบางส่วนภายใต้สภาวะเร่งหรือระหว่างการเตรียม/เก็บรักษา ส่งผลให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในระดับปานกลางใกล้เคียงกับวิตามินอี (CE)



รูปที่ 7 ค่า IC₅₀ ของน้ำมันธรรมชาติที่ศึกษา



รูปที่ 8 ค่า IC₅₀ ของตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่เติมน้ำมันธรรมชาติ

ตารางที่ 5 ปริมาณสารแคนนาบิไดโอยด์และอัตราคงอยู่ของสารแคนนาบิไดโอยด์หลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อนของตัวอย่างน้ำมันกัญชาที่เติมน้ำมันธรรมชาติความเข้มข้น 20% w/w

ตัวอย่าง	ปริมาณ CBD หลังผ่านสภาวะเร่ง (%L.A.)	CBD retention เทียบกับค่าเริ่มต้น* (%)
CG	75.6	88.54
CC	78.3	91.70
CM	78.5	91.94
CE	83.1	97.33
CS	77.1	90.30

* ค่าเริ่มต้น %L.A. ของตัวอย่างน้ำมันกัญชาหลังผสมน้ำมันธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 85.38%

3.4 ผลการศึกษาสารแคนนาบิไดโอยด์ (Cannabidiol: CBD) ในตัวอย่างน้ำมันกัญชาผสมน้ำมันธรรมชาติ

การวิเคราะห์ปริมาณคงอยู่ของสารแคนนาบิไดโอยด์ (Cannabidiol: CBD) ในตัวรับหลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน มีความสำคัญโดยตรงต่อการศึกษาความคงตัวของผลิตภัณฑ์ โดยสามารถรายงานผลเป็น (% Label Amount: %L.A.) การมีอยู่ของสารสำคัญเมื่อเทียบกับปริมาณที่ระบุไว้ในฉลากหรือสูตรตำรับ โดยค่า %L.A. ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานการผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาตำรับแคนนาบิไดโอยด์สูงข้อกำหนดขององค์การเภสัชกรรมได้กำหนดค่าเท่ากับ 90–110% L.A. โดยตัวอย่างน้ำมันกัญชาเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีค่า %L.A. อยู่ที่ 102.2% ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันธรรมชาติที่ความเข้มข้น 20%w/w และนำไปผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อนพบว่า อัตราการคงอยู่ของสารแคนนาบิไดโอยด์ (Cannabidiol: CBD) หลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อนโดยสูตรวิตามินอี (CE) มีค่า %CBD Retention สูงสุด รองลงมาคือ น้ำมันมะรุม (CM) และ เมล็ดผักชี (CC) ในขณะที่น้ำมันกระเทียม (CG) ค่าต่ำสุด (ตารางที่ 5) ซึ่งสนับสนุนสมมติฐานของงานวิจัยว่าการเติมสารต้านอนุมูลอิสระจากน้ำมันธรรมชาติบางชนิดสามารถรักษาปริมาณสารแคนนาบิไดโอยด์หลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อน เนื่องจากการลดการเกิดอนุมูลอิสระที่ได้จากการเสื่อมสภาพของน้ำมันและยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารแคนนาบิไดโอยด์



4. บทสรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของน้ำมันธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันเมล็ดฝักชี่ น้ำมันกระเทียม และน้ำมันมะรุม ในการเพิ่มความคงสภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาดำรับแคนนาบิไดโอลลสูงภายใต้สภาวะเร่งด้วยความร้อน โดยเปรียบเทียบกับวิตามินอีซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน และสูตรควบคุมที่ใช้ไขมันงาผลการศึกษาพบว่า ชนิดและความเข้มข้นของน้ำมันธรรมชาติที่เติมในดำรับมีผลต่อค่าปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญของการเสื่อมสภาพในระบบน้ำมันสูตรที่เติมน้ำมันเมล็ดฝักชี่และน้ำมันกระเทียมมีแนวโน้มช่วยชะลอการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าสูตรควบคุม โดยเฉพาะน้ำมันเมล็ดฝักชี่ที่แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดจากการทดสอบด้วยวิธี DPPH โดยมีค่า IC_{50} ต่ำที่สุด (0.2%v/v) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ขณะที่การวิเคราะห์ปริมาณสารแคนนาบิไดโอล (Cannabidiol: CBD) หลังผ่านสภาวะเร่งด้วยความร้อนพบว่า ทุกสูตรยังคงมีปริมาณสารแคนนาบิไดโอล (Cannabidiol: CBD) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำมันธรรมชาติบางชนิดสามารถช่วยรักษาคูณภาพของดำรับได้ภายใต้สภาวะที่เร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพ

โดยสรุป น้ำมันเมล็ดฝักชี่และน้ำมันกระเทียมมีศักยภาพในการใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติเพื่อเพิ่มความคงสภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาดำรับแคนนาบิไดโอลลสูงโดยน้ำมันเมล็ดฝักชี่เป็นสูตรที่โดดเด่นที่สุดด้านฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการ

พัฒนาตำรับผลิตภัณฑ์น้ำมันกัญชาที่มีความคงสภาพคุณภาพและความเหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น รวมถึงอาจนำไปต่อยอดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากสารธรรมชาติที่มีความปลอดภัยและสอดคล้องกับแนวทางการใช้สมุนไพรทางการแพทย์ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์แห่งแผ่นดินเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน วิทยาลัยบูรณาการศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Chitrattha, Drug stability, Academic Article, Center for Continuing Pharmaceutical Education (CCPE), The Pharmacy Council of Thailand, Thailand, 2018. (in Thai)
- [2] N. Santiyanon, Stability of pharmaceutical products and storage, Thai Pharmaceutical and Health Science Journal, 2008, 3(1), 180 – 187. (in Thai).
- [3] A. Fadda, D. Sanna, E.H. Sakar, S. Gharby, M. Mulas, S. Medda, N.S. Yesilcubuk, A.C. Karaca, C.K. Gozukirmizi, M. Lucarini, G. Lombardi-Boccia, Z. Diaconeasa and A. Durazzo, Innovative and sustainable technologies to enhance the oxidative stability of vegetable oils, Sustainability, 2022, 14(2), 849.

- [4] A.R. Hras, M. Hadolin, Z. Knez and D. Bauman, Comparison of antioxidative and synergistic effects of rosemary extract with α -tocopherol, ascorbyl palmitate and citric acid in sunflower oil, *Food Chemistry*, 2000, 71(2), 229 – 233.
- [5] H.J. Jang, H.J. Lee, D.K. Yoon, D.S. Ji, J.H. Kim and C.H. Lee, Antioxidant and antimicrobial activities of fresh garlic and aged garlic by-products extracted with different solvents, *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(1), 219 – 225.
- [6] C. Limmatvapirat and S. Limmatvapirat, Chemical stability enhancement of vegetable oils by addition of antioxidants, *Thai Bulletin of Pharmaceutical Sciences*, 2012, 7(1), 57 – 71. (in Thai).
- [7] A.M. Duarte, J.S. Aquino, N. Queiroz, D.L.L. Dantas, G.S. Maciel and A.L. Souza, A comparative study of the thermal and oxidative stability of moringa oil with olive and canola oils, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 134(3), 1943 – 1952.
- [8] V. Athanasiadis, D. Kalompatsios, M. Mantiniotou and S.I. Lalas, Investigation into the reduction of palm oil in foods by blended vegetable oils through response surface methodology and oxidative stability tests, *Antioxidants*, 2024, 13(8), 929.
- [9] ICH Q1A(R2), Stability Testing of New Drug Substances and Products, International Council for Harmonisation, Switzerland, 2003. <https://database.ich.org/sites/default/files/Q1A%28R2%29%20Guideline.pdf> (Accessed on 19 January 2026)
- [10] L. Tonoyan, D. Babu, B. Reiz, T. Le and A.G. Siraki, Heating of consumer cannabis oils can lead to free radical initiated degradation, causing CBD and THC depletion, *Free Radical Biology and Medicine*, 2022, 192, 77 – 83.
- [11] M. Tura, M. Mandrioli and T.G. Toschi, Preliminary study: Comparison of antioxidant activity of cannabidiol (CBD) and α -tocopherol added to refined olive and sunflower oils, *Molecules*, 2019, 24(19), 3485.
- [12] I.G. Trofin, G. Dabija, D.I. Vaireanu and L. Filipescu, Long-term storage and cannabis oil stability, *Revista de Chimie*, 2012, 63(3), 293 – 297.
- [13] Government Pharmaceutical Organization, Analytical Method for Cannabinoid Content in Sibannac Cannabis Oil CBD, Quality Assurance Division, Thailand, 2021. (in Thai)

หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล

ศศิภาส อริสริยวงศ์¹ ธัญวรัตน์ กำซ้อน² อัจฉรา อยู่ผาสุข² วัชรพล กิ่งชา² และ
ธนายศ อริสริยวงศ์^{2*}

¹ ส่วนงานวิจัยและพัฒนา, โรงพยาบาลธัญบุรี

² ห้องปฏิบัติการวิจัยเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tanayos.Swu@gmail.com

วันที่รับบทความ: 27 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 23 กรกฎาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 31 กรกฎาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: ปัจจุบันโรงพยาบาลส่วนใหญ่ถูกออกแบบให้เป็นอาคารปิด จึงต้องตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมเป็นประจำเพื่อป้องกันปัญหาด้านมลพิษและสุขภาพของผู้ที่อยู่ในโรงพยาบาล งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติเพื่อตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารของโรงพยาบาล เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมจำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดและลดการใช้แรงงานคนในการตรวจวัด โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมพร้อมจอแสดงผลแบบสัมผัสไว้บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ซึ่งพัฒนาโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส ROS 2 ทำให้หุ่นยนต์สามารถสร้างแผนที่ นำทาง และหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ด้วยตนเอง จากผลการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมสามารถทำงานร่วมกับจอแสดงผลแบบสัมผัสได้เป็นอย่างดี ค่าตัวแปรที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ผลิตกำหนด เมื่อนำไปทดสอบการทำงานที่โรงพยาบาลพบว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดวัดและกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นได้ด้วยตัวเองพร้อมแสดงผลการวัดได้อย่างถูกต้อง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดของตำแหน่งตามแนวแกน x และ y เท่ากับ 0.16 m. และ 0.18 m. ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลการวัดเหล่านี้ทางโรงพยาบาลจะได้นำไปใช้ทำแผนการปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมในอาคารต่อไป

คำสำคัญ: คุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร; หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ; ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์

Autonomous Mobile Robot for Environmental Quality Monitoring in Hospital

Sasipa Arisariyawong¹, Thanwarat Kason², Achara Yoophasuk², Watcharapon Gingcha²
and Tanayos Arisariyawong^{2*}

¹ Research and Development Division, Thanyaburi Hospital

² Mechatronics and Robotics Research Laboratory, Mechanical Engineering Department,
Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

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

Received: 27 October 2025; Revised 23 July 2026; Accepted: 31 July 2026

Online Published: 21 August 2026

Abstract: Most hospitals are currently designed as enclosed buildings. Therefore, it is necessary to regularly monitor environmental quality to prevent pollution and health risks. This research presents the development of an autonomous mobile robot for monitoring indoor environmental quality in hospitals, to reduce the cost of installing numerous environmental quality monitoring devices to cover the entire area and to reduce human labor. The robot is equipped with environmental quality sensor and a touchscreen display and utilizes the open-source software ROS 2 for autonomous mapping, navigation, and obstacle avoidance. The experimental results showed that the environmental quality sensor worked well with the touchscreen display, and the measured parameters were within the manufacturer's specified range. Field testing in the hospital, the robot's capability to autonomously navigate to measurement points, return to its origin and display the measurement results accurately. The maximum average positional error was 0.16 m on the x-axis and 0.18 m on the y-axis. The acquired data can support hospital decisions for improving indoor environmental quality.

Keywords: Indoor environmental quality; Autonomous mobile robot; Robot operating system



1. บทนำ

ปัจจุบันโรงพยาบาลส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้เป็นอาคารปิด เพื่อต้องการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคารให้มีความปลอดภัยจากมลพิษภายนอก และเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ป่วย และบุคลากรทางการแพทย์ [1] อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาขององค์การอนามัยโลก (WHO) เผยแพร่ว่า ร้อยละ 30 ของอาคารทั่วโลกอาจมีปัญหาด้านคุณภาพสิ่งแวดล้อมในอาคาร และอาจมีปริมาณสารมลพิษสูงกว่าภายนอกอาคารถึง 100 เท่า [2] มลพิษดังกล่าวอาจเกิดได้จากหลากหลายแหล่งกำเนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นจากอากาศภายนอกที่มีการรั่วไหลเข้าสู่อาคารหรือเกิดจากกิจกรรมของผู้ใช้อาคารเอง ในประเทศไทยได้มีผลการศึกษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารของโรงพยาบาล 9 แห่ง พบว่าแบคทีเรียและเชื้อรา รวมถึงดัชนีอื่นๆมีปริมาณเกินเกณฑ์มาตรฐานเนื่องจากไม่ได้ตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารเป็นประจำ [3] ซึ่งผู้ที่อาศัยและทำงานในอาคารของโรงพยาบาลดังกล่าวเป็นเวลานาน มีโอกาสเป็นโรคที่เกิดจากการทำงานภายในอาคาร (Sick Building Syndrome: SBS) [4] ดังนั้นคุณภาพของสิ่งแวดล้อมภายในอาคารจึงเป็นเรื่องที่สำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อป้องกันปัญหาทางคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารทางโรงพยาบาลส่วนใหญ่มักจะติดตั้งอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมไว้ในตัวอาคารเพื่อคอยตรวจวัดและแจ้งเตือนเมื่อพบปัญหาด้านคุณภาพสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของชั้นต่างๆภายในอาคารของโรงพยาบาลมักจะแบ่งเป็นหลายส่วน มีการกันแต่ละส่วนอย่างชัดเจน ทำให้ต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมจำนวนมาก เพื่อที่จะทราบถึง

คุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในชั้นนั้นๆทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นต้นทุนที่สูงมาก อีกทั้งถ้าอุปกรณ์ดังกล่าวต้องใช้คนในการจดบันทึกก็จะยิ่งทำให้เสียเวลาและผลที่ได้ยังไม่เป็นเวลาจริง [5-7] ในอนาคตหากมีการปรับเปลี่ยนส่วนต่างๆภายในอาคารก็จะต้องมีการย้ายและติดตั้งอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมใหม่ จะพบว่าการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมแบบนี้ขาดประสิทธิภาพ และไม่มีประสิทธิภาพในการทำงาน ต่อมามีการพัฒนาหุ่นยนต์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ ขึ้นมาเพื่อทดแทนแรงงานคนและลดจำนวนอุปกรณ์วัดคุณภาพอากาศ [8-9] แต่หุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะทำงานตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้แล้วเท่านั้น จึงเป็นข้อจำกัดเมื่อมีสิ่งกีดขวางเส้นทางเดินหรือมีการเปลี่ยนสถานที่ตรวจวัด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติในอุตสาหกรรมมาใช้ตรวจวัดคุณภาพอากาศ [10] ทำให้หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ด้วยตัวเอง แต่จะพบว่าระบบนี้มีต้นทุนทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่สูงมาก ปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้ยาก มีต้นทุนด้านการบำรุงรักษาที่สูง อีกทั้งหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมก็มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สะดวกในการนำมาใช้ในโรงพยาบาล

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาลที่มีความยืดหยุ่นในการทำงานและต้นทุนที่ต่ำ โดยใช้เป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมซึ่งหุ่นยนต์สามารถสร้างแผนที่และนำทางไปยังจุดที่ต้องการตรวจวัดได้โดยอัตโนมัติ เมื่อเจอสิ่งกีดขวางสามารถหลบหลีกได้ด้วยตัวเอง เมื่อตรวจวัดเรียบร้อยแล้วก็จะรายงานผลการตรวจวัดทันทีแบบเวลาจริง



และยังสามารถเก็บข้อมูลต่างๆไว้วิเคราะห์ภายหลังได้ สามารถปรับเปลี่ยนจุดวัดได้ตลอดเวลา ใช้อุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมเพียงชุดเดียวสำหรับตรวจวัดทั้งชั้นภายในอาคาร การพัฒนาโปรแกรมสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติจะใช้เป็นโอเพนซอร์สทั้งหมดจึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ รวมถึงช่วยลดแรงงานคนในการจดบันทึกข้อมูล

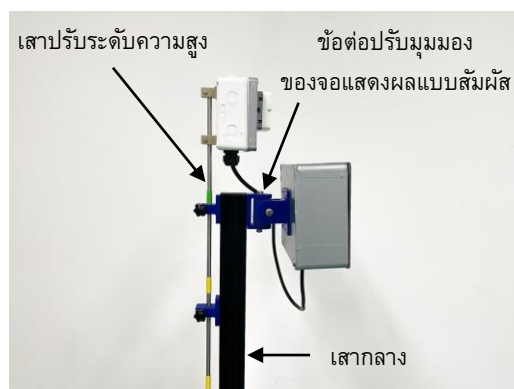
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล

หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาลที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมและหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยส่วนการวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมและจอแสดงผลแบบสัมผัส ทั้งสองส่วนหลักจะยึดติดกันด้วยเสากลาง ฐานของหุ่นยนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 cm. สามารถปรับความสูงของอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมได้ตั้งแต่ 75 - 120 cm นับจากพื้นดิน ซึ่งเป็นระยะตามมาตรฐานการตรวจวัด [1] รวมถึงสามารถปรับมุมมองของจอแสดงผลแบบสัมผัสได้จากข้อต่อปรับมุมมองดังรูปที่ 2 โครงสร้างทั้งหมดทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ร่วมกับแผ่นสแตนเลส เพื่อป้องกันการเกิดสนิมและทำความสะอาดได้ง่าย น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์เท่ากับ 24.56 kg มีการติดตั้งมอเตอร์วัดปริมาณแบตเตอรี่เพื่อให้ผู้ใช้ทราบว่าควรชาร์จแบตเตอรี่แล้วหรือยัง



รูปที่ 1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล



รูปที่ 2 ลักษณะของเสาปรับระดับความสูงและข้อต่อปรับมุมมองของจอแสดงผลแบบสัมผัส



2.2 การออกแบบส่วนการวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม

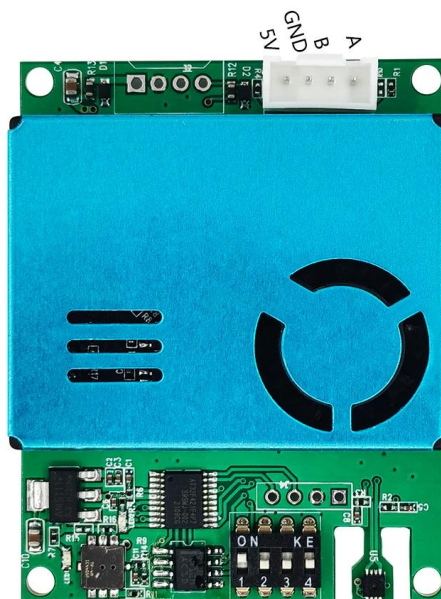
ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมและจอแสดงผลแบบสัมผัส ซึ่งจะทำงานร่วมกันตลอดเวลา เพื่อแสดงผลข้อมูลของคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่วัดได้และรับคำสั่งจากผู้ใช้งานผ่านการสัมผัสที่หน้าจอ ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.2.1 อุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม

คุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารสามารถประเมินได้จากคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) และภาวะความสบายของผู้ที่อยู่ในอาคาร [1] โดยคุณภาพอากาศภายในอาคาร สามารถพิจารณาได้จากหลายตัวแปร โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวแปร อนุภาคที่มีขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) และอนุภาคที่มีขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) เป็นตัวพิจารณาถึงมลภาวะอากาศที่อยู่ในอาคาร เนื่องจากสามารถหาเซ็นเซอร์ได้ง่าย ราคาไม่สูง เครื่องมือสอบเทียบสามารถจัดหาได้ และเมื่อสอบถามจากผู้เกี่ยวข้องของโรงพยาบาลที่จะนำไปทดสอบก็ให้ความเห็นว่าพอเพียงสำหรับการประเมินในทางปฏิบัติ ส่วนภาวะความสบายของผู้ที่อยู่ในอาคารสามารถพิจารณาได้จากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่ามาตรฐานของคุณภาพอากาศและภาวะความสบายภายในอาคารสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 จากเงื่อนไขในตารางที่ 1 จึงเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดคุณภาพอากาศจากบริษัท Shenzhen Shenchen Technology Co., Ltd. รุ่น M702 [11] ซึ่งมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ โดยใช้ไฟเลี้ยงวงจรเพียง 5 VDC สื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus RTU ผ่านพอร์ต RS485 ในรูปแบบ 9600,8,N,1 สามารถวัดตัวแปรได้ครบตามตารางที่ 1 โดยรูปของเซ็นเซอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ส่วนคุณสมบัติของเซ็นเซอร์

ตารางที่ 1 ค่ามาตรฐานค่าคุณภาพอากาศและภาวะความสบาย [1]

ตัวแปร	ค่าที่ยอมรับได้	หน่วย
อุณหภูมิ (Ta)	24 ถึง 26	°C
ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	50 ถึง 65	%
อนุภาคที่มีขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)	ไม่เกิน 35	µg/m ³
อนุภาคที่มีขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10)	ไม่เกิน 50	µg/m ³



รูปที่ 3 เซ็นเซอร์วัดคุณภาพอากาศ M702

สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 และตำแหน่งหน่วยความจำของตัวแปรต่างๆในโปรโตคอล Modbus แสดงได้ดังตารางที่ 3



ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ M702 [11]

ตัวแปร	ความละเอียด	ช่วงการวัด	ความแม่นยำ
อุณหภูมิ	0.1 °C	0-100 °C	±1 °C
ความชื้นสัมพัทธ์	0.4%	0-100%	±3%RH
PM2.5	1 µg/m ³	0-999 µg/m ³	±10%
PM10	1 µg/m ³	0-1000 µg/m ³	±10%

ตารางที่ 3 ตำแหน่งหน่วยความจำของตัวแปรในโปรโตคอล Modbus

ตำแหน่งเริ่มต้น	จำนวนข้อมูล (Byte)	ตัวแปร
0x30008	2	PM2.5
0x3000A	2	PM10
0x3000C	2	อุณหภูมิ
0x3000E	2	ความชื้นสัมพัทธ์

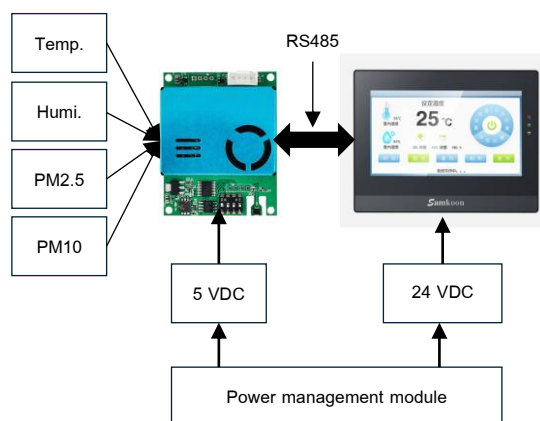
2.2.2 จอแสดงผลแบบสัมผัส

ในส่วนของจอแสดงผลแบบสัมผัสเลือกใช้ยี่ห้อ Samkoon รุ่น SK-070QEV3 [12] ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีขนาด 7 นิ้ว พร้อมช่องสื่อสารแบบ RS485 ที่รองรับโปรโตคอล Modbus RTU สามารถบันทึกข้อมูลด้วยแฟลชไดรฟ์ผ่านช่อง USB ใช้ไฟเลี้ยงขนาด 24 VDC มีโปรแกรมออกแบบหน้าจอ SKTOOL ซึ่งสามารถโหลดมาใช้งานได้แบบไม่มีค่าใช้จ่าย และรองรับภาษาไทย

ไดอะแกรมการทำงานส่วนการวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 จอแสดงผลแบบสัมผัสยี่ห้อ Samkoon รุ่น SK-070QEV3



รูปที่ 5 ไดอะแกรมการทำงานส่วนการวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม

จากรูปที่ 5 ตัวแปรของคุณภาพสิ่งแวดล้อมตามตารางที่ 1 จะถูกตรวจวัดโดยเซ็นเซอร์ M702 แล้วส่งข้อมูลที่วัดได้ไปที่จอแสดงผลแบบสัมผัสผ่านทางพอร์ต RS485 ด้วยโปรโตคอล Modbus RTU ส่วนไฟเลี้ยงอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกจัดการด้วยโมดูลบริหารกำลังไฟ (Power management module) ซึ่งสามารถเลือกกรับแหล่งพลังงานได้ทั้งจากแบตเตอรี่ภายในหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติหรือจากไฟฟ้าในอาคารขนาด 220 VAC ตัวอย่างการทำงานของหน้าจอแสดงผลแบบสัมผัสขณะทำการวัดสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 6

2.3 การออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

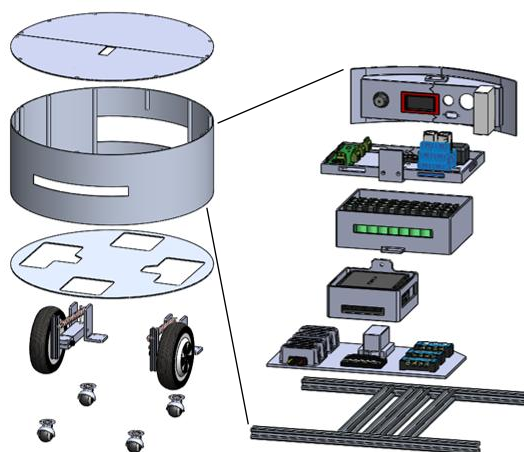
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบและโครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ รวมถึงการพัฒนาโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

2.3.1 ส่วนประกอบและโครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

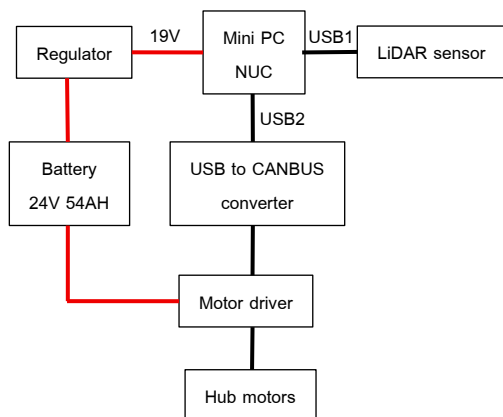
โครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยมีลักษณะเป็นทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 cm. สูงเท่ากับ 22.6 cm. ทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์และแผ่นสแตนเลส ใช้การขับเคลื่อนแบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์ (Differential drive) ด้วยล้อขับเคลื่อน 2 ล้อ ที่เป็นอิสระต่อกัน โดยใช้มอเตอร์ฮับ (Hub motor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว เป็นต้นกำลัง ติดตั้งที่กลางตัวหุ่นยนต์ มีลูกล้อ (Caster wheels) ด้านหน้าและด้านหลังอย่างละ 2 ล้อ สำหรับรักษาสถิตของตัวหุ่นยนต์ มีการออกแบบกลไกให้ล้อขับเคลื่อนสามารถขึ้นลงได้ตามระดับพื้นที่ไม่เท่ากัน เพื่อช่วยให้ล้อขับเคลื่อนติดพื้นตลอดเวลา ติดตั้งเซ็นเซอร์ไลดาร์ (LiDAR sensor) เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับสิ่งกีดขวางและสร้างแผนที่ ใช้คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ยี่ห้อ Intel รุ่น NUC5i5RYH เป็นตัวควบคุมหลัก ขับเคลื่อนมอเตอร์ฮับด้วยบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor driver) ใช้แบตเตอรี่ชนิด LiFePO4 ขนาด 24V 54AH เป็นแหล่งพลังงาน และไดอะแกรมการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 การทำงานของหน้าจอแสดงผลแบบสัมผัส



รูปที่ 7 โครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ



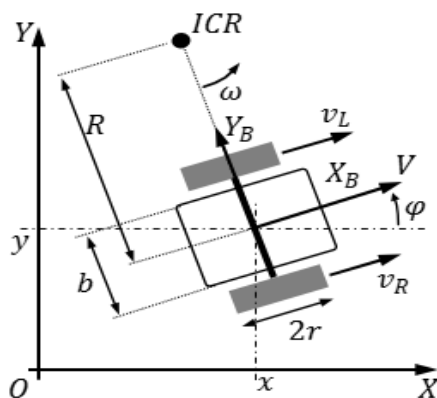
รูปที่ 8 โดอะแกรมการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

จากรูปที่ 8 แบตเตอรี่ขนาด 24V 54AH จะจ่ายไฟให้กับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor driver) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และจ่ายไฟให้กับวงจรเรกกูเลเตอร์เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ที่ 19V เพื่อใช้กับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก NUC ส่วนเซ็นเซอร์ไลดาร์ต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB1 และเนื่องจากบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์รับคำสั่งควบคุมผ่านทางพอร์ต CANBUS แต่คอมพิวเตอร์ NUC ไม่มีพอร์ต CANBUS ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณจาก USB ไปเป็นสัญญาณ CANBUS เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถสื่อสารกับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ได้โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB2

2.3.2 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

เพื่อความยืดหยุ่นและต้นทุนที่ต่ำในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ จึงเลือกใช้ชุดซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สสำหรับพัฒนาหุ่นยนต์

ROS 2 (Robot Operating System 2) [13] เป็นหลักในการพัฒนาโปรแกรม เนื่องจากมีไลบรารีเครื่องมือและเฟรมเวิร์คต่างๆ ที่ช่วยให้สามารถสร้างโมดูลการทำงานของหุ่นยนต์เป็นส่วนๆ และสามารถสื่อสารกันได้ รวมถึงเข้ากันได้กับมาตรฐานอุตสาหกรรม การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติทำได้โดยการควบคุมความเร็วเชิงมุมของล้อขับทั้งสองข้างเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังทิศทางต่างๆตามที่ต้องการ แต่คำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในซอฟต์แวร์ ROS 2 จะอยู่ในรูปความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของตัวหุ่นยนต์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของตัวหุ่นยนต์กับความเร็วเชิงมุมของล้อขับทั้งสองข้างสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 9 และจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1



รูปที่ 9 จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์ [14]

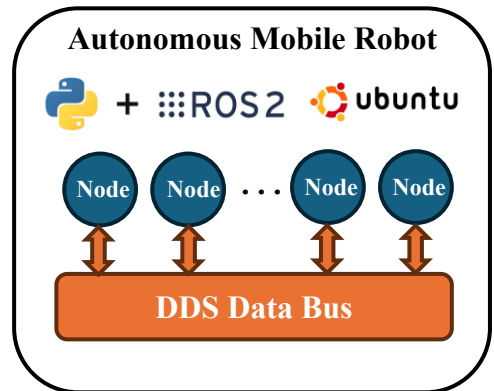
$$\omega_L = \frac{V - \omega \times \frac{b}{2}}{r} \quad (1)$$

$$\omega_R = \frac{V + \omega \times \frac{b}{2}}{r}$$

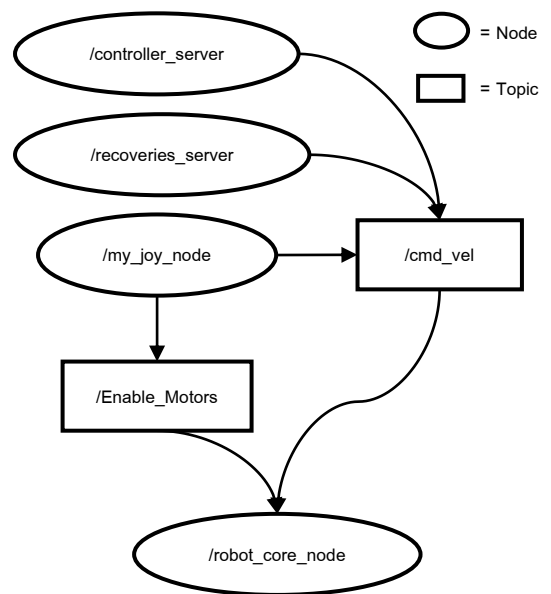
โดย ω_L, ω_R คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อขับ
ด้านซ้ายและขวาของหุ่นยนต์
 V คือ ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์
 ω คือ ความเร็วเชิงมุมของหุ่นยนต์
 b คือ ความกว้างของตัวหุ่นยนต์
 r คือ รัศมีของล้อขับ

หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติจะใช้ซอฟต์แวร์ ROS 2 เวอร์ชัน Galactic ในการพัฒนาระบบควบคุมและนำทาง โดยทำงานบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu เวอร์ชัน 20.04 ซึ่งในซอฟต์แวร์ ROS 2 จะประกอบไปด้วย โหนด (Node) ทำหน้าที่เหมือนโปรแกรมย่อย แต่ละโหนดจะทำหน้าที่แตกต่างกัน และสามารถสื่อสารกันได้ทั้งภายในระบบ ROS 2 เองหรือกับโปรแกรมภายนอกผ่านบัสข้อมูล DDS ด้วยสิ่งที่เรียกว่า หัวข้อ (Topic) ดังแสดงในรูปที่ 10

การพัฒนาโปรแกรมจะใช้ภาษา Python และใช้เฟรมเวิร์กชื่อว่า Nav2 [15] ในการนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เลือกใช้วิธีการกำหนดตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแผนที่ด้วยวิธี AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) การสร้างเส้นทางเดินแบบ Global Path Planner ด้วยวิธี A* Algorithm และการสร้างเส้นทางเดินแบบ Local Path Planner ด้วยวิธี DWA (Dynamic Window Approach) ตัวอย่างแผนภาพของโหนดและหัวข้อในโปรแกรม ROS 2 ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ระบบการทำงานของ ROS 2



รูปที่ 11 ตัวอย่างแผนภาพของโหนดและหัวข้อในโปรแกรม ROS 2 ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ



3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบความถูกต้องของส่วนการวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมและจะแสดงผลแบบสัมผัสเมื่อทำงานร่วมกัน ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับอุปกรณ์วัดมาตรฐาน โดยตัวแปรอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะใช้อุปกรณ์วัดมาตรฐานยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT333S [16] ส่วนตัวแปร PM2.5 และ PM10 จะใช้อุปกรณ์วัดมาตรฐานยี่ห้อ TEMTOP รุ่น P600 [17] ในการทดสอบจะนำชุดอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นไปไว้ในห้องปรับอากาศเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง แล้วทำการบันทึกผลการทดลองวัดค่าตัวแปรต่างๆ เทียบกับอุปกรณ์วัดมาตรฐานทุกหนึ่งชั่วโมง ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-7 จากผลการทดลองจะพบว่าค่าตัวแปรทุกตัวที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นมีค่าความผิดพลาดเป็นไปตามคุณสมบัติของเซ็นเซอร์ในตารางที่ 2 และจะแสดงผล

ตารางที่ 4 ผลการทดลองกรณีตัวแปรอุณหภูมิ

ชั่วโมงที่	ค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัด (°C)	ค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัดมาตรฐาน (°C)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
1	26.1	25.5	2.4
2	25.8	25.1	2.8
3	25.5	25.5	0.0
4	25.3	25.1	0.8
5	24.7	24.5	0.8
6	23.9	24.1	0.8
7	23.5	23.6	0.4
8	23.4	23.1	1.3
เฉลี่ย	24.8	24.6	1.2

แบบสัมผัสก็สามารถแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล

3.2 การทดสอบระบบควบคุมและนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

หัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการทำแผนที่ การนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยทำการทดสอบ ณ บริเวณคลินิกพิเศษโรงพยาบาลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี ซึ่งมีขนาดพื้นที่ กว้างxยาว เท่ากับ 6.0x11.34 m. ดังแสดงในรูปที่ 12 ในการทดสอบสร้างแผนที่จะใช้เทคนิค Cartographer [18] กำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงเส้นเท่ากับ 0.2 m/s และความเร็วเชิงมุมเท่ากับ 0.5 rad/s ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรายละเอียดของแผนที่ รูปแผนที่บริเวณทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 จะพบว่าแผนที่มีความชัดเจนพอสมควร มีบริเวณที่ภาพไม่ชัดบ้างเนื่องจากการสะท้อนแสงของกระจก มีคนเดินผ่านไปมาหรือสิ่งของเคลื่อนที่ ขณะทำการเก็บแผนที่



ตารางที่ 5 ผลการทดลองกรณีตัวแปรความชื้นสัมพัทธ์

ชั่วโมงที่	ค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัด (%RH)	ค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัด มาตรฐาน (%RH)	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด (%)
1	62.1	62.8	1.1
2	61.2	58.5	4.6
3	61.3	62.1	1.3
4	62.2	61.9	0.5
5	59.4	57.0	4.2
6	59.0	59.5	0.8
7	59.6	59.6	0.0
8	59.6	59.9	0.5
เฉลี่ย	60.6	60.2	1.6

ตารางที่ 6 ผลการทดลองกรณีตัวแปร PM2.5

ชั่วโมงที่	ค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัด ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัด มาตรฐาน ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด (%)
1	4.7	5.0	6.0
2	5.0	5.4	7.4
3	5.1	5.6	8.9
4	4.9	5.3	7.5
5	4.8	5.0	4.0
6	3.0	2.8	7.1
7	2.9	2.7	7.4
8	4.1	4.5	8.9
เฉลี่ย	4.3	4.5	7.2

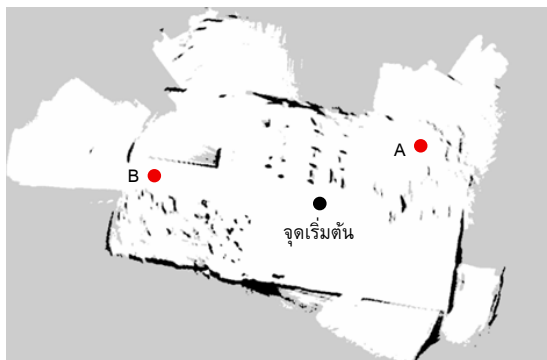


ตารางที่ 7 ผลการทดลองกรณีตัวแปร PM10

ชั่วโมงที่	ค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัด ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัด มาตรฐาน ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด (%)
1	8.2	8.9	7.9
2	8.5	9.2	7.6
3	8.7	9.5	8.4
4	8.8	9.6	8.3
5	7.8	8.2	4.9
6	10.5	9.9	6.1
7	5.2	4.8	8.3
8	8.2	7.6	7.9
เฉลี่ย	8.2	8.5	7.4



รูปที่ 12 บริเวณคลินิกพิเศษ โรงพยาบาลรัฐบุรี



รูปที่ 13 แผนที่บริเวณทดสอบที่เก็บได้จากหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

การทดสอบระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางจะทำโดยนำหุ่นยนต์ไปไว้บริเวณกลางพื้นที่คลินิกพิเศษแล้วให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดหมายที่บริเวณมุมห้อง (จุด A) และที่ทางเข้า (จุด B) ดังรูปที่ 13 ตั้งค่าตัวแปรที่สำคัญในเพจเพจ Nav2 ได้แก่ ความเร็ว



สูงสุดในการเคลื่อนที่เชิงเส้นและเชิงมุมเท่ากับ 0.4 m/s และ 0.5 rad/s ตามลำดับ พื้นที่สำหรับทำ Local cost map เท่ากับ 3x3 m. โดยจะทำการทดลอง จำนวน 3 รอบ บันทึกผลค่าความผิดพลาดของ ตำแหน่งตามแนวแกน x, y รวมถึงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ผลการทดลองสามารถแสดงดังตารางที่ 8-9 เส้นแนวทางการเดินที่สร้างจาก Nav2 และการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14-17

จากตารางที่ 8 และ 9 จะพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดในแนวแกน x และ y เท่ากับ 0.16 m. และ 0.18 m. ตามลำดับ เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ จุด B จะมากกว่าจุด A เนื่องจากระยะทางเคลื่อนที่ไกลกว่า ส่วนค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ส่วนหนึ่งมาจากมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ใช้เป็นหุ่นราคา ถูกที่ใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ (Hall sensor) ในการวัดมุมของล้อทำให้ความละเอียดของมุมที่วัดได้ต่ำ หากต้องการลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งต้องมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดมุมที่มีความละเอียดมากขึ้นเพิ่มเติม

3.3 การทดสอบวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล

หัวข้อนี้จะเป็นการนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ สำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นไป ทดสอบการใช้งาน โดยจะใช้พื้นที่ของคลินิกพิเศษ โรงพยาบาลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี เป็นสถานที่ทดสอบ ในขณะที่มีผู้ใช้บริการตามปกติ โดยเริ่มต้นจะให้หุ่นยนต์อยู่ตรงตำแหน่งเริ่มต้นดังรูปที่ 13 จากนั้นให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดวัดจำนวน 2 จุด คือ จุด A และ B โดยแต่ละจุดใช้ระยะเวลาในการวัด 5 นาที แล้วบันทึกผล จากการทดลองพบว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดวัดและกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นได้

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบนำทางไปที่จุด A

ลำดับ	ค่าความผิดพลาด		เวลา (s)
	x(m)	y(m)	
1	0.16	0.17	58
2	0.17	0.18	55
3	0.16	0.19	60
เฉลี่ย	0.16	0.18	57.67

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบนำทางไปที่จุด B

ลำดับ	ค่าความผิดพลาด		เวลา (s)
	x(m)	y(m)	
1	0.15	0.18	72
2	0.16	0.19	76
3	0.15	0.16	74
เฉลี่ย	0.15	0.18	74

ตารางที่ 10 ผลตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่จุด A

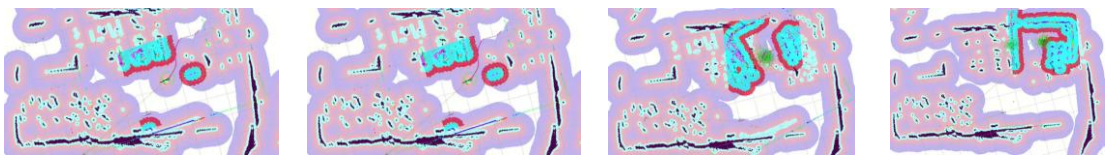
ครั้งที่	Ta (°C)	RH (%)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	30.6	72.8	11	13
2	31.0	70.6	11	13
3	31.1	70.6	12	14
เฉลี่ย	30.9	71.3	11.3	13.3

อย่างถูกต้อง ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 10-11 ซึ่งพบว่าค่าตัวแปรอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เกินเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนตัวแปร PM2.5 และ PM10 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ทางโรงพยาบาลจะได้นำไปทำแผนการปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมในอาคารต่อไป



ตารางที่ 11 ผลตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่จุด B

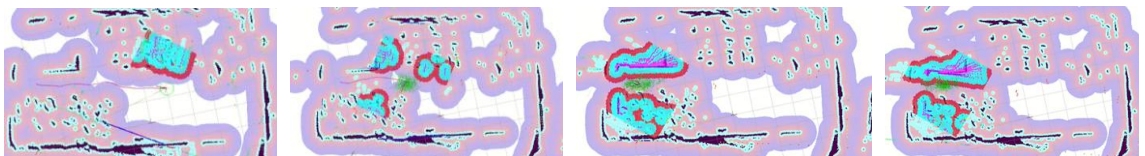
ครั้งที่	Ta (°C)	RH (%)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	31.4	65.6	10	17.5
2	30.6	67.1	11	17.2
3	30.9	67.7	12	18.1
เฉลี่ย	30.9	66.8	11	17.6



รูปที่ 14 เส้นทางทางเดินของหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นไปยังจุด A



รูปที่ 15 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จริงจากจุดเริ่มต้นไปยังจุด A



รูปที่ 16 เส้นทางทางเดินของหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นไปยังจุด B



รูปที่ 17 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จริงจากจุดเริ่มต้นไปยังจุด B



4. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสำหรับการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาล โดยหุ่นยนต์จะทำการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อนุภาค PM_{2.5} และอนุภาค PM₁₀ แล้วแสดงผลผ่านหน้าจอสัมผัส สามารถสร้างแผนที่และนำทางไปยังจุดที่ต้องการตรวจวัดได้โดยอัตโนมัติ จากผลการทดลองพบว่า การวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมสามารถตรวจวัดและแสดงผลของการวัดได้อย่างถูกต้องและค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดของเซ็นเซอร์ก็เป็นไปตามเกณฑ์ที่ผู้ผลิตกำหนด ส่วนหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติที่พัฒนาโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ ROS 2 ก็สามารถสร้างแผนที่และนำทางได้อย่างถูกต้อง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดในแนวแกน x และ y เท่ากับ 0.16 m. และ 0.18 m. ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบใช้งานในโรงพยาบาลพบว่า หุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามที่กำหนด สามารถรายงานผลการตรวจวัดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำแผนการปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมในอาคารต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตที่ใช้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เฉพาะตามเส้นทางที่กำหนดไว้แล้ว [8-9] จะพบว่ามีความยืดหยุ่นและสะดวกกว่ามากเมื่อนำไปใช้งานจริง เพราะหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ด้วยตัวเอง รวมถึงความสามารถในการสร้างแผนที่ขึ้นมาได้ใหม่ได้ตลอดเวลา และเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่นำหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติในอุตสาหกรรมมาใช้ตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม [10] จะพบว่าหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นมานี้มีต้นทุนทางด้านซอฟต์แวร์ที่

ต่ำกว่าเพราะพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาด้วยซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สจึงไม่มีค่าใช้จ่ายส่วนนี้ อีกทั้งชิ้นส่วนของหุ่นยนต์สามารถหาได้ภายในประเทศจึงมีความสะดวกและค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อมีการซ่อมบำรุง

งานวิจัยในอนาคตจะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์เพิ่มเติมเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่และหยุดได้อย่างแม่นยำ รวมถึงการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ร่วมกับข้อมูลที่เก็บได้เพื่อใช้ในการทำนายคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2567 สัญญาเลขที่ 488/2567

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bureau of environmental health under Department of health, Handbook of indoor air quality assessment for the authorities, Bureau of environmental health, Nonthaburi, Thailand, 2016. (in Thai)
- [2] Working group on indoor air quality--biological contaminants under World Health Organization (WHO), Report on a meeting of the Working Group on Indoor Air Quality--Biological Contaminants, Rautavaara, Finland, 1988.
- [3] C. Priyada, P. Chamaiphon and P. Wantana, Study of indoor air quality in hospitals and hotels in Thailand, Environmental Health Journal, 2014, 16(2), 51 - 66. (in Thai)



- [4] V.V. Tran, D. Park and Y.-C Lee, Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17, 1 - 27.
- [5] T.-W Tsang, K.-W Mui, L.-T Wong, A. C.-Y Chan and R. C.-W Chan, Real-time indoor environmental quality (IEQ) monitoring using an IoT-based wireless sensing network, *Sensors*, 2024, 24(21), 1 - 20.
- [6] Z. Liu, G. Wang, L. Zhao and G. Yang, Multi-points indoor air quality monitoring based on internet of things, *IEEE Access*, 2021, 9, 70479 - 70492.
- [7] G. Yang, Z. Zhang, J. Yu, H. Chen, H. Zhou, B. Lin and W. Zhuang, An intelligent IEQ monitoring and feedback system: Development and applications, *Engineering*, 2022, 18, 218 - 231.
- [8] Y. Sriladda, N. Woranuwatkul, K. Thararam, P. Desyoo, T. Wangkham and S. Chanket, Air quality monitoring robot with automatic air filter, *Journal of Health Technology*, 2024, 5(1), 26 - 29. (in Thai)
- [9] B. Dyer, M. Biglarbegan, and A. A. Aliabadi, The autonomous robotic environmental sensor (ARES), *Science and Technology for the Built Environment*, 2021, 27(10), 1461 - 1472.
- [10] V. Jan, R. Hercik, and P. Bilik, Using interoperability between mobile robot and KNX technology for occupancy monitoring in smart home care, *Sensors*, 2023, 23(21), 1 - 19.
- [11] https://www.iot-sc.com/product_details_3053439.html. (Accessed on 19 October 2025)
- [12] <https://www.factionation.com/products/hmi/SK-070QEV3>. (Accessed on 19 October 2025)
- [13] <https://docs.ros.org/en/galactic/index.html>. (Accessed on 22 October 2025)
- [14] https://wiki.ros.org/diff_drive_controller. (Accessed on 22 October 2025)
- [15] <https://docs.nav2.org/>. (Accessed on 22 October 2025)
- [16] <https://emin.com.mm/uni-tut333s-uni-tut333s-digital-temperature-humidity-meter-10-60degc-0-100-rh-68387/pr.html>. (Accessed on 23 October 2025)
- [17] <https://temtopus.com/products/temtop-p600-air-quality-laser-particle-detector-professional-meter-for-pm2-5-pm10-tft-color-lcd-display?variant=41039511879728>. (Accessed on 23 October 2025)
- [18] X. Zhang, J. Lai, D. Xu, H. Li, and M. Fu, 2D lidar-based SLAM and path planning for Indoor rescue using mobile robots, *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 8867937, 1 - 14.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or not less than 2500 words using a word count of MS Word (should not exceed 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3-5 words).

The content of the research article consists of 5-6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

☐ ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่ได้เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

☐ ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index>☐ ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com☐ ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

1. Title

2. Type of manuscript ☐ Research Article ☐ Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

☐ I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

☐ Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech/index>

☐ Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com

☐ Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature Corresponding author

(.....)

Date Month Year

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๔

บทความ (Articles)

- Application of Piezoelectric Sensors to Determine the Strength of Eco-Friendly Construction Material. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 1-18.
- Influence of Natural Organic Matter on Fouling Mechanisms and Hexavalent Chromium Removal by Nanofiltration Membranes. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 17-35.
- Applying Social Engineering for Localized Technology Development: A Case Study in Forage Management for Cattle Farmers. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 36-52.
- Influence of Engine Oil Viscosity on the Combustion and Performance Characteristics of Gasoline Direct Injection Engines. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 53-71.
- Design and Development of a Fixture for an Automated Mobile Rice Thresher to Improve Painting Process Efficiency. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 72-89.
- An Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Spare Parts Prioritization in the Beverage Industry. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 90-108.
- Comparative Study on the Dynamic Performance of Natural Rubber-Based and Polyurethane Rail Dampers. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 109-125.
- Experimental Design for Optimization of Conditions Affecting Over-Standard Paint Thickness in Car Hood Electrodeposition Process. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 126-138.
- Properties of Pervious Concrete Containing Fly Ash and Polyvinyl Alcohol Fibers. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 139-153.
- Design and Development of the Lygodium Shoulder Bags through the Integration of Quality Function Deployment and Kansei Engineering. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 154-176.
- Two-phase Induction Motor Drive with Two-phase Matrix Converter with Sinusoidal PWM. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 177-192.
- Effects of Natural Oils on the Oxidative Stability of a High Cannabidiol Cannabis Oil Formulation under Accelerated Thermal Conditions. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 193-207.
- Autonomous Mobile Robot for Environmental Quality Monitoring in Hospital. The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(2), 208-223.