

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

ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๗

VOLUME 20 | ISSUE 1 | 2024 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๗

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายิ่งจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์
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 วิศวกรรมอุตสาหกรรม 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 ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่ นั้น 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 20 ฉบับที่ 1 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาและเผยแพร่บทความด้วยระบบ Online Journal Submission (OJS) ร่วมกับการเผยแพร่บทความแบบรูปเล่ม 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/jointtech 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	
การจัดการสินค้าคงคลังเพื่อลดค่าใช้จ่ายการบริหารจัดการสินค้าและการออกแบบปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ เพื่อลดค่าขนส่ง: กรณีศึกษาบริษัท AAA จำกัด (Inventory Management to Reduce Product Administration Costs and Design Improvement of Packaging to Reduce Shipping Cost: A Case Study of AAA Company Limited) <i>Pipat Rungruang, Piyanate Nakseedee</i>	1-15
การออกแบบและสร้างระบบการผลิตปุ๋ยหมักที่มีการควบคุมด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Design and Construction of Compost Production System Controlled by the Internet of Things) <i>Siriwich Tadsuan, Panuwat Taerakul</i>	16-31
Optimal Power Allocation in NOMA System Based on Artificial Intelligence Methods <i>Igor Jovanovic, Kritsada Mamat</i>	32-45
สมบัติทางกายภาพ กำลังอัด และโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าไม้ไผ่ (Physical Properties, Compressive Strength and Microstructure of Interlocking Concrete Paving Block Containing Bamboo Ash) <i>Suchart Chantaramanee , Abideng Hawa , Chatree Homkhiew, Nuntachai Chusilp</i>	46-61
Production Planning and Machine Maintenance Schedule of Dragon Green Energy Company, Limited <i>Adul Phuk-in</i>	62-80



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
ดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของระบบทำน้ำเย็นในอาคารกองสลากกินแบ่งรัฐบาล (Energy Performance Indicator of the Chiller Water System in the Government Lottery Office) <i>Sumol Sae-heng Pisitsungkakarn , Jutakorn Potisarangkul , Tammatuch Srathongchan , Thatchai Laythong , Wanchalee Pengpongsa, Weera Sriariyakul</i>	81-94
การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ: กรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติก (Development of Mathematical Model for Reverse Logistics Management: A Case Study of Plastic Recycling) <i>Jaturit Promsala, Rojane Homchalee</i>	95-111
อิทธิพลของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและการกระจายตัวของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในอาคารจอดรถใต้ดิน (Influence of Meteorological factors and Distribution of Particulate Matter at Underground Parking) <i>Akaporn Prachanurak, Pradthana Prachanurak</i>	112-129
การย่อยสลายพลาสติกพอลิพรพิลีนโดย <i>Fictibacillus phosphorivorans</i> ที่แยกจากตะกอนดินน้ำจืด (Polypropylene Biodegradation by <i>Fictibacillus phosphorivorans</i> Isolated from Freshwater Sediment) <i>Pradinunt Eiamsa-ard</i>	130-140
การปรับปรุงกระบวนการประกอบเครื่องกรองน้ำเพื่อลดเวลาการผลิตและความเสี่ยงทางการยศาสตร์ (Improvement of the Water Purifier Assembly Process to Reduce Process Time and Ergonomic Risk) <i>Phattarasaya Tantiwattanakul , Krit Khaonun , Tasakorn Wongworapitak , Visarut Markthongdee, Kunanon Arnon</i>	141-156
พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้หน้าทับบรรทุกแบบสถิตย์ (Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened with Carbon Fiber under Static Loading) <i>Sineenat Kaewprasit , Sayan Sirimontree, Chanachai Thongchom</i>	157-170



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
Reducing Harmful Effects on Human Health of Car Vibrations using a Combination of Unsupervised and Supervised Machine Learning Algorithm <i>Pachara Juyploy, Chatlatanagulchai Withit</i>	171-185
การออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาเลท (Design and development of the Pallet Shot Machine) <i>Nittaya Siriwan, Kwanchai Saeweean, Wannalak Laotaweesub</i>	186-200
ประสิทธิภาพของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการลดระดับความเครียดของสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (PC-Plank Girder) ภายใต้น้ำหนักบรรทุก (The Performance of Carbon Fiber in Decreasing the Strain Level of the PC-Longitudinal Bridge (PC-Plank Girder) under Service Load) <i>Pruchaya Yoddumrong, Chichaya Boonmee และ Kittipoom Rodsin</i>	201-215
บทความวิชาการ	
RETRACTED: หลักเกณฑ์การตรวจสอบโครงสร้างสะพานและการวางแผนเพื่อซ่อมบำรุงรักษา: กรณีศึกษาเกณฑ์ที่ใช้ในประเทศไทยและต่างประเทศ (PC-Plank Girder) ภายใต้น้ำหนักบรรทุก (The Criteria for Bridge Structures Inspecting and Planning for Maintenance: A Case Study of Thailand and the Other Countries) <i>Thawatchai Phanyakit</i>	216-230
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2



การจัดการสินค้าคงคลังเพื่อลดค่าใช้จ่ายการบริหารจัดการสินค้าและการ ออกแบบปรับปรุงบรรจุภัณฑ์เพื่อลดค่าขนส่ง: กรณีศึกษาบริษัท AAA จำกัด

พิพัฒน รุ่งเรือง¹ และ ปิยะเนตร นาคสีดี^{2*}

¹ หลักสูตรบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, การจัดการโลจิสติกส์, คณะบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: piyanate.n@gmail.com

วันที่รับบทความ: 3 สิงหาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 24 พฤศจิกายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 12 ธันวาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: บริษัท AAA จำกัด ดำเนินธุรกิจโรงเรียนกวดวิชา ซึ่งมีสาขาทั่วประเทศ จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 ที่ผ่านมา ส่งผลให้พฤติกรรมการซื้อของผู้บริโภคเปลี่ยนไป การเข้าซื้อหน้าสาขาลดลง การซื้อผ่านช่องทางออนไลน์เพิ่มขึ้น บริษัทจึงตัดสินใจปรับเปลี่ยนรูปแบบการสั่งซื้อและจัดส่งหนังสือ เป็นการดำเนินการผ่านช่องทางออนไลน์ 100% จากเดิมที่ช่องการขายและรับหนังสือเป็นการดำเนินการผ่านทางหน้าร้านเป็นหลัก การเปลี่ยนแปลงในครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้พบปัญหาในเรื่องบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสมในการจัดส่ง อีกทั้งยังพบปัญหาสินค้าคงคลังเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ รวมถึงพบปัญหาสินค้าล้าสมัยที่สูงโดยวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการเก็บคลังสินค้า ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสินค้าล้าสมัย อีกทั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการขนส่งสินค้า และค่าบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการส่งพัสดุ ผลการศึกษาจากการใช้ทฤษฎี SWOT Analysis และ TOWS Matrix ในการคิดกลยุทธ์การดำเนินการโดยยกกลุ่มสินค้าตัวอย่างชายดี 5 คอร์ส เพื่อแสดงต้นทุนที่เกิดขึ้น โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและต้นทุนสินค้าได้กว่า 11,056,738.81 บาท และนางบประมาณส่วนนี้ไปพัฒนาปรับปรุงกระบวนการอื่นๆแทนได้ รวมถึงการใช้ทฤษฎี ABC Analysis มาช่วยจัดการหมวดหมู่สินค้า สามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บสินค้าได้ 433,616.04 บาท/ปี และยังคงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อหนังสือเพิ่ม 733,595.71 บาทในรอบปี 2023 ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้าได้เพิ่ม 55,621.29 บาท/ปี อีกทั้งในการใช้หลักการของน้ำหนักมิติมาเป็นหลักคิดในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ยังสามารถช่วยลดค่าขนส่งลงได้ 379,762 บาท/ปี และการปรับสเปคบรรจุภัณฑ์ช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้รวม 459,718.60 บาท/ปี

คำสำคัญ: SWOT Analysis; การจัดการสินค้าคงคลัง; การลดต้นทุน; บรรจุภัณฑ์

Inventory Management to Reduce Product Administration Costs and Design Improvement of Packaging to Reduce Shipping Cost: A Case Study of AAA Company Limited

Pipat Rungruang¹ and Piyanate Nakseedee^{2*}

¹ Master of Business Administration Program in Logistics Management, School of Business, University of the Thai Chamber of Commerce

² School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce

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

Received: 3 August 2023; Revised: 24 November 2023; Accepted: 12 December 2023

Online Published: 17 April 2024

Abstract: AAA Company Limited operates a tutoring school business with branches across the country. The past COVID-19 pandemic situation has led to changes in consumer buying behavior, with fewer in-store purchases and increased online shopping. The company, therefore, decided to transform its book order and delivery system into a 100% online operation, a shift from the previous method of selling and receiving books mainly in stores. With this change, the researchers identified problems with inappropriate packaging for delivery and found issues of a large amount of unsold inventory, affecting the cost of storage, and issues with outdated products. The purpose of this research is to reduce the cost of inventory, and the cost of outdated products, as well as to reduce the shipping costs and improve the packaging used for shipping parcels. The results from using SWOT Analysis and TOWS Matrix for strategic planning, with an example of the top 5 selling products, showed that operational and inventory costs could be reduced by more than 11,056,738.81 baht. This budget can be allocated to the development and improvement of other processes. Furthermore, using the ABC Analysis theory to manage product categories could reduce storage costs by 433,616.04 baht/year and also reduce the cost of ordering additional books by 733,595.71 baht in the year 2023. In addition, the holding cost can be saved 55,621.29 baht/year. Using weight dimensions as a principle in packaging design can also reduce transportation costs by 379,762 baht per year, and adjusting packaging quality can reduce costs by a total of 459,718.60 baht/year.

Keywords: SWOT Analysis; Inventory Management; Cost Reduction; Packaging



1. บทนำ

บริษัท AAA จำกัด เป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจในส่วน
ของโรงเรียนทอวิชาที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการสอน
เปิดสอนในระดับประถมศึกษาถึงมัธยมศึกษา
ครอบคลุมเนื้อหาภาควิชาสายวิทย์-คณิต และภาควิชา
สายศิลป์ สอนโดยทีมครูที่จบจากมหาวิทยาลัยชั้นนำ
โดยจากกระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 สาขาหน้า
ร้านทั้งหมดถูกสั่งปิดตามประกาศของรัฐบาล และความ
วิตกกังวลจากตัวนักเรียนและผู้ปกครองในการเข้าใช้
พื้นที่ ส่งผลให้ยอดขายผ่านหน้าสาขาซึ่งเป็นช่อง
ทางการขายหลักลดลงอย่างมหาศาล ถึงแม้สถานการณ์
จะคลี่คลายลงแล้วก็ตาม แต่ด้วยพฤติกรรมลูกค้าที่เริ่ม
เปลี่ยนแปลงไป ทำให้บริษัทตัดสินใจปรับเปลี่ยน
ช่องทางการขายมาเป็นการขายผ่านช่องทางออนไลน์
100% ผ่านเว็บไซต์ แทนการขายผ่าน POS จาก
สาขาทันที บริษัทหันไปใช้บริการคลังสินค้า [1]
เช่าแพ็คเกจสินค้าแบบ Fulfillment ยกเลิกการสต็อกสินค้า
ที่สาขา และส่งมอบให้บริษัทขนส่งพัสดุส่งสินค้าถึงมือ
ลูกค้าแต่ด้วยบรรจุภัณฑ์แบบเดิมที่ใช้งานอยู่เป็นบรรจุ
ภัณฑ์ที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่เมื่อครั้งที่ยังมีปริมาณการ
ส่งมอบผ่านช่องทางออนไลน์ที่ไม่มากนัก และยังคงถูก
ใช้งานมาจนถึงปัจจุบัน ทำให้ปริมาณออเดอร์เพิ่มขึ้น
อย่างทวีคูณ ปัจจัยค่าขนส่งสินค้ากลายเป็นหนึ่งใน
ต้นทุนหลักของบริษัท โดยปัจจุบันทางบริษัทมีต้นทุน
ค่าขนส่งสินค้าในปี 2022 อยู่ที่ 5,891,253.74 บาท
คิดเป็นค่าขนส่งต่อออเดอร์ที่ 43.01 บาทต่อออเดอร์
บรรจุภัณฑ์เดิมได้ถูกออกแบบไว้ 2 รูปแบบ
คือกล่องลูกฟูกสีขาว สกรีน 4 สี ขนาด 33X24X12 cm
(มีการใช้งานกว่า 90%) และกล่องลูกฟูกสีน้ำตาล สกรีน
สีดำ 1 สี ขนาด 23X30X26 cm (มีการใช้งาน 10%)

ในส่วนของสินค้าคงคลังของทางบริษัท สินค้าได้ถูก
เก็บสะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการสั่งซื้อเข้ามาทั้ง
หนังสือเรียน สั่งซื้อโบว์ลิ่ง กระดาษข้อสอบ สื่อการเรียน
แต่ขาดซึ่งการจัดการ วิเคราะห์ ทบทวนปริมาณสินค้าที่
มีอยู่ ทำให้ทางบริษัทต้องแบกรับต้นทุนค่าจัดเก็บสินค้า
สะสมเพิ่มขึ้น โดยราคาค่าจัดเก็บสินค้าที่เกิดขึ้นมี
ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเดือนละ 135,285.97 บาท อีกทั้งที่ผ่าน
มาทางบริษัทยังเกิดปัญหามีมูลค่าสินค้าล้าสมัยเฉลี่ยถึง
ปีละ 3,656,045.23 บาท และไม่สามารถนำไปใช้งานได้
ต่อได้นอกจากการขายซากและทำลายทิ้ง

ดังนั้นการศึกษาทำวิจัยในครั้งนี้ ทางผู้วิจัยจึงนำ
ปัญหาที่เกิดขึ้น มาแก้ไขโดยใช้ทฤษฎีในส่วนของการใช้
SWOT Analysis และ TOWS Matrix [2] ในการคิด
กลยุทธ์เพื่อหาแนวทางในการลดต้นทุน สร้าง
ข้อได้เปรียบให้กับองค์กร ใช้ทฤษฎี ABC Analysis [3]
ในการบริหารจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีระบบยิ่งขึ้น
รวมถึงใช้หลักการคิดน้ำหนักมิติ [4] ในการออกแบบ
บรรจุภัณฑ์ เพื่อช่วยวิเคราะห์หาแนวทางในการลด
ค่าใช้จ่ายในการขนส่งมากยิ่งขึ้น [5]

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel คิดคำนวณ
ค่าต่างๆ ในงานวิจัยฉบับนี้ โดยจุดตั้งต้นทางผู้วิจัยได้
ใช้ทฤษฎีผังก้างปลา [6] มาวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุ
ของปัญหา เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขที่ถูกต้องตาม
ประเด็น ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 3 ปัญหา (รูปที่ 1-3) ดังนี้

2.1 ปัญหาสินค้าล้าสมัย

จากการวิเคราะห์ด้วยผังก้างปลาทางผู้วิจัยเลือก
แก้ไขในส่วนของนโยบายการวางแผนผลิตภัณฑ์
ในองค์กร โดยได้ใช้ทฤษฎี SWOT Analysis เพื่อหา



จุดแข็ง จุดอ่อน อุปสรรค โอกาส ของบริษัท จากนั้นทางผู้วิจัยเลือกใช้ TOWS Matrix ในการจับคู่คิดกลยุทธ์เพื่อหาแนวทางในการลดต้นทุน [7-9] พร้อมแสดงตัวอย่างการคิดต้นทุนค่าหนังสือและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่เกิดขึ้นจริง เพื่อประกอบการพิจารณา

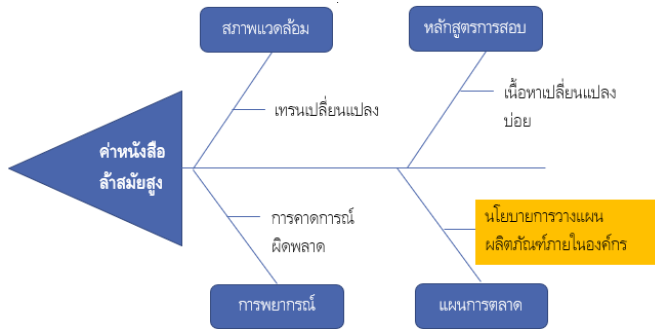
2.2 ปัญหาค่าจัดเก็บสินค้าสูง

จากการวิเคราะห์ด้วยผังก้างปลาทางผู้วิจัยเลือกแก้ไขในส่วนของการเก็บสินค้าที่ไม่ได้ใช้งาน และในด้านการจัดการสินค้าได้เลือกทฤษฎี ABC Analysis

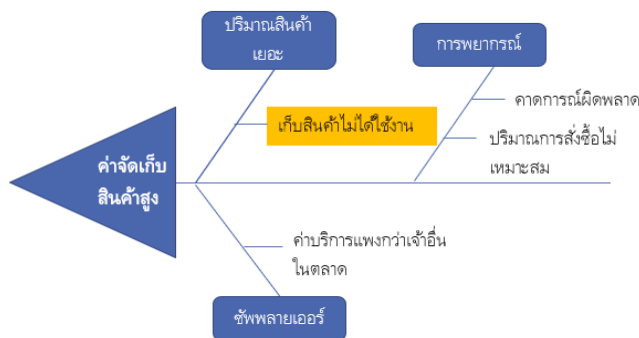
ในการบริหารจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีระบบยิ่งขึ้น [10-13]

2.3 ปัญหาค่าขนส่งสูง

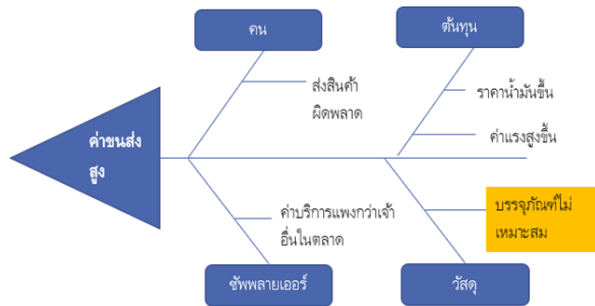
จากการวิเคราะห์ด้วยผังก้างปลาทางผู้วิจัยเลือกแก้ไขในส่วนของบริษัทที่ ไม่เหมาะสม โดยใช้หลักการคิดต้นทุนน้ำหนัก เพื่อช่วยวิเคราะห์ และออกแบบเพิ่มขนาดของบริษัทใหม่ เพื่อหาแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง [14]



รูปที่ 1 ผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุเรื่องค่าหนังสือลำสมัยสูง



รูปที่ 2 ผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุเรื่องค่าจัดเก็บสินค้าสูง



รูปที่ 3 ผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุเรื่องค่าขนส่งสูง

จากรูปที่ 4 พบว่าหากแพ็คสินค้าในจำนวน 1-2 เล่ม ด้วยกล่องบรรจุภัณฑ์หลักมีในปัจจุบันนั้น ส่งผลให้มีช่องว่างเหลือมาก

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเล่มต่อออเดอร์ที่มีการส่งมากที่สุดในปี 2022 มีผ่านมามีเพียงจำนวน 1 และ 2 เล่มตามลำดับ เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบรรจุภัณฑ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่มีความเหมาะสมสอดคล้องกับจำนวนการส่งมอบสินค้า



รูปที่ 4 ขนาดของสินค้าไม่สอดคล้องกับขนาดของบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 1 ตารางแจกแจงจำนวนเล่มต่อออเดอร์ปี 2022

จำนวนเล่ม	รวมออเดอร์ปี 2022	%
1	52,786	39%
2	26,593	19%
3	9,476	7%
4	15,758	12%
5	8,760	6%
6	5,711	4%
7	2,969	2%
8	3,470	3%
9	4,448	3%
≤10	7,004	5%
รวม	136,975	100%

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel คิดคำนวณค่าต่างๆ ในงานวิจัยฉบับนี้ โดยจุดตั้งต้นทางผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีผังก้างปลา [6] มาวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุของปัญหา เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขที่ถูกต้องตามประเด็น ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 3 ปัญหา (รูปที่ 1-3) ดังนี้

3.1 การสร้างกลยุทธ์ในการจัดการสินค้าลำสมัย

ทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์ SWOT Analysis ขององค์กร โดยวิเคราะห์ออกมาได้ดังนี้

(1) จุดแข็ง

S1. เป็นสถาบันที่มีชื่อเสียงเป็นอันดับต้นๆ และมีสาขาหน้าร้านพร้อมให้คำปรึกษาด้านปัญหาการเรียนกับผู้ปกครองกว่า 52 แห่งทั่วประเทศ



- S2. มีการ Rebrand สร้าง Bu ใหม่ ๆ มาเพื่อเจาะกลุ่มลูกค้าที่หลากหลายขึ้น ได้แก่ โรงเรียนกวดวิชา ทักษะเพื่อวัยทำงาน หลักสูตรขายผ่านโรงเรียน หลักสูตรนักเรียน Inter หลักสูตรการเงิน
- S3. รองรับรูปแบบการเรียนรู้ ทั้งการเรียนรู้ผ่านหนังสือเรียนในรูปแบบเดิม หรือการเรียนรู้ผ่านไฟล์จาก E book ตามยุคสมัยใหม่
- S4. ทางบริษัทกำลังเข้าสู่ตลาดหลักทรัพย์ไทย ซึ่งส่งเสริมภาพลักษณ์ ความแข็งแรง ความน่าเชื่อถือให้กับทางบริษัทได้ดี
- 5. เรียนได้อย่างอิสระ ทุกที่ วางแผนได้ด้วยตนเอง

(2) จุดอ่อน

- W1. การผูกติดชื่อเสียงของอาจารย์ผู้สอน ทำให้ตัดโอกาสในการขาย และการสร้างฐานลูกค้าให้อาจารย์คนอื่น ๆ
- W2. ไม่สามารถยับยั้งคอร์สได้ / เลื่อนกำหนดการขายไม่ได้ ส่งผลให้มีหนังสือล้าสมัยเกิดขึ้น ไม่สามารถระบายสินค้าออกได้ทั้งหมด
- W3. การใช้ระบบเทคโนโลยี ในกิจกรรมต่างๆยังไม่เสถียร เช่น ระบบการเชื่อมต่อข้อมูลในการบริหารงานภายใน
- W4. บริษัทมีการปรับการส่งสินค้าจากการ Stock ไว้ที่สาขา เป็นการส่งถึงบ้านผ่านการสั่งซื้อในรูปแบบ Online ทำให้ลูกค้าต้องรอสินค้า 1-2 วัน จากเดิมที่สามารถรับหนังสือจากหน้าร้านได้ทันที
- W5. มีอายุคอร์ส และชั่วโมงเรียนที่จำกัด
- W6. หนังสือค่อนข้างเป็นภาระ ไม่สะดวกในการพกพาหลายเล่ม
- W7. คอร์สเรียนมีราคาสูง

(3) โอกาส

- O1. เทรนการเรียนออนไลน์มีแนวโน้มมากขึ้น หลังจากช่วงโควิดที่ผ่านมา
- O2. ค่านิยมเรื่องการในบุตรหลานเรียนในสถาบันที่มีชื่อเสียงยังคงมีอย่างต่อเนื่องและโปกัสมากยิ่งขึ้น ทำให้ทางบริษัทยังคงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจตลอดจนปัจจุบัน
- O3. ราคาอุปกรณ์แท็บเล็ต มีแนวโน้มราคาต่ำลง ตัวเลือกมากขึ้น สามารถเอื้อมถึงได้ง่าย ทำให้เพื่อโอกาสในการเรียนออนไลน์มากขึ้น เพิ่มการเข้าถึง

(4) อุปสรรค

- T1. แนวโน้มการมีบุตรลดลง โดยลูกค้าหลักในปัจจุบันคือ ประชากร Gen Z
 - T2. จากอัตราเงินเฟ้อสูงขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนต่างๆ สูงขึ้นทั้ง เช่น ค่ากระดาษ ค่าบรรจุภัณฑ์ ค่าเช่าสถานที่ กระทบต่อต้นทุนค่าบริหารจัดการ
 - T3. จากเศรษฐกิจที่ยังมีการชะลอตัวทำให้ อำนาจการซื้อจำกัดมากขึ้น การเลือกเรียนเฉพาะคอร์สที่สำคัญจึงยังเป็นหนึ่งในสิ่งที่ผู้ปกครองเลือกมากกว่าการเรียนหลายๆ คอร์ส
 - T4. ลูกค้าในยุคปัจจุบันต้องการการตอบสนองได้ทันทีด้วยความรวดเร็ว
- หลังจากที่ทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์ SWOT Analysis มาแล้ว ทางผู้วิจัยจึงได้นำ จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค ที่ได้มาวิเคราะห์เป็นกลยุทธ์ผ่าน TOWS Matrix ดังนี้

Strength + Opportunity กลยุทธ์เชิงรุก

- เสริมสร้าง บรรยากาศ หน้าร้านให้มีความเป็น CO-working Space มากขึ้น เพื่อเพิ่มทางเลือก



ดึงดูดนักเรียน ให้อยากใช้บริการภายในสาขา (S1, S5, O4)

- ทำกิจกรรมแคมเปญร่วมกับ แปรนต์อุปกรณ์แท็บเล็ต ได้ส่วนลด เพื่อกระตุ้นให้มีการซื้อเพื่อเรียนกับทางบริษัทได้ง่ายขึ้น (S3, O3)

Weakness + Opportunity กลยุทธ์เชิงแก้ไข

- ส่งเสริมพัฒนาบุคลากรขององค์กรเพื่อให้ความสามารถด้านเทคโนโลยีสูงขึ้น สอดคล้องกับการเป็นองค์กรแห่งยุคดิจิทัลในปัจจุบัน (W3, O1)
- พัฒนาเทคโนโลยีสื่อการเรียน การสอนแบบ Interactive ระหว่างผู้เรียนกับสื่อการสอนให้มากขึ้น (W1, O2)

Strength + Threat กลยุทธ์เชิงป้องกัน

- ผลักดันเป็นศูนย์การเรียนรู้พัฒนานวัตกรรมการเรียนรู้ให้เข้าถึงทุกช่วงวัย (S2, T1)
- สร้างความเชื่อมั่น สร้างพันธมิตรกับซัพพลายเออร์ ร่วมมือกันสร้างกลยุทธ์เพื่อหาแนวทางการลดต้นทุนร่วมกันกับบริษัท (S4, T2)

Weakness + Threat กลยุทธ์เชิงรับ

- ผลักดันการขายในรูปแบบ E Book เพื่อหลักหนีขีดจำกัดด้านการจัดการ Stock สินค้า ลดค่าใช้จ่าย และสร้างโอกาสการขายที่เต็มประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (W4, T2, T4)
- จัดหาพันธมิตรด้านสินเชื่อเพื่อผ่อนชำระระยะยาวเพื่อการศึกษา เพื่อแบ่งเบาภาระค่าใช้จ่ายลงในยุคปัจจุบัน (W7, T3)

หลังจากที่ทางผู้วิจัยได้สร้างกลยุทธ์ทั้งหมดในทุกมิติแล้วทางผู้วิจัยได้เลือกกลยุทธ์มา 3 กลยุทธ์ ดังนี้

กลยุทธ์ที่ 1 ผลักดันการขายในรูปแบบ E-Book เพื่อหลักหนีขีดจำกัดด้านการจัดการ Stock สินค้า ลดค่าใช้จ่าย และสร้างโอกาสการขายที่เต็มประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (W4, T2, T4) เพื่อโปรโมท กระตุ้นโปรโมชันลดสัดส่วนการพึ่งพิงหนังสือลงอย่างต่อเนื่อง

กลยุทธ์ที่ 2 ทำกิจกรรมแคมเปญร่วมกับ แปรนต์อุปกรณ์แท็บเล็ตสร้างส่วนลดพิเศษ เพื่อกระตุ้นให้มีการซื้อเพื่อเรียนกับทางบริษัทได้ง่ายขึ้น (S3, O3) เพื่อเพิ่มโอกาสการเลือกเรียนผ่าน E-book ในการเรียนกับองค์กร

กลยุทธ์ที่ 3 เสริมสร้าง บรรยากาศ หน้าร้านให้มีความเป็น CO-working Space มากขึ้น เพื่อเพิ่มทางเลือกดึงดูดนักเรียน ให้อยากใช้บริการภายในสาขา (S1,S5,O4) เพื่อรักษาความเชื่อมโยงระหว่างองค์กรและลูกค้าอย่างต่อเนื่อง

จากกลยุทธ์ทั้ง 3 ทางเลือกล้วนเป็นกลยุทธ์เพื่อส่งเสริมให้องค์กรลดการพึ่งพาหนังสือลง ผลักดันองค์กรให้เป็นองค์กรด้านการศึกษาแห่งยุคดิจิทัล โดยมีเป้าหมายให้เป็น E-book 100% ทางผู้วิจัยจึงแสดงตัวอย่างคอร์สขายดี 5 อันดับในปี 2022 เพื่อแสดงต้นทุนให้เห็นดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า หากมีการปรับการเรียนเป็นการเรียนผ่าน E-book 100% ในคอร์สขายดี 5 อันดับแรก สามารถประหยัดต้นทุนค่าหนังสือ ค่าการจัดการทั้งหมดไปได้ถึง 11,056,738.81 บาท โดยทางบริษัทสามารถนำต้นทุนที่ประหยัดส่วนนี้ไปใช้ในการปรับปรุงพื้นที่สาขา พัฒนาระบบความปลอดภัยของไฟล์การเรียนได้



ตารางที่ 2 ตารางแสดงต้นทุนคอร์ส ขายดี 5 อันดับ

ลำดับ	คอร์ส	ยอดขาย (คอร์ส)	ต้นทุนรวม (บาท)
1	C-233308	11,713	1,172,153.29
2	P-231399	7,621	2,945,106.71
3	ME- 239996	7,329	1,984,417.51
4	M-238399	5,855	3,854,074.76
5	G-239480	5,841	1,100,986.54
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดทั้งหมด			11,056,738.82

3.2 การจัดการสินค้าคงคลัง

จากปัญหาสินค้าคงคลังที่มีการเก็บจนมีปริมาณสะสมเป็นจำนวนมากทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ทฤษฎี ABC Analysis มาช่วยในการแก้ปัญหาในครั้งนี้ โดยมีกระบวนการดังนี้

จากตารางที่ 3 ทางผู้วิจัยได้ทำการจำแนกสินค้าคงคลังทั้งหมดภายในคลังออกเป็นหมวดหมู่ โดยจัดแบ่งได้ 6 กลุ่มใหญ่ จากนั้นทางผู้วิจัยจึงได้นำยอดเบิกตลอดปี 2022 คำนวณเป็นมูลค่าจำแนกตามกลุ่ม ABC Analysis ดังนี้

3.2.1 ทบทวนสินค้าที่ไม่สามารถใช้งานได้เพื่อขออนุมัติในการทำลาย

หลังจากที่ได้จัดแจงสินค้าออกเป็นหมวดหมู่แล้ว พบว่า สินค้ากลุ่ม C โดยส่วนใหญ่ล้วนเป็นสินค้ากลุ่ม โบชัวร์ กระดาษข้อสอบ และ หนังสือ มากที่สุดสามลำดับแรกตามลำดับ ซึ่งเป็นกลุ่มที่ควรจัดการมากที่สุด ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงรวบรวมข้อมูลทั้งหมด โดยเฉพาะ กลุ่มที่เป็น C แสดงให้ฝ่ายที่เกี่ยวข้องในองค์กรรับรู้และตัดสินใจร่วมกันว่า สินค้ากลุ่มดังกล่าว

ตารางที่ 3 จำนวนสินค้าคงเหลือ

รายการ	จำนวนสินค้า คงเหลือ (ชิ้น)	% สะสม
หนังสือ	266,475	32.57%
โบชัวร์	259,117	64.24%
กระดาษ	191,646	87.67%
ข้อสอบ		
อุปกรณ์เบ็ด เตี๊ยม	82,128	97.71%
ของฟรีเมี่ยม	15,499	99.60%
อื่นๆ	3,259	100.00%
รวม	818,124	

สามารถใช้งานต่อไปได้จริงๆหรือไม่ ในปัจจุบัน โดยหลังจากที่ได้นำข้อมูลส่งให้ฝ่ายอื่นๆที่เกี่ยวข้องช่วยประเมินตัดสินใจร่วมกัน ทางผู้วิจัยสามารถสรุปได้ถึงจำนวนสินค้าที่ไม่สามารถใช้งานได้ ดังนี้

จากการประชุมร่วมกันกับฝ่ายที่เกี่ยวข้องเพื่อสอบถามรายการสินค้าที่ไม่สามารถใช้ได้ในปัจจุบัน สามารถสรุปรายการได้ดังตารางที่ 4 และ 5 โดยมีจำนวนรวมเท่ากับ 450,710 ชิ้น คิดเป็นปริมาตรการเก็บสินค้าได้ 65.70 CBM โดยจำนวนเหล่านี้จะถูกดำเนินการส่งอนุมัติทำลายสินค้าเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บสินค้า ซึ่งค่าเช่าบริการเก็บรักษาสินค้าปัจจุบันมีอัตราค่าเช่าอยู่ที่ 550 บาท/ CBM ดังนั้นการนำสินค้าเหล่านี้ออกไปทำลายจะสามารถประหยัดค่าจัดเก็บสินค้าได้รวม 36,134.67 บาท/เดือน จากเดิมที่มีจำนวนสินค้าทั้งหมด 818,124 ชิ้น คิดเป็นปริมาตรทั้งหมด 262.29 / CBM หรือคิดเป็นค่าเช่าบริการเก็บรักษาอยู่ที่ 144,261.76 บาท/ เดือน



ตารางที่ 4 จำนวนสินค้าคงเหลือจำแนกตามกลุ่ม ACB

Analysis

รายการ	A	B	C	รวม
หนังสือ	44,579	66,363	155,533	266,475
โบชัวร์	-	-	259,117	259,117
กระดาษ	-	-	191,646	191,646
ข้อสอบ				
อื่นๆ	-	2,549	710	3,259
ฟรีเมียม	6,264	3,366	5,869	15,499
อุปกรณ์	2,080	3,677	76,371	82,128
เบ็ดเตล็ด				
รวม	52,923	75,955	689,246	818,124

ตารางที่ 5 สรุปจำนวนและรายการที่ไม่สามารถใช้งานได้ในปัจจุบัน

รายการ	A	B	C	รวม
โบชัวร์	-	-	258,773	258,773
กระดาษข้อสอบ	-	-	191,646	191,646
หนังสือ	-	-	220	220
ฟรีเมียม	-	-	52	52
อื่นๆ	-	-	19	19
รวม	-	-	450,710	450,710

ตารางที่ 6 รายการเปรียบเทียบหนังสือเวอร์ชันเก่าและใหม่จำแนกกลุ่มตามทฤษฎี ABC Analysis

รายการ	A	B	C	รวม
เวอร์ชันเก่า (SKU)	6	23	7	36
เวอร์ชันใหม่ (SKU)	33	1	2	36

3.2.2 ทบทวนหนังสือที่หมดอายุการใช้งานไปแล้วเพื่อนำไปสร้างมูลค่าเพิ่มในโครงการอื่น

หลังจากที่ได้มีการแบ่งกลุ่มสินค้าแล้วทางผู้วิจัยเล็งเห็นว่ายังมีหนังสืออยู่บางกลุ่มซึ่งเป็นหนังสือเวอร์ชันเก่า อาจนำไปสร้างมูลค่าเพิ่มนอกเหนือจากการทำลายได้ จึงตัดสินใจประชุมปรึกษาหาแนวทางการเป็นไปได้กับที่มการตลาด เพื่อนำสินค้ากลุ่มหนังสือเวอร์ชันเก่านี้ไปสร้างประโยชน์อื่น และหลังจากการประชุมเสร็จสิ้นทางผู้ร่วมประชุมต่างสรุปกันได้ว่ายังมีหนังสือบางกลุ่มที่คงเหลือในคลังสินค้าซึ่งเป็นหนังสือเวอร์ชันเก่าสามารถนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มได้บ้าง โดยการนำไปแจกกับโครงการให้ทุนนักเรียน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบตัวอย่างกลุ่มที่เป็นหนังสือเรียนเวอร์ชันเก่ากับหนังสือเรียนเวอร์ชันใหม่พบว่า หากไม่มีการพิจารณาร่วมกันในการใช้สินค้าเก่าเลย โดยปกติสินค้าที่ถูกใช้ไปในโครงการแจกทุนใน

ทุก ๆ ปี ทางที่มการตลาดล้วนใช้แต่หนังสือเวอร์ชันปัจจุบันซึ่งโดยส่วนใหญ่ล้วนเป็นสินค้าในกลุ่ม A เกือบทั้งสิ้น ดังนั้นการประชุมร่วมกันในครั้งนี้อจึงเป็นประโยชน์ที่ดีในการใช้สินค้าเก่าที่ส่วนใหญ่ล้วนเป็นสินค้ากลุ่ม B และ C มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากกว่าการนำไปทำลาย

จากจำนวนคงเหลือทั้งหมดในคลังสินค้าที่เป็นกลุ่มเวอร์ชันเก่าเมื่อนำสินค้าทั้งหมดมาจัดเรียงแบ่งเซตสินค้าใหม่ โดยอิงข้อมูลยอดการแจกสินค้าย้อนหลังในปี 2022 ที่ผ่านมา ซึ่งมียอดเฉลี่ยการแจกคอร์สอยู่ที่ 9% ต่อยอดขายทั้งหมด จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้รวม 10,823 เล่ม หรือ 1,966 คอร์ส หรือคิดเป็นมูลค่าที่สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อหนังสือใหม่เพิ่มถึง 733,595.71 บาท อีกทั้งการนำหนังสือกลุ่มนี้ไปใช้ประโยชน์ในการแจกคอร์สทุนยังสามารถช่วยระบายสินค้าให้ประหยัดค่าเช่าคลังสินค้าได้อีก 4,635.10 บาท/เดือน หรือ 55,621.29 บาท/ปี



3.2.3 การจัดการออกแบบบรรจุภัณฑ์ในการขนส่ง

ในปัจจุบันกล่องสินค้าที่ใช้งานอยู่สามารถจำแนกออกได้เป็นสองขนาด ได้แก่ กล่องบรรจุภัณฑ์ขนาด 33X24X12 cm ลูกฟูกสีเขียว สกรีน 4 สี ซึ่งมีอัตราการใช้งานสูงถึง 90% จากจำนวนการจัดส่งออเดอร์ทั้งหมด โดยสามารถบรรจุสินค้าในช่วงของออเดอร์ที่มีการบรรจุในช่วง 1-7 เล่ม และกล่องบรรจุภัณฑ์อีกหนึ่งขนาดคือ กล่องบรรจุภัณฑ์ขนาด 23X30X26 cm ลูกฟูกสีน้ำตาล สกรีนสีดำ 1 สี อัตราการอยู่ที่ 10% บรรจุสินค้าในช่วง 8 เล่มขึ้นไป

จากปัญหาที่พบว่ากว่า 58% ของออเดอร์การจัดส่งทั้งหมดอยู่ในช่วงการจัดส่งเพียง 1-2 เล่มเท่านั้น ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางการเพิ่มขนาดบรรจุภัณฑ์อีกหนึ่งขนาด เพื่อบรรจุสินค้าที่ใช้จัดส่งในช่วง 1-2 เล่ม โดยมุ่งหวังที่จะลดค่าขนส่งจากเดิมโดยทางผู้วิจัยได้นำเสนอบรรจุภัณฑ์ 2 รูปแบบเพื่อเปรียบเทียบ ตามรูปที่ 7 บรรจุภัณฑ์แบบซองบับเบิลกันกระแทก และรูปที่ 8 บรรจุภัณฑ์แบบซองพลาสติกกันน้ำ



รูปที่ 6 บรรจุภัณฑ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน กล่องบรรจุภัณฑ์ขนาด 23X30X26 cm



รูปที่ 7 บรรจุภัณฑ์แบบซองบับเบิลกันกระแทก ขนาด 26x30X2 cm



รูปที่ 5 บรรจุภัณฑ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน กล่องบรรจุภัณฑ์ขนาด 33X24X12 cm



รูปที่ 8 บรรจุภัณฑ์แบบซองพลาสติกกันน้ำ ขนาด 25X31X2 cm



ตารางที่ 7 ราคาค่าขนส่ง

kg	บริษัทขนส่ง A			บริษัทขนส่ง B		
	SIZE (cm)	กทม	ตจว	SIZE (cm)	กทม	ตจว
1 kg	≤40	22.5	31.5	24	24	33
2 kg	≤50	27	36	29	29	38
3 kg	≤60	31.5	40.5	33	33	43
4 kg	≤70	36	45	38	38	48
5 kg	≤80	40.5	49.5	43	43	52

ปัจจุบันทางบริษัทใช้บริการขนส่งจากผู้ให้บริการ 2 ราย ในการคิดราคาค่าขนส่งนั้น หากค่าน้ำหนักพัสดุ หรือค่าน้ำหนักขนาดมิติ ค่าใดที่ให้ราคาสูงที่สุด ทางผู้ให้บริการขนส่งจะเลือกเก็บค่าบริการขนส่งด้วยค่านั้นๆ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ขนาดปัจจุบันที่ใช้ขนส่งสินค้าบรรจุกลุ่ม 1-2 เล่ม คือขนาด 33X24X12 cm โดยการส่งด้วยบรรจุภัณฑ์นี้ผ่านบริษัทขนส่ง A จะเสียค่าขนส่งที่ 36 บาท (กทม) / 45 บาท (ตจว.) แต่หากขนส่งด้วยบรรจุภัณฑ์แบบซองบับเบิ้ลกันกระแทกขนาด 26x30X2 cm ผ่านบริษัทขนส่ง A จะเสียค่าขนส่งที่ 31.5 บาท (กทม) / 40.5 บาท (ตจว.) หรือหากขนส่งสินค้าด้วยบรรจุภัณฑ์แบบซองพลาสติกกันน้ำขนาด 25X31X2 cm ผ่านบริษัทขนส่ง A จะเสียค่าขนส่งที่ 31.5 บาท (กทม) / 40.5 บาท (ตจว.) โดยจะเห็นว่า การเปลี่ยนบรรจุภัณฑ์ไม่ว่าจะเป็นแบบซองบับเบิ้ลกันกระแทก ขนาด 26x30X2 cm หรือแบบซองพลาสติกกันน้ำ ขนาด 25X31X2 cm ต่างช่วยลดต้นทุนค่าขนส่งลงได้ 4.5 – 5 บาท / ออเดอร์ โดยในปี 2022 ค่าขนส่งที่เกิดขึ้นจริงคิดเป็นจำนวนเงินรวม 5,891,254 บาท ปริมาณออเดอร์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 136,975 ออเดอร์ หรือหากคิดเป็นราคาต่อออร์เดอร์เท่ากับ 43.01 บาท

ตารางที่ 8 ราคาบรรจุภัณฑ์ในแต่ละรายการและราคา Air Bubble

รายการ	ราคา / หน่วย	ค่าบับเบิ้ล / ออเดอร์	ราคา รวม
กล่องปัจจุบัน 33X24X12 cm	8.00	2.00	10.00
ซองบับเบิ้ล 26x30X2 cm	4.80	-	4.80
ซองพลาสติกกันน้ำ 25X31X2 cm	3.75	2.00	5.75

หลักการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ทั้งทางเลือกรูปแบบซองบับเบิ้ล หรือซองพลาสติกกันน้ำ ส่งผลให้ราคาค่าขนส่งในช่วงของกล่องที่บรรจุสินค้า 1-2 เล่มสามารถลดค่าขนส่งรวมได้ 379,762 บาท หรือลดลง 6.45%เหลือ 5,511,492 บาท

จากตารางที่ 8 ได้แสดงราคาทั้งหมดในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ในทุกรูปแบบ โดยตามปกติในกระบวนการแพ็คสินค้าทางคลังจำเป็นต้องห่อแผ่นพลาสติก Air Bubble กันกระแทกก่อนการบรรจุลงกล่องทุกครั้งก่อนการปิดผนึกกล่องสินค้า แต่เมื่อมีการเปรียบเทียบด้วยตารางข้างต้นสังเกตได้ว่า ในทางเลือกการบรรจุด้วยซองบับเบิ้ลกันกระแทกนั้นจะไม่จำเป็นต้องห่อแผ่นพลาสติก Air Bubble อีก เนื่องจากในซองมี Air Bubble อยู่ในตัวแล้ว ดังนั้นจึงมีค่าใช้จ่ายรวมที่ถูกลงกว่าการบรรจุด้วยซองพลาสติกกันน้ำซึ่งต้องเสียต้นทุนแฝงเพิ่มในส่วนของค่าห่อ Air Bubble ด้วย

จากการเปรียบเทียบตามตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์แบบซองบับเบิ้ลขนาด 26x30X2 cm บรรจุสินค้าในกลุ่มของการจัดส่ง 1-2 เล่มเป็นทางเลือกที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด



ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบราคาค่าบรรจุภัณฑ์ในแต่ละรูปแบบ

จำนวน เล่ม	จำนวน Order	ราคาค่าบรรจุภัณฑ์ + Air Bubble		
		กล่องปัจจุบัน 33X24X12 cm	ซองบับเบิล กันกระแทก	ซองพลาสติก โปรขนีย์ กันน้ำ
1	52,788	527,880.00	253,382.40	303,531.00
2	26,594	265,940.00	127,651.20	152,915.50
รวม	79,382	793,820.00	381,033.60	456,446.50

โดยสามารถลดค่าบรรจุภัณฑ์ในกลุ่มของการจัดส่ง 1-2 เล่ม จากเดิมที่ใช้กล่องขนาด 33X24X12 cm มีออเดอร์ทั้งหมด 79,382 ออเดอร์ ค่าบรรจุภัณฑ์และ Air Bubble รวม 793,820 บาท ลดเหลือ 381,034 บาท หรือลดค่าบรรจุภัณฑ์และค่า Air Bubble ลงได้ 412,786 บาท หรือลดลง 52%

ทั้งนี้ทางผู้วิจัยยังมีการนำเสนอการปรับเบ็ดของกล่องปัจจุบันซึ่งยังคงใช้งานในส่วนของการบรรจุในกลุ่ม 3- 7 เล่มอยู่ จากเดิมซึ่งเป็นสเปคกล่องลูกฟูกสีขาวย สกรีน 4 สี ปรับเป็นกล่องลูกฟูกสีน้ำตาล สกรีนสีดำล้วน ซึ่งสามารถลดต้นทุนค่ากล่องได้จาก 8 บาท เป็นราคา 6.9 บาท / ใบ ซึ่งเมื่อคิดเปรียบเทียบจากค่าบรรจุภัณฑ์เดิมที่ใช้บรรจุในช่วง 3-7 เล่ม จะใช้บรรจุภัณฑ์ทั้งหมด 42,666 ใบ มีค่าบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด 341,328.00 บาท ซึ่งหากมีการปรับเปลี่ยนมาใช้ กล่องกล่องลูกฟูกสีน้ำตาล สกรีนสีดำล้วน จะสามารถลดค่าบรรจุภัณฑ์ลงเหลือ 294,395.40 บาท ลดลง 46,932.60 บาท คิดเป็น 14% จากต้นทุนบรรจุภัณฑ์เดิม

4. บทสรุป

4.1 การสร้างกลยุทธ์ในการจัดการสินค้าล้ำสมัย

จากการใช้เครื่องมือ SWOT Analysis ในการวิเคราะห์ จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคขององค์กร สามารถนำมาสร้างกลยุทธ์ที่ต่อยอดด้วยเครื่องมือ TOWS Matrix และจากกลยุทธ์ทั้งหมด 8 กลยุทธ์ ทางผู้วิจัยได้คัดเลือก 3 กลยุทธ์ ได้แก่ กลยุทธ์การผลักดันการขายในรูปแบบ E-Book เพื่อหลักหนีขีดจำกัดด้านการจัดการ Stock สินค้า ลดค่าใช้จ่าย และสร้างโอกาสการขายที่เต็มประสิทธิภาพยิ่งขึ้น, กลยุทธ์การทำการกิจกรรมแคมเปญร่วมกับ แปรนต์อุปกรณ์แท็บเล็ต ได้ส่วนลด เพื่อกระตุ้นให้มีการซื้อเพื่อเรียนกับทางบริษัทได้ง่ายขึ้น, กลยุทธ์เสริมสร้าง บรรยากาศ หน้าร้านให้มีความเป็น CO-working Space มากขึ้น เพื่อเพิ่มทางเลือกดึงดูดนักเรียน ให้อยากใช้บริการภายในสาขา โดยทั้ง 3 กลยุทธ์นี้ล้วนเป็นกลยุทธ์เพื่อส่งเสริมให้องค์กรลดการพึ่งพาหนังสือลง ผลักดันให้องค์กรเป็นองค์กรด้านการศึกษาแห่งยุคดิจิทัล โดยมีเป้าหมายให้เป็น E-book 100% ซึ่งจากตัวอย่างทางผู้วิจัยได้แสดงต้นทุนหากมีการปรับ 5 คอร์สขายดี ผลักดันเป็น E-book 100% ทางองค์กรจะสามารถประหยัดต้นทุนลงไปได้ถึง 11,056,738.82 บาท/ ปี โดยสามารถนำงบประมาณส่วนนี้ไปพัฒนาส่วนอื่นๆ เช่น การพัฒนาพื้นที่สาขาหน้าร้าน การพัฒนาระบบคอร์สการเรียนแทนได้

4.2 การจัดการสินค้าคงคลัง

จากการใช้ทฤษฎี ABC Analysis เข้ามาช่วยในการจัดกลุ่มสินค้าเพื่อหาแนวทางในการจัดการสินค้าก สามารถ จัดการสินค้ากลุ่ม C ไปได้รวม 450,710 ชิ้น หรือ 55% จากสินค้าทั้งหมด 818,124 ชิ้น



โดยการจัดการสินค้าโดยการประสานร่วมกันกับฝ่ายที่เกี่ยวข้องเพื่อตัดสินใจคัดเลือกรายการสินค้าที่ไม่สามารถนำมาใช้งานต่อได้แล้วในปัจจุบันทำออกไปทำลาย โดยการตัดสินใจในการจัดการในครั้งนี้สามารถช่วยประหยัดค่าเช่าคลังสินค้าลงได้ 36,134.67 บาท/เดือน หรือ 433,616.04 บาท/ปี และการจัดการโดยการเลือกหนังสือเวอร์ชันเก่าที่ยังสามารถใช้งานได้รวม 36 SKU โดยส่วนมากล้วนเป็นสินค้ากลุ่ม B และ C สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อหนังสือใหม่เพิ่ม 733,595.71 บาทในรอบปี 2023 อีกทั้งการผลักดันหนังสือเก่าไปใช้ให้เกิดประโยชน์ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายให้การเก็บรักษาได้อีก 4,635.10 บาท/เดือน หรือ 55,621.20 บาท/ปี ดังนั้นจากการจัดการในคลังนี้เราสามารถลดค่าใช้จ่ายได้รวม 1,222,832.95 บาท/ปี คิดเป็น 36.01% จากต้นทุนทั้งหมด

4.3 การจัดการออกแบบบรรจุภัณฑ์ในการขนส่ง

จากการวิเคราะห์จากข้อมูลและพิจารณาเรื่องน้ำหนักมิติทำให้สามารถตัดสินใจออกแบบเพิ่มขนาดของบรรจุภัณฑ์ได้อีก 1 ขนาดจากเดิม ซึ่งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดส่งลงได้จากขนาดของน้ำหนักมิติที่ลดลงรวม 379,762 บาท/ปี หรือลดลง 6.45% จากค่าขนส่งทั้งหมด นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุในกลุ่มออเดอร์ที่มีการจัดส่งหนังสือในกลุ่ม 1-2 เล่ม โดยทางผู้วิจัยเลือกบรรจุภัณฑ์แบบซองบับเบิ้ลกันกระแทก 26x30x2 cm. ยังสามารถช่วยลดต้นทุนค่าบรรจุภัณฑ์ และค่า Air Bubble ได้รวม 412,786 บาท หรือลดลง 52% จากการใช้บรรจุภัณฑ์แบบเดิมในกลุ่มที่จัดส่ง 1-2 เล่ม อีกทั้งการตัดสินใจปรับสเปคของกล่องบรรจุภัณฑ์เดิมซึ่งยังใช้ในการบรรจุสินค้าในกลุ่มที่มีออเดอร์จัดส่งอยู่ระหว่าง 3-7 เล่ม จากสเปคเดิมคือ กล่อง

ตารางที่ 10 สรุปปัญหาและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

ปัญหา	เครื่องมือ	ผลลัพธ์
ค่าจัดเก็บสินค้าสูง	ABC Analysis	- ลดค่าจัดเก็บรักษาจากการทำลายได้ 433,616.04 บาท/ปี และลดค่าจัดเก็บรักษาจากการผลักดันหนังสือเก่าไปใช้โครงการอื่นได้ 55,621.20 บาท/ปี คิดเป็น 28.26% จากค่าจัดเก็บทั้งหมด - ลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อหนังสือเพิ่ม 733,595.71 บาท/ปี คิดเป็น 44.07%
รวม		1,222,832.95 บาท/ปี
ค่าขนส่งสูง	Dimensional Weight	- ลดค่าขนส่งได้ 379,762.0 บาท/ปี และลดค่าบรรจุภัณฑ์จากการเพิ่มขนาดได้ 412,786.04 บาท/ปี - ลดต้นทุนจากการปรับสเปคกล่อง 46,932.06 บาท/ปี รวมคิดเป็น 12 % จากต้นทุนเดิมทั้งหมด
รวม		839,480 บาท/ปี
สินค้าล้ำสมัยสูง	SWOT Analysis / TOWS Matrix	ตัวอย่าง การปรับ 5 คอร์สขายดี สามารถประหยัด ต้นทุนลงได้ 11,056,738.82 บาท/ปี คิดเป็น 30.53%
รวม		11,056,738.82 บาท/ปี

ลูกฟูกสีขาว สกรีน 4 สี ปรับเป็น กล่องลูกฟูกสีน้ำตาล สกรีนสีดำ 1 สี ยังสามารถลดต้นทุนค่าบรรจุภัณฑ์ลงได้อีก 46,932.60 บาท หรือลดลง 14% จากต้นทุนบรรจุภัณฑ์แบบเดิม ดังนั้นจากทุกกระบวนการในการลดต้นทุนในส่วนของการจัดการบรรจุภัณฑ์การขนส่งในครั้งนี้ สามารถลดต้นทุนได้รวมทั้งหมด 839,481 บาท/ปี คิดเป็น 12 % จากต้นทุนเดิมทั้งหมด



5. กิติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ว่าอิสระเรื่องนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านทั้งในสาขาและนอกสาขาวิชาที่ได้ให้ความรู้ นำมาประกอบและประยุกต์ใช้ให้การศึกษาครั้งนี้แล้วนี้สำเร็จเสร็จสิ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] http://www.brainasset.com/blog.php?blog=15&c_id=9 (Accessed on 17 April 2024)
- [2] <https://www.abdo.org.uk/dashboard/business-hub/leadership/tows-or-swt> (Accessed on 10 January 2023)
- [3] <https://www.netsuite.com/portal/resource/articles/inventory-management/abc-inventory-analysis.shtml> (Accessed on 17 April 2024)
- [4] <https://www.at-once.info/th/blog/volumeweight-and-actualweight> (Accessed on 19 November 2022)
- [5] P. Phermsuwan and P. Phisitkasem, How to manage an effective packaging logistics, Executive Journal, 2012, 32(1), 130-137. (in Thai)
- [6] <https://www.nst.or.th/article/article492/article492082.html> (Accessed on 02 December 2022)
- [7] A. Louharungpisit and C. Panyasiri, SWOT analysis and TOWS matrix for formulation strategy of Thai orchid export under the non-tariff trade barriers (NTBS), NRRU Community Research Journal, 2023, 17(1), 69-83. (in Thai)
- [8] T. Pansed, C. Phaitayasiritham and Y. Yanpreechaset, Strategic for competency building of the student in bilingual school bangkok metropolitan administration for best practice, Journal of Politics, Administration and Law, 2021, 13(1), 251-265. (in Thai)
- [9] V. Lorchirachoonkul, W. Atthirawong and K. Leerojanaprapa, SWOT and TOWS matrix analysis for strategic development to increase Thai-Laos silk supply chain efficiency, WMS Journal of Management Walailak University, 2018, 7(3), 15-26. (in Thai)
- [10] K. Phalika and N. Suwannasap, Inventory management by applying the theory of ABC classification analysis, EOQ model techniques and silver-method : A case study of XYZ, Research Journal Phranakhon Rajabhat : Social Sciences and Humanity, 2016, 11(1), 102-114. (in Thai)



- [11] M. Sripan, Packaging inventory management of processes fruit, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2020.
- [12] N. Mongkhonratchadarom, Warehouse optimization management case study of B supply chain Co., Ltd., Thesis, University of the Thai Chamber of Commerce, Thailand, 2016.
- [13] N. Somsri and S. Lekdee, Inventory cost reduction using ABC - FSN analysis : A case study of dietary supplements factory, Thesis, Dhurakij Pundit University, Thailand. 2020.
- [14] P. Phakdeerat, Packaging improvements to reduce product costs type of hair treatment, size 15 ml, case study: Reciprocal factory, Thesis, Dhurakij Pundit University, Thailand. 2014.



การออกแบบและสร้างระบบการผลิตปุ๋ยหมักที่มีการควบคุมด้วย อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

สิริวิษ ทัตสวน¹ และ ภาณุวัฒน์ แตระกุล^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: panuwatt@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 ตุลาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 12 ธันวาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 15 ธันวาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างระบบการผลิตปุ๋ยหมัก โดยใช้วัตถุุดิบมูลวัวและต้นหน่อไม้ฝรั่งที่มีการควบคุมด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อลดต้นทุนการซื้อปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารในดิน รวมถึงจัดการสร้างมลภาวะทางอากาศเป็นพิษสาเหตุอื่นเนื่องมาจากการเผาทำลายต้นหน่อไม้ฝรั่ง โดยขั้นตอนการทำงานได้ขึ้นกองปุ๋ยหมักจำนวน 3 กอง กองที่ 1 ใช้เทคนิคการตั้งเวลาในการรดน้ำภายในกองปุ๋ย กองที่ 2 ใช้เทคนิคการรดน้ำในกองขึ้นกับความชื้นปุ๋ยที่ตั้งค่าไว้ และกองที่ 3 ใช้เทคนิควิศวกรรมแม่โจ้ 1 ขั้นตอนได้ทำการออกแบบและสร้างชุดควบคุมระบบการผลิตปุ๋ยหมัก จากนั้นออกแบบและเขียนโปรแกรม Arduino IDE เพื่อติดต่อกับเอ็มชียู ESP8266 ฝั่งด้านเน็ตเวิร์กใช้ Netpie 2020 เป็นตัวควบคุมและแสดงผล และได้นำ Node-Red เป็นเกตเวย์เพื่อรองรับการใช้ InfluxDB และ Grafana ในอนาคต และได้มีการสำรองข้อมูลกรณีที่เกิดคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของ Netpie 2020 เกิดขัดข้องโดยการใช้ MySQL สร้างฐานข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลจากตัวรับรู้ลงในเซิร์ฟเวอร์ และใช้ Line notify ในการแจ้งสถานะการทำงานของระบบ เมื่อนำปุ๋ยที่หมักตลอดระยะเวลา 60 วัน ไปวัดปริมาณแร่ธาตุอาหาร ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของทั้ง 3 กอง มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ (เกรด A) ส่วนโพแทสเซียมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยมีระยะเวลาการคืนทุนในการสร้างระบบควบคุมดังกล่าวมีค่าเพียง 2 ปี เท่านั้น

คำสำคัญ: ปุ๋ยหมัก; หน่อไม้ฝรั่ง; อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง; โหนดเอ็มชียู ESP8266

Design and Construction of Compost Production System Controlled by the Internet of Things

Siriwich Tadsuan¹ and Panuwat Taerakul^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University

* Corresponding author, E-mail: panuwatt@sau.ac.th

Received: 4 October 2023; Revised: 12 December 2023; Accepted: 15 December 2023

Online Published: 17 April 2024

Abstract: This research focuses on designing and assembling a compost production system using cow manure and asparagus plants as raw materials. This system is controlled by the Internet of Things to reduce the cost of purchasing organic and chemical fertilizers, increase the fertility of nutrients in the soil, and reduce toxic air pollution caused by burning asparagus trees. The process uses three compost piles. The first one uses the technique of scheduling watering inside the fertilizer pile. The second one uses watering techniques in piles based on the set fertilizer moisture, and the third pile uses Maejo engineering techniques number one. This study includes designing and assembling compost pile control, then designing and programming an Arduino IDE to contact MCU ESP8266. The network side uses Netpie 2020 as a controller and display. This research adopted Node-Red as a gateway to support the future use of InfluxDB and Grafana. To maintain system stability, a backup was made in case of a cloud server failure of Netpie 2020 using MySQL, creating a database to store data from the sensor into the server, and using Line notify to report the operating conditions of the system. The fertilizer composted over a period of 60 days was taken to measure the amount of minerals and nutrients, the nitrogen and phosphorus elements of all three stacks were similar which is greater than the standard level of organic fertilizer (grade A). However, the potassium level is substandard. The payback period for setting us such a control system is only 2 years.

Keywords: Compost; Asparagus; Internet of Things; Node MCU ESP8266



1. บทนำ

จากรายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ ไทยปี พ.ศ. 2565 มีปริมาณ 25.7 ล้านตัน ส่วนที่เป็น การกำจัดขยะแบบถูกต้องมี 38% โดยเกิดจากการฝัง กลบ เตาเผาผลิตพลังงาน และการนำไปทำปุ๋ยหมัก โดยแหล่งผลิตปุ๋ยหมักมีเพียง 4 แห่ง เท่านั้น [1] ใน ส่วนรัฐบาลไทยได้จัดทำแผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระ แห่งชาติ ในเรื่องการพัฒนายั่งยืน(SDGs) ในเรื่อง นโยบายการจัดการ PM 2.5 จากการเผาในภาคเกษตร มีนโยบาย/มาตรการและข้อเสนอแนะต่างๆ เช่น ห้าม ไม่ให้มีการเผาในที่โล่งโดยเด็ดขาด ส่งเสริมให้มีการนำ เศษวัสดุทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ [2] แต่มาตรการ เหล่านี้อาจจะเกิดปัญหากับเกษตรกรที่ยังขาดองค์ ความรู้และเงินทุน คณะวิจัยของ Jo [3] ได้นำการ สื่อสารแบบ LoRa มาใช้เพื่อติดตามข้อมูลที่ได้จาก เซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในอาคารหมักปุ๋ยที่อยู่ห่างไกลจาก ตัวเกษตรกร คณะวิจัยของ Bhoir [4] สร้างไซโลใส่ขยะ อินทรีย์ ซึ่งมีใบป้อนบดขยะที่มีแกนต่อเข้ากับมอเตอร์ โดยมีการใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิ ความชื้นและก๊าซ แอมโมเนีย มีระบบควบคุมและสื่อสารด้วย ESP8266 คณะวิจัยของ Mamari [5] ได้นำโครงข่ายประสาท เทียมเชิงลึกมาใช้ในการคัดแยกขยะที่มีการติดตั้งตัว รับรู้และตัวมอเตอร์ในถังขยะ โดยมีการแจ้งเทศบาลเมื่อ ขยะเต็ม ขยะที่ถูกคัดแยกออกจ่าพวกเศษอาหารจะถูก นำไปทำปุ๋ยหมักอีกที คณะวิจัยของ Mujiyanti [6] นำ ระบบ IoT มาช่วยผลิตปุ๋ยอินทรีย์เหลวที่บรรจุอยู่ในถัง โดยใช้ ESP32 ต่อร่วมกับตัวรับรู้ ส่วนภาคแสดงผลใช้ แอปพลิเคชันของ Blynk ร่วมด้วย แต่งานวิจัยต่างๆ ที่ กล่าวอ้างข้างต้นยังไม่ตอบโจทย์เท่าที่ควร เพราะเป็น การผลิตปุ๋ยหมักปริมาณเล็กน้อยหรือใช้เศษอาหารใน

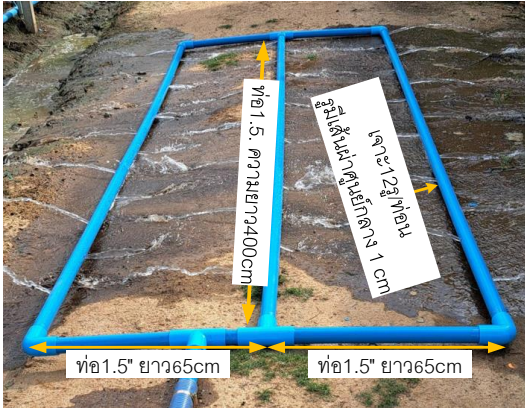
ครัวเรือน หรือเป็นเพียงแค่คัดแยกขยะ แต่ที่ตอบโจทย์ ได้ใกล้เคียงคือการผลิตปุ๋ยหมักแบบไม่กลับกอง (แม่ใจ1) [7] สาเหตุเพราะใช้ต้นทุนน้อย ใช้เศษขยะ ทางการเกษตรทั่วๆ ไปหมักร่วมกับมูลสัตว์ ทำในร่ม หรือที่โล่งแจ้งได้ทุกฤดูกาล และไม่มีการลื่นเหม็น จึงทำ ให้ขึ้นกองปุ๋ยได้ทุกๆ สถานที่ ส่วนขบวนการผลิตมี เพียงแต่รดน้ำในกองทุกๆ วัน แต่ปัญหาในทางปฏิบัติ คือ กรณีพื้นที่ที่ขึ้นกองปุ๋ยกับตัวเกษตรกรอาจอยู่ ห่างไกลกัน แต่เกษตรกรก็จำเป็นต้องเดินทางมาทำ กิจกรรมต่างๆ ตลอดระยะเวลามากกว่า 60 วัน จึงทำให้ ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาอย่างมากและตัว เกษตรกรเองจะต้องใช้แรงงานมาก ซึ่งอาจมีปัญหากับ ผู้หญิงและคนชราและยังต้องมีประสบการณ์ร่วมด้วย

ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงใช้ระบบ IoT เข้ามาผลิตปุ๋ย หมักได้ปริมาณครั้งละมากๆ ไม่ต้องเคลื่อนย้ายเศษวัสดุ ทางการเกษตรออกนอกพื้นที่ ไม่ต้องสร้างอาคารหมัก ปุ๋ย ไม่มีการลื่นเหม็นรบกวนพื้นที่ชุมชน ไม่ต้องใช้ แรงงานและประสบการณ์ สามารถควบคุมหรือติดตาม การทำงานจากสถานที่ใดก็ได้ที่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต เข้าถึงพื้นที่ดังกล่าวในการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งมาก ยิ่งขึ้น [5]

2. การดำเนินงานวิจัย

นำดินหน่อไม้ฝรั่งที่ถูกถอนทิ้งในไร่ [8] หมักร่วมกับ มูลวัว โดยแยกออกเป็น 3 กอง แต่ละกองจะมีเทคนิค การทำปุ๋ยหมักที่แตกต่างกัน

กองที่1 ใช้การรดน้ำบนกองปุ๋ยด้วยสปริงเกอร์ทุก ๆวัน วันละ 2 นาที เพื่อรักษาความชื้นที่กองปุ๋ย และ รดในกองปุ๋ยด้วยการปล่อยน้ำออกจากท่อ PVC ที่มีการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ที่ต่อขนาน กัน 3 เส้น ซึ่งจะเรียกว่า "แผงท่อปล่อยน้ำ" ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ทดสอบการกระจายน้ำของแผงท่อระบายน้ำ

จำนวน 5 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 10 วัน ครั้งละ 2 นาที เพื่อให้ง่ายกับการกล่าวอ้างของเทคนิคนี้จะใช้คำว่าแบบ “IoT1”

กองที่ 2 ใช้การรดน้ำบนกองปุ๋ยด้วยสปริงเกอร์ ทุกๆวัน วันละ 2-3 นาทีเหมือนกับกองที่ 1 แต่การรดน้ำในกองจะใช้ค่าความชื้นของปุ๋ยที่ได้จากตัวรับรู้ความชื้นดิน โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส กำหนดขอบเขตความชื้นในกองปุ๋ย 60% ถึง 70%[7] เมื่อความชื้นปุ๋ยต่ำกว่า 60% จะมีการรดในกองปุ๋ยด้วยแผงท่อปล่อยน้ำเหมือนเทคนิค IoT1 และเมื่อความชื้นสูงมากกว่า 70% ระบบควบคุมจะหยุดการจ่ายน้ำ โดยวิธีการนี้เรียกว่าแบบ “IoT2”

กองที่ 3 ใช้วิธีการของแม่โจ้1 โดยรดน้ำบนกองปุ๋ยด้วยการใช้สายยางฉีดโดยคนงานทุกๆ วัน และทุกๆ 7-10 วัน จะมีการเจาะกองปุ๋ยจากข้างบนลงถึงข้างล่าง โดยแต่ละรูจะมีระยะห่างกัน 40 cm จากนั้นกรอกน้ำลงรูที่เจาะจนเต็มแล้วปิดรูที่เจาะด้วยเศษวัสดุที่ใช้ทำปุ๋ยเพื่อรักษาอุณหภูมิในกองปุ๋ยไม่ให้ลดต่ำจนเกินไป

2.1 การออกแบบระบบควบคุมการรดน้ำบนกองปุ๋ยหมักและในกองปุ๋ยหมัก

รูปที่ 2 ถึงรูปที่ 3 เป็นแปลนและงานติดตั้งจริงของระบบการรดน้ำปุ๋ย เมื่อความสูงที่ใช้ในการยกน้ำจากพื้นถึงหัวปล่อยน้ำสปริงเกอร์เท่ากับ 2 เมตร ต้องการแรงดันที่ใช้สำหรับหัวปล่อยเท่ากับ 2 บาร์ หรือเท่ากับ 20 เมตร สามารถคำนวณหาขนาดกำลังมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำ [9] ดังสมการที่ (1)

$$P = \frac{\rho \times Q \times H}{102 \cdot \eta} \tag{1}$$

P คือ กำลังไฟฟ้า, kW

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m³

Q คือ อัตราการไหลของน้ำ, m³/sec

H คือ พลังงานที่ต้องการทั้งหมด, m

η คือ ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

$$P = \frac{\left(1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0.00333 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}}\right) (20\text{m} + 2\text{m})}{(102)(0.7)}$$

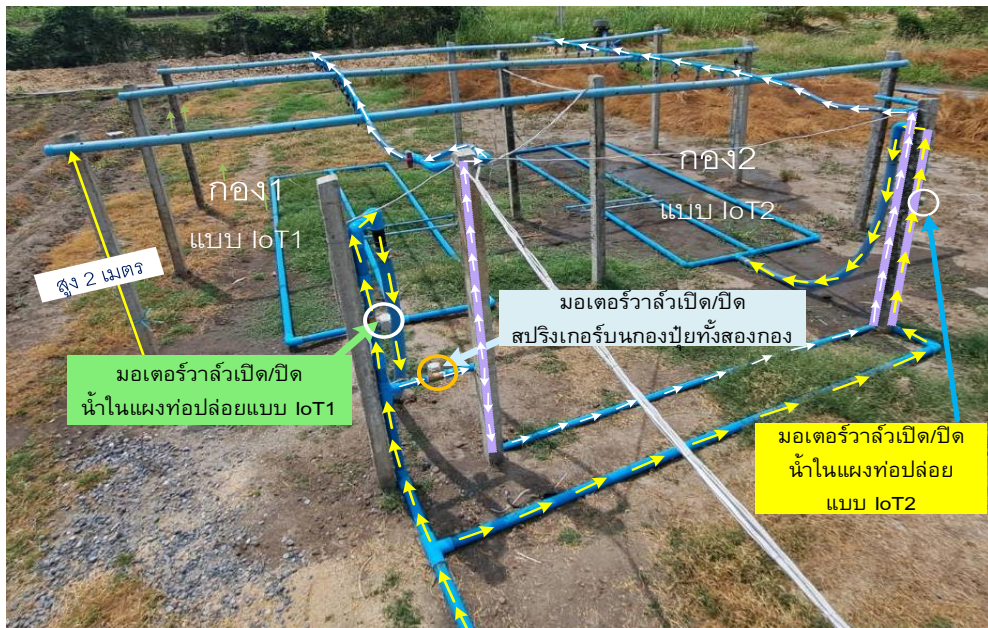
P = 1.026 kW (ในทางปฏิบัติเลือกขนาด 2 แรงม้า)

2.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

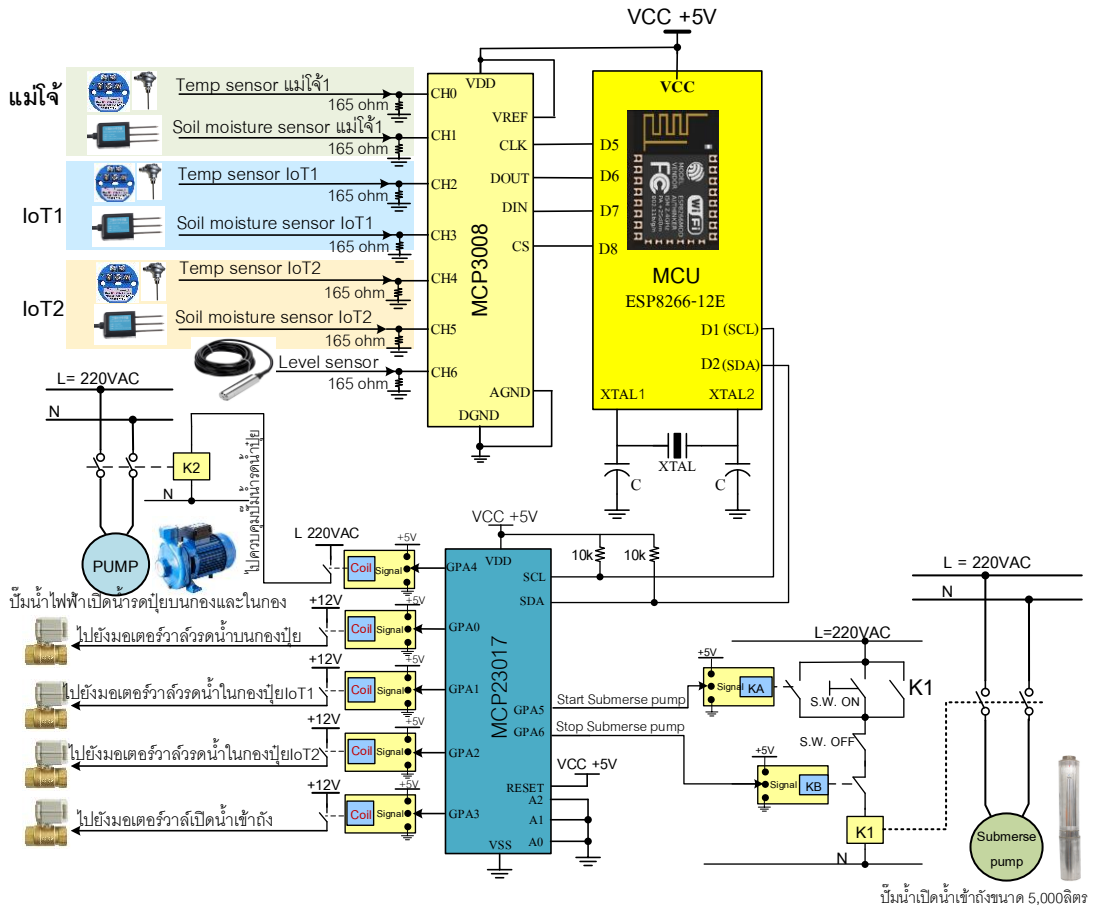
รูปที่ 4 ใช้ตัวรับรู้ความชื้นดินวัดความชื้นในกองปุ๋ย ส่วนการวัดค่าอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักเลือกใช้ RTD แบบ PT100 ใช้ตัวรับรู้ระดับความสูงของเหลววัดปริมาณน้ำในถัง ใช้ Node MCU ESP8266 เป็นตัวประมวลผลและควบคุมระบบ โดยมีการสื่อสารแบบ SPI กับ IC เบอร์ MCP 3008 ที่ใช้เป็นตัวแปลงสัญญาณ ADC ขนาด 10 บิต ที่รับข้อมูลจากตัวรับรู้ต่างๆ เลือกใช้ IC เบอร์ MCP 23017 เป็นตัวขยาย I/O พอร์ตเพื่อไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์วาล์วและปั้มน้ำ



รูปที่ 2 การติดตั้งถังน้ำ ตู้ควบคุม ปั๊มน้ำแบบหอยโข่งขนาด 2 Hp เพื่อสูบน้ำออกจากถังไปยังกองปุ๋ยหมัก



รูปที่ 3 การเดินท่อPVC เพื่อรดน้ำปุ๋ยที่แผงท่อปล่อยน้ำและที่สปริงเกอร์ และติดตั้งมอเตอร์วาล์วจำนวน 3 ตัว

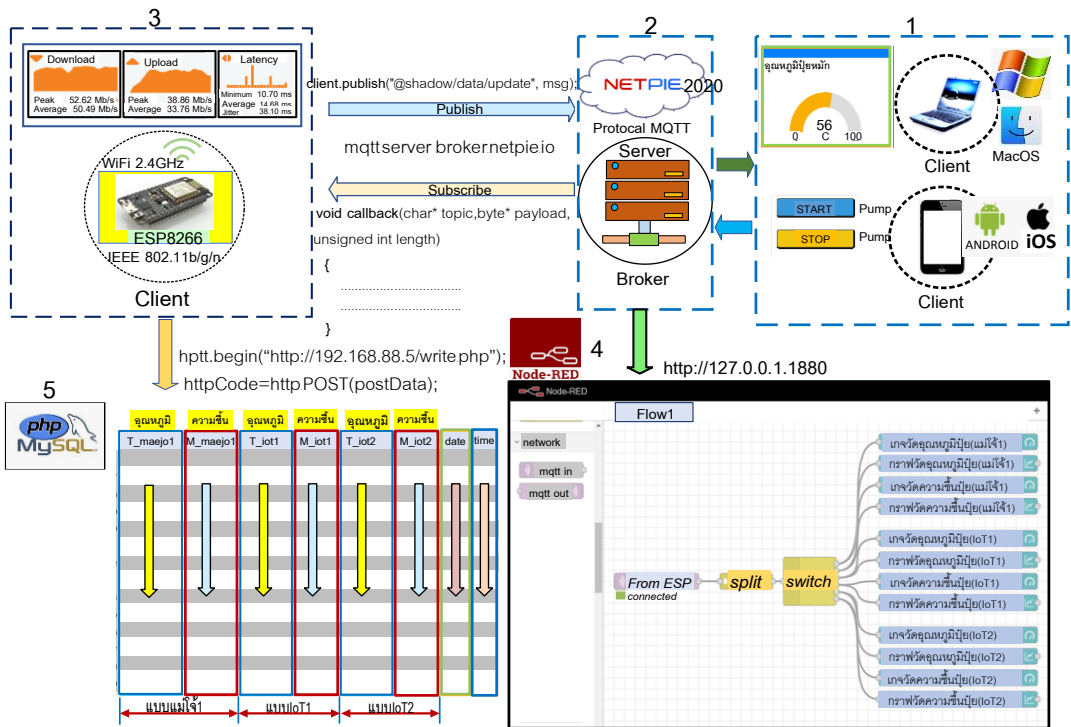


รูปที่ 4 วงจรควบคุมโดยใช้ Node MCU ESP8266 ประมวลผลและติดตามการผลิตปุ๋ยหมักด้วยระบบ IoT

2.3 การออกแบบซอฟต์แวร์

ฝั่งด้านเน็ตเวิร์กได้ใช้คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของ Netpie 2020[10] จะมี MQTT Telemetry Transport (MQTT) [11-12] เป็นโปรโตคอลสื่อสารแบบ M2M หรือ IoT ดังรูปที่ 5 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือไคลเอนต์และโบรกเกอร์ ในการเก็บค่าข้อมูลของตัวรับรู้แบบอนุกรมเวลา ได้ใช้พีดีที่สามารถดูข้อมูลแบบเวลาจริงหรือดูย้อนหลังและยังสามารถส่งค่าออกในรูปแบบ

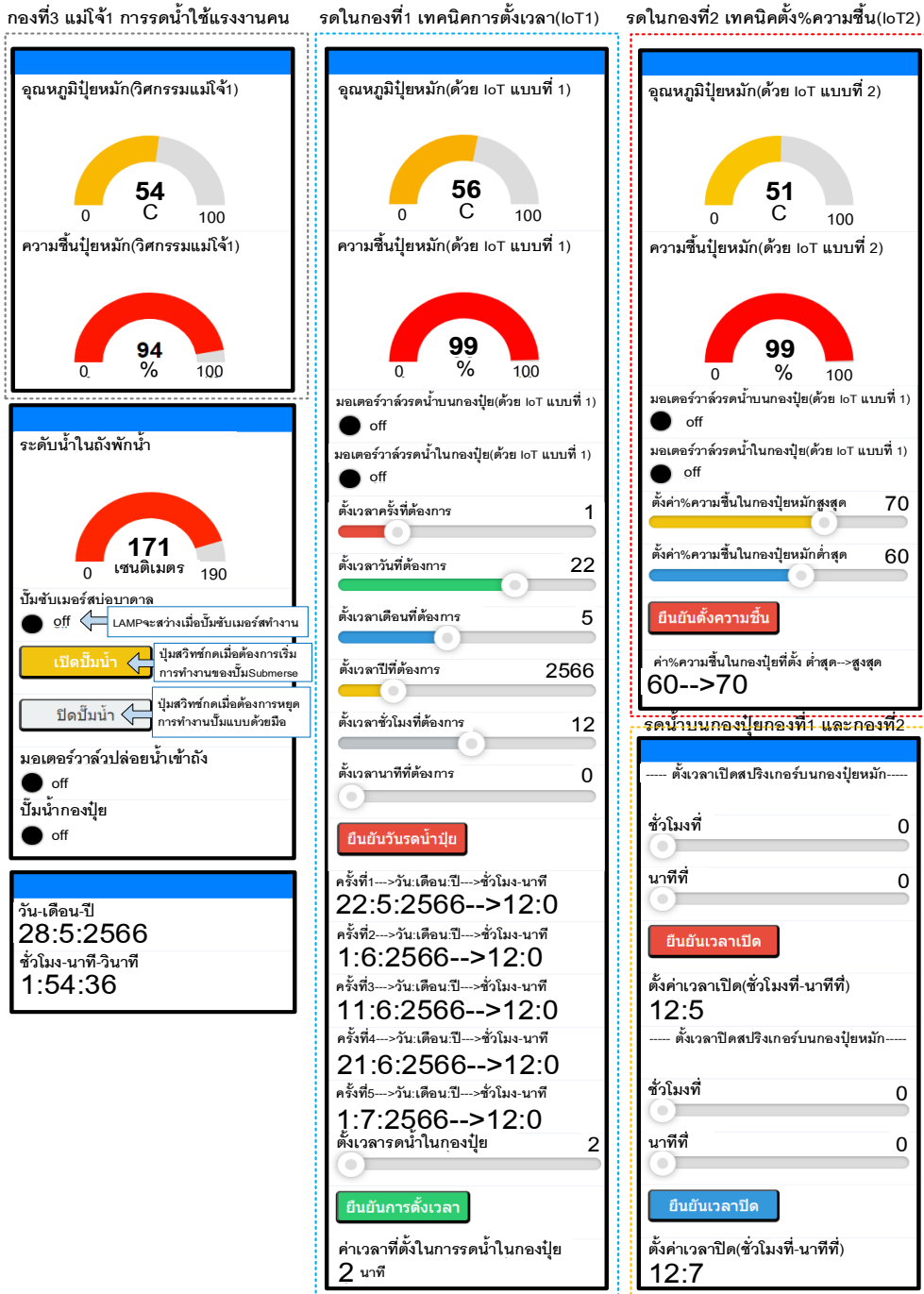
นามสกุล.CSV และใช้ Node-RED ที่เป็นเครื่องมือการพัฒนาที่ใช้ไฟล์สำหรับการเขียนโปรแกรมด้วยภาพ ในกรณีนี้ที่ Netpie 2020 เกิดขัดข้องหรือหยุดปรับปรุงระบบชั่วคราว เพื่อให้ข้อมูลจากตัวรับรู้ต่างๆ ไม่มีการสูญหาย ใงานวิจัยได้มีการเก็บข้อมูลบนเซิร์ฟเวอร์ใช้ MySQL ในการสร้างฐานข้อมูลเพื่อเก็บค่าต่างๆ ที่ได้จากตัวรับรู้ทั้ง 6 ค่า



รูปที่ 5 การสื่อสารโปรโตคอล MQTT ของ Netpie 2020 การใช้ Node-RED และการบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล

การทดสอบระบบสื่อสารใช้สัญญาณ WiFi 2.4 GHz จากเราเตอร์อินเทอร์เน็ตบ้าน 3BB ไปยัง Node MCU ESP8266 ที่ระยะ 14 เมตร ปรากฏจากสิ่งกีดขวางได้อัตราการส่งถ่ายข้อมูลที่ Upload ได้ค่าสูงสุด 38.86 Mbps และค่าเฉลี่ยที่ 33.76 Mbps ส่วนที่ Download ได้ค่าสูงสุด 52.62 Mbps และค่าเฉลี่ยที่ 50.49 Mbps เป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดจากมาตรฐาน IEEE 802.11n[13] (รองรับสูงสุดต้องไม่เกิน 300 Mbps และมีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณได้ระยะประมาณ 70 เมตรในโครงสร้างปิดและ 250 เมตรในที่โล่งแจ้ง) ส่วนค่า Latency หรือค่า Ping เป็นความเร็วในการตอบสนองของเครื่องเซิร์ฟเวอร์ของผู้ให้บริการมีค่าต่ำสุด 10.70 mS (การตอบสนองยิ่งค่าน้อยยิ่งดี)

รูปที่ 6 การใช้งานวิดเจ็ตบนพรีบอร์ดแพลตฟอร์ม Netpie 2020 ใช้วิดเจ็ตเกจวัดอุณหภูมิและความชื้นในกองปุ๋ยทั้ง 3 กอง(แบบ IoT1 IoT2 และแม่ใจ1) ส่วนการรดน้ำบนกองปุ๋ยด้วยหัวปล่อยน้ำสปริงเกอร์ จะทำการรดน้ำกองที่1 (IoT1) และกองที่2 (IoT2) ในเวลาเดียวกัน โดยสามารถตั้งค่าเวลาจากวิดเจ็ตสไลเดอร์ ซึ่งถ้าสังเกตจากรูปที่ 4 ฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบจะไม่นำโมดูลนาฬิกาแบบเรียลไทม์มาใช้งาน เช่น ไอซีเบอร์ DS 1307 แต่จะนำวิธีการตั้งเวลามาตรฐานสากลที่เป็นเวลาปัจจุบันจากโปรโตคอล NTP ที่อยู่บนอินเทอร์เน็ตมาใช้ ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ใช้เลี้ยงไอซีเมื่อพลังงานหมดลง



รูปที่ 6 วิวเจ็ดต่าง ๆ ของระบบการควบคุมและติดตามขณะเก็บผลการทำงาน



3. ขั้นตอนการผลิตปุ๋ยหมัก

การทดสอบทำการขึ้นกองปุ๋ยหมักแบบไม่กลับกอง เป็นจำนวน 3 กอง ในวันที่ 13 พ.ค. 2566 โดยแต่ละกองมีความกว้าง 2.5 m ยาว 4.2 m ใช้มูลวัวกับต้นหน่อไม้ฝรั่งวางปูสลับชั้นกันอย่างหลวมๆ โดยแต่ละชั้นหนา 7 cm แต่ละชั้นใช้มูลวัว 10 kg ต่อต้นหน่อไม้หน้าหนักประมาณ 40 kg ทำการรดน้ำตอนขึ้นกองแต่ละชั้นให้ทั่วๆ กอง ข้อสำคัญเพื่อให้อากาศสามารถถ่ายเทภายในกองปุ๋ยได้สะดวก อย่าเหยียบอัดแน่นวัตถุดิบบนกองปุ๋ย โดยขึ้นกองรวมทั้งหมด 15 ชั้น รวมความสูงกองที่วัดได้จริงประมาณ 110 cm ติดตั้งตัวรับรู้ความชื้นและอุณหภูมิในกองปุ๋ยในชั้นที่ 4 ติดตั้งแผงท่อปล่อยน้ำในกองบนกองชั้นที่ 8 จากรูปที่ 7 เป็นกองปุ๋ยหมักจำนวน 3 กองที่ขึ้นกองเสร็จสิ้นแล้ว และมีการรดน้ำบนกองปุ๋ยกองที่ 1 และกองที่ 2 โดยใช้ระบบ IoT ส่วนกองที่ 3 เป็นการรดน้ำด้วยตัวเกษตรกร โดยใช้สายยางฉีดน้ำบริเวณบนกองให้ทั่ว ๆ และทำทุกๆ วัน กรณีที่เวลาผ่านไปทุกๆ 10 วันจะมีการเจาะรูกองปุ๋ยเพื่อกรอกน้ำลงในกองปุ๋ย โดยที่รูมีระยะห่างกัน 40 cm สภาพกองปุ๋ยที่เวลาผ่านไป 30 วันมีความสูงกองปุ๋ยลดลงจาก 110 cm เหลือ 40 cm และกองปุ๋ยที่เวลาผ่านไป 60 วัน ความสูงกองปุ๋ยลดลงเหลือเพียง 30 cm

เมื่อมีการล้มกองปุ๋ยเพื่อตากปุ๋ยหมักให้ความชื้นลดลงและอุณหภูมิลดลง(เหลือใกล้เคียงอุณหภูมิแวดล้อม ในงานวิจัยวัดได้ 32.5 °C) โดยมีการพลิกกลับกองปุ๋ยทุกๆ วัน เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นเก็บใส่กระสอบหรือนำไปใช้งานได้แล้ว ส่วนอินทรีย์วัตถุขนาดใหญ่ที่ย่อยสลายไม่หมดยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทำปุ๋ยหมักรอบถัดไปได้อีกด้วย



รูปที่ 7 การรดน้ำบนกองปุ๋ยทั้ง 2 กองด้วยหัวจ่ายสปริงเกอร์ตามเวลาที่ตั้งไว้ด้วยระบบ IoT

4. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์แบ่งได้ 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 สมรรถนะของเครื่องผลิตปุ๋ยหมัก กรณีที่ 2 ศึกษาพฤติกรรมของอุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในกองปุ๋ย กรณีที่ 3 ศึกษาถึงคุณภาพของปุ๋ยหมักในเรื่องของธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมีจากปุ๋ยหมักทั้ง 3 กอง กรณีที่ 4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

4.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องผลิตปุ๋ยหมัก

จากตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบสมรรถนะในด้านต่างๆ เช่น ระบบปฏิบัติการที่รองรับ ระยะทางในการสื่อสารข้อมูลไร้สายคลื่นความถี่ WiFi 2.4 GHz คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ที่ใช้งาน การสำรองน้ำในถังใช้งาน รวมถึงขีดจำกัดในเรื่องของปริมาณการผลิตปุ๋ยต่อครั้ง

4.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นในกองปุ๋ย

จากรูปที่ 8 เป็นค่าของอุณหภูมิในกองปุ๋ยทั้ง 3 กองตลอดระยะเวลา 60 วัน เห็นได้ว่าในช่วงของ 5 วันแรกค่าของอุณหภูมิของปุ๋ยทั้ง 3 กองจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นค่าอุณหภูมิต่ำๆ ลดลงอย่างช้าๆ แล้วไปสิ้นสุดที่อุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นในการศึกษาจะแยกศึกษาที่ละส่วน



ตารางที่ 1 สมรรถนะของเครื่องผลิตปุ๋ยหมักที่สร้างขึ้น

รายการ	
ระบบปฏิบัติการที่รองรับ	macOS, windows iOS, Android
คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ที่ใช้งาน	Netpie2020, Node red MySQL, Line notify
ระยะทางที่ทดสอบสัญญาณ WiFi 2.4GHz	95 m
ได้มากที่สุด คิดระยะทางจากเราเตอร์ไปยัง ESP8266 ในสภาวะมีสิ่งกีดขวางปานกลาง	
จำนวนวันมากที่สุดที่สามารถสำรองน้ำในถังขนาด 5,000 ลิตร เพื่อใช้รดน้ำกองปุ๋ย	5 วัน
จำนวนกองปุ๋ยสูงสุดที่สามารถขึ้นกองต่อรอบการผลิต (ขนาดกองปุ๋ย กว้าง 2.5m ยาว 4.2m สูง 1.5m)	2 กอง

- ค่าอุณหภูมิสูงสุดของปุ๋ยหมัก

รูปที่ 9 เป็นการศึกษาช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นในกองปุ๋ยที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วช่วง 62 ชั่วโมงแรก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักเป็นลักษณะใกล้เคียงค่าของลอการิธึมธรรมชาติ ดังสมการที่ (2)

Temp = Slope*ln(hour)+ Initial temp (2)

Temp คือ อุณหภูมิปุ๋ยหมักที่เวลาใดๆ, °C

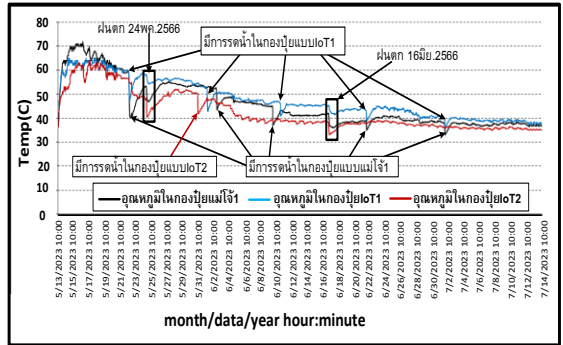
Slope คือ ค่าความชัน

Initial temp คือ อุณหภูมิปุ๋ยหมักที่เวลาเริ่มต้น, °C

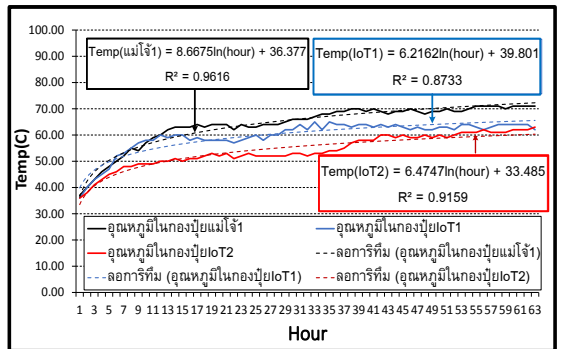
เมื่อนำข้อมูลนี้ไปสร้างเส้นแนวโน้มหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิปุ๋ยกับเวลาที่ใช้หมักปุ๋ย โดยใช้วิธีถดถอยไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression Method) ได้โมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ (3) ถึง (5)

Temp(แม่ใจ1) = 8.6675*ln(hour)+36.377 (3)

Temp(loT1) = 6.2162*ln(hour)+39.801 (4)



รูปที่ 8 ค่าอุณหภูมิของปุ๋ยหมักทั้ง 3 กองที่ได้จากการทดสอบตลอดระยะเวลา 60 วัน



รูปที่ 9 ค่าอุณหภูมิในกองปุ๋ยทั้ง 3 กองที่ได้จากการทดสอบและการทำนายในช่วง 62 ชั่วโมงแรก

Temp(loT2) = 6.4747*ln(hour)+33.485 (5)

นำค่าความชันของทั้ง 3 สมการไปหาความชันเฉลี่ย จะได้โมเดลใหม่ที่สามารถนำไปทำนายค่าอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักอื่นๆ แบบล่วงหน้าได้ ดังสมการที่ (6)

Slope = (8.6675+ 6.2162+6.4747)/3 = 7.1195

Temp = 7.1195*ln(hour)+ Initial temp (6)

ถ้าค่าอุณหภูมิที่ทำนายล่วงหน้ามีค่าสูงเกิน นั้นหมายถึงจุลินทรีย์ที่ช่วยในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เช่น เชื้อรา แบคทีเรียและแอกติโนมัยซิทตายได้ [14]



ส่งผลทำให้ขบวนการย่อยสลายไม่สมบูรณ์และทำให้ระยะเวลาในการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุนานมากยิ่งขึ้น

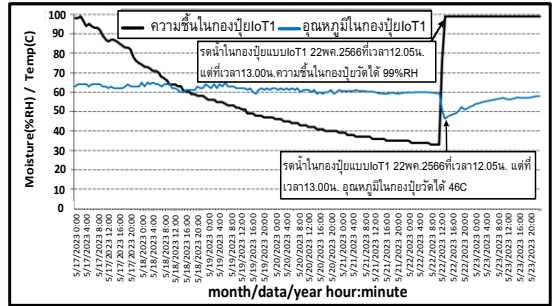
- ช่วงการเว้นจำนวนวันที่เหมาะสมกับการรดน้ำในกองปุ๋ยหมัก

ที่กองปุ๋ยหมักที่ 1 (IoT1) การรดน้ำในกองปุ๋ยแต่ละครั้งจะใช้วิธีการเว้นระยะเวลาห่างกัน 10 วัน รูปที่ 10 เป็นผลการทดสอบการรดน้ำในกองด้วยแผงท่อปล่อยน้ำ ครั้งที่ 1 ในวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 เห็นได้ว่าอุณหภูมิลดลงเหลือ 46 °C หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ค่าเดิม แต่เมื่อพิจารณาค่าความชื้นเห็นได้ว่าการเว้นระยะเวลา 10 วัน ค่าความชื้นลดลงมาอยู่ที่ 32 % ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเกินไปทำให้บริเวณนี้มีการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ได้ ค่าความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 60-70% [7] ซึ่งอยู่ในช่วงระยะเวลา 6 วัน ในทางปฏิบัติอาจจะอยู่ในช่วง 6-7 วันตามความสะดวกของเกษตรกร

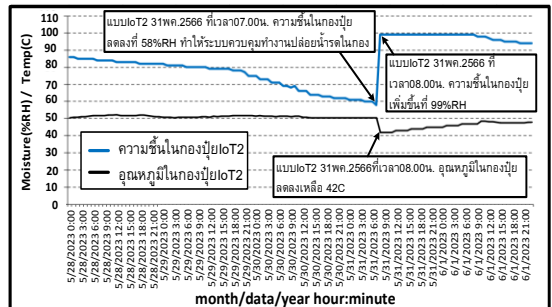
ส่วนรูปที่ 11 เป็นการการรดน้ำในกองปุ๋ยหมักด้วยแผงท่อปล่อยน้ำในกองที่ 2 (IoT2) ในวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 เมื่อความชื้นในกองปุ๋ยลดต่ำกว่า 60% จะมีการปล่อยน้ำและจะหยุดปล่อยน้ำเมื่อความชื้นในกองปุ๋ยสูงมากกว่า 70 %

- จำนวนเวลา (นาที) ที่เหมาะสมกับการรดน้ำกองปุ๋ย

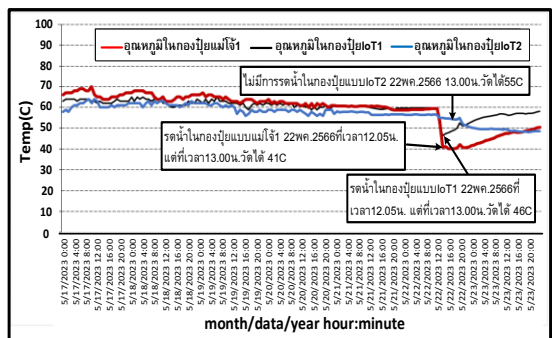
ในการรดน้ำบนกองปุ๋ยกองที่ 1 (IoT1) และกองที่ 2 (IoT2) จะรดน้ำทุกๆ วันด้วยหัวจ่ายสปริงเกอร์พร้อมกันทั้งสองกองโดยใช้เวลา 2 นาที ซึ่งวัดปริมาณน้ำที่ใช้ต่อกองมีค่า 200 ลิตร จากรูปที่ 12 ในวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ได้มีการสั่งให้มีการรดน้ำในกองปุ๋ยหมักที่ 1 (IoT1) โดยปล่อยน้ำเข้าแผงท่อปล่อยน้ำ โดยตั้งค่าเวลา 2 นาที (ใช้น้ำ 400 ลิตร) โดยการรดน้ำในกองปุ๋ยแต่ละครั้งเว้นระยะเวลาห่างกัน 10 วัน



รูปที่ 10 ค่าอุณหภูมิและความชื้นในกองปุ๋ยที่ 1 (IoT1) ก่อนและหลังที่มีการรดน้ำในกองปุ๋ย



รูปที่ 11 ค่าอุณหภูมิและความชื้นในกองปุ๋ยที่ 2 (IoT2) ก่อนและหลังที่มีการรดน้ำในกองปุ๋ย



รูปที่ 12 ค่าอุณหภูมิที่ลดลงอันเนื่องจากการรดน้ำในกองปุ๋ยหมักที่ 1 (IoT1) และในกองปุ๋ยหมักที่ 3 (แม่ใจ)



อุณหภูมิที่วัดได้ลดจาก 60 °C ลงไปอยู่ที่ 46 °C ส่วน กองที่ 3 (แม่ใจ) จะใช้เกษตรกรรดน้ำทั้งบนกองปุ๋ย และในกองปุ๋ยด้วยสายยาง จากรูปที่ 12 เห็นได้ว่าเมื่อ เกษตรกรรดน้ำในกองปุ๋ยด้วยระยะเวลาสั้นเกินไป ทำให้ เกิดการสูญเสียความร้อนในกองปุ๋ยปริมาณมาก ค่า อุณหภูมิที่วัดได้ลดจาก 60 °C ลงไปอยู่ที่ 41 °C ดังนั้น กว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับ กระบวนการย่อยสลายจะใช้เวลานาน ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพของเกษตรกรจึงเป็นสิ่งจำเป็นกับการ ปฏิบัติงาน ส่วนการรดน้ำในกองปุ๋ยที่ 2 (IoT2) ในวัน ดังกล่าวระบบปล่อยน้ำยังไม่ทำงาน สาเหตุเพราะ ความชื้นในกองปุ๋ยยังไม่ลดลงต่ำกว่า 60%

4.3 การวิเคราะห์คุณภาพของปุ๋ยหมัก

ข้อดีของปุ๋ยอินทรีย์มีจำนวนธาตุอาหารมากกว่า ปุ๋ยเคมี คือมีทั้งหมด 13 ชนิด[7] ประกอบด้วยธาตุ อาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุ จากตารางที่ 2 เป็นผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการเคมีฯ ภาควิชา ปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ. นครปฐม เห็นได้ว่าการทดสอบทั้ง 3 แบบให้ผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียง กัน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (เกรดA) [15] ผ่านเกณฑ์การทดสอบทุกรายการยกเว้น

ธาตุโพแทสเซียมที่ต่ำกว่า แต่ค่าไนโตรเจนและ ฟอสเฟอรัสมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ (เกรด A) ที่กำหนดไว้มาก ซึ่งเหมาะกับพืชที่ต้องการเร่งการ เจริญเติบโตของลำต้นและเร่งการแผ่ขยายของราก [16] จากผลการทดสอบปุ๋ยทั้ง 3 กองมีค่า C/N ประมาณ 12 หมายความว่าระบบการหมักมีปริมาณไนโตรเจนที่มาก พอที่จะทำให้ขบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นไป อย่างรวดเร็ว ค่า pH ของดินที่เหมาะสมกับการ เจริญเติบโตของต้นหน่อไม้ฝรั่งมีค่า 6.0-8.0 [17] ค่า การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ทั้ง 3 กองมี ค่ามากกว่า 80% ส่วนอินทรีย์วัตถุที่เหลือเป็นเศษเล็กๆ เมื่อนำไปใช้งานส่งผลทำให้ดินฟู อากาศถ่ายเทในดินได้ ดี อีกทั้งช่วยในการรักษาความชื้นหน้าดิน ทำให้ ประหยัดค่าน้ำและค่าไฟฟ้าในการรดน้ำของแต่ละวัน และเมื่อที่โคนต้นมีสภาพดินฟู ส่งผลดีทำให้การถอน หน่อขึ้นจากตัวเหง้าได้อย่างง่ายไม่เสี่ยงกับหน่อหัก ทำ ให้ลดค่าสูญเสียอันเนื่องจากการเก็บผลผลิตได้อย่าง มาก ส่วนการปรับปรุงค่าธาตุโพแทสเซียมให้สูงขึ้นนั้น ทำได้โดยการใช้เศษพืชอื่นๆ ที่มีธาตุโพแทสเซียมสูง ร่วมหมักด้วย เช่น ผักตบชวา(4.84%) [18] เปลือก ทุเรียน (1.57% - 2.04%) [19]

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบธาตุอาหารและค่าอื่นๆ ของปุ๋ยทั้ง 3 กอง กับมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์(เกรด A)

	มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์(เกรดA)	แม่ใจ1	IoT1	IoT2
กรด-ด่าง (pH; 1:5)	5.5-8.5	7.32	7.39	7.52
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	ไม่น้อยกว่า30 ของน้ำหนัก	59.35	58.44	55.82
การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยอินทรีย์	ไม่น้อยกว่า 80	สมบูรณ์ (97.64%)	สมบูรณ์ (83.31%)	สมบูรณ์ (111.81%)
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน(C/N)	ไม่เกิน 20:1	12.12	12.24	12.13
ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	ไม่น้อยกว่า1% ของน้ำหนัก	2.84	2.77	2.67
ฟอสเฟอรัสมทั้งหมด (%)	ไม่น้อยกว่า0.5%ของน้ำหนัก	1.54	1.65	1.55
โพแทสเซียมทั้งหมด (%)	ไม่น้อยกว่า0.5%ของน้ำหนัก	0.18	0.15	0.06



4.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

โดยงานวิจัยนี้ได้นำต้นหน่อไม้ฝรั่งที่ถอนต้นทิ้งในไร่มาใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยอินทรีย์และลดการใช้ปุ๋ยเคมี ลดสภาพดินเปรี้ยวอันเนื่องมาจากใช้ปุ๋ยเคมีปริมาณมากอย่างต่อเนื่อง [20] ส่วนธาตุฟอสฟอรัสช่วยเพิ่มความต้านทานโรคพืชและโพแทสเซียมช่วยทำให้รากแข็งแรงทนทานต่อโรคแมลง [21] ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อยาฉีดป้องกัน/กำจัดโรคต่างๆ และลดการสะสมของยาตังกกล่าวในตัวเกษตรกรผู้ใช้ และเมื่อไม่มีการเผาต้นหน่อไม้ฝรั่งทำให้ไม่เกิดมลภาวะในอากาศเป็นพิษรวมถึงไม่ทำลายธาตุอาหารและจุลินทรีย์ที่บริเวณผิวน้ำดิน ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงสภาพดินให้ดีขึ้น [22]

จากตารางที่ 3 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยจะมีค่าสูง สาเหตุเพราะเป็นบริบทในเรื่องของงานวิจัย จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากมาวิเคราะห์ แต่ถ้านำไปใช้งานจริงสามารถตัดส่วนที่ไม่จำเป็นออกได้ ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้เกษตรกรสามารถลดค่าใช้จ่ายอีกจำนวนมาก ส่วนปุ๋ยหมักที่มีส่วนของอินทรีย์วัตถุย่อยสลายและไม่ย่อยสลายรวมกันจากทั้ง 3 กองมีน้ำหนัก 867 กิโลกรัม (ความชื้น 80%) แต่เมื่อตากแห้งที่ความชื้นไม่เกิน 15% (ผลจากตารางที่ 2) น้ำหนักจะลดลงเหลือ 217 กิโลกรัม (1/4 ของน้ำหนักเดิม) และเมื่อร่อนเอาเฉพาะปุ๋ยที่เป็นผงอย่างเดียว น้ำหนักจะลดลงอีก 10% จึงทำให้ได้น้ำหนักสุทธิ 195.3 กิโลกรัม/รอบการผลิต ดังนั้นใน 1 ปี ผลิตได้ 4 รอบ ทำให้ได้จำนวนปุ๋ยหมัก 781.2 กิโลกรัมจากราคาท้องตลาดราคาปุ๋ยยังไม่รวมค่าขนส่ง กิโลกรัมละ 35 บาท [23] ทำให้มีค่าประหยัดปีละ 27,342 บาท

และยังได้เศษของอินทรีย์วัตถุมาใช้คลุมหน้าดินเพื่อรักษาความชื้นอีกด้วย ไม่จำเป็นต้องซื้อแกลบหรือซีเถ้าแกลบมาผสมกับปุ๋ยหมักใช้งานเพิ่มอีก เมื่อนำค่าการลงทุน 55,043 บาท หารด้วยค่าประหยัดจะได้ค่าระยะเวลาการคืนทุน [24] ดังสมการที่ (7) มีค่าประมาณ 2 ปี ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่า 5 ปี จึงคุ้มค่ากับการลงทุน และหลังจากนั้นการลงทุนจะลดลง สาเหตุเพราะไม่ต้องลงทุนในส่วนของอุปกรณ์มีเฉพาะค่าใช้จ่ายส่วนที่เหลือเป็นเงิน 10,043 บาท จึงทำให้ได้กำไร 17,299 บาท/ปี (27,342-10,043) แต่ถ้าเกษตรกรขึ้นกองปุ๋ยเองจะทำให้เพิ่มกำไรอีกปีละ 4,500 บาท และที่สำคัญเมื่อเกษตรกรสามารถผลิตปุ๋ยได้เอง ก็จะทำให้มีช่องทางต่อยอดในการทำธุรกิจใหม่เพิ่มอีก แต่ถ้ามีการซื้อปุ๋ยมาใช้งานตลอดเวลา ราคาปุ๋ยดังกล่าวมีโอกาสปรับขึ้นตามค่าเงินเพื่อในแต่ละปี ทำให้ราคาต้นทุนการปลูกหน่อไม้ฝรั่งผันผวนและเสี่ยงกับการขาดทุน ในกรณีที่น่าปุ๋ยหมักที่ผลิตได้ไปใช้ในไร่ ไม่มีความจำเป็นต้องลดความชื้นปุ๋ยลงเหลือต่ำกว่า 30% (ตามเกณฑ์มาตรฐาน) ในกรณีของเกษตรกรรายนี้ได้ใช้ปุ๋ยที่ผสมกับเศษอินทรีย์วัตถุที่ย่อยไม่หมดรวมน้ำหนัก 623 กิโลกรัม (ความชื้น 40%) ใส่โคนต้นหน่อไม้ฝรั่งประมาณ 1 กำมือ/กอ ซึ่งทดสอบแล้วใส่ได้จำนวน 2 ไร่ ดังนั้น ถ้าผลิตได้ปีละ 4 รอบ จะได้น้ำหนักปุ๋ย 2,492 กิโลกรัม ทำให้ใส่ปุ๋ยได้จำนวน 8 ไร่ ส่วนพื้นที่จากงานวิจัยมีขนาด 4.22 ไร่ ทำให้สามารถใส่ได้ประมาณ 2 ครั้งต่อ 1 ปี โดยใส่ครั้งละ 1,252 กิโลกรัม เว้นระยะเวลาห่างกัน 6 เดือน

$$\text{ระยะเวลาการคืนทุน} = \frac{\text{ค่าการลงทุน}}{\text{ค่าประหยัด}} \quad (7)$$

**ตารางที่ 3** รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปี

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าก่อสร้างและอุปกรณ์ทั้งหมด	45,000
ต้นทุนไม้ฝรั่งน้ำหนัก 6,840 kg	0
มูลวัว(ทำปุ๋ย 12 กอง) 1,800 kg	5,143
ค่าไฟฟ้า 80 หน่วย	400
ค่าน้ำใช้ตลอดขบวนการหมัก	0(ยกเว้น)
ค่าแรงขึ้นกองปุ๋ยทั้ง 12 กอง	4,500
ค่าบริการอินเทอร์เน็ต 3BB	0(มีใช้อยู่แล้ว)
รวมทั้งหมด	55,043

5. บทสรุป

ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ปุ๋ยหมักที่ได้จากทั้ง 3 เทคนิคามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ขบวนการผลิตแตกต่างกัน แต่ยังให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ค่าไนโตรเจนมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (เกรดA) ประมาณ 2.76 เท่า ฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์(เกรดA) 3.16 เท่า แต่โพแทสเซียมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์(เกรดA) 3.85 เท่า สาเหตุเพราะเศษพืชที่นำมาใช้มีเฉพาะต้นหน่อไม้ฝรั่งเพียงอย่างเดียว แนวทางปรับปรุงเพื่อเพิ่มโพแทสเซียมสามารถกระทำโดยนำวัชพืชผักตบชวาหมักร่วมด้วย เทคนิคแบบ IoT1 จะประหยัดค่าต้นทุนในการสร้างเครื่องผลิตปุ๋ยมากกว่าแบบ IoT2 สาเหตุเพราะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวรับรู้ การทำงานจะใช้ฟังก์ชันเวลาที่กำหนด และแบบ IoT1 จะดีกว่าแบบแม่ใจ1 สาเหตุเพราะไม่ต้องใช้คนงานมาปฏิบัติหน้าที่ตลอดระยะเวลามากกว่า 60 วัน ถ้าพิจารณาเป็นค่าแรงคิดเฉพาะเดินทางมาปฏิบัติงานรดน้ำกองปุ๋ยชั่วระยะเวลาสั้นๆ เป็นเงิน 50 บาท/วัน จำนวน 60 วัน รวมเป็นเงิน 3,000 บาท/รอบ ที่ระยะเวลา 1 ปีสามารถผลิตปุ๋ย

หมักได้ 4 รอบ ซึ่งหมายความว่าสามารถลดค่าแรงงานได้มากถึง 12,000 บาท/ปี เมื่อนำระบบ IoT มาช่วยในการผลิตปุ๋ยหมัก (ความชื้น 40%) สามารถผลิตได้ 2,492 กิโลกรัม/ปี ส่วนระยะเวลาการคืนทุนมีค่าประมาณ 2 ปี

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยที่กรุณาให้ความเห็นชอบในการอนุมัติงบประมาณ โดยโครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากบริษัทอุตสาหกรรมท่องเที่ยว จำกัด และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2563 ตามสัญญาขอรับทุนอุดหนุนการวิจัย หมายเลข ST001/2564

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.pcd.go.th/publication/29509>. (Accessed on 3 September 2023)
- [2] <https://www.sdgmove.com/2023/05/17/sdg-insights-policy-pm2-5-agriculture/>. (Accessed on 1 September 2023)
- [3] R.S. Jo, M. Lu, V. Raman and P.H.H. Then, Design and implementation of IoT-enabled compost monitoring system, 9th IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE), Proceeding, 2019, 23-28.
- [4] R. Bhoir, R. Thakur, P. Tambe, R. Borase and S. Pawar, Design and implementation of smart compost system using IoT, IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Proceeding, 2020, 1-5.



- [5] H.I.B.A. Mamari, N.A.A.A. Washahi, M.H.K.A. Busaidi and F. Hajamohideen, Deep neural network based composting processing technology: A solution for municipality and fertilizer companies, 6th IET International Smart Cities Symposium, Proceeding, 2022, 1-9.
- [6] S.F. Mujiyanti, P.Y. Aisyah, A.F. Salsabilla, T.R. Darmawan and A. Rohid, IoT-based for monitoring and control system of composter to accelerate production time of liquid organic fertilizer, The Journal of Engineering, 2022, 8(2), 49-55.
- [7] <https://archives.mju.ac.th/intellectualhub/?p=1469> (Accessed on 5 September 2023)
- [8] S. Tadsuan and P. Taerakul, Increasing yield and reducing the cost of cultivation of asparagus with the internet of things, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 69-88. (in Thai)
- [9] R.K. Rajput, Electrical machines in S.I. units, Laxmi Publications Ltd., New Delhi, India, 2007.
- [10] <https://netpie.io/tutorials> (Accessed on 7 September 2023)
- [11] A. Minteer, Analytics for the internet of things (IoT), Packt Publishing Ltd., UK, 2017.
- [12] S.V. Mukherji, R. Sinha, S. Basak and S.P. Kar, Smart agriculture using internet of things and mqtt protocol, International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (Com-IT-Con), Proceeding, 2019, 14-16.
- [13] <https://iiot.riverplus.com/ieee-802-11/>. (Accessed on 20 December 2023)
- [14] <https://kuojs.lib.ku.ac.th/index.php/tjsf/article/view/4410/2078>. (Accessed on 30 October 2023)
- [15] <http://r08.idd.go.th/KM%20-%206.htm> (Accessed on 2 September 2023)
- [16] http://oss101.idd.go.th/web_soils_for_youth/s_prop_nutri02.htm. (Accessed on 9 September 2023)
- [17] <https://www.tools.in.th/ph/suitable-soil-ph/>. (Accessed on 25 September 2023)
- [18] <https://acrobat.adobe.com/link/review?uri=urn%3Aaaid%3Aascds%3AUS%3A26f5db6d-5f74-3e82-b12e-bb38c73d0088>. (Accessed on 14 September 2023)
- [19] W. Thaymuang, J. Boonjan and S. Singhabandhu, Nutrient in leaves, flesh and peel of Monthong durian planting on Khlong Chak series, Journal of Agricultural Science and Management, 2022, 5(1), 82–90. (in Thai)



- [20] https://www.opsmoac.go.th/angthong-local_wisdom-preview-412891791829. (Accessed on 20 September 2023)
- [21] https://www.baanlaesuan.com/144528/garden-farm/farming-101/plants_nutrients. (Accessed on 20 September 2023)
- [22] S. Khetjoi, W. Thasa, S. Raisa-nguan and S. Khatjoi, Impact of burning sugarcane leaves polluted pm 2.5 Nai-Muang sub-district, Wiangkao district, Khon kaen province, Journal of Buddhist Education and Research, 2021, 7(1), 16-25. (in Thai)
- [23] https://shopee.co.th/product/5468522/9734469687?gclid=CjwKCAjwgsqoBhBNEiAwEw5w0xJgGnr401ceY7C5zOIC0tp8URQOUEHvQmMmNsRVxipCbkrzwohoCG6MQAvD_BwE. (Accessed on 26 September 2023)
- [24] http://cmuir.cmu.ac.th/bitstream/6653943832/11424/7/econ30555pp_ch4.pdf. (Accessed on 24 September 2023)

Optimal Power Allocation in NOMA System Based on Artificial Intelligence Methods

Igor Jovanovic¹ and Kritsada Mamat²

¹ School of Electrical Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120, Belgrade, Serbia
Institute Mihajlo Pupin, University of Belgrade, Volgina 15, 11060, Belgrade, Serbia

² Department of Electronic Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's
University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: kritsada.m@cit.kmutnb.ac.th

Received: 13 June 2023; Revised: 29 November 2023; Accepted: 18 January 2024

Online Published: 18 April 2024

Abstract: This paper considers the Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technique which is one of the core technologies in 5G and beyond. To distinguish users in the power domain, Superposition coding and Successive Interference Cancellation (SIC) are applied at the transmitter and receiver. Power allocation is shown to be significant in affecting the system performance. This work proposes an application of two Artificial Intelligence (AI) methods, Q-learning and Genetic Algorithm (GA), in order to optimize the power allocation in the NOMA system. Namely, the maximization of the minimum bitrate of the overall system as well as the transformation of the NOMA system into both Q-learning and GA components are obtained by setting and solving the power allocation optimization problem. Numerical results demonstrate that Artificial intelligence algorithms provide a higher minimum bitrate in comparison with the existing theoretical power allocation methods. Besides bitrate, the complexity of both methods is analyzed. It is concluded that Q-learning has an exponential, while GA has a linear complexity with the increase of the total number of users.

Keywords: NOMA; power allocation; Artificial Intelligence; Q-learning; Genetic Algorithm



1. Introduction

Non-orthogonal multiple access (NOMA) is one of the candidates considered to be a core technology for future wireless communications. Many works prove that NOMA outperforms Orthogonal multiple access (OMA) in various aspects; for example, supporting multiple users and providing better spectral efficiency [1-4]. However, to enable NOMA, users should be operating in the same domain such as power or code. For power domain-NOMA, users are allowed to share some resources between each other, e.g., code, frequency, and modulation scheme, but they must stay separated in the power domain where Superposition coding is applied at the transmitter and receiver level. Received signal decoding is achieved by applying a Successive Interference Cancellation (SIC) method. Since users are separated by power, power allocation among them is of great importance. There are quite a huge number of existing works trying to optimize the power allocation in NOMA systems for various channel models and objectives presented in [5-8]. In [5], power allocation optimization problems were formulated in the manner of minimizing the transmission power and maximization of fairness rate. Minimizing the transmission power was also considered in [6] where power resource was allocated for multi-cell, multi-carrier NOMA system. In [7], power allocation algorithms for maximizing

the sum of achievable rates and energy efficiency were proposed for millimeter wave (mm Wave) NOMA system. Also, NOMA system was applied for uplink with the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) system where the power allocation scheme was proposed to improve throughput and packet delay [8]. In addition to be standalone, power allocation is usually jointly optimized with other resources [9], [10]. Concretely in [9], power and time allocations were jointly optimized to minimize the system outage probability in bidirectional NOMA communications. Furthermore, power allocation and beamforming were considered to maximize the system reliability in multiple-input multiple-output (MIMO) NOMA channels [10].

Nowadays, Artificial intelligence (AI) is becoming an almost indispensable tool in solving a huge number of engineering problems, what necessitates its enormous demand and development [11]. Basically, an AI agent is trying to find an optimal environmental state through a trial-and-error process, receiving the reward where such depends on the objective value of the considered environmental state [12]. Therefore, AI agent moves through the n-dimensional state space, in general case, looking for the state in which it receives the highest possible reward. AI is also showing popularity in the field of wireless communication, particularly in solving optimization problems [13-15]. In [13], AI was applied to optimize uplink and



downlink in decoupling system. Using AI to manage interference in the power optimization problem was considered in [14], where the objective was to maximize the sum of achievable rates. In [15], AI was applied to schedule transmission time slots in order to maximize the number of packets.

This paper considers a downlink power-domain NOMA system where a base station broadcasts signals to users. In order to maximize the minimum bitrate among users, the allocation of transmission power of all users to be achieved by applying two AI methods are proposed, Q-learning and Genetic algorithm. The mentioned problem was partially considered in [16], where only two users of NOMA system were taken into consideration. It is noted that AI was applied in resources allocation in NOMA channel with the difference in considered objectives [17], [18]. The equivalence between AI algorithms and NOMA system is successfully established. Precisely, the optimization problem in NOMA, which refers to an allocation of transmitting powers, was solved by AI algorithms whose components (e.g., population size and crossover probability in GA) were chosen in accordance with the problem formulation. Numerical results show that both AI methods provide higher minimum bitrate than the theoretical power allocation methods proposed in [19]. In addition to the bitrate, algorithm complexities are also considered. It can be concluded that the complexity of Q-learning increases with the total

number of users while that of GA is linearly increasing.

This paper is organized as follows. Section 2 represents the introduction of a downlink NOMA system with a review of existing power allocation schemes. Power allocation problem formulation and AI algorithms (Q-learning and GA) application are presented in section 3. Performance comparison including minimum bitrate and algorithm complexity are shown in section 4. Finally, section 5 is devoted to the conclusion.

2. System Model

In this study, a single-cell discrete time downlink channel is considered. A single antenna is assigned to a base station and users. Regarding the NOMA advantages over the OMA system, the base forms a cluster with K users and assigns them the common bandwidth in frequency domain. This way, the base station is able to transmit data to all users sharing the same bandwidth by applying a Superposition coding method. Therefore, the transmitted signal is given by

$$x = \sum_{k=1}^K \sqrt{\alpha_k P_{tot}} S_k \quad (1)$$

where α_k is the power allocation coefficient of user k , P_{tot} is a total budget of transmitted power and S_k is the symbol for user k . An additional assumption is that the user coefficients of transmitted power satisfy the following condition



$\sum_{k=1}^K \alpha_k \leq 1$. The received signal for k -th user is given by

$$y_k = c_k h_k x + n_k \quad (2)$$

where h_k is a channel coefficient, n_k is Additive White Gaussian Noise (AWGN) with zero mean and variance σ_n^2 and c_k , $0 < c_k \leq 1$, is normalized degradation factor depending on the distance between the base station and the k -th user. Afterwards, the Successive Interference Cancellation method (SIC) is applied by each user separately on the received signal, so that each of them decodes their own signal. Therefore, the signal transmitted from the base station is jointly decoded by all users who are sharing the same bandwidth. The priority of decoding is given to user with lower channel quality and hence, the first decoded user must be fully interfered by other users. Each subsequent user signal is obtained by subtracting the prior decoded signals from the received signal. Hence, the current received Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR) of user k is given by

$$\gamma_k = \frac{\alpha_k c_k^2 |h_k|^2}{c_k^2 |h_k|^2 \sum_{i=k+1}^K \alpha_i + \frac{\sigma_n^2}{P_{tot}}} \quad (3)$$

Subsequently, the associated achievable rate can be computed as follows

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k) \quad (4)$$

and the sum rate of overall system is given by

$$R_{sum} = \sum_{k=1}^K R_k \quad (5)$$

By observing (3) it can be concluded that the overall system performance mainly depends on the set of allocated powers among users $\{\alpha_k\}_{k=1}^K$. What gives an opportunity to improve the system performance. According to reference [19], power equalization of received signals is obtained by applying a Channel inversion power allocation scheme. This strategy allocates power inversely with the channel quality. In this way, the transmission power of k -th user is given by

$$\alpha_k = \frac{1}{c_k^2 |h_k|^2 \sum_{i=1}^K \frac{1}{c_i^2 |h_i|^2}} \quad (6)$$

In addition with Channel inversion, the same paper also proposes another method that can guarantee a minimum rate of one users per each frequency block. Furthermore, it is assumed the first decoded user is marked as l . Power allocated to this user, which also satisfies the desired SINR, is given by

$$\alpha_l = \frac{\gamma_l \left(c_l^2 |h_l|^2 + \frac{\sigma_n^2}{P_{tot}} \right)}{c_l^2 |h_l|^2 (1 + \gamma_l)} \quad (7)$$

where γ_l represents desired SINR. The rest of power budget, $1 - \alpha_l$, will be uniformly allocated among others in the same group. However, in order to achieve a feasible power allocation, the desired SINR must be bounded by the next constraint

$$\gamma_l < c_l^2 |h_l|^2 \frac{\sigma_n^2}{P_{tot}} \quad (8)$$

Although the power allocation schemes in (6) and (7) can maintain the performance of some users in



the group, they do not cover the user with a minimum rate. Hence, the Quality of Service (QoS) of the overall system would be unreliable for both mentioned theoretical methods. Consequently, the goal of this paper is to maximize the minimum rate user performance to guarantee QoS of overall system.

3. Optimal Power Allocation with Q-learning and Genetic Algorithm

The overarching objective of this paper is to guarantee the overall system performance as described in the previous section. Namely, the individual information transmission quality for each user is evaluated by distributing the total available power among them. It turns out that (6) and (7) provide a significant difference in the information transmission quality between users. Accordingly, Q-learning and Genetic algorithm have that task of performing such a total power distribution among users, so the maximum similarity of their performance is ensured. This can be formalized with the following expression

$$\begin{aligned} & \max_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K} \min(\gamma) \\ \text{subject to } & \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K \geq 0 \\ & \sum_{k=1}^K \alpha_k \leq 1 \end{aligned} \quad (9)$$

where γ is defined by (3) and $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$ represent the parts of total power assigned to the users. It is also noted that the problem formulated

by (9) can be solved using the classical optimization tools (e.g., Karush–Kuhn–Tucker or KKT theorem) if the channel distribution where the channel is described as a random variable is known. On the other side, if the channel distribution is unknown, the optimization technique can be learned through Artificial intelligence methods. Consequently, two Artificial intelligence methods, Q-learning and Genetic algorithm, are being applied in order to optimize the power allocation in NOMA channel.

3.1. Q-learning algorithm

Q-learning belongs to a group of algorithms called Reinforcement learning, which is a branch of Machine learning where agents learn optimal strategies through the method of unsuccessful attempts [12]. Q-learning algorithm can be formalized through 4 essential elements: state, action, reward, and Q value. State represents one of all problem solutions, regardless of whether that solution is physically achievable or not and whether it meets eventual limitations. Actions unambiguously define the transition from current to the next state and their number is arbitrary. Rewards represent the state's quality. It is usually measured as a distance from the goal state. Finally, Q values represent actions quality in the particular state, where number of actions and Q values has to be the same.

In the context of the problem exposed in this paper before, the relationship between NOMA



system and Q-learning algorithm would be as follows:

- **Agent:** The base station that allocates the transmission power to each of the system users is an agent of this scenario.

- **State (S_t):** A set of transmitting powers $\{\alpha_k P_{tot}\}_{k=1}^K$ is assumed to be the model state. In order to define a discrete state, all user coefficients α_k are quantized within the range $[0,1]$ with step Δ . Therefore, transmission power of each user is defined as a part of P_{tot} or overall P_{tot} power. However, the last user power must be equal to P_{tot} minus sum of all other user powers.

- **Action (a_t):** A set of transmitting power coefficients $\{\alpha_k\}_{k=1}^K$, where subset of $k \in (0, K)$ coefficients are taking values from the range $[0,1]$ with step Δ and $\alpha_{k \in subset} \neq \alpha_{k-1} \wedge \alpha_{k \notin subset} = \alpha_{k-1}$, is considered to be an state action. In other words, increasing or decreasing power of user k is considered to be an action.

- **Model constraints:** All user powers must be positive numbers and their sum must be equal to total transmit power P_{tot} .

- **Reward (r_t):** The main purpose of the state rewards is to incorporate the constraints introduced in advance. This way, the states which are not satisfying mentioned constraints are automatically

receiving low rewards. Additionally, in order to maximize the minimum system SINR, the reward should be the total SINR difference among users. Accordingly, the state reward is defined as follows

$$r_t(S_t, a_t) = -\frac{2}{K(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K |\gamma_i - \gamma_j| \quad (11)$$

- **Environment:** In accordance with the introduced Q-learning components, an environment of this system is described through

Algorithm 1.

Algorithm 1: Environment: $Env(\cdot)$

1. Initialize current state S_t
 2. Input action $a_t = \{\alpha_k\}_{k=1}^K$
 3. Go to the next state $S_{t+1} = \{\alpha_k P_{tot}\}_{k=1}^K$
 4. Find reward $r_t(S_t, a_t)$ using (11)
 5. **IF** $r_t(S_t, a_t)$ is maximum **THEN**
 6. $terminal = T$ (true)
 7. **ELSE**
 8. $terminal = F$ (false)
 9. **END IF**
 10. **RETURN** $S_{t+1}, r_t(S_t, a_t)$ and $terminal$
-

Algorithm 1 also represents one interaction between the agent and environment. This algorithm implies reaching the next state by executing an action in the current state. Therefore, the goal is to find an optimal action for each state that leads agent towards the maximum reward state. In order



to satisfy this assumption, a Q value lookup table has to be created. Each slot in the table represents state and action pair Q value. "Learning" part of Q-learning algorithm refers to updating the Q values ($Q(s_t, a_t)$) by using a Bellman equation with the temporal difference [12], which is given by

$$Q^{new}(s_t, a_t) \leftarrow Q^{old}(s_t, a_t) + \beta \left[r_t(s_t, a_t) + \mu \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q^{old}(s_t, a_t) \right] \quad (12)$$

where β is a learning rate and μ is a discount factor. Finally, the entire Q-learning algorithm can be summarized by **Algorithm 2**.

Algorithm 2: Q-learning algorithm

1. Define number of episodes N, N_{lim}, β, μ and ϵ
 2. **FOR** $episode = 1:N$ **DO**
 3. Initialize starting state s_t ,
 $terminal = F$ and
 $counter = 0$
 4. **WHILE** $terminal = F$ **DO**
 5. $counter = counter + 1$
 6. **IF** $rand(\cdot) < \epsilon$ **THEN**
 7. Randomly select one action a_t
 8. **ELSE**
 9. Select the action
 $a_t = arg \max_a Q(s_t, a_t)$
 10. **END IF**
 11. $s_{t+1}, r_t(s_t, a_t), terminal = Env(a_t)$
 12. Use (12) to update Q-table
 13. **IF** $counter \geq N_{lim}$ **THEN**
 14. **BREAK**
 15. **END IF**
 16. **END WHILE**
 17. **END FOR**
-

Where $\epsilon \in (0,1)$ and $rand(\cdot)$ is a random variable uniformly taking the value between 0 and 1. Based on **Algorithm 2**, agent can either randomly choose an action or specify the action which maximizes the reward. This is directly related with the biological learning process which includes exploration and exploitation. Furthermore, once the execution of the **Algorithm 2** is finished, the agent or the base station will know the most appropriate action for each state. On the other side, by considering **Algorithm 1** and **Algorithm 2**, the conclusion can be drawn that the optimal power allocation based on the Q-learning algorithm performs a $(K - 1)$ dimensional space searching. Accordingly, this method complexity depends on the number of state-action pairs what is a function of total number of users

$$comp_ql = O((K - 1)^2) \quad (13)$$

Equation (13) implies that the Q-learning complexity increases exponentially with the number of users in the system. This could be a serious problem when the base station needs to allocate power to many users at the same time. Basically, the complexity may refer to computation time or memory storage. Therefore, other Artificial intelligence methods which require less complexity than Q-learning algorithm are preferred.

3.2. Genetic Algorithm

Genetic Algorithm (GA) is an optimization method for both constrained and unconstrained problems. The concept of this algorithm is based on natural selection. Algorithm starts by generating a random population of J individuals (chromosomes), where each of them will be coded with M bits. Afterwards, a new generation is formed by passing all J chromosomes through 4 essential GA components: Evaluation, Selection, Crossover and Mutation. Furthermore, the previous generation will be replaced with the next one and the overall process will be repeated until the stopping criterion is met [21].

Defining the first generation is one of the beginning steps of GA application in the power allocation domain. Namely, the set of J random chosen values from the range $[0, P_{tot}]$ represents initial population after coding. Each of J value is firstly rounded to the nearest of $(2^M - 1)$ quantization levels. Then each of them is binary coded with M bits. Therefore, the population of i th generation can be represented by $\mathbf{P}(i)$ matrix.

$$\mathbf{P}(i) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1,1}[M](i) & \cdots & \mathbf{p}_{1,K-1}[M](i) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{p}_{J,1}[M](i) & \cdots & \mathbf{p}_{J,K-1}[M](i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Where each row of $\mathbf{P}(i)$ matrix is a $(K - 1)$ dimensional vector of power allocation coefficients $\{\alpha_k\}_{k=1}^{K-1}$ and $\alpha_K = 1 - \sum_{k=1}^{K-1} \alpha_k$. Then, all population members SINR (γ_k) per user is

calculated using equation (3). This part directly leads to individuals evaluation or determining the fitness function value $f(\text{chr}_i(j))$ which is constructed in accordance with the optimization problem in (9).

$$f(\text{chr}_i(j)) = e^{(-\sum_{t=0}^{K-2} \sum_{s=t+1}^{K-1} |\gamma_t - \gamma_s|)} \quad (15)$$

where i and j represent the i —th generation and the j —th individual, respectively. After each chromosome evaluation, the fitness function values are stored into the vector \mathbf{f} defined by

$$\mathbf{f} = [f_1(i) \quad \dots \quad f_J(i)]. \quad (16)$$

The selection process is envisaged to be applied two times. Direct individuals transfer from the previous to the next generation, which refers to Generation gap [21], is the first application. The second time is during the crossover process while selecting the parental individuals. Basically, selection can be implemented through the several methods. However, Elitism and the “Roulette wheel” [22] are applied as the most frequent used selection methods. By Elitism, one individual with the highest criterion function value is directly transferred to the next generation, while “Roulette wheel” randomly chooses the rest of necessary number of individuals based on their fitness function values. Afterwards, the single-point crossover is applied on two parents selected by a “Roulette wheel” method, with the crossover probability of p_c . Therefore, if crossover occurs, two inheritances are formed by appending



the first m representative bits of one parent and the rest $M - m$ bits of the other one and vice versa, otherwise parents are becoming the new generation members by themselves. The last step is mutation, performed by randomly choosing and inverting defined number of representative bits of randomly chosen chromosomes from $\mathbf{P}(i + 1)$. The mutation process is extremely important because it provides a genetic diversity, but this is also in correlation with the number of mutation bits. In other words, large number of mutation bits leads to algorithm degradation. Finally, $\mathbf{P}(i)$ matrix is updated with $\mathbf{P}(i + 1)$ and the process will be repeated until the individuals converge towards the optimal solution or maximum generation number is achieved. The entire GA can be summarized through **Algorithm 3**.

The complexity of this method mainly depends on the population size J , generation number N_g , and the number of representative bits M . Therefore, the complexity is given by

$$comp_GA = \mathcal{O}(N_g J (2M + 1)). \quad (17)$$

Where N_g and M are constant values, while J depends linearly on the number of users K . Accordingly, GA complexity increases linearly with the number of users in NOMA system.

Algorithm 3: Genetic Algorithm

1. Define population size J , representative bits Number M , generations number N_g , crossover probability p_c , mutation probability p_m and generation gap G
 2. Initialize first generation $\mathbf{P}(0)$, $terminal = F$, and $counter = 0$
 3. **WHILE** $terminal = F$ **DO**
 4. $counter = counter + 1$
 5. Use (15) to calculate fitness function values
 6. Store fitness function values in vector \mathbf{f} from (16)
 7. Use Elitism and “Roulette wheel” to perform Selection process of individuals number defined by G
 8. Perform Crossover with p_c probability to produce the rest of individuals in population
 9. Perform mutation with p_m probability
 10. Update $\mathbf{P}(i) \leftarrow \mathbf{P}(i + 1)$
 11. **IF** \mathbf{f} converges **OR** $counter = N_g$ **THEN**
 12. $terminal = T$
 13. **ENDIF**
 14. **ENDWHILE**
-

4. Numerical Results

To investigate the performance of all power allocation methods considered in this work, the Python programming language is used to implement simulations. Performances of all schemes are averaged over 1000 channel and noise realizations. Furthermore, the total number of users was set to be 2 and 3. Although that number could be greater than 3, it has been shown in [2] that there is a tradeoff between system performance and the number of users sharing frequency in NOMA group. The common parameters for each figure in continuation are $\Delta = 0.01$, $c_1 = 1$, $c_2 = 0.6$, $c_3 = 0.4$ and noise variance $\sigma_n^2 = 0.1$.

In Fig. 1, the sum of all user bitrates is demonstrated by using all power allocation schemes versus total transmission power P_{tot} in a 2-user NOMA system. As expected, the sum of bitrates increases with the total transmission power for each method. However, the QoS method clearly provides the highest performance while Channel inversion method referred as CSI provides the lowest. Performance of both AI methods (Q-learning and GA) are comparable, and their values are in between the QoS and CSI performance values. Therefore, AI methods do not provide the highest sum of bitrates.

In Fig. 2, the objective is changed to the minimum bitrate of the system. Consequently, GA

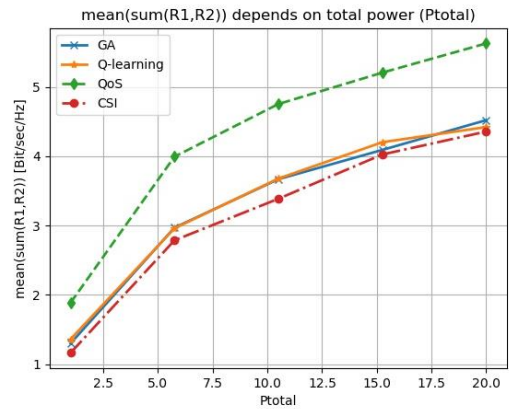


Fig. 1 Average sum of user bitrates for all power allocation methods in a 2-user NOMA system with total transmit power P_{tot}

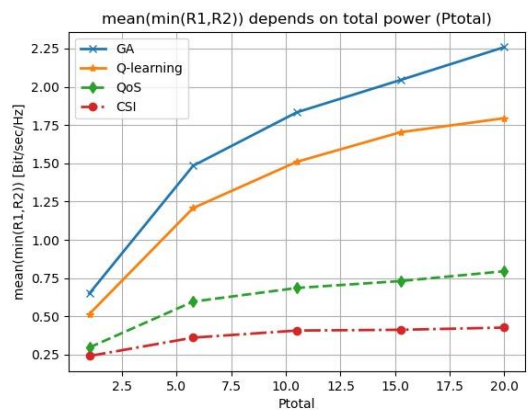


Fig. 2 Average minimum of user bitrates for all power allocation methods in a 2-user NOMA system with total transmit power P_{tot}

achieves the highest minimum bitrate while Q-learning is the second best. This approach improves the system quality of service in the way that the minimum performance user is maximized while others maintain optimal (maximum) values.

In Fig. 3 and Fig. 4, the results are extended when 3 users are considered. Similar to a 2-user system, the same trend is provided by all power allocation methods. However, Q-learning is not taken into consideration due to its exponential time complexity, however; the same performance trend as the 2-user system is expected.

Fig. 5 shows individual user bitrates obtained by GA and CSI methods in a 3-user NOMA system. This figure emphasizes the advantages of Artificial intelligence methods over the theoretically based methods. Namely, bitrates computed by GA are almost the same, what was the initial goal. On the other side, that is not the case for the CSI method, where the bitrate of one user is extremely high while of the other one is extremely low. Mentioned fact is of great importance while maintaining the overall quality of the system.

Fig. 6 represents the complexities of Artificial intelligence algorithms with the total number of K users in NOMA system. As expected, the complexities of both methods increase with the number of system users. However, Q-learning provides less complexity than GA when the number of users is less than or equal to 3. Moreover, as the number of users grows Q-learning is becoming more complex what explains its exponential complexity nature, while GA maintains its complexity in the linear domain as described in Section 3.

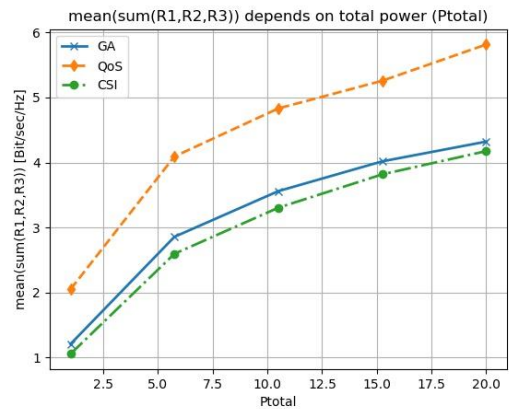


Fig. 3 Average sum of user bitrates for GA, QoS and CSI power allocation methods in a 3-user NOMA system with total transmit power P_{tot}

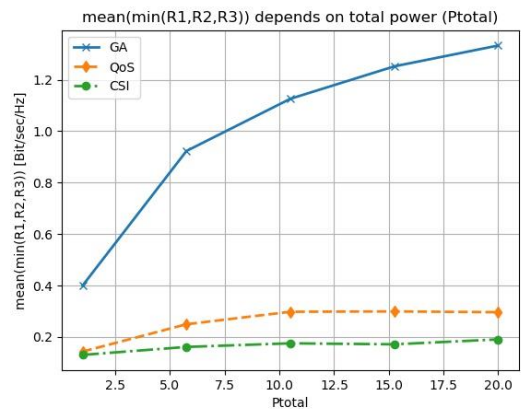


Fig. 4 Average minimum of user bitrates for GA, QoS and CSI power allocation methods in a 3-user NOMA system with total transmit power P_{tot}

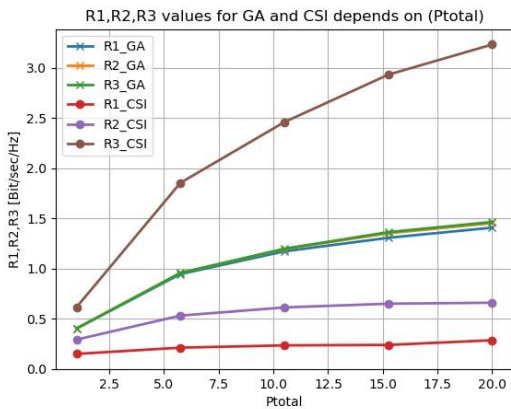


Fig. 5 Individual rates of all users for 3-user NOMA system performed by GA and CSI with total transmit power P_{tot}

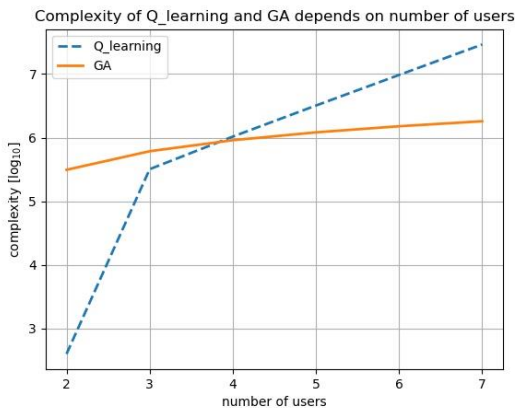


Fig. 6 Genetic algorithm and Q-learning complexities with the total number of system users

5. Conclusions

The allocation of transmission powers among users in the downlink NOMA system has been considered. Consequently, the power optimization problem is formulated to maximize the minimum bitrate of overall system. Apart from the theoretical methods, Q-learning and Genetic algorithm are applied in order to solve the appointed problem. Firstly, the transformation steps from NOMA system to GA and Q-learning components are described. Simulation results demonstrate that the Artificial intelligence methods outperform the existing theoretically based power allocation methods. Furthermore, the algorithm complexities are also considered, and it turns out that GA has less complexity in comparison with Q-learning algorithm with the increase in total number of users. Therefore, it can be concluded that GA is more suitable over Q-learning in optimal power allocation application since it provides less complexity and better performance.

In this work, a simple model is considered since NOMA system is assumed to be a single-cell and single-antenna. Therefore, power allocation is the only parameter to be optimized. Thus, the future work should consider more complex systems as well as AI algorithms improvement in order to achieve better performance.



6. Acknowledgement

I. Jovanovic was supported by the IAESTE scholarship to join the Department of Electronic Engineering Technology, KMUTNB as a visiting scientist during September to October 2022.

7. References

- [1] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, A survey of non-orthogonal multiple access for 5G, *IEEE Communication Surveys Tutorials*, 2018, 20(3), 2294-2323.
- [2] M. Zeng, A. Yadav, O.A. Dobre, G.I. Tsiropoulos and H.V. Poor, On the sum rate of MIMO-NOMA and MIMO-OMA systems, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(20), 534-537.
- [3] D. Zhang, Y. Liu, Z. Ding, Z. Zhou, A. Nallanathan and T. Sato, Performance analysis of non-regenerative massive-MIMO-NOMA relay systems for 5G, *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(1), 4777-4790.
- [4] Y. Liu, G. Pan, H. Zhang and M. Song, On the capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA, *IEEE Access*, 2016, 4, 2123-2190.
- [5] J. Cui, Z. Ding and P. Fan, A novel power allocation scheme under outage constraints in NOMA systems, *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(9), 1226-1230.
- [6] D. Ni, L. Hao, Q.T. Tran and X. Qian, Transmit power minimization for downlink multi-cell multi-carrier NOMA networks, *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(12), 2459-2462.
- [7] Y. Zhang, X. Zhao, S. Geng, Z. Zhou, P. Qin, L. Zhang and L. Yang, Power allocation algorithms for stable successive interference cancellation in millimeter wave NOMA systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 22(12), 2459-2462.
- [8] Y. Kwon, H. Baek and J. Lim, Uplink NOMA using power allocation for UAV-Aided CSMA/CA Networks, *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(2), 2378-2381.
- [9] J. Bae and Y. Han, Joint power and time allocation for Two-Way cooperative NOMA, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(12), 12443-12447.
- [10] M.R.G. Aghdam, B.M. Tazehkand and R. Abdolee, Joint optimal power allocation and beamforming for MIMO-NOMA in mmWave communications, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(5), 938-941.
- [11] www.simplilearn.com/tutorials/artificial-intelligence-tutorial/artificial-intelligence-applications. (Accessed on 18 January 2023)



- [12] R.S. Sutton and A.G. Barto, Reinforcement Learning: An introduction, 2nd Ed., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, 2017.
- [13] M. Chen, W. Saad and C. Yin, Optimized uplink-downlink decoupling in LTE-U networks: An echo state approach, IEEE International Conference on Communications (ICC-Malaysia 2016), Proceeding, 2016, 1-6.
- [14] H. Sun, X. Chen, Q. Shi, M. Hong, X. Fu and N.D. Sidiropoulos, Learning to optimize: Training deep neural networks for interference management, IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 6(20), 5438-5453.
- [15] E. Mete and T. Girici, Q-Learning based scheduling with successive interference cancellation, IEEE Access, 2020, 8, 172034-172042.
- [16] P. Aermisa-Ard, C. Wangsamad and K. Mamat, On applying Q-Learning to optimize power allocation in 2-users NOMA system, The journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 104-116. (in Thai)
- [17] O.F. Gemici, F. Kara, I. Hokelek, G.K. Kurt and H.A. Çırpan, Resource allocation for NOMA downlink systems: Genetic algorithm approach, 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Proceeding, 2017, 114-118.
- [18] S. Lee, J. Kim and S. Cho, Resource Allocation for NOMA based D2D system using genetic algorithm with continuous pool, 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Proceeding, 2019, 705-707.
- [19] M.M. El-Sayed, A.S. Ibrahim and M.M. Khairy, Power allocation strategies for Non-Orthogonal multiple access, International Conference on Selected Topics in Mobile & Wireless Networking (MoWNeT-Egypt 2016), Proceeding, 2016, 1-6.
- [20] E. Cantu-Paz, Selection intensity in genetic algorithm algorithms with generation gaps, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (Las Vegas, NY 2000)*, Proceeding, 2000, 1-8.
- [21] D.R. da S. Medeiros, M.F. Torquato and M.A.C. Fernandes, Embedded genetic algorithm for low-power, low-cost, and low-size-memory devices, Engineering Report, 2020, 2(9), 1-28.



สมบัติทางกายภาพ กำลังอัด และโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าไม้ไฟ

สุชาติ จันทร์มณี^{1*} อามิเต็ง ฮาวา² ชาตรี หอมเขียว^{1,3} และ นันทชัย ชูศิลป์⁴

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

³ หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

⁴ สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 15 ธันวาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 26 มกราคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้เถ้าไม้ไฟแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบขนาดมิติรูปร่าง ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างระดับจุลภาค ประกอบด้วยภาพถ่ายกำลังขยายสูงโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน และสารประกอบโดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ ยังมี การทดสอบเปรียบเทียบคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้วิธีการบ่มน้ำและบ่มอากาศ จากผลการทดสอบ พบว่า การทดสอบขนาดมิติรูปร่างเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C936/C936M ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นอยู่ในช่วง 2,111-2,209 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณเถ้าไม้ไฟเพิ่มขึ้น การผสมเถ้าไม้ไฟร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุดเมื่อบ่มน้ำที่อายุ 60 วัน และโครงสร้างระดับจุลภาคพบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแอกทริงไคต์ ดังนั้น เถ้าไม้ไฟสามารถนำแทนที่ซีเมนต์ผสมสำหรับงานเฉพาะบางชนิดได้

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น; เถ้าไม้ไฟ; การดูดซึมน้ำ; โครงสร้างระดับจุลภาค

Physical Properties, Compressive Strength and Microstructure of Interlocking Concrete Paving Block Containing Bamboo Ash

Suchart Chantaramanee^{1*}, Abideng Hawa², Chatree Homkhiew^{1,3} and Nuntachai Chusilp⁴

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

² Infrastructure and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

³ Materials Processing Technology Research Unit, Rajamangala University of Technology Srivijaya

⁴ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th

Received: 27 June 2023; Revised: 15 December 2023; Accepted: 26 January 2024

Online Published: 22 April 2024

Abstract: This research focused on studying the physical properties, mechanical properties, and microstructure of concrete interlocking blocks that use bamboo ash as a partial replacement of cement. In the 10, 20, and 30 percentages by weight of cement, dimensions of shape, density, water absorption, and microstructure were tested. High-magnification imaged by scanning electron microscope technique elemental analysis with energy-dispersed X-ray spectrometry and compounds by X-ray diffraction analysis technique. In addition to that, there was a comparative test of concrete blocks interlocking paving using water curing and air curing methods. According to the test results, the dimensional dimension test was following ASTM C936/C936M standards, the density of concrete interlocking blocks for paving is in the range of 2,111-2,209 kilograms per cubic meter. Water absorption tended to increase significantly with an increase in bamboo ash content. Mixing 10% bamboo ash by weight provided the best compressive strength, curing water at 60 days of age, and the microstructure found calcium silicate hydrate and ettringite. Therefore, bamboo ash can replace cement mixtures for some specific applications.

Keywords: Interlocking concrete paving block; Bamboo ash; Water absorption; Microstructure



1. บทนำ

ไม้ไผ่เป็นพืชที่มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทยและไม้ไผ่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะด้านผลิตภัณฑ์หัตถกรรม เช่น กระดัง กระเช้าผลไม้ ตะกร้า จายตลาต ชะลอม ตะกร้าใส่ขยะ กระเป๋าถือ-สตรี หมวก และยังมีนิยมนำมาใช้ทำแคร์ โต้ะ แก้วอี้ เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการผลิตเหล่านี้ส่งผลให้เกิดเศษเหลือทิ้งจากไม้ไผ่เป็นจำนวนมากและถูกกำจัดด้วยวิธีการเผาทำลายส่งผลให้มีแก๊สไผ่ไผ่เกิดขึ้นจำนวนหนึ่งภายหลังกระบวนการเผา ในขณะที่เดี่ยวกันปัจจุบันวัสดุก่อสร้างที่เป็นปูนซีเมนต์จำนวนมากถูกผสมด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น เช่น การนำ แก้วลอยผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ทำให้สมบัติดีขึ้น [1-3] สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างงานประเภทโครงสร้างได้เป็นอย่างดี นอกจากแก้วลอยแล้วยังมีการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งอื่น ๆ เช่น แก้วปาล์มน้ำมัน [4, 5] ที่มีศักยภาพในการผสมกับปูนซีเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุผสมคอนกรีตบางชนิดไม่ได้มีความจำเป็นที่จะต้องมีการอัดที่สูงเหมือนกับคอนกรีตโครงสร้าง เช่น คอนกรีต-บล็อกหรืออิฐบล็อก คอนกรีตบล็อกปูพื้น คอนกรีต-พูน คอนกรีตมวลเบา เป็นต้น วัสดุเหล่านี้สามารถผสมด้วยแก้วชนิดต่าง ๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นแก้วชานอ้อย แก้วกลบ แก้วไผ่ย่างพารา กากกาแฟ เป็นต้น Hansudewechakul *et. al.* [6] ได้ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกผสมแก้วชานอ้อย พบว่าการผสมแก้วชานอ้อยจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกลดลงเล็กน้อยเมื่อการผสมไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อมีการผสมมากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก กำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนในทุกอายุบ่มสำหรับการดูดซึมน้ำ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วชาน

อ้อยการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามลำดับ Klathae *et. al.* [7] มีการศึกษาการใช้แก้วไผ่ย่างพาราเพื่อผลิตอิฐ-บล็อกประสานปูพื้นโดยการผสมแก้วไผ่ย่างพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแก้วไผ่-ย่างพาราในทุกอายุบ่ม 7-28 วัน แต่ยังมีค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์ [8, 9] โดยศึกษาการใช้แก้วชานแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นใช้กากแก้วผสมร้อยละ 10-60 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีกำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากแก้วชานเช่นเดียวกับกำลังอัดขณะเดียวกับการดูดซึมน้ำ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มของกากแก้วชาน

ปัจจุบันที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้แก้วไผ่ไผ่ในการผสมคอนกรีตอยู่บ้าง ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า การผสมแก้วไผ่ไผ่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ดีขึ้น Odeyemi *et. al.* [10] ได้มีการผสมแก้วไผ่ไผ่เข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังคอนกรีตผสมแก้วไผ่ไผ่ พบว่า การใช้แก้วไผ่ไผ่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถให้กำลังอัดที่ดีที่สุด โดยเฉพาะเมื่อบ่มน้ำที่อายุเป็นเวลานานถึง 56 วัน กำลังอัดมีความโดดเด่นอย่างชัดเจน ซึ่งก่อนหน้านี้ Umoh และ Odesola [11] ทำการศึกษาแก้วไผ่ไผ่ผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในการทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ พบว่า การแทนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถให้กำลังอัดได้สูงสุดตั้งแต่บ่มน้ำที่อายุ 7 วัน ถึง 90 วัน แต่จากการศึกษาของ Silva *et. al.* [12] พบว่า การผสมแก้วไผ่ไผ่สามารถผสมได้มากถึงร้อยละ 30 ของการแทนที่ปูนซีเมนต์โดย-น้ำหนัก ซึ่งเป็นที่น่าสังเกต



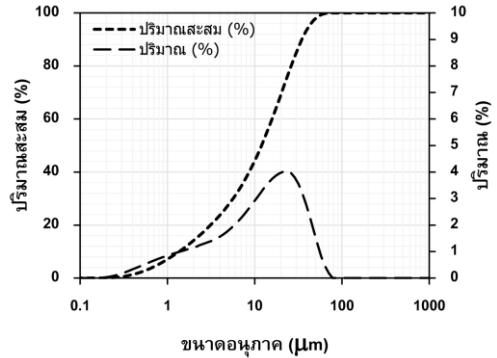
องค์ประกอบทางเคมีมี SiO_2 สูงถึงร้อยละ 83.56 ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ (XRD) ได้พบกับความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) อย่างเด่นชัด [13] แสดงให้เห็นว่าการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าใบไม้ไผ่ ในขณะที่การแทนที่เถ้าใบไม้ไผ่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดดีที่สุด และมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าใบไม้ไผ่ อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะใช้ใบไม้ไผ่เผาเป็นเถ้าในการผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์สำหรับการใช้ลำไม้ไผ่เผาให้เป็นเถ้าไม้ไผ่ผสมคอนกรีตยังไม่ได้มีการศึกษามากนัก

ในการวิจัยนี้จึงสนใจการใช้เถ้าไม้ไผ่แทนที่ปูนซีเมนต์ ศึกษาอัตราส่วนผสมของเถ้าไม้ไผ่ในปริมาณต่าง ๆ ต่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ศึกษาสมบัติทางกายภาพ กำลังอัด และวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เพื่อความเป็นไปได้ในการนำเศษเหลือทิ้งในกระบวนการใช้ไม้ไผ่มาใช้ในงานวัสดุก่อสร้างสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

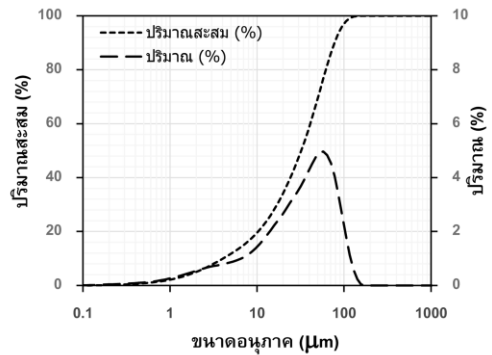
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุ

ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน [14] ได้วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคด้วยวิธี Laser Particle Size Analyzer (LPSA2), ANALYSETTE 22 Nano Tec, FRITSCH, Germany พบว่า อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน และขนาดของอนุภาคที่ปริมาณสะสม d_{10} d_{50} และ d_{90} มีค่าเท่ากับ 1.4, 12.1 และ 34.3 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



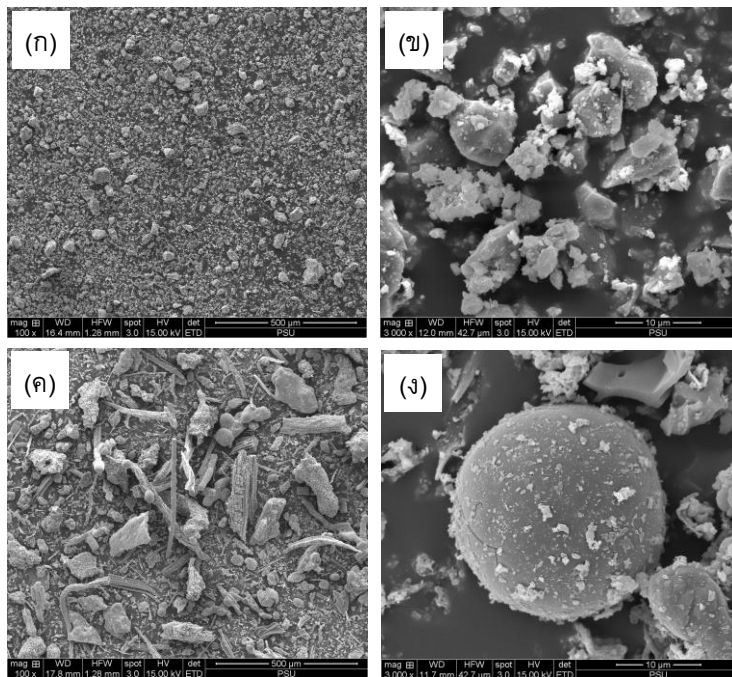
รูปที่ 2 ขนาดอนุภาคของเถ้าไม้ไผ่

สำหรับเถ้าไม้ไผ่ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้จากการนำไม้ไผ่ขางหม่นจากเศษเหลือทิ้งเผาด้วยถังโลหะขนาด 200 ลิตร เป็นระบบเปิดอุณหภูมิขณะเผาสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เถ้าที่ได้สีเทาละเอียดขนาดนำผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200 แล้ววิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธีเดียวกันกับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ พบว่า ขนาดอนุภาคที่ปริมาณสะสม d_{10} d_{50} และ d_{90} มีค่าเท่ากับ 4.0, 31.8 และ 75.3 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 ซึ่งโดยภาพรวมเถ้าไม้ไผ่จะมีความต้องการน้ำสูงกว่าปูนซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะทำให้มีความต้องการน้ำสูงเป็นปัจจัยการพัฒนากำลังของ



คอนกรีต เนื่องจาก W/C กำลังอัดจะต่ำลงสอดคล้องกับ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์ และเถ้าไม้ไผ่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดชนิด Scanning Electron Microscope (SEM2) Thermo FISHER SCIENTIFIC QUANTA 400 ที่กำลังขยาย 100x และ 3,000x ดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของวัสดุทั้งสอง พบว่า การกระจายขนาดของอนุภาคปูนซีเมนต์มีความ สม่าเสมอ (รูปที่ 3(ก)) เมื่อพิจารณารายละเอียดถึง ลักษณะรูปทรง พบว่า ปูนซีเมนต์มีลักษณะทรงเหลี่ยม

สี่เหลี่ยมรูปที่ 3 (ข) ในส่วนของเถ้าไม้ไผ่ พบว่า ขนาด อนุภาคมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3(ค) ซึ่งเกิดจากการที่เถ้าไม้ไผ่ไม่ได้ผ่านการบดละเอียดทำให้ลักษณะทางกายภาพมีทั้งที่รูปทรงยาวมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและเมื่อกำลังขยาย 3,000x สามารถตรวจพบ อนุภาคทรงกลมเป็นบางส่วน ซึ่งเป็นอนุภาคของซิลิกา ร้อยละ 34.45 เป็นไปตามผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ ทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ X-ray Fluorescence (XRF) Model : Zetium, PANalytical, Netherlands ดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคจาก SEM QUANTA 400 ปูนซีเมนต์ กำลังขยาย (ก) 100x (ข) 3,000x เถ้าไม้ไผ่ กำลังขยาย (ค) 100x และ (ง) 3,000x



ในตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ พบว่า ปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักมากถึงร้อยละ 60.25 แคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในส่วนของเถ้าไม้ไฟมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และโปแตสเซียมออกไซด์ (K₂O) เป็นองค์ประกอบหลักมีมากถึงร้อยละ 34.45 และร้อยละ 20.76 ตามลำดับ และมีแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 8.10 ดังนั้น องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไม้ไฟที่ผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 35.85 ซึ่งใกล้เคียงสารปอซโซลานของ Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15]

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตามอัตราส่วน ดังตารางที่ 2 ทั้งหมด 4 อัตราส่วนผสม

โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าไม้ไฟเข้าไปแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 0, 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักโดยได้ใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เถ้าไม้ไฟ) : ทราายแม่น้ำผ่านตะแกรง 12 เมส : หินฝุ่นผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว (1 : 3 : 5) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 1.0 เริ่มจากการผสมวัสดุประสานกับทราายแม่น้ำให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีต ทำการเติมน้ำในอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ และเติมหินฝุ่นเข้าในขั้นตอนสุดท้ายผสมกระทั่งวัสดุทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำไปเทลงในแบบหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นขนาด 10 x 20 x 6 เซนติเมตร จำนวน 5 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อนำไปบ่มน้ำที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน และบ่มอากาศที่อายุ 28 วัน ก่อนทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ไฟ (XRF)

ออกไซด์ (ร้อยละ)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂
ปูนซีเมนต์	60.25	8.54	2.36	1.88	0.74	1.54	2.19	0.04	0.02	0.03	0.16
เถ้าไม้ไฟ	8.10	34.45	0.78	0.62	20.76	6.68	5.36	0.23	6.91	0.80	0.05

ตารางที่ 2 อัตราส่วนคอนกรีตบล็อกปูพื้นต่อวัสดุประสาน 8 กิโลกรัม

สัญลักษณ์	น้ำหนัก (กิโลกรัม)					
	วัสดุประสาน (B)		ทราาย	หิน	น้ำ (w)	น้ำ/วัสดุประสาน (W/B)
	ปูนซีเมนต์ (C)	เถ้าไม้ไฟ				
CT	8.0	0.0	24.0	40.0	8.0	1.0
BA10	7.2	0.8	24.0	40.0	8.0	1.0
BA20	6.4	1.6	24.0	40.0	8.0	1.0
BA30	5.6	2.4	24.0	40.0	8.0	1.0



2.3 การทดสอบ

2.3.1 สมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบมิติรูปร่าง การดูดซึมน้ำ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C936/C936M [16] โดยใช้ก้อนตัวอย่างบ่มน้ำที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน และบ่มอากาศที่อายุ 28 วัน สำหรับการวิเคราะห์ความหนาแน่นจริงด้วยเครื่องมือทดสอบ True Density Analyzer, AccuPyc II 1340, Micromeritics, U.S.A. ณ อุณหภูมิห้อง 25 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่าปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.7932 ± 0.0075 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเถ้าไม้ไผ่เท่ากับ 2.2852 ± 0.0033 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.3.2 กำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้ตามมาตรฐาน [16] ทดสอบก้อนตัวอย่างบ่มน้ำที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน และบ่มอากาศที่อายุ 28 วันเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.3.3 โครงสร้างระดับจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อคอนกรีตบล็อกโดยใช้ส่วนที่แตกหักภายหลังจากการทดสอบกำลังอัด นำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน Scanning Electron Microscope (FESEM), Model : Apreo, Brand FEI, NETHERLANDS วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) และวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray Diffractometer PANALYTICAL, EMPYREAN, NETHERLANDS

3. ผลและการอภิปรายผล

3.1 ผลการวัดขนาดมิติรูปร่าง

ผลการทดสอบ มิติรูปร่างของก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น พบว่า ขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาเท่ากับ 99.79 ± 0.29 199.38 ± 0.33 และ 60.33 ± 0.56 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน [16] ดังนั้น การผสมเถ้าไม้ไผ่แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้านขนาดมิติรูปร่างอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 ผลความหนาแน่น

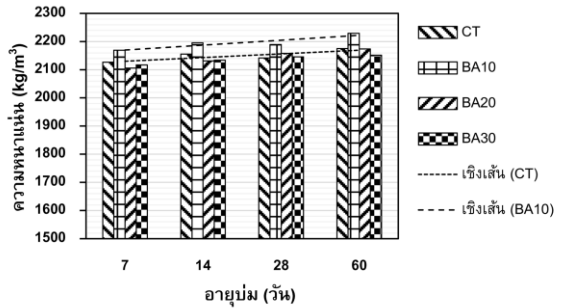
รูปที่ 4 ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า การใช้เถ้าไม้ไผ่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นสูงสุดอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น ๆ เนื่องจากคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีความหนาแน่นสูงสัมพันธ์ค่ากำลังอัดที่สูงเช่นเดียวกันดังรูปที่ 9 ที่บ่มน้ำทุกส่วนผสมสามารถอธิบายได้ว่า คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีกำลังอัดสูงแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีนั้น จะส่งผลต่อความหนาแน่นไปด้วย กล่าวคือ เมื่อเกิดปฏิกิริยาได้ดีแสดงว่าเนื้อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจะมีช่องว่างลดลงจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าไปอุดในช่องว่างมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตเนื้อแน่นมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 6 ในขณะที่การแทนที่เถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นน้อยกว่าอย่างชัดเจน แต่มีค่าใกล้เคียงตัวอย่างที่ไม่ผสมเถ้าไม้ไผ่ และเมื่อพิจารณาจากเนื้อคอนกรีตจะเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดรูพรองหลายตำแหน่งมีผลทำให้น้ำหนัก



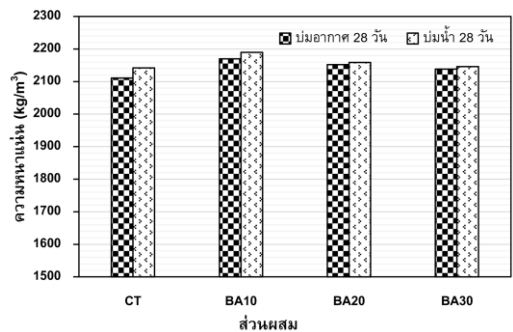
น้อยกว่าตัวอย่างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นเมื่ออายุบ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของลักษณะการบ่มทั้งการบ่มน้ำและบ่มอากาศต่อผลความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 5 พบว่า การบ่มน้ำความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกมีค่ามากกว่าในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากการบ่มน้ำคอนกรีตสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าการบ่มอากาศส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เข้าไปอุดช่องว่างได้มากกว่าทำให้ได้น้ำหนักมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความหนาแน่นจากปริมาณแก้วไม้ไผ่ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณมากขึ้น พบว่า ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นลดลง เนื่องจากแก้วไม้ไผ่มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.3 และปูนซีเมนต์ 2.8 มีผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง

3.3 ผลการดูดซึมน้ำ

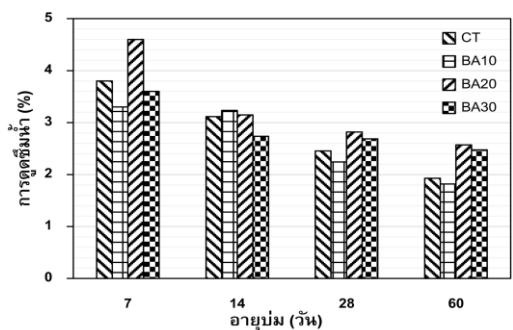
ผลการดูดซึมน้ำได้ทำการทดสอบในทุกอายุบ่มที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน การดูดซึมน้ำนี้ทดสอบกับก้อนตัวอย่างขนาดอิฐบล็อกประสานปูพื้น 10 x 20 x 6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6 อายุบ่มที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเกิดการทำให้ปฏิกิริยานานขึ้นมีผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นมีผลต่อการปิดช่องว่างรูพรองจากผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น และเป็นที่น่าสังเกตเป็นอย่างยิ่งว่าตัวอย่าง CT และ BA10 มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าตัวอย่าง BA20 และ BA30 จะมีความสัมพันธ์กับกำลังอัด ตัวอย่างที่การดูดซึมน้ำน้อยกำลังอัดสูง ในขณะที่ตัวอย่างที่การดูดซึมน้ำมากกำลังอัดลดลง ปริมาณแก้วไม้ไผ่ที่มากขึ้นมีแนวโน้มให้



รูปที่ 4 ความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น



รูปที่ 5 ความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตามวิธีการบ่ม



รูปที่ 6 การดูดซึมน้ำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงเนื้อของอิฐบล็อกประสานปูพื้นที่เกิดโพรงขึ้นมีความแตกต่างอย่างชัดเจน [17] อธิบายว่าการลดปริมาณรูพรอง

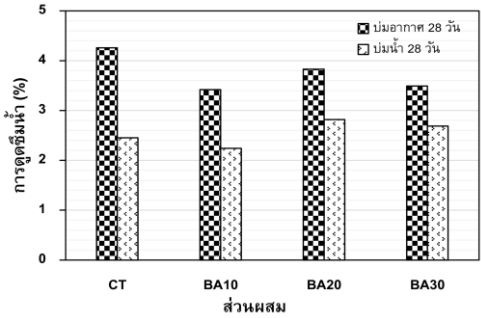


สามารถช่วยลดปริมาณการดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับกับการศึกษาของ Wang *et. al.* [18] ปริมาณโพรงมากส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำมาก การศึกษาของ Aprianti *et. al.* [19] ที่ใช้แก้วไมไฟไฟผสมคอนกรีตผลการทดสอบการดูดซึมน้ำมีลักษณะสอดคล้องกับการศึกษานี้ โดยปริมาณแก้วไมไฟไฟที่เพิ่มมากขึ้นการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นด้วย และอายุบ่มมากขึ้นการดูดซึมน้ำลดลง

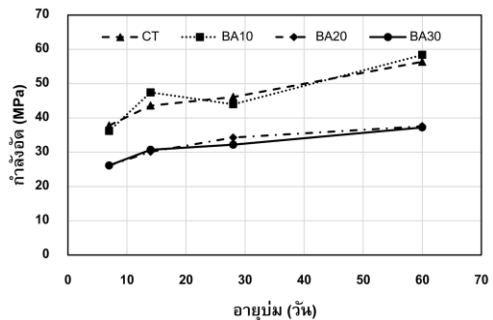
รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นปูพื้นที่อายุบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการบ่มน้ำมีปริมาณการดูดซึมน้ำได้น้ำน้อยกว่าการบ่มอากาศซึ่งแน่นอนว่าการบ่มน้ำจะมีผลให้น้ำแทรกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น จากน้ำที่เกิดจากอัตราส่วนผสมของคอนกรีตเบื้องต้นจึงมีความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงเนื่องจากมีปริมาณของน้ำอยู่จำนวนหนึ่งแล้วในเนื้อคอนกรีตและการบ่มน้ำของคอนกรีตเป็นปัจจัยการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าการบ่มอากาศ ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นและทึบกว่าคอนกรีตที่ทำปฏิกิริยาได้ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของการบ่ม 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 9 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนระหว่างการบ่มทั้ง 2 แบบ หากพิจารณาผลของการดูดซึมน้ำทั้ง 2 แบบ ดังกล่าวเห็นถึงความแตกต่างอย่างมากถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำ

3.4 ผลกำลังอัด

รูปที่ 8 ผลกำลังอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทำการทดสอบก่อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกโดยการกดตัวอย่างตามมาตรฐาน [16] ทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าตามแนวโน้มและทิศทางของค่าการทดสอบมีลักษณะ



รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตามวิธีการบ่ม



รูปที่ 8 กำลังอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

สอดคล้องผลการทดสอบที่ผ่านมา Aprianti *et. al.* [19] ที่การผสมแก้วไมไฟไฟร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม (ปูนซีเมนต์อย่างเดียว) การผสมแก้วไมไฟไฟปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขึ้นไปมีกำลังอัดลดลงร้อยละ 25.69 และ ร้อยละ 33.34 ที่อายุ 28 และ 60 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (CT) นั้นแสดงให้เห็นว่าการผสมแก้วไมไฟไฟปริมาณมากไม่ได้ส่งผลดีด้านกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นผลรวมของสารปอซโซลาน ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$) [15] ซึ่งของแก้วไมไฟไฟมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 35.85 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์



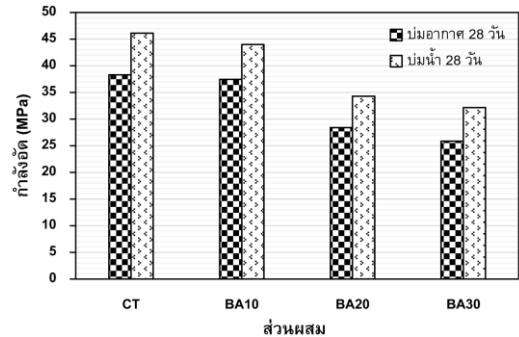
มากนัก อีกประเด็นที่ส่งผลให้กำลังอัดที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากถ้าไม่ใฝ่มีขนาดอนุภาคใหญ่โดยมีขนาดโตกว่า 45 ไมครอน ประมาณร้อยละ 62 ในขณะที่ปูนซีเมนต์อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน ประมาณร้อยละ 96 ซึ่งอนุภาคที่มีความละเอียดมากสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี Supit *et al.* [20]

รูปที่ 9 กำลังอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบที่บ่มน้ำและบ่มอากาศเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบต่อการแช่น้ำกับไม่แช่น้ำ (เก็บที่อุณหภูมิห้อง) จากรูปที่ 9 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผ่านการแช่น้ำมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากการบ่มน้ำเป็นการช่วยยับยั้งการระเหยของน้ำในแต่ละอัตราส่วนผสมทำให้มีน้ำสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในการบ่มก่อนตัวอย่างในอากาศโดยไม่มีการห่อหุ้มเพื่อเก็บน้ำในเนื้อคอนกรีตทำให้มีน้ำในเนื้อคอนกรีตสามารถระเหยออกได้บางส่วน จึงไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

3.5 ผลโครงสร้างระดับจุลภาค

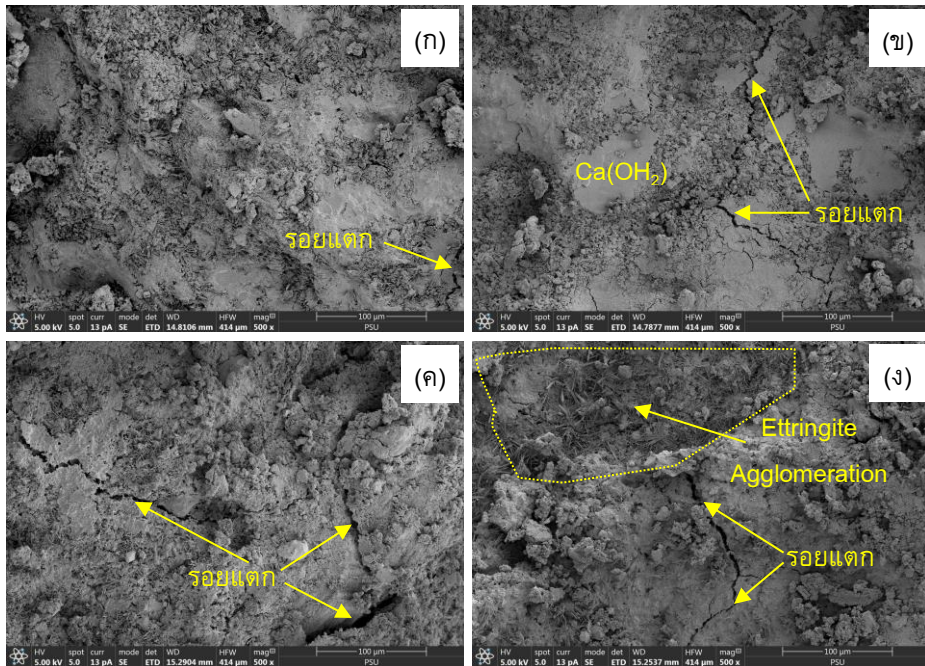
3.5.1 ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาค

รูปที่ 10 ผลโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยนำส่วนที่แตกหักภายหลังจากการทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 9 ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน ที่กำลังขยาย 500x (ก) CT (ข) BA10 (ค) BA20 และ BA30 บ่มน้ำที่อายุ 28 วัน พบว่า เนื้อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผสมเถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (BA10) มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และความแน่น (Dense Compact) มีเศษเนื้อคอนกรีตประปรายและพบเนื้อมีลักษณะแผ่นเป็นส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$



รูปที่ 9 กำลังอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต่างวิธีการบ่ม

และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate C-S-H) ทำหน้าที่เป็นตัวประสานซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความเป็นเนื้อเดียวกันและแน่นส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัด และพบว่าที่อัตราส่วนผสมเถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถให้กำลังอัดได้ดีสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาค ในขณะที่ตัวอย่างใช้เถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (BA30) ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงเนื้อคอนกรีตที่มีโพรงอากาศอยู่จำนวนมาก ซึ่งมีผลให้คอนกรีตน้ำหนักเบาและมีผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นและกำลังอัด ดังรูปที่ 4 และ 8 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถพบผลิตภัณฑ์คล้ายกับเข็มอยู่จำนวนมากซึ่งเป็นส่วนของแอททริงไคต์ (Etringite) ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากแท่งเข็มยาวจะไปแทงให้เนื้อคอนกรีตแตกออกจากกัน เกิดเป็นรอยแตกร้าวทำให้คอนกรีตรับแรงได้น้อย Lubej *et al.* [21] กล่าวถึงผลึกแอททริงไคต์สามารถทำให้เกิดรอยร้าวและการขยายตัวได้ ซึ่งเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดความเสียหายขณะรับแรงได้



รูปที่ 10 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจาก FESEM ที่กำลังขยาย 500x
(ก) CT (ข) BA10 (ค) BA20 และ BA30 บ่มน้ำที่อายุ 28 วัน

3.5.2 การวิเคราะห์ธาตุ

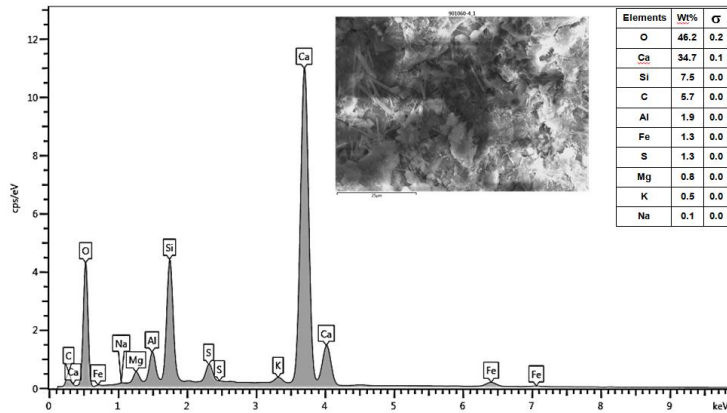
การวิเคราะห์ธาตุโดยเลือกตัวอย่างทดสอบจากผลกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นของ BA10 พบว่า ที่มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดของตัวอย่างทั้งหมด คือ ตัวอย่างรหัส 901060-4 และ BA20 พบว่า ที่มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุดของตัวอย่างทั้งหมด คือ ตัวอย่างรหัส 80207-5 จึงนำมาวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) แบบ Mapping Analysis ของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ดังรูปที่ 11 และ 12 เมื่อพิจารณารูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์แบบ Mapping Analysis ของตัวอย่างผสมเถ้าไม้ไฟร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (BA10) จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็น

เห็นว่าธาตุแคลเซียม (Ca) แสดงผลอย่างชัดเจนเท่ากับร้อยละ 34.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งมาจากปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นยังพบซิลิกอน (Si) ในปริมาณร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมาจากเถ้าไม้ไฟเป็นหลักเนื่องจากในเถ้าไม้ไฟมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักและยังพบบางส่วนในปูนซีเมนต์ทำให้ในการวิเคราะห์ธาตุจะพบสองธาตุดังกล่าวเป็นหลัก เมื่อพิจารณาในรูปที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างที่ผสมเถ้าไม้ไฟ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (BA20) พบแคลเซียมในปริมาณร้อยละ 19.9 โดยน้ำหนัก คล้ายกับตัวอย่าง BA10 แต่มีปริมาณน้อยกว่า เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์และเป็นที่น่าสังเกตว่ามีคาร์บอน (C) เท่ากับ

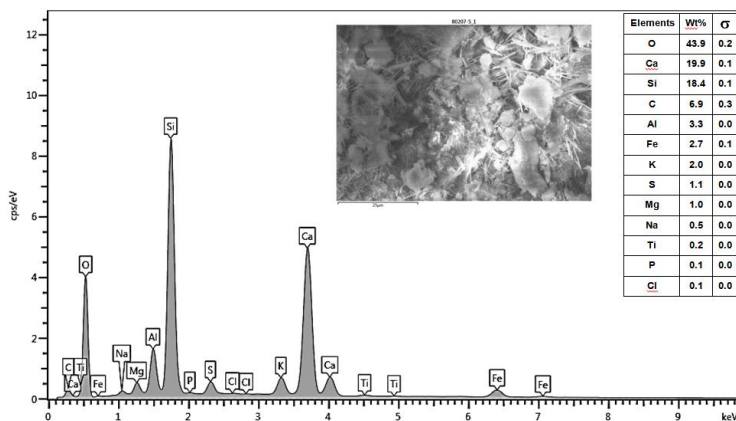


ร้อยละ 6.9 โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้น ยังตรวจพบธาตุโพแทสเซียม (K) ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5 (BA10) เป็น 2.0 (BA20) โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากการที่แก้วไม่ใฝ่มี K_2O ในปริมาณสูงเมื่อพิจารณาโดยภาพรวม พบว่า การเปลี่ยนแปลงธาตุของตัวอย่างทั้งสองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจจะเป็นเรื่องยากที่จะใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของธาตุที่จะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น จึงจำเป็นต้องประเมินจากการวิเคราะห์อื่น ๆ มา

ประกอบการอธิบาย โดยเฉพาะความแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุต่าง ๆ ทั้งสองส่วนผสม พบว่า ออกซิเจน แคลเซียม และซิลิกอน ถูกพบในปริมาณมากเนื่องจากเป็นธาตุที่ปรากฏในวัสดุประสานเป็นหลัก โดยเฉพาะออกซิเจนที่พบในปริมาณมากกว่าธาตุอื่น ๆ นั้น เท่ากับร้อยละ 46.2 (BA10) และ 43.9 (BA20) โดยน้ำหนักเนื่องจากในองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบทั้งหมด



รูปที่ 11 ปริมาณธาตุแบบ Mapping Analysis อัตราส่วนผสม BA10 ของตัวอย่างรหัส 901060-4



รูปที่ 12 ปริมาณธาตุแบบ Mapping Analysis อัตราส่วนผสม BA20 ที่ตัวอย่างรหัส 80207-5

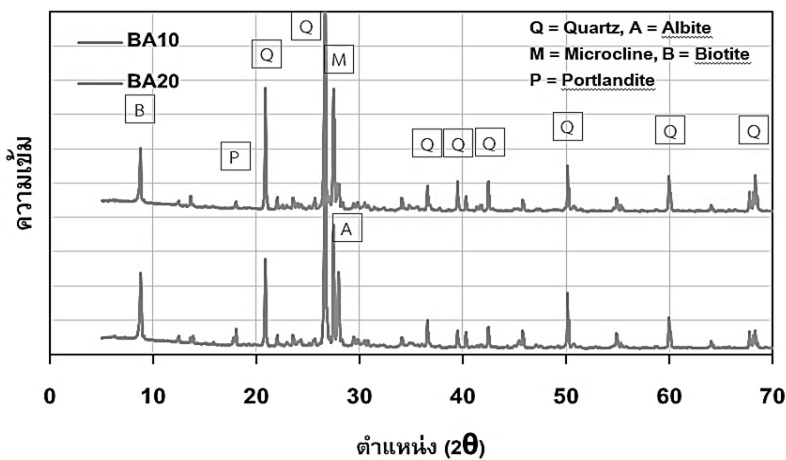


3.5.3 สารประกอบ

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยการนำตัวอย่างภายหลังการทดสอบกำลังอัดเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ธาตุ พบว่า มีควอตซ์ (Quartz, Silicon Oxide – SiO₂) เป็นสารประกอบที่แสดงพีคอย่างเด่นชัดที่มาจาก SiO₂ ของเถ้าไม้ไผ่ สัมพันธ์กับการวิเคราะห์พฤติกรรมปอซโซลานิกเปรียบเทียบระหว่างเถ้าเปลือกไม้ไผ่กับเถ้าชานอ้อย [22] นอกจากนี้ยังตรวจพบไบโอไทต์ (Biotite, Potassium Iron Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide – KFeMg₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂) ที่ตำแหน่ง 9 (2θ) พบพีคเล็กน้อยของพอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์ (Portlandite, Calcium Hydroxide – Ca(OH)₂) ที่ตำแหน่ง 18 (2θ) พอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับน้ำ เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เป็นสารตั้งต้นรวมกับ SiO₂ และ Al₂O₃ ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกขึ้น

ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงเนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวประสานเข้าแทนที่ช่องว่างคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้นและพบว่า ตัวอย่าง BA10 ค่ากำลังอัดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 9 และ 5 ที่ชัดเจนกว่าตัวอย่าง BA20 สอดคล้องกับงานวิจัย [6, 7, 10]

นอกจากนั้น คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทั้ง 2 ส่วนผสมพบไมโครไคลน์ (Microcline, Potassium Aluminum Silicate – K(AlSi₃O₈)) ที่ตำแหน่ง 27 (2θ) การปรากฏพีคเด่นของไมโครไคลน์ เกิดจากเถ้าไม้ไผ่ที่มีโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ปริมาณสูง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าสารประกอบอัลไบต์ (Albite, Sodium Calcium Aluminum Silicate – (Na_{0.84}Ca_{0.16}) Al_{1.16}Si_{2.84}O₈) จะปรากฏพีคที่เด่นชัดในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (BA10) และพีคลดลงอย่างชัดเจนในตัวอย่างที่ผสมเถ้าไม้ไผ่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (BA20) คือ (Na_{0.75}Ca_{0.25}) Al_{1.26}Si_{2.74}O₈) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุสามารถตรวจพบโซเดียม (Na) ดังรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 13 สารองค์ประกอบคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าไม้ไผ่



4. สรุปผล

ถ้าไม่ไฟที่ผ่านการเผาไม่ไฟเหลือทิ้งจากการผลิตสิ่งของจากไม้ไฟ สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อประยุกต์ใช้กับงานที่ไม่ได้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง

1. การผสมเก้าไม้ไฟแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้านขนาดมิติรูปร่างของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น
2. การผสมเก้าไม้ไฟมีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกประสานลดลง ยกเว้นตัวอย่างที่แทนที่เก้าไม้ไฟร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เมื่อใช้เวลานานขึ้นความหนาแน่นคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
3. การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อคอนกรีตมีการบ่มที่เวลานานมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเกิดปฏิกิริยาได้ติมีช่องว่างน้อยลง และการบ่มอากาศที่อุณหภูมิห้องมีผลต่อการดูดซึมน้ำมากกว่าการบ่มน้ำในทุกอัตราส่วนผสม
4. การแทนที่เก้าไม้ไฟร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และบ่มน้ำเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น
5. โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผสมเก้าไม้ไฟร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความเป็นเนื้อเดียวกันและความแน่นมีส่วนประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำหน้าที่เป็นตัวประสานซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยตรงต่อกำลังอัด แต่ยังคงพบผลึกแอททริงไคต์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดความเสียหายขณะรับแรงด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณชุดโครงการวิจัยเรื่องการพัฒนานวัตกรรมจากไม้ไฟเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ไฟ จังหวัดสตูล จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) รหัสโครงการ 2290700 สัญญาเลขที่FRB650001/0172 ใช้งบประมาณ 2565 มทร.ศรีวิชัย โครงการย่อยที่ 4

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Warinlai and P. Krammart, Slump, compressive strength, chloride penetration resistance and carbonation of concrete with partial replacement of cement by fly ash, ground bottom ash, limestone powder, The Journal of KMUTNB, 2021, 31(3), 438-449. (in Thai)
- [2] C.H. Huang, S.K. Lin, C.S. Chang and H.J. Chen, Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of class F fly ash, Construction and Building Materials, 2013, 46, 71-78.
- [3] M. da S. Magalhães, B.F. Cezar and P.R. Lustosa, Influence of Brazilian fly ash fineness on the cementing efficiency factor, compressive strength and Young's modulus of concrete, Developments in the Built Environment, 2023, 14, 100147.



- [4] W. Chalee, T. Cheewaket and C. Jaturapitakkul, Enhanced durability of concrete with palm oil fuel ash in a marine environment, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13, 128-137.
- [5] A.M. Zeyad, M.A.M. Johari, A. Abadel, A. Abutaleb, M.J.A. Mijarsah and A. Almalki, Transport properties of palm oil fuel ash-based high-performance green concrete subjected to steam curing regimes, *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16, e01077.
- [6] C. Hansudewechakul, W. Uttavachon, V. Nuntarplom, A. Noalseesai and M. Srivichai, Mechanical properties study of concrete block containing bagasse ash and corn cob ash, *Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University*, 2018, 37(1), 69-80. (in Thai)
- [7] T. Klathae, N. Sompakdee, C. Buathongkhue and N. Deedard, Utilization of parawood ash in concrete paving blocks, *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, 2020, 12(1), 36-48. (in Thai)
- [8] TIS 827-2565, Standard Specification for Interlocking Concrete Paving Blocks, 2022. (in Thai)
- [9] A.R. Djamaluddin, M.A. Caronge, M.W. Tjaronge, A.T. Lando and R. Irmawaty, Evaluation of sustainable concrete paving blocks incorporating processed waste tea, *Case Studies in Construction Materials*, 2020, 12, e00325.
- [10] S.O. Odeyemi, O.D. Atoyebi, O.S. Kegbeyale, M.A. Anifowose, O.T. Odeyemi, A.G. Adeniyi and O.A. Orisadare, Mechanical properties and microstructure of high-performance concrete with bamboo leaf ash as additive, *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, 6, 100352.
- [11] A.A. Umoh and I. Odesola, Characteristics of bamboo leaf ash blended cement paste and mortar, *Civil Engineering Dimension*, 2015, 17(1), 22-28.
- [12] L.H.P. Silva, J.R. Tamashiro, F.F.G. de Paiva, L.F. dos Santos, S.R. Teixeira, A. Kinoshita, and P.A. Antunes, Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement, *Journal of Building Materials*, 2021, 42, 102769.
- [13] G. Abebaw, B. Bewket and S. Getahun, Experimental investigation on effect of partial replacement of cement with bamboo leaf ash on concrete property, *Advances in Civil Engineering*, 2021, 6468444.



- [14] ASTM C150-2007, Standard Specification for Portland Cement, 2007.
- [15] ASTM C618-2019, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2019.
- [16] ASTM C936/C936M-21, Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units¹, 2021.
- [17] S. Koliass and C. Georgiou, The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(2), 211- 216.
- [18] X. Wang, M. Sun and S. Guo, Water absorption characteristics of cement-based materials based on the chemical reaction, *Construction and Building Materials*, 2019, 220, 607-614.
- [19] E. Aprianti, P. Shafiqh, S. Bahri and J.N. Farahani, Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review, *Construction and Building Materials*, 2015, 74, 176-187.
- [20] S.W.M. Supit, F.U.A. Shaikh and P.K. Sarker, Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high-volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 2014, 51, 278-286.
- [21] S. Lubej, I. Anžel, P. Jelušič, L. Kosec and A. Ivanič, The effect of delayed ettringite formation on fine grained aerated concrete mechanical properties, *Science and Engineering of Composite Materials*, 2016, 23(3), 325-334.
- [22] E.D. Perez-Diaz, J.L. Reyes-Araiza, B.M. Millán-Malo, S.M. Londoño-Restrepo and M.E. Rodríguez-García, Evaluation of bamboo cortex ash as supplementary cementitious material: Comparative analysis with sugarcane bagasse ash and natural pozzolan, *Journal of Building Engineering*, 2023, 66, 105846.

Production Planning and Machine Maintenance Schedule of Dragon Green Energy Company, Limited

Adul Phuk-in*

Industrial Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Utrraradit Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: adun999@gmail.com

Received: 6 July 2023; Revised: 31 January 2024; Accepted: 5 February 2024

Online Published: 23 April 2024

Abstract: This research has led to the problem of Dragon Green Energy Co., Ltd., a factory that produces tapioca starch with a production capacity is about 25-50 tons per day. The company has encountered problems in total production planning and scheduling maintenance. The research, therefore, developed a mathematical schedule modeling method to solve problems and the development of integrated applications using scheduling rules, Heuristics Genetics Algorithms (GA), and Local Search (L) becoming Integrated Methods (GA+L). The research found that the total production planning in 2022 was close to the actual production measured from (GAP) which was equal to 2.3 tons, with a margin of error of 0.307 percent. The researchers obtained the value of the company's maintenance scheduling with problems of various sizes, which the program can schedule maintenance using the scheduling rules Heuristic method (GA) and combination method. In scheduling results, the lowest makespan value was measured by the good comparison gap (Gap) together with the comparison of the percentage of time when the machine crashed before and after the research. It was found that the mean value between machine failures (MTBF) increased by 25.332% and the average machine downtime was reduced after the research, accounting for 43.928 percent. This research was therefore by the objectives.

Keywords: Tapioca Starch Production; Total Production Planning; Scheduling Maintenance; Gap



1. Introduction

Currently, industrial business organizations and industries have high competition to survive in business operations. The organization has adapted in various aspects to be able to compete in the commercial market. Every organization, therefore, focuses on managing the organization's resources to operate in the 4M aspect for improving efficiency [1-3].

In the production process to transform raw materials into finished products must use a machine with high efficiency [4-5]. Due to being a source of carbohydrates and having important properties in food and other related products, Tropic starch manufacturing is one of the important industries [6].

Dragon Green Energy Co., Ltd. has purchased more than 20 million baht per year for tapioca raw materials, both in and outside the area of Uttaradit Province, namely Sukhothai and Phrae Province. There is a 6-month production season from December to May. The production capacity is about 25-50 tons per day, using a large number of machines in every step of production by continuously working more than 1,600 horsepower, using working capital in the business of more than 350 million baht per season. It is raw material cost, labor cost, machine maintenance, fuel utility bills, and other production overheads. From the study of information in the production process of the business, it does not have a clear overall production

plan for each month and season. However, the information of past productions has used the expertise and the experience of employees in planning production for each season. In addition, each time production can be produced, tapioca roots must be purchased from farmers through nodes of purchasing yards located in various areas both in and outside Uttaradit Province and transported to the company to produce tapioca starch. Meanwhile, the production is seasonal, and machines used in production must have the least damage. Hence, scheduling maintenance is important to the company both during production and a maintenance period of 6 months, the machine must be serviced to be ready for production during the following season. Accordingly, the problems of Dragon Green Energy Co., Ltd., can be seen in that the production season is only 6 months, but the overview planning both is in the production and machine maintenance, including all waste costs. This research will bring the problem to aggregate planning and maintenance schedules in 2022. It is to find the makespan of the jobs with the least downtime and to compare with pre-research production in 2021, as follows:

1.1 Aggregate Planning

Aggregate production planning is planning that deals with quantities in industrial production processes [7]. This total production plan will consist of a production output plan based on production



capacity, The production plans consist of raw materials used in production, labor requirement, production cost utilization, [8, 9] determining machinery used, and technology.

1.2 Preventive Maintenance: PM

There is routine maintenance or duration of use by planning to keep the machines used in production under good conditions and with maximum efficiency. It should be planned regularly in advance, including stopping working immediately (Downtime), and reducing the time of the damaged production machinery. This maintenance also slows down the deterioration, wear, and tear of machinery and production pieces of equipment [10, 11]. The goal of preventative maintenance is to reduce emergency repair time and unscheduled repair work and add more tasks and plans. [12, 13]

1.3 Heuristics Algorithms

Algorithmic heuristic methods are about finding answers or considering appropriate values to solve complex problems or NP-Hard level well [14, 15]. The method has been widely used in research and has been developed and improved to be more efficient in finding suitable values continuously, which will reduce the time required to find the correct answer. The methods are the Ant Colony algorithm, Bee Analytical Algorithm, Steel melting simulation algorithm, Local search algorithm, Taboo search algorithm, genetic algorithms, etc. Finding the answer or solution obtained using heuristic

algorithms may not be the best solution. But it is a time guideline to find the best answer or solution under good time constraints. [15]

1.4 Scheduling Problems

Scheduling problems are an important and common problem in the manufacturing industry [12, 16]. This is because industrial plants require the most efficient production plan to operate in compliance with regulations, and many limitations in production such as time, machinery, human resources, etc. Therefore, scheduling by selecting a sort order by the task to come into production or maintenance before or after properly [17]. Jobs or products are completed according to customer delivery dates which are indeed something that each establishment expects a lot [13, 18, 19]. Because the process of producing tapioca starch in each season was for 6 months, the most important problem of the business which incurring production costs without output, including labor costs, urgent repair costs energy costs, etc. Machine maintenance is an issue in the research as well.

2. Experimental Procedure

2.1 A Survey of the process problems of the study company

The data about production in the company in 2021 have been studied. The process of tapioca starch is continuous. However, it is a seasonal production for 6 months each year. For the remaining 6 months, machines were shut down for



maintenance. The data collected from this company has been expressed as follows.

1. The production uses tapioca which is available in Uttaradit province, and outside the area of Uttaradit Province, namely Phrae Province, and Sukhothai Province. The use of tapioca roots is more than 110,000 tons/year.

2. The total production planning for the 2021 season relied on the expertise and experience of staff members. Despite the absence of production cost calculations, comprehensive planning was executed, incorporating data collected from December 2020 to May 2021, with total production costs amounting to 45 million baht.

3. The use of machinery for the production of tapioca starch uses automatic production technology and machines controlled by workers. The pre-research study did not provide a maintenance plan. It uses a method to improve after a crash occurs. While producing and repairing using the expertise of the staff in scheduling, there are 2 types of costs incurred, namely the cost from machine failure during production by replacing spare parts that caused problems during production, and lastly seasonal maintenance work, maintenance costs incurred in 2021 equal to 2,790,000 baht/year.

4. Working capital was spent on the cost of tapioca raw materials, direct labor, electricity, maintenance, water in the production process, fuel oil, chemicals, and fuel 50,750,000 baht in 2021.

2.2 Mathematical Schedule Modeling for the Development of Integrated Production Planning

The aggregate planning in this research had indices, parameters, and Decision Variables as follows:

Indices

i = Index of tapioca-starch-production upstream

j = Index of tapioca-starch-production downstream

Parameters

m = Number of tapioca-starch-production upstream

n = Number of tapioca-starch-production downstream

Rm_{ij} = Raw material costs from i to j

M_{ij} = Maintenance cost of i to j

Cc_{ij} = Chemical cost of i to j

Wc_{ij} = Cost of water production of i to j

Lc_{ij} = Labor cost of i to j

Ec_{ij} = Electricity cost of i to j

Fo_{ij} = Fuel oil cost of i to j

Df_{ij} = Direct fuel cost of i to j

S_i = Source Capacity of the upstream node

D_j = Demand of a downstream node

C_{ij} = Costs of tapioca-starch production from i to j

Decision Variables

X_{ij} = Number of finished goods from i to j

A linear equation of an objective function is shown in Equations 1-5 below:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

**Subject to**

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq S_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots m) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} \geq D_i \quad (j = 1, 2, 3 \dots n) \quad (3)$$

$$C_j = \sum_{i=1}^m X_{ij} [Rm_j + M_j + Cc_j + Wc_j + Lc_j + Ec_j + Fo_j + Df_j] \quad (j = 1, 2, 3 \dots n) \quad (4)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, 3 \dots m), \quad (j = 1, 2, 3 \dots n) \quad (5)$$

Equation 1 is an objective function; tapioca-starch production cost of Dragon Green Energy Co., Ltd., which is minimized.

Equation 2 is a conditional equation of total tapioca X_j that is less than or equal to the production capacity of the factory at S_i .

Equation 3 is a conditional equation of total tapioca X_j that is more than or equal to the demand of customers or production administrators of the tapioca-starch factory D_i .

Equation 4 is an equation of the sum of C_j that is a cost straight to the production costs.

Equation 5 is a conditional equation to answer X_j which is higher than or equal to 0.

The equations to assess Dragon Green Energy Co., Ltd.'s total production planning value gauge efficiency by comparing the production process in 2021 with the pre-research data from 2022's total production planning.

2.3 Development of maintenance planning.

It was found from searching for processes before the research that maintenance information

had a high cost. Preventive maintenance can be used to monitor the condition of the condition of machinery and equipment within the factory. It was used to inspect, maintain, or change the equipment at a specified time [14-15] by specifying repair work for each season in conjunction with the scheduling maintenance. It was by dividing maintenance units according to the expertise of employees into workstations. Mean Time Between Failure (MTBF) is measured as shown in Equations 6 and 7 as follows.

The average number of machine damage

$$\eta_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{N} \quad (6)$$

The mean time between machine failures where n = number of machine breakdowns during production in month i and N = total number of machine breakdowns

$$MTBF = \frac{T}{\eta_{avg}} \quad (7)$$

where T = the time period when machine damage was found.

Mean Time Between Failures (MTBF) of Dragon Green Energy Co., Ltd. with the number of failures encountered during T /total mean time of failure of the Company's machinery, and the relationship between MTTF and MTTR, where MTTF is Mean Time to Failure and MTTR is Mean Time to Repair [15].



Efficiency measurement from the percentage of time that the machine crashes, Average Machine Down Time (AMD) is shown in Equation 8 as follows.

$$AMD = \frac{\%Machine\ Downtime}{Operation\ Time} \times 100 \quad (8)$$

Indices and parameters, decision variables in maintenance scheduling of Dragon Green Energy Co., Ltd., shown in inequality 9 to 18 as follows:

Indices

i = Required maintenance work time from the maintenance plan

j = Machines required for being maintained from the maintenance plan

k and l = represent machines where work is assigned

Parameters

m = Number of maintenance machines

n = Number of tasks

M_i = Working time i

C_i = Completion time

C_{max} = Time to complete all batches

x_{ij} = Assigning workstation j to work i

Y_{ij} = Assigning workstation j to work i will have a value of 1 and 0.

Z_{ijkl} = Binary assignment, such that job i is done by machine k and job j is done by machine l , is equal to 1.

Decision Variables

Minimize C_{max}

Subject to

$$C_{max} \geq C_i \quad where \quad 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

$$C_i - M_i \geq 0 \quad where \quad 1 \leq i \leq n \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ik} \leq 1 \quad where \quad 1 \leq i \leq n \quad (11)$$

$$Z_{ijkl} \leq X_{ik} \quad where \quad 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k, l \leq m \quad (12)$$

$$Z_{ijkl} \leq X_{jl} \quad where \quad 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k, l \leq m \quad (13)$$

$$X_{ik} + X_{jl} - 1 \leq Z_{ijkl} \quad where \quad 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k, l \leq m \quad (14)$$

$$C_i - (C_j - M_j) + Y_{ij}MT \geq 0 \quad where \quad 1 \leq i, j \leq n \quad (15)$$

$$C_i - (C_j - M_j) - (1 - Y_{ij})MT \leq 0 \quad where \quad 1 \leq i, j \leq n \quad (16)$$

$$Y_{ij} + Y_{ji} \geq Z_{ijkl} \quad where \quad 1 \leq i, j \leq n, i \neq j, 1 \leq k \leq m \quad (17)$$

$$Y_{ij} + Y_{ji} \geq Z_{ijkl} \quad where \quad 1 \leq i < j \leq n, 1 \leq l < k \leq m \quad (18)$$

Inequality 9 is the completion time of all assigned maintenance batches C_{max} which is greater than or equal to the time spent on each task C_i .

Inequalities 10 is the start time for $C_i - M_i$ maintenance work which is greater than or equal to 0, indicating that any work cannot be started before time 0.

Inequality 11 states that only one job will be performed by one maintenance unit.

Inequalities 12 and 13 are the maintenance assignment i assigned to the maintenance unit k and the job j assigned to the maintenance unit l will be either 0 or 1, less than or equal to x_{ij} .

Inequality 14 is used to help determine and value = 0.

Inequality 15, 16 defines the meaning of the values Y_{ij} or explains the relationship between Y_{ij} with C_i , C_j , and M_i . Here both inequalities are considered simultaneously in maintenance work.

Inequalities 17 and 18 are inequalities, so Z_{ijk} can be either 0 or 1. This means that in this case, task i finishes before task j starts, so both tasks can be performed by maintenance unit k .

2.4 Genetic algorithm heuristic methods

This research employs the Genetic Algorithm method to address maintenance [20-22] scheduling issues and can extend its application to formulate production plans. The outlined method involves the following sequential steps.

2.4.1 Encoding and creating a random initial population from the problem is encoding it in the form of a bit-length string based on the size of the job, Binary Coding. [23]

2.4.2 Old Population is a string that will be selected as a model for creating a new population. The first set of Old Populations is the initial random

population of the problem, scheduling maintenance with 2 or more maintenance units.

2.4.3 The operation of the Genetic Algorithm consists of three operations: reproduction, crossover, and mutation as shown in Fig. 1.

In this research, Cycle crossover (CX) and Inversion mutation were chosen because they are used to find the ideal solution in terms of conditional randomness to obtain the appropriate Offspring 1-3 [23, 24].

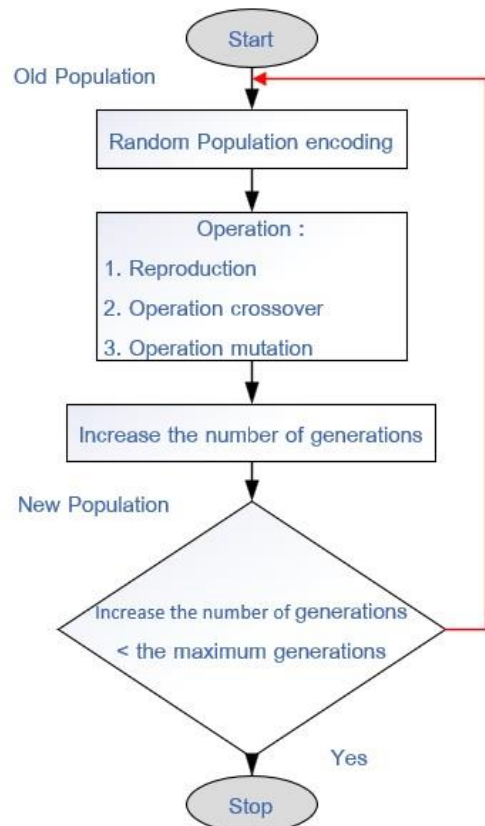


Fig. 1 The steps of the Genetic Algorithm



1) Reproduction is a process in which each string imitates the value of the target function $f(x)$, which measures its fitness. When the string with higher fitness can be possible to be the high next generation. The method used is to create a roulette wheel.

2) Crossover is a process after the entire population has been processed, and reproduction will be matching members in the mating pool or the whole population at random, and then cross-swap values at random positions or trade parts Cycle crossover was used in this research; CX is shown in Fig. 2.

3) Mutation is a necessary step even with reproduction and crossover. Because the mutation prevents irrecoverable damage; and recovery loss. The research using inversion mutation is shown in Fig. 3.

2.4.4 New Population or Generation, all strings derived from the Genetic Algorithm, which will become the older population for further action, and will repeat until the generation is equal to the design value. The previous population with poor answer values will be eliminated and keep the good chromosomes from the operation process, both crossover and mutation. The next generation as an expanded model is called Generational Enlargement and it will stop when the specified generation is complete [20-24].

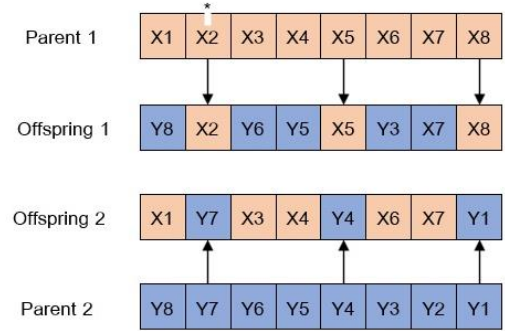


Fig. 2 Cycle crossover (CX)

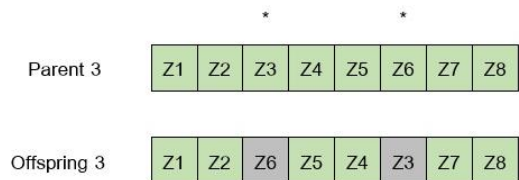


Fig. 3 Inversion mutation

2.5 Local Search Integration Method

The local search integration method is an effective heuristic approach [20, 21, 26, 27] that can be put into the genetic algorithms process in the reproduction section with low probability string commutation. It is from the probable chromosome as measured by the makespan. J. Zheng, et al. [20] and O. Tayfun, & T. Aysegul [21] with their research of the Traveling Salesman Problem: TSP and Vehicle Routing Problems: VRP that used local search methods combined (hybrid) with GA after the Operation process by selecting 1 set of good chromosomes to randomly place in the Allele. It is in the chromosome and then swapped, and it results in a new filtered answer value and a good new local optimum from this process.

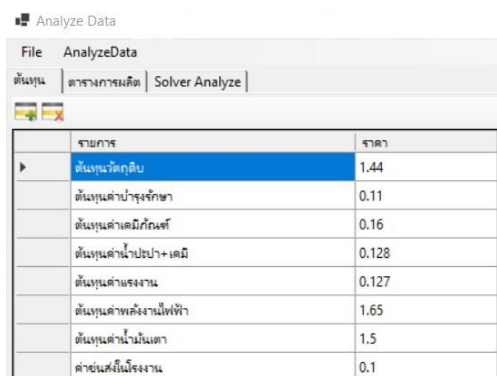
2.6 Development of integrated production planning program and maintenance

The research led to the overall production plan structure, and the maintenance plan; a preventive maintenance (PM), which enables to be divided into 2 main activities in the same program development. This is divided into data acquisition windows by numerical input method and developed a genetic algorithm for scheduling maintenance, which has problems with maintenance work such as problems 6x2, 7x3, 12x3, 15x3, and 20x4, etc. (which 6 is the number of maintenances works of 6 works and 2 are the agencies used in the maintenance of 2 agencies). The researcher has developed a program using the C++ language for development because the finished program cannot process (Run) large problems. The program development has a machine data storage structure, indication of maintenance time, specifying the replacement, interval scheduling maintenance, and analysis of maintenance performance. The numerical figures of both activities are shown in Fig. 4.

It works together with the factorial experimental design 4^2 to test the appropriate parameters of the factors in the work of the genetic algorithm method. It will divide the factor level (Factorial effect) into 2 levels: low (0) and high (1) and have 4 treatment combinations: Population size (50/100), Crossover rate (0.5/1.0), Mutation rate (0.15/0.3), and Max generations (50/100) [23, 24]. There are

16 experiments and 10 rounds of tests with a 20x4 large problem. It was found that the appropriate parameters of the Population size factor were 100, the Crossover rate was 1.0, the Mutation rate was 0.3, and Max generations of 100. The local search method combined with GA will also work based on Max generations of 100.

Fig. 4 shows the program design plan for the production and maintenance of Dragon Green Energy Co., Ltd. when the program development was complete. The software testing was divided into 2 steps: (1) Testing the correctness of the program as follows: A unit test is a functional test of the system in each sub-section to ensure that each part works correctly. An integration test is to bring each unit's data together and test the connection between the units whether it can work properly, and an end-to-end test is to test the system as a whole. By bringing each part of the system to assemble completely and testing the system with users



รายการ	ราคา
ต้นทุนฝึกอบรม	1.44
ต้นทุนค่าบำรุงรักษา	0.11
ต้นทุนค่าเคมีภัณฑ์	0.16
ต้นทุนค่าไปป์+เคมี	0.128
ต้นทุนค่าแรงงาน	0.127
ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า	1.65
ต้นทุนค่าน้ำมันเตา	1.5
ค่าขนส่งน้ำมันโรงงาน	0.1

Fig. 4 Program design, production planning, and maintenance of Dragon Green Energy Co., Ltd.



(2) A Stress test is a test of the efficiency of the system to test whether the system can receive a total amount of production planning information, and enough scheduling data for use. A usability test is a test of the system's usability to improve research and pass on all parts of the developed program.

2.7 Data of total production planning of Dragon Green Energy Co., Ltd.

The data collected from the company consists of purchasing of cassava raw materials, quantity produced per month, labor costs, and cost of maintenance each month. The data collected was started from December 2020 to May 2021 to use the data for post-research comparison, then planned the production by collecting data from December 2021 to May 2022 for a period of 6 months (seasonal cycle 2022). The researcher displayed an example of recording data that occurred in February 2022 for production planning in Table 1.

Table 1 shows that the cost of cassava production was divided into 2 periods per day, namely the production period in time, and part-time production. The cost of production at the time was 4.757 baht per kilogram.

For part-time production, the cost of production was added to the cost of overtime labor. There was an increase in production costs of 0.5 baht per kilogram. The cost of production

was 5.257 baht per kilogram. Then the production cost data in February 2022 was used to plan the production by research method. The production plan is shown in Table 2.

Table 2 shows the production planning value including the lowest cost of February 2022 could be seen each week. There were different costs incurred in production on time, and outside of the same time. Costs incurred were not equal, for example, production in week 1 had a cost of 4.790, and production over time had a cost of 5.290. Then the research would be analyzed from Equations 1-5 to determine the decision variable. X_{ij} had a total cost of 492,009 baht and showed the result of finding the answer in Table 3.

Table 1 An example of collecting data on production costs per kilogram in February 2022

Items	Cost Unit	Cost Unit
	(in time)	(part-time)
	(฿)	(฿)
Raw material cost	2.25	2.25
Maintenance cost	0.315	0.315
Chemical cost	0.045	0.045
Water-production cost	0.033	0.033
Labor costs	0.385	0.599
Electricity cost	0.683	0.712
Fuel oil cost	0.953	1.21
Factory freight	0.126	0.126
Total cost/Kilogram	4.790	5.290

**Table 2** The lowest costs of February 2022

	Week1	Week2	Week3	Week4	Capacity
	Cost Unit	Cost Unit	Cost Unit	Cost Unit	(Tons)
Produced in time 1	4.790	4.778	4.785	4.784	24
Produce part-time 1	5.290	5.278	5.285	5.284	25
Produced in time 2	4.757	4.758	4.763	4.784	25
Produce part-time 2	5.257	5.259	5.263	5.284	25
Demand (Tons)	25	21	28	24	

NOTE: Produced in Time 1 is a production from 8:00 pm-7:00 pm on the 1st and Produce Part-Time 1, which is production from 7:00 pm -05.00 hrs. on the 1st day.

Table 3 An example of production planning including the minimum cost of research method for February 2022

	Week1	Week2	Week3	Week4	Capacity (Tons)
Produced in time 1	0	21	0	3	24
Produce part-time 1	0	0	3	21	24
Produced in time 2	0	0	25	0	25
Produce part-time 2	25	0	0	0	25
Demand (Tons)	25	21	28	24	total cost
					492,009 ฿

Table 3 shows the total production value which was planned to be produced in the first to fourth weeks of 25, 21, 28, and 24 tons as needed, respectively. It caused the lowest cost equal to 492,009 baht in February 2022 by multiplying the total production by the cost.

2.8 Schedule maintenance of Dragon Green Energy Co., Ltd.

After the end of the 6-month production season from December 2021 to May 2022, there was a 6-month maintenance period from June 2022 to November 2022, which is part of the maintenance.

Production of Dragon Green Energy Co., Ltd. directly, whether they were a replacement of parts, [27] planned maintenance [22], and the replacement of parts according to the service life. There would be labor costs incurred from maintenance both during the production season and during the off-season.

The maintenance plan in this factory had a clear repair plan. The period was timed 5 times and averaged. In the repair, there would be the repair workstation of the staff in the maintenance department. The production department of



employees who controlled machines and the management who systematically inspected the delivery of work each month as an example, Table 4.

Table 4 shows that there was planned maintenance work utilizing Preventive Maintenance (PM) [10, 11, 19, 22, 27].

Arranging workstations for maintenance and production staff. It was divided into 3 workstations

that would result in 7×3 work problems and used to find the makespan value; sequencing maintenance n jobs on m parallel.

The units of the company were with 7 maintenance jobs and 3 maintenance units. The maintenance was parallel which could perform maintenance for all units as the same. The longest-time maintenance scheduling rule method was determined initiatively as shown in Table 5.

Table 4 Week 1 Maintenance Sample for June 2022

Machines	Cleaning	Lubrication	Lubricant Changing	Belt Inspection	Total (minutes)
1. Shredder	330	10.50	15.85	7.00	363.35
2. Peeler Centrifuge 1	270	9.51	35.54	10.45	325.50
3. Peeler Centrifuge 2	274	9.32	37.44	11.45	332.31
4. Peeler Centrifuge 3	281	10.21	38.53	11.61	341.35
5. Peeler Centrifuge 4	275	10.54	40.22	11.53	337.29
6. Peeler Centrifuge 5	285	10.22	37.55	10.51	343.28
7. Tapioca-root washing machine	342	17.5	40.00	11.21	410.71

Table 5 An example valuation using the longest-first maintenance scheduling rule

Jobs	Processing Time (minutes)	Due Date (days)
7	410.71	7
1	363.35	6
6	343.28	6
4	341.35	7
5	337.29	7
3	332.31	7
2	325.50	6



Table 5 shows the application of maintenance time values using the LPT method by scheduling tasks to maintenance units that had maintenance time values. The longest time to do it first was shown as follows.

$$\text{LPT} = (7) 410.71 \geq (1) 363.35 \geq (6) 343.28 \geq (4) 341.35 \geq (5) 337.29 \geq (3) 332.31 \geq (2) 325.50$$

Then the results of maintenance scheduling using the longest time-first (LPT) maintenance rule were shown in Table 6 as follows.

Table 6 Maintenance scheduling results using the longest time maintenance scheduling rule takes first

Maintenance Unit	Processing Time (Jobs) (minutes)	Total Time (minutes)
1	Machine 7 (410.71) + Machine 3 (332.31)	743.02
2	Machine 1 (363.35) + Machine 5 (337.29)	700.64
3	Machine 6 (343.28) + Machine 4 (341.35) + Machine 2 (325.50)	1,010.13

According to Table 6, it was found that the maintenance of 1, 2, and 3 had a total time of 743.02, 700.64, and 1,010.13 minutes, while the longest makespan was 1,010.13 minutes.

3. Results and Discussion

The research brought the Aggregate Planning Program and the Maintenance Program of Dragon Green Energy Co., Ltd. working in the integrated system to deal with the problem of aggregate planning and scheduling of maintenance as the following:

3.1 Total Production Planning Management

The research addressed the problem of production planning for 2021-2022 which needed to be planned from December 2021 to May 2022. The planning had to fill in capacity data, demand from marketing, and production management costs each month. The research collected data on the production process by obtaining information to plan the total production and compared the results of the actual production operations as shown in Table 7.

The results of total production planning and comparison of the results of actual production operations showed that the amount of total production planning and the actual production volumes were similar.

The volumes were measured from the comparative gap, for example, in January 2022, the total planned production was 645 tons, the actual production was 645 tons, and the comparative gap was 0. The overall comparative gap from December 2021 to May 2022 was 2.3 tons. The implementation

**Table 7** Results of total production planning and comparison of actual production

Date	Production (Million Baht)	Aggregate Planning (Tons)	Actual Production (Tons)	Gap
December 2021	4.57	527	528	1
January 2022	4.55	645	645	0
February 2022	4.56	587	587	0
March 2022	4.43	700	700.3	0.3
April 2022	4.65	445	445.5	0.5
May 2022	4.74	412	412.5	0.5

of the program from December 2021 to May 2022 showed that the mathematical schedule modeling method and the developed program were able to plan the total production. Hence, planning and actual productions were similar. According to the comparison of the report in Table 7, the error was only 0.307 percent.

The comparison of production costs before conducting research showed a production cost in 2021 of 45 million baht, but when planning the total production in 2022, the production cost was 41.5 million baht, with a 4.651 percent decrease in production costs, or an amount equal to 4,651,000 million baht.

3.2 Scheduling of maintenance work of Dragon Green Energy Co., Ltd.

The research was conducted on a maintenance schedule from June 2022 to November 2022 for 6 months in order to solve the planned maintenance problems of Preventive

Maintenance (PM) on Dragon Green Energy Company's machinery. Co., Ltd., which found that maintenance management jobs for m maintenance units worked in parallel with more than 2 or more maintenance units. The research compared the lower bound value from any arrangement with the lowest makespan value of the batch. The research used a maintenance scheduling program, which was used to find the common value to find the answer using the Genetic Algorithm (GA) heuristic method, and how it combined Genetic Algorithm with Local Search (GA+L) versus scheduling rules. Research showed below:

3.2.1 Research led to the problem of planned maintenance that had to be maintained to keep the equipment ready for use, and measured from the relationship between MTTF and MTTR, showing the problem of scheduling maintenance of Dragon Green Energy Co., Ltd. as shown in Table 8 as follows:

**Table 8** Result of maintenance schedule of Dragon Green Energy Co., Ltd.

Problem Size	Scheduling Method	Lower Bound	Makespan (Min)	Gap
6 x 2	FIFO	812.100	942.800	130.70
	LPT		818.740	06.64
	GA		815.160	03.06
	GA+L		812.100	00.00
7 x 3	FIFO	995.100	1050.56	490.46
	LPT		1010.13	15.03
	GA		995.10	00.00
	GA+L		995.10	00.00
12x 3	FIFO	1535.810	1567.05	31.24
	LPT		1599.39	63.58
	GA		1542.72	06.91
	GA+L		1535.81	00.00
15x 4	FIFO	1668.78	1894.85	226.07
	LPT		1749.89	81.11
	GA		1668.78	00.00
	GA+L		1668.78	00.00
20x 4	FIFO	2074.81	2251.63	176.82
	LPT		2180.08	105.19
	GA		2074.81	00.00
	GA+L		2074.81	00.00

According to Table 8, the maintenance schedule of Dragon Green Energy Co., Ltd. with problems of various sizes, the program enabled to schedule maintenance and compare the scheduling values of both the scheduling rule method, the heuristic method (GA) with the GA+L. Moreover, they were shown that in the

12x3 problem, the GA+L method found the lowest makespan value with 1535.81 minutes, and the gap of comparison (gap) was 00.00, Problem 15x4, the GA method and GA+L method, found the lowest makespan value equal to 1668.78 minutes, and the comparison gap (Gap) was equal to 00.00 minutes.

3.2.2 Efficiency measurement of Preventive Maintenance (PM) was shown from maintenance data collection. The study measured the efficiency of the Mean Time Between Mechanical Failures (MTBF) by analyzing data from the effects of MTBF from December 2020 to May 2021 after the study from December 2021 to May 2022, in which every period was the production of tapioca starch in 6 months, shown as follows:

1. Comparison of the results of Mean Time Between Machine Failures (MTBF) (Equation 7) found that MTBF before the research in each month were 35.540, 51.210, 64.452, 54.230, and 43.540 with the average MTBF before the research of 49.794, and MTBF after the research in each month were 82.550, 81.410, 87.450, 82.451, and 84.051 with the average BTBF after the research of 83.582. It was with an increase of MTBF of 25.332% from the comparison.

2. Comparison of mean time to repair from developed program data: The analysis results showed that the mean between crashes before the research was 3.252 and the mean between



crashes after the research was 1.274, with a decrease in each month after the research, representing 43.703%.

3. Comparison of percentage of machine downtime; Average Machine Downtime (Equation 8): The analysis results are shown in Figure 5.

Fig. 5 shows the average between the machine failures before the research of months 1-5 were 4.61, 4.110, 3.562, 3.640, and 3.280, with an average of 3.840.5. The machine failures after the research of months 1-5 were 1.720, 1.640, 1.461, 1.440, and 1.220, with an average of 1.496. It showed a decrease after the research of 43.934%.

4. Conclusion

This research brought the problems of Dragon Green Energy Co., Ltd., which found problems in total production planning and scheduling maintenance. This research, therefore, created a mathematical scheduling model to solve problems of the company in 2 forms, together with the development of a mixed (hybrid) program using scheduling rules. The heuristic methods of GA and GA+L were used to compare the answers. The research found that total production planning and actual production data collection were close to the planning value. The results of the comparative gap (Gap) were equal to 2.3 tons with 0.307 percent of the comparison of the error, and scheduling maintenance of the company with

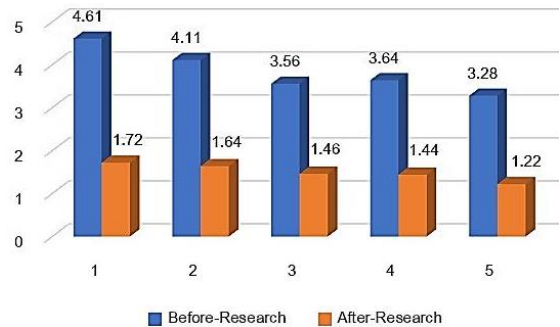


Fig. 5 Comparing the percentage of time Mechanical failure (AMD)

problems of various sizes. The program was able to be scheduled maintainability and compare the scheduling values of both the scheduling rules method and the heuristic methods of (GA) and (GA+L), for example, in a 15x4 problem with the heuristic method GA+L, found the minimum makespan value equal to 1668.78 minutes with a gap value, and the comparison of Gap was equal to 00.00 minutes. Meanwhile, measuring the comparison of the percentage of time revealed that the machine crashes before and after the research, and the mean between the machine crashes decreased after the research, accounting for 43.928%. This research, therefore, meets the objectives of the research.

5. Acknowledgement

I am very thankful to Dragon Green Energy Co., Ltd., and the Industrial Technology Program, Uttaradit Rajabhat University for the courtesy and equipment used in this research.



6. References

- [1] X. Wang, Y. Sun and B. Peng, Industrial linkage and clustered regional business cycles in China, *International Review of Economics and Finance*, 2023, 85, 59-72.
- [2] M.A. Nguyen, G.T. Dang, M.H. Ha, and M.T. Pham, The min-cost parallel drone scheduling vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, 2022, 299(3), 910-930.
- [3] I.B. Suryaningrat, Raw material procurement on agro-industrial supply chain management: A Case Survey of Fruit Processing Industries in Indonesia, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016, 9, 253-257.
- [4] A.N. Mustapha, Y. Zhang, Z. Zhang, Y. Ding, Q. Yuan and Y. Li, Taguchi and ANOVA analysis for the optimization of the microencapsulation of a volatile phase change material, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11, 667-680.
- [5] P. Arunkumar, N. Muthukumaran, M.M. Samy, L. Prabhu and R. Rajeshwari, Investigation on the effect of process parameters in abrasive Jet Machining process using full factorial design, *International Conference on Sustainable materials, Manufacturing and Renewable Technologies*, 2021, 47(15), 5395-5400.
- [6] V.T.W. Thuppahige, L. Moghaddam, Z.G. Welsh, T. Wang, and A. Karim, Investigation of critical properties of Tapioca (*Manihot esculenta*) peel and bagasse as starch-rich fibrous agro-industrial wastes for biodegradable food packaging, *Food Chemistry*, 2023, 422, 1-12.
- [7] J.D. Fonseca, A.M. Latifi, A. Orjuela, G. Rodríguez and I.D. Gil, Modeling, analysis and multi-objective optimization of an industrial batch process for the production of tributyl citrate, *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 132, 106603.
- [8] T. Krishnan, A. Khan and J. Alqurni, Aggregate production planning and scheduling in the Industry 4.0 Environment, *Procedia Computer Science*, 2022, 204, 784-793.
- [9] P.D. Cachinero, J.I. Muñoz-Hernandez and J. Contreras, Integrated operational planning model considering optimal delivery routing, incentives and electric vehicle aggregated demand management, *Applied Energy*, 2021, 304, 1-23.
- [10] B. Liu, J. Pang and Y. Zhao, Optimal condition-based maintenance policy for leased equipment considering hybrid preventive maintenance and periodic inspection, *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 242, 109724.



- [11] Y. Han, X. Zhen and Y. Huang, Multi-objective optimization for preventive maintenance of offshore safety critical equipment integrating dynamic risk and maintenance cost, *Ocean Engineering*, 2022, 245, 110557.
- [12] S. Frisch, P. Hungerlander, A. Jellen, B. Primas, S. Steininger and D. Weinberger, Solving a real-world locomotive scheduling problem with maintenance constraints, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 150, 386-409.
- [13] Z. Boumallessa, H. Chouikhi, M. Elleuch and H. Bentaher, Modeling and optimizing the maintenance schedule using dynamic quality and machine condition monitors in an unreliable single production, *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 235, 109216.
- [14] A.M. Fathollahi-Fard, K.Y. Wong and M. Aljuaid, An efficient adaptive large neighborhood search algorithm based on heuristics and reformulations for the generalized quadratic assignment problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 126(A), 106802.
- [15] R. Ogunsakin and N. Mehandjiev, Towards autonomous production: Enhanced meta-heuristics algorithm, *Procedia Computer Science*, 2022, 200, 1575-1581.
- [16] C. Destouet, H. Tlahig, B. Bettayeb and B. Mazari, Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration, and resilience improvement, *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 67, 155-173.
- [17] R. Chaouch, H. Ghorbel and S. Khalfallah. Model for the classification of scheduling problems based on ontology, *Procedia Computer Science*, 2021, 181, 890–896.
- [18] R. Cordone and P. Hosteins, A bi-objective model for the single-machine scheduling problem with rejection cost and total tardiness minimization, *Computers and Operations Research*, 2019, 102, 130-140.
- [19] Q. Zhang, Y. Liu, T. Xiahou, and H.Z. Huang, A heuristic maintenance scheduling framework for a military aircraft fleet under limited maintenance capacities, *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 235, 109239.
- [20] J. Zheng, J. Zhong, M. Chen and K. He, A reinforced hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem, *Computers and Operations Research*, 2023, 157, 106249.
- [21] O. Tayfun and T. Aysegul, A hybrid metaheuristic algorithm based on iterated local search for vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery, *Expert Systems with Applications*, 2022, 202, 117401.



- [22] A. Phuk-in, Production-scheduling problem: A case of SD tractors company, limited, The Conference of Industrial Engineering Network (IE network Thailand 2022), Proceeding, 2022, 469-474.
- [23] G. Yuxiang, C. Yuning, G. Zhongxue, Z. Zhuo, D. Wenchao, Z. Hongda, L. Yi and O. Chun, Hybrid flow-shop scheduling in collaborative manufacturing with a multi-crossover-operator genetic algorithm, Journal of Industrial Information Integration, 2023, 36, 100514.
- [24] A. Anita, K. Laszlo and B. Tamas, An Attraction Map Framework of a Complex Multi-Echelon Vehicle Routing Problem with Random Walk Analysis, Appl Sci, 2021, 11, 1-23.
- [25] H. Xinxin, W. Zhijian, L. Yanfeng, K. Svetlana, D. Wenhua, W. Junyuan and W. Wenzhao, Joint decision-making of parallel machine scheduling restricted in job-machine release time and preventive maintenance with remaining useful life constraints, Reliability Engineering and System Safety, 2023, 222, 108429.

ดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของระบบทำน้ำเย็นในอาคาร กองสลากกินแบ่งรัฐบาล

สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ^{1,2} จุฑากร โปธิศรางกุล² ธรรมธัช สระทองจันทร์²
ธัชชัย ลายทอง² วันชลี เพ็งพงศา³ และ วีระ ศรีอริยะกุล^{2*}

¹ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและการจัดการพลังงาน, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

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

วันที่รับบทความ: 27 ตุลาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 26 มกราคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 19 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้พลังงานของกองสลากกินแบ่งรัฐบาลโดยประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ และแผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม เพื่อให้หาดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงาน โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับองค์กร ระดับระบบทำน้ำเย็น และระดับอุปกรณ์ จากผลงานวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในระดับองค์กร คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น และค่า Cooling Degree Days (CDD) สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในระดับระบบทำความเย็น คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น และระยะเวลาการเปิดเครื่องส่งลมเย็น ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในระดับอุปกรณ์ คือ ค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น จากนั้น นำดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานระดับองค์กร และระดับระบบทำน้ำเย็น มาคาดการณ์การใช้พลังงานของปี พ.ศ. 2563 พบว่า การใช้พลังงานในระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็นลดลงร้อยละ 7.34 และ 8.59 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กำลังสอง (R^2) มากกว่า 0.75 จึงสามารถนำดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานในระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็นไปใช้คาดการณ์การใช้พลังงานในอนาคต

คำสำคัญ: เส้นฐานพลังงาน; ดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงาน; อุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

Energy Performance Indicator of the Chiller Water System in the Government Lottery Office

Sumol Sae-heng Pisitsungkakarn^{1,2}, Jutakorn Potisarangkul², Tammatuch Srathongchan², Thatchai Laythong², Wanchalee Pengpongsa³ and Weera Sriariyakul^{2*}

¹ Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy (CTAE),
College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

³ Manufacturing Engineering and Energy Management, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: weera.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 27 October 2023; Revised: 26 January 2024; Accepted: 19 February 2024

Online Published: 23 April 2024

Abstract: This research is to study on the energy consumption of the Government Lottery Office (GLO) which is applied by statistical tools such as linear regression analysis, multiple linear regression analysis and cumulative sum control chart (CUSUM control chart). The statistical tools could find energy performance indicators (EnPI) in 3 parts as organization, chilled water system and equipment. The experiments showed that working time of chiller and cooling degree days (CDD) were factors which effected to energy consumption in organization part. The factor of energy consumption of chiller system part was working time of chiller and opening period time of air handling unit (AHU). The coefficient of performance (COP) of chiller was an effected factor of energy consumption of equipment part. EnPI of organization and chilled water system parts were forecasted in term of energy consumption in 2020. The results found that energy consumption of the parts decreased by 7.34% and 8.59%, respectively. A correlation coefficient squared (R^2) was more than 0.75 that was appropriately used the EnPI of organization and chilled water system parts for predicted energy consumption in the future.

Keywords: Energy Baseline; Energy Performance Indicator; Significant Energy Use equipment



1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนสิ่งต่าง ๆ ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มประเทศที่เจริญแล้ว กลุ่มประเทศกำลังพัฒนา และกลุ่มประเทศด้อยพัฒนา ต่างก็มีความต้องการในการใช้พลังงานซึ่งในด้านสาธารณูปโภคหรือการลงทุนในด้านธุรกิจและอุตสาหกรรมภายในประเทศเพื่อให้สถานะเศรษฐกิจภายในประเทศขยายตัวขึ้น [1] และพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานหลักในระบบเศรษฐกิจนั้นจะถูกผลิตจากการเผาไหม้เช่นก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหินซึ่งล้วนแต่เป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ยิ่งผ่านไปนานเท่าไรยิ่งลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งในการนำเข้ามาพลังงานสุทธิเพิ่มขึ้นเกือบทุกประเภทโดยการนำเข้าของน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นสุทธิร้อยละ 5.7 ในปี พ.ศ. 2564 [2] ขณะที่มนุษย์มีความต้องการการใช้พลังงานมากขึ้นทุกวัน แต่พลังงานนั้นมีอยู่อย่างจำกัด นั่นจึงเป็นเหตุผลให้ มีการศึกษาค้นคว้าหาวิธีการจัดการการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและให้เกิดประโยชน์สูงสุด [3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมซึ่งมีการใช้พลังงานอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในภาคครัวเรือน ยกตัวอย่างโรงงานผลิตเครื่องเสียงติตรกยนต์แห่งหนึ่งที่ไม่ม่มาตรการการอนุรักษ์พลังงานและการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะมีปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 112.68 [4] ถ้าปริมาณการใช้พลังงานในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยไม่คำนึงถึงความคุ้มค่าในการใช้พลังงาน อาจส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง เป็นสาเหตุของการขาดแคลนพลังงานเนื่องจาก พลังงานไฟฟ้าถูกใช้เพื่อตอบสนอง

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจโดยเฉพาะในสาขาอุตสาหกรรมมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าถึงร้อยละ 42-46 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ [5] และหากในอนาคตอันใกล้มีแหล่งพลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อ ระบบเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมในภาคอุตสาหกรรมและอาคารสำนักงานหากมีการขยายการให้บริการให้ใหญ่ขึ้นกว่าเดิมตามการเจริญเติบโตของธุรกิจหรือการเพิ่มการบริการ โดยไม่ได้มีการวางแผนการจัดการพลังงานให้เหมาะสมต่อการใช้พลังงานภายในองค์กร อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการใช้พลังงานไปอย่างสิ้นเปลืองใน ส่วนของอุปกรณ์ที่มีนัยสำคัญ (Significant Energy Use; SEU) และไม่ได้มีการวิเคราะห์หาค่าพลังงานจำเพาะต่อหนึ่งหน่วยผลิต (Specific Energy Consumption; SEC) ส่งผลให้มิตันทุนในการผลิตที่สูง เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้พลังงานลงนั้น จึงต้องมีการจัดทำ การจัดการพลังงานขึ้น โดยเริ่มต้นจากการติดตามการใช้พลังงานในอดีตที่ผ่านมา ศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานและการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานหรือไม่จากนั้นจึงนำข้อมูลในอดีตมาสร้างสมการเส้นฐานพลังงาน เพื่อคาดการณ์การใช้พลังงานในปีถัดไป จากนั้นหาค่าความแตกต่างของปริมาณพลังงานที่ใช้จริงกับปริมาณพลังงานที่คาดการณ์ไว้และสร้างแผนภูมิค่าผลรวมสะสมของความแตกต่าง (Cumulative Sum of Different; CUSUM) เพื่อ ดูแนวโน้มการใช้พลังงานว่ามีการประหยัดหรือสิ้นเปลืองกว่าที่คาดการณ์ไว้ ค่าผลรวมสะสมของความแตกต่างที่เป็นค่าลบแสดงให้เห็นถึงการ ใช้พลังงานต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าถือว่ามี การ



ประหยัดพลังงาน ในอีกด้านหนึ่งค่าผลรวมสะสมของความแตกต่างมีค่าเป็นบวกก็จะแสดงผลว่ามีการใช้พลังงานสิ้นเปลืองเกินกว่าที่คาดการณ์ไว้ [6] จากนั้นสามารถวางแผนมาตรการการอนุรักษ์พลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานลงได้และสามารถใช้เครื่องมือทางสถิติ เช่น แผนภูมิควบคุมผลรวมสะสมในการติดตามผลการอนุรักษ์พลังงานได้ [7]

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ (1) เพื่อศึกษาการใช้พลังงานของกองสลากกินแบ่งรัฐบาลโดยประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติ (2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของกองสลากกินแบ่งรัฐบาล โดยการนำข้อมูลการใช้พลังงานปี 2562 (ปีฐาน) ของอาคารกองสลากกินแบ่งรัฐบาล โดยวิเคราะห์การใช้พลังงานและเส้นฐานพลังงาน (Energy Baseline; EnB) ของกองสลากกินแบ่งรัฐบาลในระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็น ด้วยเครื่องมือทางสถิติสำหรับการใช้พลังงานได้แก่ การวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) แผนภูมิค่าผลรวมสะสมของความแตกต่าง (Cumulative Sum of Different; CUSUM) พร้อมทั้งหาค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงาน (Energy Performance Indicator; EnPI) ของระดับองค์กร ระดับระบบทำน้ำเย็น และระดับอุปกรณ์ นำไปสู่การจัดการพลังงานขององค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ ตามมาตรฐานสากล Energy Management System ISO5001: 2018 [8] นอกจากนี้ยังช่วยให้องค์กรลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการปล่อยมลพิษและก๊าซเรือนกระจก

2. อุปกรณ์ เครื่องมือวัดและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้ใช้อาคารกองสลากกินแบ่งรัฐบาลมีพื้นที่ในการทำความเย็น 33,466.28 ตารางเมตร จำนวนพนักงานประจำ 760 คน จากตารางที่ 1 พบว่าข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าประจำปี พ.ศ. 2562 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 5,249,000.00 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี โดยคิดเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าตามระบบต่างๆ ได้แก่ ระบบทำน้ำเย็น ร้อยละ 68.75 ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนร้อยละ 2.00 ระบบแสงสว่างร้อยละ 15.62 ระบบอุปกรณ์สำนักงานร้อยละ 10.49 และระบบอื่นๆ ร้อยละ 3.14 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาระบบทำน้ำเย็น ซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดของอาคารกองสลากกินแบ่งรัฐบาล สอดคล้องกับงานวิจัย [9] มาใช้ในการหาค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของระดับระบบ และทำการตรวจวัดการใช้พลังงานของระบบทำน้ำเย็น

ตารางที่ 1 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าตามระบบ

ระบบ	การใช้พลังงานไฟฟ้า	
	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี	ร้อยละ
ทำน้ำเย็น	3,608,656.81	68.75%
ปรับอากาศแบบแยกส่วน	104,782.90	2.00%
แสงสว่าง	819,962.95	15.62%
อุปกรณ์สำนักงาน	550,714.46	10.49%
อื่นๆ	164,882.87	3.14%
รวม	5,249,000.00	100.00%



2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

(1) เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (Chauvin Arnoux, CA 8332, Paris, France) ใช้ในการวัดการใช้กระแส, แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ โดยมีค่าความแม่นยำ $\pm 1\%$ ดังแสดงในรูปที่ 1

(2) เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Imari, CLM – 700, Japan) ชนิดแบบพกพา โดยมีค่าความแม่นยำ $\pm 1\%$ ใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นภายในห้องน้ำเย็น เพื่อวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะการทำความเย็น (Chiller Performance: CHP) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ

(3) เครื่องทำน้ำเย็นของอาคารกองสลากกินแบ่งรัฐบาลได้ทำการติดตั้งเครื่องทำน้ำเย็น 2 ขนาด ได้แก่ เครื่องทำน้ำเย็นยี่ห้อ Carrier ขนาด 550 ตัน รุ่น 19XR6060436LBH52 จำนวน 3 เครื่อง และ เครื่องทำน้ำเย็นยี่ห้อ Carrier ขนาด 250 ตัน รุ่น 30XW1002P จำนวน 2 เครื่อง ชนิด Compressor แบบ Centrifugal ระบายความร้อนด้วยน้ำ AHU จำนวน 52 เครื่อง ขนาดพิกัดรวม 296.50 kW

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์และเก็บข้อมูล

การหาเส้นฐานพลังงาน(Energy Baseline; EnB) ของอาคารกองสลากกินแบ่งรัฐบาลระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็น โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยรวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนของปี 2562 (ปีฐาน) เพื่อหาความสัมพันธ์กับตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงานได้แก่ จำนวนพนักงาน (คน) พื้นที่ใช้สอย (ตารางเมตร) ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชั่วโมง) โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ได้ออกมาในรูปแบบสมการที่ (1)

$$y = mx + c \quad (1)$$

โดยที่ y คือ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)

x คือ ตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงาน

m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ

c คือ ค่าคงที่

สมการเส้นตรงที่ได้จากการหาเส้นฐานพลังงานของปี 2562 มาคำนวณหาค่าคาดการณ์การใช้พลังงานปี 2563 ของระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็น พร้อมทั้งหาค่าผลต่าง (Diff) ร้อยละความคลาดเคลื่อน



(%Error) ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงกับพลังงานที่คาดการณ์และค่าผลรวมสะสมของความแตกต่าง (CUSUM) ของแต่ละเดือน โดยความแม่นยำของค่าคาดการณ์ด้วยวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (Coefficient of Determination; R^2) ซึ่งจะแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (x) ที่มีต่อตัวแปรตาม (y) โดยค่าที่ยอมรับได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (Coefficient of Determination; R^2) มากกว่า 0.75 ดังแสดงในตารางที่ 2 [4, 10]

การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงานด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยรวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของปี 2562 ในแต่ละเดือนและปัจจัยที่ทางผู้วิจัยได้สันนิษฐานว่าเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงานในระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็น ได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิสภาพแวดล้อมกับห้องปรับอากาศ (Cooling Degree Days; CDD) ระยะเวลาการทำงานล่วงเวลา ระยะเวลาการเปิดห้องประชุมเพิ่มเติม โดยสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) นี้จะแสดงออกในรูปแบบสมการที่ (2)

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n + c \quad (2)$$

โดยที่ y คือ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)

m_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปร

อิสระแต่ละตัว

x_n คือ ตัวแปรที่ควบคุมได้

n คือ จำนวนของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

c คือ ค่าคงที่

ตารางที่ 2 เกณฑ์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าสหสัมพันธ์ยกกำลังสอง

ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าสหสัมพันธ์ยกกำลังสอง	อิทธิพลของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตาม
0.00 – 0.30	ไม่มีความสัมพันธ์
0.31 – 0.50	มีความสัมพันธ์น้อย
0.51 – 0.74	มีความสัมพันธ์ปานกลาง
0.75 – 1.00	มีความสัมพันธ์มาก

สมการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ของปี 2562 มาคำนวณหาค่าคาดการณ์การใช้พลังงานปี 2563 ของระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็น พร้อมทั้งหาค่าผลต่าง (Diff) ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงกับพลังงานที่คาดการณ์ได้และค่าผลรวมสะสมของความแตกต่าง (CUSUM) ของแต่ละเดือน การคำนวณร้อยละผลประหยัด (%Saving) จากผลต่างสะสมเทียบกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไ้รจ่ายปีของระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็นจากสมการที่ (3) [7]

$$\%Saving = \frac{C_y}{E_y} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ %Saving คือ ร้อยละผลประหยัด

C_y คือ ผลต่างสะสมรายปี (kWh)

E_y คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไ้รจ่ายปี (kWh)

สำรวจตำแหน่งและจำนวนของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ภายในอาคารสำนักงานกองสลากกินแบ่งรัฐบาล โดยการติดต่อกับเจ้าหน้าที่ของสำนักงานเพื่อขอเข้าไปเก็บข้อมูลและวางแผนในการดำเนินงานและสำรวจพื้นที่ ที่มีการติดตั้งเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)



ตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำภายในท่อน้ำเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3

คำนวณหาต้นความเย็นที่ทำได้ (TR) จากสมการที่ (4) ดังต่อไปนี้ [11]

$$TR = \frac{\dot{m} \times (T_{CHR} - T_{CHS})}{24} \quad (4)$$

โดยที่ \dot{m} คือ อัตราการไหลของน้ำเย็นภายในท่อ (GPM)

T_{CHR} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นฝั่งน้ำเข้าเครื่องทำน้ำเย็น (F)

T_{CHS} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นฝั่งน้ำออกเครื่องทำน้ำเย็น (F)

คำนวณหาสมรรถนะการทำความเย็น (CHP) ของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ได้จากสมการที่ (5) ดังต่อไปนี้ เป็นการตรวจวัดแบบ Non-standard Part Load Value (NPLV) และภาระโหลดในแต่ละช่วงเวลาได้แก่ร้อยละ 100, 75, 50 และ 25 ตามลำดับ [11, 12]

$$CHP = \frac{P}{TR} \quad (5)$$

โดยที่ CHP คือ สมรรถนะการทำความเย็น (kW/TR)

P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

TR คือ ต้นความเย็นที่ทำได้ (TR)

ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) ในระดับองค์กรโดยนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์และต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานซึ่งจะเป็นในรูปแบบของสัดส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ (Input) และจำนวนพนักงาน (Output) ในช่วงเวลาเดียวกันจากสมการที่ (6) [13]



รูปที่ 3 การตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นภายในท่อของระบบทำน้ำเย็น

การวิเคราะห์หาค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของระดับองค์กร ระดับระดับระบบทำน้ำเย็น และระดับอุปกรณ์ โดยใช้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านพลังงาน (Energy Performance Indicators; EnPI) องค์กรต้องซึ่งดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานให้เหมาะสม เพื่อเฝ้าติดตามและตรวจวัดสมรรถนะด้านพลังงาน ซึ่งวิธีการในการกำหนดและการปรับปรุงให้ทันสมัยของดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านพลังงานจะต้องถูกบันทึกและทบทวนอย่างสม่ำเสมอ [13]

$$SEC = \frac{\text{การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)}}{\text{จำนวนพนักงาน (คน)}} \quad (6)$$

โดยที่ SEC คือ ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ โดยการ ใช้พลังงานไฟฟ้าเทียบกับจำนวนพนักงาน (kWh/คน)



3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของระดับองค์กร

รวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของปี 2562 ในแต่ละเดือนและตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงาน และจัดทำเป็นเส้นฐานพลังงานของระดับองค์กรโดยตัวแปรที่เลือกใช้คือจำนวนพนักงานที่ทำงานในแต่ละเดือนของปี 2562

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาพรวมระดับองค์กรปี 2562 วิธีการวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) จะได้เส้นฐานพลังงานจากสมการที่ (7)

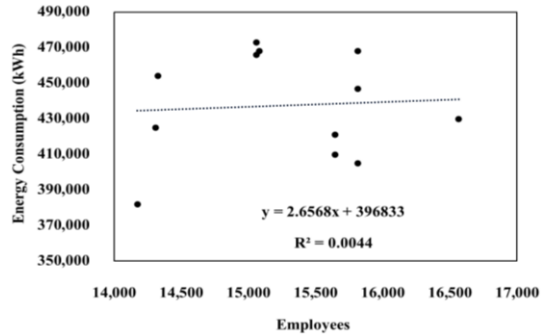
$$Y = 2.6568X + 396833 \quad (7)$$

โดยที่ Y คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (kWh)

X คือ จำนวนพนักงาน (คน)

จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่า R² เท่ากับ 0.0044 ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ R² เท่ากับ 0.75 แสดงให้เห็นว่าจำนวนพนักงาน ไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้า ส่งผลให้ไม่สามารถใช้เป็นดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) ในระดับองค์กร ดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ในการทำนายการใช้พลังงานในระดับองค์กรได้

ดังนั้น การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานในระดับองค์กรปี 2562 ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยการเพิ่มตัวแปรอิสระ ซึ่งทางผู้ทําวิจัยได้สันนิษฐานว่าเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงาน เช่น ค่า Cooling Degree Days



รูปที่ 4 การกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อจำนวนพนักงาน

ในระดับองค์กรปี 2562

(CDD), ระยะเวลาการทำงานล่วงเวลา, ระยะเวลาการเปิดห้องประชุม และระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พบว่าตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในระดับองค์กร คือ ค่า CDD และระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น โดยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของสมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) มีรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ของระดับองค์กร

Model	Unstandardized		T Stat	P-value
	Coefficients			
	B	Std. Error		
(Constant)	193530.83	38279.30	5.055	0.0007
X ₁ : ระยะเวลาการทำงาน ของเครื่อง ทำน้ำเย็น (ชม.)	245.57	48.85	5.027	0.0007
X ₂ : CDD (°C)	354.66	132.04	2.686	0.025



โดยแสดงค่า B, Std. Error, t-Stat, P-value ซึ่งค่าต่าง ๆ มีความหมายดังต่อไปนี้ [4]

B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวพร้อมทั้งค่าคงที่ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดการณ์

Std. Error คือค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

t-Stat และ P-value เป็นค่าสถิติที่และค่านัยสำคัญทางสถิติ (P-value) ของการทดสอบที่ (t-test) สำหรับทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใด ควรนำไปใช้ในสมการค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดการณ์ได้บ้าง โดยค่า P-value มีค่าน้อยหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญที่กำหนด) แสดงว่าสามารถนำไปใช้ในสมการค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดการณ์ได้ ในงานวิจัยนี้กำหนดระดับนัยสำคัญ (Level of Significant) ไว้ที่ 0.05 (P-value < 0.05) ซึ่งหมายถึงยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อน 5 % หรือมีระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) 95 % [4]

สมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ของระดับองค์กรได้ดังนี้

$$Y = 245.57X_1 + 354.66X_2 + 193530.83 \quad (8)$$

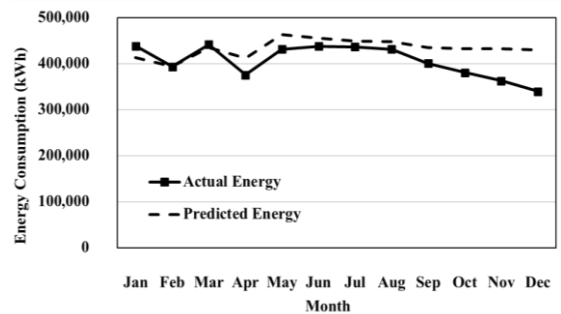
โดยที่ X_1 คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.)

X_2 คือ ค่า CDD (°C) [12]

เมื่อนำสมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) $Y = 245.57X_1 + 354.66X_2 + 193530.83$ ดังสมการที่ (8) ของระดับองค์กร โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8715 ซึ่งมากกว่าค่าที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.75 และมากกว่าสมการที่ (7) ซึ่งเป็นสมการถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) ดังนั้น

เมื่อนำสมการที่ (8) มาใช้ในการทำนายค่าคาดการณ์การใช้พลังงานของระดับองค์กรของปี 2563 โดยแทนค่า X_1 คือระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.) และ X_2 คือ ค่า CDD (°C) ของปี 2563 พบว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง (Actual Energy) น้อยกว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าคาดการณ์ (Predicted Energy) ร้อยละ 7.34 แสดงให้เห็นว่ากองสลากกินแบ่งรัฐบาลมีการอนุรักษ์พลังงานในระดับองค์กร ดังแสดงในรูปที่ 5

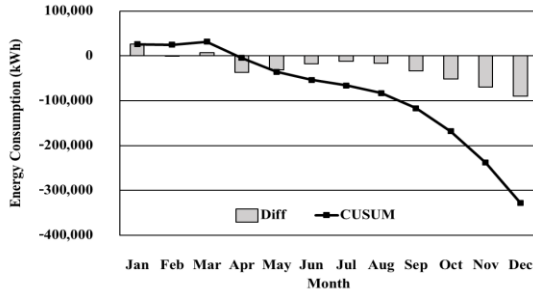
สำหรับค่าผลรวมสะสมของความแตกต่าง (CUSUM) ในระดับองค์กร คำนวณจากผลรวมของค่าผลต่าง (Diff) ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าในช่วง ม.ค.-มี.ค. มีค่าความชันของผลรวมสะสมของความแตกต่างเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าค่าฐานอ้างอิง และตั้งแต่เดือน เม.ย. เป็นต้นไป พบว่าค่าความชันของผลรวมสะสมของความแตกต่างเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าฐานอ้างอิง เนื่องจากทางกองสลากกินแบ่งรัฐบาลได้มีนโยบายลดการใช้พลังงานโดยกำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงานภายในองค์กร



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลของปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงและค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดการณ์ในระดับองค์กร



บทความวิจัย



รูปที่ 6 แสดงแผนภาพปริมาณของผลต่าง (Diff) และผลต่างสะสม (CUSUM) ในระดับองค์กร

3.2 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของระดับระบบทำน้ำเย็น

การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานในระดับระบบทำน้ำเย็น ปี 2562 วิธีการวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) จะได้เส้นฐานพลังงานจากสมการที่ (9)

$$Y = 243.55X - 60533 \quad (9)$$

โดยที่ Y คือ พลังงานไฟฟ้าในระดับระบบทำน้ำเย็นที่ใช้ต่อเดือน (kWh)

X คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในระดับระบบทำน้ำเย็นปี 2562 ด้วยวิธีการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression) จะได้ดังสมการที่ (9) โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.5749 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ 0.75 ดังนั้นจึงใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยการเพิ่มตัวแปรอิสระที่ทางผู้ทำวิจัยได้สันนิษฐานว่าเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงาน

เช่น ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น ระยะเวลาการเปิดห้องประชุมเพิ่มเติม และระยะเวลาการเปิดเครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit; AHU) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พบว่าตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในระดับระบบทำน้ำเย็นคือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น และระยะเวลาการเปิด AHU โดยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆของสมการการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ของระบบทำน้ำเย็น

Model	Unstandardized Coefficients		t-Stat	P-value
	B	Std. Error		
ค่าคงที่ (Constant)	-16674.135	45308.356	-0.368	0.0072
X ₁ : ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.)	-143.144	47.327	-3.025	0.0144
X ₂ : ระยะเวลาการเปิด AHU (ชม.)	278.695	50.519	5.517	0.0004

สมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ในระดับระบบทำน้ำเย็นได้ดังสมการที่ (10)

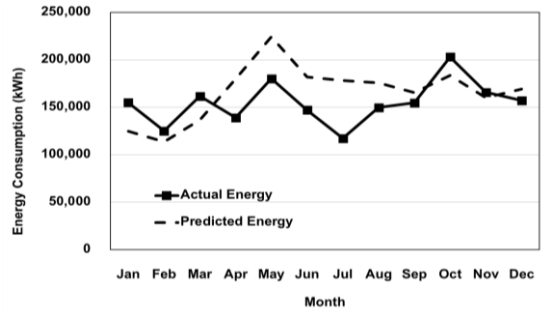
$$Y = -143.144X_1 + 278.695X_2 - 16674.135 \quad (10)$$

โดยที่ X₁ คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.)

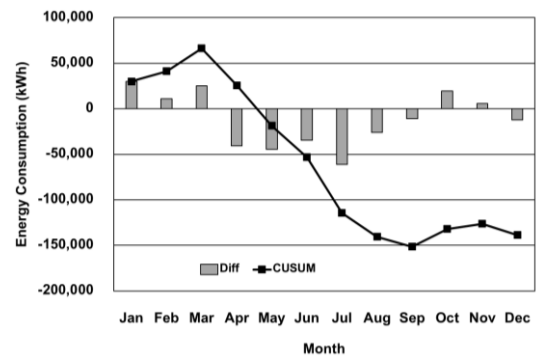
X₂ คือ ระยะเวลาการเปิด AHU (ชม.)



เมื่อนำสมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ในระดับระบบทำน้ำเย็น $Y = -143.144X_1 + 278.695X_2 - 16674.135$ ดังสมการที่ (10) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7892 ซึ่งมากกว่าค่าที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.75 ส่งผลให้สามารถใช้สมการที่ (10) มาคำนวณหาค่าคาดการณ์การใช้พลังงานของระดับระบบทำน้ำเย็นปี 2563 โดยแทนค่า X_1 คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.) และ X_2 คือ ระยะเวลาการเปิด AHU (ชม.) ด้วยข้อมูลของปี 2563 พบว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง (Actual Energy) น้อยกว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าคาดการณ์ (Predicted Energy) ร้อยละ 8.59 แสดงให้เห็นว่ากองสลากกินแบ่งรัฐบาลมีมาตรการอนุรักษ์พลังงานในระบบทำน้ำเย็น ดังแสดงในรูปที่ 7 และเมื่อคำนวณค่าผลต่าง (Diff) และค่าผลรวมสะสมของความแตกต่าง (CUSUM) ในระดับระบบทำน้ำเย็นของปี 2563 ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าในช่วง ม.ค.-มี.ค. มีความชันของค่าผลรวมสะสมของความแตกต่างเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำเย็นต่ำกว่าค่าฐานอ้างอิง และตั้งแต่เดือน เม.ย. เป็นต้นไป พบว่าความชันของค่าผลรวมสะสมของความแตกต่างเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำเย็นสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าฐานอ้างอิง เนื่องจากกองสลากกินแบ่งรัฐบาลมีมาตรการลดระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำความเย็น (Chiller) เมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวและมาตรการเปลี่ยนมาใช้เครื่องทำน้ำเย็นขนาด 250 ตัน แทนเครื่องทำน้ำเย็นขนาด 550 ตัน ในช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลของปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงและค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดการณ์ในระดับระบบทำน้ำเย็น



รูปที่ 8 ปริมาณของผลต่าง (Diff) และผลต่างสะสม (CUSUM) ในระบบทำน้ำเย็นโดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

3.3 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านพลังงานของระดับอุปกรณ์

ทำการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ทั้งหมด และทำการตรวจวัดค่าอัตราการไหลของน้ำเย็นภายในท่อ อุณหภูมิน้ำเย็นฝั่งน้ำเข้าและน้ำออกจากเครื่องทำน้ำเย็น เพื่อคำนวณหาค่าความเย็นที่เครื่องทำน้ำเย็นที่ผลิตได้ (Ton of Refrigeration; TR) จากสมการที่ (4) เพื่อคำนวณหาค่าสมรรถนะการทำความเย็น (CHP) ดังสมการที่ (5) ดังตารางที่ 5



ตารางที่ 5 ค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น

No.	Power (kW)	Flow Rate (GPM)	Chilled Water Temp. (°F)		Ton (TR)	CHP (kW/TR)	CHP Legal (kW/TR)
			Inlet	Outlet			
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2	287.5	1504.71	50.2	45	326.02	0.88	0.62
3	127	606.36	50.7	46	118.74	1.07	0.76
4	127	608.50	50.1	45	129.31	0.98	0.76
5	301.8	1498.51	50.5	45	343.41	0.87	0.62

จากตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นที่ได้จากการตรวจวัด (CHP) กับค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นตามกฎหมาย (CHP Legal) พบว่าค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นที่ได้จากการตรวจวัด (CHP) เครื่องที่ 2, 3, 4 และ 5 เท่ากับ 0.88, 1.07, 0.98 และ 0.87 kW/Ton ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นตามกฎหมายกำหนด (CHP Legal) [14] พบว่า ค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น มีค่าสูงกว่าค่าสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นตามกฎหมาย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเครื่องทำน้ำเย็นของกองสลากกินแบ่งรัฐบาลมีอายุการใช้งานมานาน ทำให้เครื่องทำน้ำเย็นเกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้ค่าสมรรถนะการทำความเย็นสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตามกฎหมายกำหนด ซึ่งผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะมาตรการการอนุรักษ์พลังงานในระบบทำน้ำเย็น ดังนี้

มาตรการที่ 1. เลือกเครื่องทำน้ำเย็นค่าสมรรถนะการทำความเย็นสูงเป็นตัวหลัก

มาตรการที่ 2. เพิ่มรอบในการทำความสะอาดบำรุงรักษาเครื่องทำน้ำเย็น และอุปกรณ์ประกอบในระบบทำน้ำเย็น

มาตรการที่ 3. ควรมีระบบติดตามสมรรถนะการทำความเย็นของระบบทำน้ำเย็น (Monitoring System) อย่างต่อเนื่อง

มาตรการที่ 4. เปลี่ยนเครื่องทำน้ำเย็นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง

4. บทสรุป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานย้อนหลังของปี พ.ศ. 2562 ได้มีการหาดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานของอาคารสำนักงานกองสลากกินแบ่งรัฐบาลได้ 3 ระดับโดยระดับที่ 1 คือ ระดับองค์กรโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยการหาความสัมพันธ์กับปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในระดับองค์กร คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.) และ ค่า CDD (°C) เมื่อนำมาใช้คาดการณ์การใช้พลังงานในระดับองค์กรของปี 2563 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.8715 และการใช้พลังงานในระดับองค์กรลดลงร้อยละ 7.34



ระดับที่ 2 คือ ระดับระบบทำความเย็นโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยการหาความสัมพันธ์กับปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในระดับระบบทำความเย็น คือ ระยะเวลาการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (ชม.) และระยะเวลาการเปิด AHU (ชม.) เมื่อนำมาใช้คาดการณ์การใช้พลังงานในระดับระบบทำความเย็นของปี 2563 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.7892 และการใช้พลังงานในระดับระบบทำความเย็นลดลงร้อยละ 8.59

ระดับที่ 3 คือ ระดับเครื่องจักรอุปกรณ์ โดยจะใช้ค่าสมรรถนะทำความเย็น (CHP) ของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ในการเทียบกับค่าที่กฎหมายกำหนด จากผลการวิจัยพบว่า ค่าสมรรถนะทำความเย็น (CHP) ของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) โดยเฉลี่ยสูงกว่าค่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตามกฎหมายกำหนดร้อยละ 37.68

ดังนั้นสำนักงานกองสลากกินแบ่งรัฐบาลสามารถนำดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางด้านพลังงานในระดับองค์กรและระดับระบบทำน้ำเย็นไปใช้คาดการณ์การใช้พลังงานในอนาคต นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาในบทความแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศ ได้แก่ ภาวะความร้อนของอาคาร อุณหภูมิ น้ำเข้าคอนเดนเซอร์ ประเภทของระบบควบคุม Compressor ที่ส่งผลต่อการใช้ปริมาณไฟฟ้าขององค์กรไม่คงที่ และควรมีมาตรการการอนุรักษ์พลังงานในระบบทำน้ำเย็นและระบบอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อให้ช่วยให้องค์กรสามารถลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0619/2022 และขอขอบคุณสำนักงานกองสลากกินแบ่งรัฐบาลที่อนุเคราะห์ข้อมูลทางด้านพลังงานและสถานที่สำหรับการตรวจวัดพลังงาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Pasena and S. Putivisitak, Energy management system development for iso 50001:2011 for automotive parts factories, Journal of Energy Research, 2014, 11(1), 3-13. (in Thai)
- [2] EPPO, Summary Statistic, Energy Policy and Planning Office, 2021. (in Thai)
- [3] S.S.H. Pisitsungkakam, Energy management system (ISO 50001) and thai law on energy conservation promotion, The Journal of Industrial Technology, 2014, 10(2), 85-86. (in Thai)
- [4] R. Intarapanich, W. Mungkalasiri, and J. Mungkalasiri, The Equation of energy forecasting by statistical process control analysis: Case study of car audio industry, Journal of Science and Technology, 2017, 25(5), 894-903. (in Thai)



- [5] B. Saengpiya, J. Jantaro, and C. Chamcaoy, Factors affecting the efficiency of electric energy conservation in designated factories, *Journal of Energy Research*, 2011, 8(2), 21-33. (in Thai)
- [6] P. Numdee, J. Jantaro, and C. chamchoy, Energy efficiency studies and monitoring of the designated factories, *Journal of Energy Research*, 2011, 8(2), 1-9. (in Thai)
- [7] B. Niramitawasu, J. Jantaro, and C. Chamcaoy, An application of statistic tools for energy savings monitoring, *Journal of Energy Research*, 2011, 8(2), 36-43. (in Thai)
- [8] ISO 50001, Energy Management System Requirements with Guidance for Use, International Organization for Standardization, 2018.
- [9] N. Khetkrathok and K. Suluksna, Guidelines for the management of thermal comfort conditions in air-conditioned areas for energy saving case study library building suranaree university of technology, *Ladkrabang Engineering Journal*, 2019, 36(1), 17-24. (in Thai)
- [10] W. Sriariyakul, Drying of nam dok mai mango using far-infrared radiation in combination with hot-air, *The Journal of Industrial Technology*, 2021, 17(3), 138-151. (in Thai)
- [11] K. Ardham, N. Chansom, and S. Ruengrit, Analysis of management of chiller water cooled systems, *College of Asian Scholars Journal*, 2017, 7, 249-252. (in Thai)
- [12] American Society of Heating, Refrigerating and air-conditioning engineers, *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, ASHRAE, Atlanta, GA, USA, 2013.
- [13] W. Saiyasri, P. Kachapongkun, and C. Bunmephiphit, Specific energy consumption analysis and energy conservation of brake fabric factory, *Journal of Renewable Energy for Community*, 2019, 2(3), 72-80. (in Thai)
- [14] DEDE, Cooling efficiency, and electrical power per ton refrigeration of air conditioning system in the building, B.E.2552, Ministry of Energy's Notification on Identification of Coefficient of Minimum Performance, 2009. (in Thai)



การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ: กรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติก

จตุฤทธิ์ พรหมศาลา¹ และ โรจณี หอมชาลี^{2*}

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, วิทยาการจัดการสถิติ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ภาควิชาคณิตศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: rojanee.h@msu.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 31 มกราคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 23 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติก ให้ต้นทุนโดยรวมของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับต่ำที่สุด เริ่มจากการหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยการวิเคราะห์กลุ่มแบบขั้นตอนและการวิเคราะห์กลุ่มแบบเคมีน หลังจากนั้นจึงนำตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกที่ได้ไปเป็นตัวแปรตัดสินใจของตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear Programming Model: MINLP) ซึ่งตัวแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการตัดสินใจที่เหมาะสมในการเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก การขนส่งและการเก็บรวบรวมขยะพลาสติก รวมถึงการรีไซเคิลเม็ดพลาสติก โดยตัวแบบถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม LINGO 13.0 นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ความไวโดยปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับความจุและจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกทางเลือก พบว่า หากมีจำนวนศูนย์รวบรวมที่เปิดดำเนินการมาก จะใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่า มีปริมาณการรีไซเคิลพลาสติกน้อยกว่า และมีต้นทุนโดยรวมต่ำกว่า ตรงข้ามหากมีจำนวนศูนย์รวบรวมที่เปิดดำเนินการน้อย แม้จะมีต้นทุนโดยรวมมากกว่า แต่จะสามารถรีไซเคิลพลาสติกได้ในปริมาณมากกว่า ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สามารถนำมาประกอบการพิจารณาแนวทางในการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับของขยะพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การรีไซเคิลพลาสติก; โลจิสติกส์ย้อนกลับ; การโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

Development of Mathematical Model for Reverse Logistics Management: A Case Study of Plastic Recycling

Jaturit Promsala¹ and Rojanee Homchalee^{2*}

¹ Master of Science Program in Statistical Management Science, Mahasarakham University

² Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahasarakham University

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

Received: 16 June 2023; Revised: 31 January 2024; Accepted: 23 February 2024

Online Published: 25 April 2024

Abstract: The aim of this research is the development of a mathematical model for reverse logistics management: a case study of plastic recycling. Offers the minimization of the total costs of the reverse logistics system. First, the alternative locations for collecting plastic waste in the Northeast were determined using hierarchical clustering and K-means clustering. These alternative locations were used as decision variables in the Mixed Integer Non-linear Programming Model (MINLP). The model was developed to appropriately decide for opening a plastic waste collection center, the transport and collection of plastic waste, and the recycling of plastic pellets. This proposed model was processed with the LINGO 13.0 program. In addition, the sensitivity analysis by varying parameters regarding the capacity and number of alternative collection centers was proceeded. It was found that if there are many collection centers operating, it will take longer time to process, less plastic recycling, with lower total cost. In contrast, if there are a small number of collection centers operating, despite having more total costs but will be able to recycle more plastic. The results of this research can be used to effectively manage the reverse logistics of plastic waste in the Northeast.

Keywords: Plastic Recycling; Reverse Logistics; Mixed Integer Non-linear Programming



1. บทนำ

ปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปี 2555-2562 และมีแนวโน้มลดลงในปี 2563-2565 โดยในปี 2565 มีปริมาณขยะมูลฝอย 25.70 ล้านตัน เพิ่มขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 2.80 จากปี 2564 ที่มีปริมาณ 24.98 ล้านตัน และยังพบว่าประเทศไทยมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.07 กิโลกรัม/คน/วัน เพิ่มขึ้นจากปี 2564 ที่มีอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.03 กิโลกรัม/คน/วัน ทั้งนี้ปริมาณขยะมูลฝอยในปี 2565 ที่ถูกนำไปกำจัดอย่างถูกต้องมีประมาณ 9.80 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 38.13 ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.60 จากปี 2564 ส่วนที่ถูกกำจัดอย่างไม่ถูกต้อง 7.10 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 27.63 ซึ่งลดลงร้อยละ 9.09 จากปี 2564 นอกจากนี้ยังพบว่า มีขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ประมาณ 8.80 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 34.24 ซึ่งลดลงร้อยละ 11.53 จากปี 2564 [1]

การรีไซเคิลขยะพลาสติกเป็นแนวทางหนึ่งในการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในประเทศไทยยังมีน้อย เพราะต้องใช้เงินลงทุนสูงในการสร้างโรงงานและการดำเนินการ ดังนั้น พลาสติกที่ใช้แล้วจำนวนมากจึงไม่ได้ถูกนำมารีไซเคิลเพื่อใช้ประโยชน์ โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปฝังดินตามแหล่งจัดเก็บขยะต่างๆ หรือถูกนำไปเผาทำลาย ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการปล่อยก๊าซพิษเข้าสู่บรรยากาศโลก [2]

จากการศึกษาปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนในปี 2565 โดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณขยะมูลฝอย 16,942 ตันต่อวัน โดยในพื้นที่สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11 มีปริมาณมากที่สุด 6,482.26 ตันต่อวัน เมื่อพิจารณาทั้งภาค พบว่าขยะมูลฝอยที่ถูกกำจัดไม่ถูกต้องมีมากถึง 5,277 ตัน

ต่อวัน ส่วนที่ถูกกำจัดอย่างถูกต้องมีเพียง 3,259 ตันต่อวัน และพบว่าขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ 8,406 ตันต่อวัน ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นขยะพลาสติก และแม้จะมีการกำจัดทุกวัน แต่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีขยะมูลฝอยตกค้างรวมถึง 2,133,130 ตัน [1]

จากปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยในชุมชนซึ่งรวมถึงขยะพลาสติกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีปริมาณมาก และบางส่วนไม่ได้ถูกกำจัดอย่างถูกต้อง รวมถึงการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ยังมีปริมาณที่น้อยนั้น การนำขยะพลาสติกกลับมารีไซเคิลจึงถือเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาได้ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกในการรวบรวมขยะพลาสติก และพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ เพื่อการตัดสินใจที่เหมาะสมในการเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก การขนส่งและการเก็บรวบรวมขยะพลาสติก รวมถึงการรีไซเคิลเม็ดพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลจิสติกส์ย้อนกลับเป็นกระบวนการวางแผนการดำเนินงานและการควบคุมวัตถุดิบในกระบวนการและผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย จากการผลิตไปจนถึงการจัดจำหน่าย และจากการใช้ประโยชน์ไปจนถึงการใช้ซ้ำ ดังนั้น การออกแบบการไหลย้อนกลับที่มีประสิทธิภาพจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการจัดการห่วงโซ่อุปทานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) เช่น หลักการวิจัยดำเนินงาน (Operations Research) สามารถช่วยลดต้นทุนและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด



บทความวิจัย

โซ่อุปทาน โดยมีงานวิจัยที่ตีพิมพ์หลายฉบับ เช่น การวางแผนด้านสิ่งแวดล้อม โลจิสติกส์สีเขียว การออกแบบโซ่อุปทาน หรือการจัดการอย่างยั่งยืนที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและสังคม ซึ่งงานเหล่านี้มุ่งเน้นการจัดการโลจิสติกส์หรือโซ่อุปทานแบบการไหลไปข้างหน้า [3]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกหลายเรื่อง [4-9] ที่มีการพัฒนาตัวแบบสำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ และจากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ทบทวน พบว่า ประเภทของตัวแบบมีความหลากหลายแตกต่างกันไปตามบริบทของการประยุกต์ใช้ แต่ฟังก์ชันเป้าหมาย

(Objective Function) ส่วนใหญ่ มีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด ดังรายละเอียดสรุปในตารางที่ 1

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อวิเคราะห์และแสดงการไหลของขยะพลาสติกให้เหมาะสม รวมถึงหาตำแหน่งที่ตั้งในการรวบรวมขยะพลาสติก โดยกำหนดวิธีดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 วัตถุประสงค์ ประเภทตัวแบบ/วิธีการ และสมการเป้าหมายของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	ตัวแบบ/วิธีการ	สมการเป้าหมาย
เสกสรร สุธรรมานนท์ และคณะ [4]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม สำหรับการคำนวณต้นทุนการขนส่งขยะคอมพิวเตอร์ในจังหวัดสงขลา	Integer Linear Programming Model (ILP)	Minimize total cost
Schultmann และคณะ [5]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม สำหรับการวางแผนเครือข่ายและหาทำเลที่ตั้งโรงงานเพื่อการผลิตรีไซเคิลแบตเตอรี่เก่าที่หมดอายุการใช้งานแล้วในเยอรมนี	Mixed Integer Linear Programming Model (MILP)	Minimize total cost
Vaidyanathan และคณะ [6]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม สำหรับเครือข่ายและทำเลที่ตั้งของโรงงานผลิตซ้ำในสหรัฐอเมริกา	Mixed Integer Linear Programming Model (MILP)	Minimize total cost
Mahdi Mokhtarzadeh และคณะ [7]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม เพื่อลดต้นทุน มลพิษทางเสียง และการคุกคามที่เกิดจากการจัดตั้งศูนย์กลางสำหรับประชากร	Mixed Integer Non-linear Programming Model (MINLP)	Minimize total cost
Amir Aghsami และคณะ [8]	พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับห่วงโซ่อุปทานเลือด เพื่อช่วยลดต้นทุนทั้งหมดและเพิ่มความพึงพอใจของผู้บริจาคเลือดโดยการลดเวลารอคอยของระบบ	Mixed Integer Non-linear Programming Model (MINLP)	Minimize total cost
Ines Soares และคณะ [9]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม เพื่อเพิ่มกำไรสูงสุดอันเป็นผลมาจากการซื้อพลังงานในตลาดที่มีการจัดระเบียบ และขายให้กับผู้บริโภค	Mixed Integer Linear Programming Model (MILP) and Hybrid Metaheuristics	Maximize total profit



บทความวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีศึกษา การรีไซเคิลพลาสติก

ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ถูกรวบรวมจากเอกสารวิชาการ รายงานการวิจัย และฐานข้อมูลของหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน เช่น กรมควบคุมมลพิษ สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกไทย โดยดำเนินการวิเคราะห์โครงสร้างและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ วิเคราะห์การไหลของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ ตั้งแต่การไหลของขยะพลาสติกและการขนส่งด้วยรถประเภทต่างๆ จากชุมชน (อำเภอ) ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และขนส่งต่อไปยังโรงงานรีไซเคิลพลาสติก และวิเคราะห์ต้นทุนที่เกี่ยวข้องของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่งขยะพลาสติก ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิล เป็นต้น

3.2 การหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลพิกัดของชุมชน (อำเภอ) และปริมาณขยะพลาสติกของชุมชน เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ด้วยการวิเคราะห์จัดกลุ่ม 2 วิธี คือ แบบขั้นตอน (Hierarchical Clustering) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนกลุ่มมาก่อน โดยนำมาใช้ในการหาจำนวนกลุ่มที่ควรจะเป็นในเบื้องต้น และแบบเคมีน (K-Means Clustering) เป็นเทคนิคที่ต้องทราบจำนวนกลุ่มมาก่อน ซึ่งประยุกต์ใช้หลังจากที่กำหนดจำนวนกลุ่มในเบื้องต้นได้จากการแบ่งกลุ่ม แบบขั้นตอน (Hierarchical Clustering) ตั้งขั้นตอนต่อไปนี้

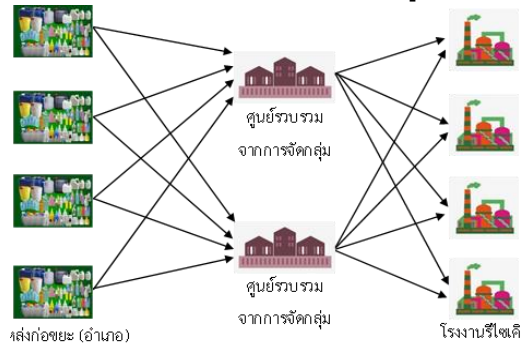
1) แปลงค่าข้อมูลของพิกัดชุมชนและปริมาณขยะพลาสติกของชุมชนเป็นคะแนนมาตรฐาน วิเคราะห์จัดกลุ่มด้วยวิธี Hierarchical Clustering และพิจารณาแผนภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) โดยเลือกการแบ่งกลุ่ม 3 ระดับ คือ จำนวนกลุ่มเท่ากับ K1 K2 และ K3

2) นำจำนวนกลุ่ม K1 K2 และ K3 มาวิเคราะห์ด้วย K-means Clustering โดยหาระยะห่างด้วยวิธี Euclidean แล้วจึงหาจุด Centroid ของกลุ่ม และแสดงแผนที่กลุ่ม

3) สรุปตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก โดยพิจารณาจาก Centroid ของ K-means Clustering ทั้ง 3 ระดับ

3.3 การออกแบบระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับและการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์

พิจารณาระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับสำหรับการรีไซเคิลพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเริ่มจากการนำขยะพลาสติกจากทุกอำเภอในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เพื่อทำการคัดแยกประเภทของพลาสติก แล้วเตรียมการจัดส่งต่อไปยังโรงงานรีไซเคิล โดยใช้ยานพาหนะประเภทต่างๆ ในการขนส่งทางถนน ดังโครงข่ายในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงข่ายโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีการรีไซเคิลพลาสติก



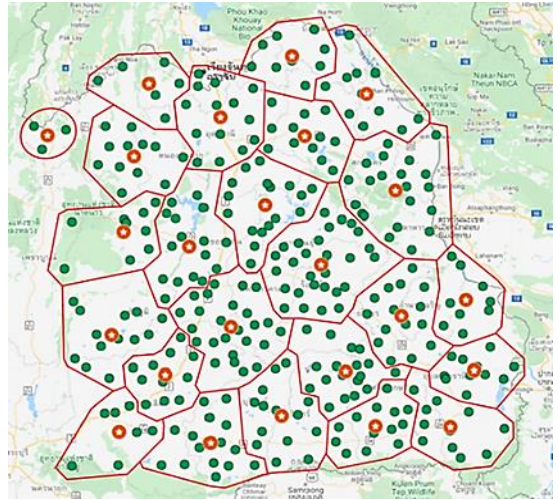
บทความวิจัย

จากนั้นจึงพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับที่สอดคล้องกับกรณีการรีไซเคิลพลาสติก รวบรวมและวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ และหาผลเฉลยของตัวแบบด้วยโปรแกรม LINGO 13.0 [10] รวมถึงวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยการทดลองแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนและความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก โดยกำหนดเป็นสถานการณ์วิเคราะห์ความไว K4 ถึง K10 ทั้งนี้เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ กรณีการรีไซเคิลพลาสติกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือในอนาคตที่อาจมีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น

4. ผลการวิจัย

4.1 ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกในการรวบรวมขยะพลาสติก

จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณขยะพลาสติก และหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกในการรวบรวมขยะพลาสติกของชุมชน (อำเภอ) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าประชากร 1 คน สามารถก่อกองขยะพลาสติกได้ 7.25 กิโลกรัมต่อปี และจากการนำข้อมูลพิกัดตำแหน่งที่ตั้งและปริมาณขยะพลาสติกของชุมชน (อำเภอ) ทั้งหมดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมาวิเคราะห์แบ่งกลุ่มแบบขั้นตอน และพิจารณาจากแผนภาพเดนไดรแกรม สรุปได้ว่า จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมสำหรับ 3 ระดับ ได้แก่ 24 33 และ 60 กลุ่ม แล้วนำจำนวนกลุ่มที่ได้มาวิเคราะห์กลุ่มแบบเคมีน และกำหนดพิกัดตำแหน่งของกลุ่มจากจุด Centroid พบว่า แบบ K1 (จำนวน 24 กลุ่ม) ได้ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกกระจายอยู่ใน 14 จังหวัด



รูปที่ 2 แผนที่กลุ่มจากผลวิเคราะห์

K-means Clustering แบบ K1 (จำนวน 24 กลุ่ม)

ตั้งแผนที่กลุ่มที่แสดงในรูปที่ 2 สำหรับแบบ K2 (จำนวน 33 กลุ่ม) ได้ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกกระจายอยู่ใน 17 จังหวัด และแบบ K3 (จำนวน 60 กลุ่ม) ได้ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกกระจายอยู่ใน 19 จังหวัด ซึ่งแผนที่กลุ่มของแบบ K2 และ K3 ได้ดำเนินการในการทำงานเดียวกัน

4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปัญหาของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีการรีไซเคิลพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่พัฒนาได้ เป็นตัวแบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear Programming: MINLP) เนื่องจากตัวแปรตัดสินใจมีทั้งที่มีค่าเป็นปริมาณต่อเนื่องและมีค่าเป็นจำนวนเต็ม อีกทั้งสมการเป้าหมายเป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนโดยรวมในการ



บทความวิจัย

จัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด ซึ่งมี ดัชนี พารามิเตอร์ ตัวแปรตัดสินใจ และโครงสร้างของตัวแบบ ดังนี้

ดัชนี

- i คือ แหล่งก่อขยะ (อำเภอ) ; $i = 1, \dots, I$
 j คือ ศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก; $j = 1, \dots, J$
 k คือ โรงงานรีไซเคิล ; $k = 1, \dots, K$
 v คือ ประเภทของรถบรรทุก ; $v = 1, \dots, V$

พารามิเตอร์

- Pld_i คือ ปริมาณขยะพลาสติกของแหล่งก่อขยะที่ i (กิโลกรัม)
 Ce_j คือ ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (บาท/กิโลกรัม)
 Co_k คือ ต้นทุนการจัดเก็บขยะพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลที่ k (บาท/กิโลกรัม)
 Cr_k คือ ต้นทุนการผลิตของโรงงานรีไซเคิลที่ k (บาท/กิโลกรัม)
 Cp_k คือ ต้นทุนการจัดเก็บเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลที่ k (บาท/กิโลกรัม)
 Ct_v คือ ต้นทุนการขนส่งด้วยรถประเภทที่ v (บาท/กิโลเมตร)
 D_{ij} คือ ระยะทางระหว่างแหล่งก่อขยะที่ i กับศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (กิโลเมตร)
 D_{jk} คือ ระยะทางระหว่างศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก j กับโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลเมตร)
 $EeCap_j$ คือ ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (กิโลกรัม)
 $ErCap_k$ คือ ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

$PlCap_k$ คือ กำลังการผลิตเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

$EpCap_k$ คือ ขีดความสามารถในการจัดเก็บเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของโรงงานที่ k (กิโลกรัม)

$TCap_v$ คือ ความจุสูงสุดของรถบรรทุกประเภทที่ v (กิโลกรัม)

α คือ อัตราการแปลงขยะพลาสติกเป็นเม็ดพลาสติก (กิโลกรัม)

M คือ จำนวนจริงที่มีค่ามาก (Positive Large Number)

ตัวแปรตัดสินใจ

PD_{ijv} คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่ขนส่งจากแหล่งก่อขยะ i ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก j ด้วยรถบรรทุก v (กิโลกรัม)

PE_{jkv} คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่ขนส่งจากศูนย์รวบรวม j ไปยังโรงงานรีไซเคิล k ด้วยรถบรรทุก v (กิโลกรัม)

Se_j คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บในศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (กิโลกรัม)

So_k คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บในโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

Sr_k คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่นำเข้าไปรีไซเคิลในโรงงานที่ k (กิโลกรัม)

PR_k คือ ปริมาณเม็ดพลาสติกที่รีไซเคิลโดยโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

Sp_k คือ ปริมาณเม็ดพลาสติกรีไซเคิลที่จัดเก็บในโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

E_j คือ ตัวแปรในการกำหนดตำแหน่ง โดยเท่ากับ 1 เมื่อศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j ถูกจัดตั้งขึ้นหรือเปิดดำเนินการ และเท่ากับ 0 เมื่อไม่ถูกจัดตั้งหรือไม่เปิดดำเนินการ



บทความวิจัย

X_{ij} คือ ตัวแปรในการกำหนดการขนส่ง โดยเท่ากับ 1 เมื่อมีการขนส่งขยะพลาสติกจากแหล่งก่อกองขยะที่ i ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

Y_{jk} คือ ตัวแปรในการกำหนดการขนส่ง โดยเท่ากับ 1 เมื่อมีการขนส่งขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j ไปยังโรงงานรีไซเคิลที่ k และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับต่ำที่สุด ดังสมการ (1) ซึ่งประกอบด้วย 1) ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก คำนวณจากผลรวมของผลคูณระหว่างต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมแต่ละแห่ง กับปริมาณขยะ

พลาสติกที่จัดเก็บในศูนย์รวบรวมและตัวแปรการกำหนดตำแหน่ง 2) ต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิล คำนวณจากผลรวมของผลคูณระหว่างต้นทุนการดำเนินงาน (การจัดเก็บขยะพลาสติก/การผลิตเม็ดพลาสติก/การจัดเก็บเม็ดพลาสติก) ของโรงงานรีไซเคิลแต่ละแห่ง กับปริมาณพลาสติกที่โรงงานดำเนินการตามลำดับ 3) ต้นทุนการขนส่งขยะพลาสติกจากแต่ละแหล่งไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก คำนวณจากผลคูณระหว่างต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยด้วยรถบรรทุกกับระยะทางการขนส่ง และจำนวนรอบในการขนส่งขยะพลาสติกซึ่งพิจารณาจากความจุของรถแต่ละประเภท และ 4) ต้นทุนการขนส่งขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงงานรีไซเคิล คำนวณจากผลคูณระหว่างต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยด้วยรถบรรทุก กับระยะทางการขนส่ง และจำนวนรอบในการขนส่งขยะพลาสติกซึ่งพิจารณาจากความจุของรถแต่ละประเภท

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{j=1}^J C_{e_j} S_{e_j} E_j + \sum_{k=1}^K (C_{o_k} S_{o_k} + C_{r_k} S_{r_k} + C_{p_k} S_{p_k}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V C_{t_v} X_{ij} D_{ij} \frac{PD_{ijv}}{TCap_v} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V C_{t_v} Y_{jk} D_{jk} \frac{PE_{jkv}}{TCap_v} \right\} \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$\sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V PD_{ijv} \leq Pld_i \quad ; \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = 1 \quad ; \forall_i \quad (3)$$

สมการ (2) เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณขยะพลาสติกที่ขนส่งไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกต้องไม่เกินปริมาณขยะพลาสติกของแต่ละแหล่งก่อกองขยะนั้นๆ

สมการ (3) ขยะพลาสติกจากแต่ละแหล่งก่อกองขยะใด ๆ สามารถส่งไปยังศูนย์รวบรวมได้แห่งเดียว



$$\sum_{j=1}^J X_{ij} \geq 1 \quad ; \forall_j \quad (4)$$

สมการ (4) ศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกใดๆ สามารถรับขยะพลาสติกได้จากหลายแหล่ง

$$\sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V PD_{ijv} \leq M(E_j) \quad ; \forall_j \quad (5)$$

สมการ (5) เป็นการกำหนดให้ปริมาณขยะพลาสติกทั้งหมดที่ขนส่งจากแหล่งก่อกองขยะไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ไม่เกินจำนวนจริงที่มีค่ามากพอ (Positive Large Number)

$$Se_j = \sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V PD_{ijv} - \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V PE_{jkv} \quad ; \forall_j \quad (6)$$

สมการ (6) สมดุลสินค้าคงคลังขยะพลาสติกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก

$$Se_j \leq EeCap_j(E_j) \quad ; \forall_j \quad (7)$$

สมการ (7) เป็นการประกันว่าปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บต้องไม่เกินขีดความสามารถในการจัดเก็บของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก

$$\sum_{k=1}^K Y_{jk} \geq 1 \quad ; \forall_j \quad (8)$$

สมการ (8) ขยะพลาสติกจากแต่ละศูนย์รวบรวมใดๆ สามารถส่งไปยังโรงงานรีไซเคิลได้หลายแห่ง

$$\sum_{j=1}^J Y_{jk} \geq 1 \quad ; \forall_k \quad (9)$$

สมการ (9) โรงงานรีไซเคิลใดๆ สามารถรับขยะพลาสติกได้จากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกหลายศูนย์

$$So_k = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V PE_{jkv} - Sr_k \quad ; \forall_k \quad (10)$$

สมการ (10) สมดุลสินค้าคงคลังขยะพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล

$$So_k \leq ErCap_k \quad ; \forall_k \quad (11)$$

สมการ (11) เป็นการประกันว่าปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บต้องไม่เกินขีดความสามารถในการจัดเก็บของโรงงานรีไซเคิล

$$\alpha(Sr_k) = PR_k \quad ; \forall_k \quad (12)$$

สมการ (12) ปริมาณเม็ดพลาสติกที่รีไซเคิลได้ต้องเท่ากับปริมาณขยะพลาสติกที่นำเข้าไปรีไซเคิล คุณด้วยอัตราการแปลง

$$PR_k \leq PlCap_k \quad ; \forall_k \quad (13)$$

สมการ (13) เป็นการประกันว่าปริมาณเม็ดพลาสติกที่ผลิตต้องไม่เกินขีดความสามารถในการผลิตของโรงงานรีไซเคิล

$$Sp_k \leq EpCap_k \quad ; \forall_k \quad (14)$$

สมการ (14) เป็นการประกันว่าปริมาณเม็ดพลาสติกที่จัดเก็บต้องไม่เกินขีดความสามารถในการจัดเก็บของโรงงานรีไซเคิล

$$Se_j \geq 0 \quad ; \forall_j \quad (15)$$

$$PR_k, So_k, Sp_k, Sr_k \geq 0 \quad ; \forall_k \quad (16)$$

$$PD_{ijv} \geq 0 \quad ; \forall_i, \forall_j, \forall_v \quad (17)$$

$$PE_{jkv} \geq 0 \quad ; \forall_j, \forall_k, \forall_v \quad (18)$$

สมการ (15-18) ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นจำนวนจริงที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0 (Non-negative)



บทความวิจัย

$$E_j \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall_j \quad (19)$$

สมการ (19) ตัวแปรกำหนดตำแหน่ง โดย เท่ากับ 1 เมื่อศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกถูกจัดตั้งหรือเปิด และ เท่ากับ 0 เมื่อไม่ถูกจัดตั้งหรือไม่เปิด

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall_i, \forall_j \quad (20)$$

สมการที่ (20) ตัวแปรกำหนดการขนส่ง โดย เท่ากับ 1 เมื่อ มีการขนส่งขยะพลาสติกจากแหล่งกักขยะ (อำเภอ) ไปยัง ศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

$$Y_{jk} \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall_j, \forall_k \quad (21)$$

สมการที่ (21) ตัวแปรกำหนดการขนส่ง โดย เท่ากับ 1 เมื่อ มีการขนส่งขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ไปยังโรงงานรีไซเคิล และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้ตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้นกับกรณีศึกษาการรีไซเคิลขยะพลาสติกใน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยปริมาณขยะพลาสติก คำนวณจากข้อมูลการกักขยะพลาสติกในประเทศไทย และอัตราการนำกลับมาใช้ประโยชน์หรือรีไซเคิลคิดเป็น ปริมาณขยะพลาสติกของแหล่งกักขยะเท่ากับ 7.25 กิโลกรัม/คน/ปี [11-12] สำหรับ ต้นทุนการ ดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก คำนวณจาก ค่าเฉลี่ยของต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิล พลาสติก [13] ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของตัวแบบได้ ถูกวิเคราะห์และรวบรวมมาจากหลากหลายแหล่ง ดัง สรุปในตารางที่ 2

4.3 ผลเฉลยของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ แบบการโปรแกรม ไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear

Programming: MINLP) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด สำหรับตัดสินใจเกี่ยวกับการเปิดดำเนินการของศูนย์ รวบรวมขยะพลาสติก รวมถึงการกระจายขยะพลาสติก จากชุมชน (อำเภอ) ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก การกระจายขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ไปยังโรงงานรีไซเคิล และปริมาณการรีไซเคิลเป็นเม็ด พลาสติก ผลเฉลยพบว่า สถานการณ์ K1 ภายใต้ขนาด ตัวแปรทั้งหมด 33,560 ตัวแปร และมีสมการเงื่อนไข หรือข้อจำกัดจำนวน 26,105 สมการ ใช้เวลาในการ ประมวลผล 1 นาที 12 วินาที ดังในรูปที่ 3 มีการ ตัดสินใจเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกทั้งหมด 24 แห่ง กระจายอยู่ทั้งหมด 14 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ นครพนม นครราชสีมา บึงกาฬ บุรีรัมย์ เลย ศรีสะเกษ สกลนคร สุรินทร์ อำนาจเจริญ อุดรธานี และอุบลราชธานี และพบว่าขยะพลาสติกที่ ขนส่งจากแหล่งกักขยะ (อำเภอ) มีปริมาณรวม 159,610,961 กิโลกรัม ขยะพลาสติกที่ขนส่งจากศูนย์ รวบรวมไปยังโรงงานรีไซเคิล มีปริมาณรวม 102,010,961 กิโลกรัม และมีปริมาณการผลิตของ โรงงานรีไซเคิลพลาสติก รวม 20,935,210 กิโลกรัม ผล เฉลยนี้ทำให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติก ต่ำที่สุด เท่ากับ 70.11 ล้านบาท

สถานการณ์ K2 ภายใต้ขนาดตัวแปรทั้งหมด 46,106 ตัวแปร และมีสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัดจำนวน 35,555 สมการ ใช้เวลาในการประมวลผล 2 นาที 21 วินาที ดังในรูปที่ 4 มีการตัดสินใจเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ทั้งหมด 33 แห่ง กระจายอยู่ทั้งหมด 17 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ นครพนม นครราชสีมา บุรีรัมย์ มหาสารคาม มุกดาหาร ยโสธร ร้อยเอ็ด เลย ศรีสะเกษ สกลนคร สุรินทร์ หนองคาย อุดรธานี และ



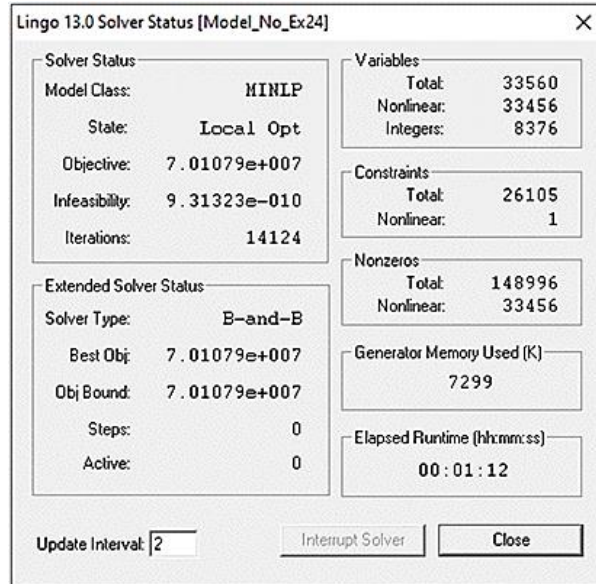
บทความวิจัย

อุปสรรคเหล่านี้ และพบว่าขยะพลาสติกที่ขนส่งจากแหล่งก่อขยะ (อำเภอ) มีปริมาณรวม 159,610,961 กิโลกรัม ขยะพลาสติกที่ขนส่งจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงงานรีไซเคิล มีปริมาณรวม 80,410,961 กิโลกรัม และมีปริมาณการผลิต

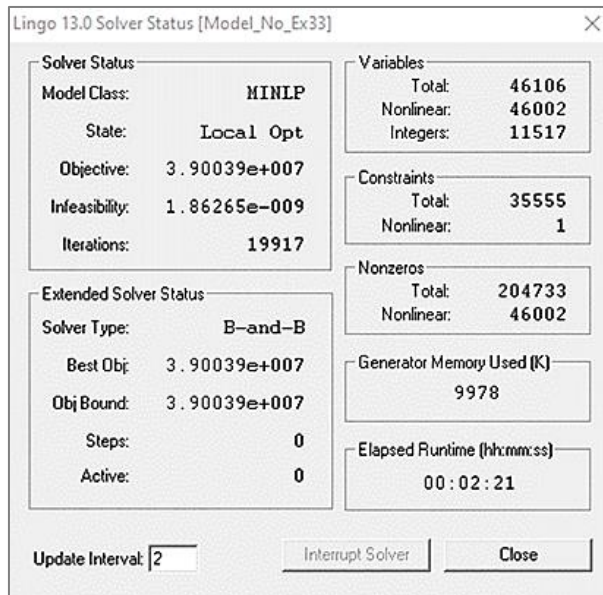
ของโรงงานรีไซเคิลพลาสติก รวม 13,159,210 กิโลกรัม ผลเฉลยดังกล่าวทำให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด เท่ากับ 39.01 ล้านบาท

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย	แหล่งที่มา
ปริมาณขยะพลาสติกของแหล่งก่อขยะ	7.25	กิโลกรัม/คน/ปี	กรีนพีซ ประเทศไทย [11] และ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [12]
ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก	0.06	บาท/กิโลกรัม	คำนวณค่าเฉลี่ยจากต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการจัดเก็บขยะพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล	0.03 – 0.09	บาท/กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการผลิตของโรงงานรีไซเคิล	0.50 – 1.50	บาท/กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการจัดเก็บเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล	0.17 – 0.52	บาท/กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการขนส่งทางถนน	11 – 22.5	บาท/กิโลเมตร	บริษัท จิซทิกซ์ จำกัด [15]
ระยะทางจากแหล่งก่อขยะไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก	4.1 – 721.8	กิโลเมตร	คำนวณด้วยวิธี Euclidean Distance
ระยะทางระหว่างศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกไปยังโรงงานรีไซเคิล	9.9 – 674.3	กิโลเมตร	คำนวณด้วยวิธี Euclidean Distance
กำลังการผลิตเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล	143,000 – 14,950,000	กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก	2,400,000	กิโลกรัม	คำนวณค่าเฉลี่ยของขีดความสามารถของโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของโรงงานรีไซเคิล	105,600 – 11,040,000	กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ขีดความสามารถในการจัดเก็บเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของโรงงาน	7,920 – 828,000	กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ความจุสูงสุดของรถบรรทุกประเภท	1,000 – 14,000	กิโลกรัม	บริษัท จิซทิกซ์ จำกัด [15]
อัตราการแปลงขยะพลาสติกเป็นเม็ดพลาสติก	0.36	กิโลกรัม	ข้อมูลจากโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]



รูปที่ 3 สรุปการประมวลผลด้วยโปรแกรม LINGO
สำหรับสถานการณ์ K1



รูปที่ 4 สรุปการประมวลผลด้วยโปรแกรม LINGO
สำหรับสถานการณ์ K2



สำหรับสถานการณ์ K3 ที่มีตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกมากถึง 60 แห่ง ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยใช้เวลารวมถึง 48 ชั่วโมง แต่ยังไม่สามารถประมวลผลได้ด้วยตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้นได้

4.4 ผลเฉลยจากการวิเคราะห์ความไว

จากข้อจำกัดในการประมวลผลของสถานการณ์ K3 ผู้วิจัยได้ออกแบบการวิจัยเพิ่มเติม ด้วยการวิเคราะห์ความไวแบบการวิเคราะห์ภายหลังการหาค่าที่เหมาะสม (Post Optimality Analysis) หรือ การโปรแกรมพารามेटริก (Parametric Programming) หรือการวิเคราะห์ความเหมาะสม (Optimality Analysis) ซึ่งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความไว โดยพยายามตั้งคำถามและหาคำตอบในลักษณะ “จะเกิดอะไรขึ้นถ้า...? (What-if?)”

โดยกำหนดช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solutions) หรือมีผลต่อค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) [16] แนวทางดังกล่าวนี้สอดคล้องกับแนวทางในการกำหนดสถานการณ์สำหรับการวิเคราะห์ความไวของตัวแบบในผลงานวิจัยของ Keles and Pekkaya [17] และของ Koohathongsumrit and Meethom [18] สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ 2 ตัว คือ จำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เพื่อหาผลเฉลยของสถานการณ์วิเคราะห์ความไว K4 ถึง K10 ภายใต้วัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์และผลการประมวลด้วยโปรแกรม LINGO 13.0 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลสถานการณ์สำหรับการวิเคราะห์ความไว

สถานการณ์ (Scenario)	ความจุของศูนย์รวบรวม (ล้าน กก.)	จำนวนศูนย์รวบรวมจาก Clustering	เวลาในการประมวลผล (วินาที)	จำนวนศูนย์รวบรวมที่เปิด	ต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด (ล้านบาท)	หมายเหตุ
K1	2.4	24	72	24	70.11	
K2	2.4	33	141	33	39.01	
K3	2.4	60	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.
K4	2.4	40	206	40	19.20	
K5	2.4	48	276	48	10.75	
K6	3.0	33	164	33	17.88	
K7	3.0	40	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.
K8	3.5	33	156	33	10.62	
K9	3.5	40	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.
K10	3.5	50	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.



บทความวิจัย

สำหรับสถานการณ์ K4 ซึ่งมีความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก 2.4 ล้านกิโลกรัม เท่าเดิม และมีจำนวนศูนย์รวบรวมทางเลือกจากการจัดกลุ่ม 40 แห่ง พบว่า มีการเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ทั้ง 40 แห่ง เนื่องจากปริมาณขยะพลาสติกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอยู่มาก และมีต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด เท่ากับ 19.20 ล้านบาท ภายใต้ขนาดตัวแปรทั้งหมด 55,864 ตัว และมีสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัดจำนวน 42,905 สมการ ใช้เวลาในการประมวลผล 3 นาที 26 วินาที ทั้งนี้หากเพิ่มความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกและจำนวนของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก จะทำให้มีต้นทุนโดยรวมลดลง แต่ถ้าหากเพิ่มมากเกินไปจนกลายเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาเกินที่จะหาคำตอบได้ด้วยตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้น

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการปรับจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 แห่ง แต่ความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกยังคงเดิม เท่ากับ 2.4 ล้านตัน (สถานการณ์ K5) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์และทราบถึงขีดจำกัดของตัวแบบที่เสนอ พบว่า ขีดจำกัดของตัวแบบที่เสนอ จะมีจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เท่ากับ 48 แห่ง มีต้นทุนรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด เท่ากับ 10.75 ล้านบาท ภายใต้ขนาดตัวแปรทั้งหมด 67,016 ตัว และมีสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัด จำนวน 51,305 สมการ ใช้เวลาในการประมวลผลตัวแบบ 4 นาที 36 วินาที ดังรายละเอียดในตารางที่ 3

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการจัดกลุ่ม (Clustering) 2 วิธี คือ การจัดกลุ่มแบบขั้นตอน (Hierarchical Clustering) ตามด้วยการจัดกลุ่มแบบเคมีน (K-means

Clustering) ในการหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear Programming: MINLP) สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด พบว่า ภายใต้ขอบเขตปัญหาเดียวกันเกี่ยวกับปริมาณขยะพลาสติกของทั้งภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับสถานการณ์ขนาดเล็กที่มีจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกทางเลือกจำนวนไม่มาก ดังสถานการณ์ K1, K2, K4, K5, K6 และ K8 นั้น ตัวแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solutions) ได้ในเวลารวดเร็ว ส่วนกรณีที่มีการกำหนดจำนวนทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกจำนวนมากขึ้นดังสถานการณ์ K3, K7, K9 และ K10 ซึ่งเป็นสถานการณ์ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ผู้วิจัยได้ทดสอบการประมวลผลของทั้ง 4 สถานการณ์ โดยใช้เวลาถึง 48 ชั่วโมง แต่ยังไม่สามารถประมวลผลได้ด้วยตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากตัวแบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MINLP) เป็นตัวแบบที่มีอย่างน้อยหนึ่งนิพจน์ไม่เป็นเชิงเส้นและเซตย่อยของตัวแปรมีข้อจำกัดเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งโดยทั่วไปถือว่าเป็นประเภทตัวแบบที่ใช้หาผลเฉลยได้สำหรับปัญหาขนาดเล็ก แต่จะหาผลเฉลยได้ยากมากสำหรับกรณีปัญหาขนาดใหญ่ [19] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ines Soares และคณะ [9] ที่แนะนำให้ใช้วิธีการเมตาฮีริสติกแบบไฮบริดในการจัดการกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่

ทั้งนี้ในการใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MINLP) มาวางแผนตัดสินใจกำหนดตำแหน่งที่ตั้งศูนย์รวบรวม



บทความวิจัย

ขยะพลาสติก รวมถึงการกระจายขยะพลาสติกในระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด เป็นตัวแบบที่มีตัวแปรตัดสินใจทั้งแบบเป็นค่าปริมาณต่อเนื่องและค่าเป็นจำนวนเต็มแบบ Binary ซึ่งเป็นแนวทางในการวางแผนตัดสินใจกำหนดตำแหน่งที่ตั้งและเปิดดำเนินการสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการผลิต สอดคล้องกับงานวิจัยของ เสกสรร สุธรรมานนท์ [4] ที่ศึกษากระบวนการขนส่งในโลจิสติกส์ย้อนกลับของขยะคอมพิวเตอร์ในจังหวัดสงขลา โดยประยุกต์ใช้ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (ILP) เพื่อให้ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งต่ำที่สุด และงานวิจัยของ Schultmann และคณะ [5] ที่ประยุกต์ใช้ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MILP) ในระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ กรณีศึกษาการวางเครือข่ายและการหาทำเลที่ตั้งของโรงงานเพื่อการรีไซเคิลแบตเตอรี่เก่าที่หมดอายุการใช้งานแล้วในเยอรมนี รวมถึงงานวิจัยของ Vaidyanathan และคณะ [6] ที่วิเคราะห์โครงข่ายโลจิสติกส์สำหรับโรงงานซึ่งทำการผลิตซ้ำในสหรัฐอเมริกา โดยสร้างตัวแบบ MILP เพื่อตัดสินใจกำหนดจำนวนและที่ตั้งของโรงงาน

จากผลการวิจัยครั้งนี้จึงมีข้อเสนอแนะได้ว่า ควรมีการกำหนดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เพื่อรวบรวมและคัดแยกขยะพลาสติกที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ และทำให้ประหยัดต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกสำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งมีพื้นที่มากและมีขยะพลาสติกปริมาณมากกระจายอยู่ในอำเภอต่างๆ ทั้งนี้ในการพัฒนาวิจัยต่อไปสามารถพิจารณาถึงช่วงของโซ่อุปทานเกี่ยวกับการจำหน่ายเม็ดพลาสติกรีไซเคิลทั้งในและต่างประเทศ และอาจขยายขอบเขตจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นทั้งประเทศเพื่อเป็น

แนวทางในการจัดการขยะพลาสติกในภาพรวมของประเทศ รวมทั้งกรณีที่ชุมชนแหล่งก่อขยะพลาสติก (อำเภอ) อยู่ใกล้กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก สามารถกำหนดให้มีการตัดสินใจขนส่งตรงไปยังโรงงานรีไซเคิลโดยไม่ต้องผ่านศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกได้ โดยกำหนดเงื่อนไขว่าโรงงานจะต้องมีการคัดแยกขยะพลาสติก ก่อนนำเข้ากระบวนการรีไซเคิล และกรณีปัญหาที่มีขนาดใหญ่มากและใช้เวลานานในการประมวลผล สามารถประยุกต์ใช้เมตาฮีริสติกในการแก้ไขปัญหา เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (GA) วิธีวิวัฒนาการผลต่าง (DE) หรือวิธีการอื่น ๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2564 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยระบบโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม LINGO 13.0 ในการประมวลผลข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2565>. (Accessed on 31 August 2023)
- [2] S. Somsri, Reverse logistics design for plastic recycling in Thailand, A case study, Thesis, Thammasat University, 2010.
- [3] S.K. Srivastava, Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review, International Journal of Management Reviews, 2007, 9(1), 53-80.



- [4] S. Suthummanon, N. Sirivongpaisal, L. Treranuwat and S. Kongkang, A study of transportation system in reverse logistics for computer wastes in songkhla, *KKU Research Journal*, 2013, 18(4), 628-641. (in Thai)
- [5] F. Schultmann, B. Engels and O. Rentz, Closed-loop supply chains for spent batteries, *Interfaces*, 2003, 33(6), 57-71.
- [6] V. Jayaraman, V. Guide and R. Srivastava, A closed-loop logistics model for remanufacturing, *Journal of the Operational Research Society*, 1999, 50(5), 497-508.
- [7] M. Mokhtarzadeh, R. Tavakkoli-Moghaddam, C. Triki and Y. Rahimi, A hybrid of clustering and meta-heuristic algorithms to solve a p-mobile hub location–allocation problem with the depreciation cost of hub facilities, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 98, 104-121.
- [8] A. Aghsami, S.R. Abazari, A. Bakhshi, M.A. Yazdani, S. Jolai and F. Jolai, A meta-heuristic optimization for a novel mathematical model for minimizing costs and maximizing donor satisfaction in blood supply chains with finite capacity queueing systems, *Healthcare Analytics*, 2023, 3, 100-136.
- [9] I. Soares, M.J. Alves and C.H. Antunes, A deterministic bounding algorithm vs. a hybrid meta-heuristic to deal with a bilevel mixed-integer nonlinear optimization model for electricity dynamic pricing, *Computers and Operations Research*, 2023, 155, 106-195.
- [10] Lingo, Lingo 13 User's manual version 13.0., LINDO System Inc., IL, USA, 2012.
- [11] <https://www.greenpeace.org/thailand/story/18232/plastic-challenge-to-combat-plastic-pollution-in-thailand/>. (Accessed on 30 October 2021)
- [12] <https://www.onep.go.th/plastic-waste/> (Accessed on 15 October 2022)
- [13] Khon Kaen University, Project to increase efficiency and productivity with technology and innovation, intelligent systems, monitoring and monitoring the operation of machines (Machine Monitoring System), Industrial Promotion Center Region 5, Fiscal Year 2018, 2019. (in Thai)
- [14] <http://plastic.oie.go.th/Directory.aspx>. (Accessed on 20 January 2020)
- [15] <https://giztix.com/pricing>. (Accessed on 26 March 2022)
- [16] B. Render, R. Stair and M.E. Hanna, Quantitative analysis for management, Prentice Hall, NJ, USA, 2012.



- [17] N. Keles and M. Pekkaya, Evaluation of logistics centers in terms of sustainability via MCDM methods, *Journal of Advances in Management Research*, 2023, 20(2), 291-309.
- [18] N. Koohathongsumrit and W. Meethom, A fuzzy decision-making framework for route selection in multimodal transportation networks, *Engineering Management Journal*, 2022, 34(4), 689-704.
- [19] Lingo, The modeling language and optimizer, LINDO Systems, Inc., IL, USA, 2018.

อิทธิพลของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและการกระจายตัวของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในอาคารจอดรถใต้ดิน

อรรถพร ประชาบุรุษ¹ และ ปราบรณ ประชาบุรุษ^{2*}

¹ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์, โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pradthanap@j.swu.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 ตุลาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 15 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 27 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} และ PM₁₀ ที่เกิดขึ้นจากยานพาหนะภายในบริเวณพื้นที่จอดรถใต้ดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยได้ทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในบริเวณชั้นใต้ดิน 1 (ชั้นใต้ดิน A) และชั้นใต้ดิน 2 (ชั้นใต้ดิน B) ในช่วงวันจันทร์ถึงวันศุกร์ นอกจากนี้ยังได้เก็บข้อมูลปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM₁₀ อยู่ในช่วง 156.3-225.4 µg/m³ ส่วนปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 15.5-45.9 µg/m³ โดยในบางจุดตรวจวัดมีค่าเกินค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศ ซึ่งปริมาณฝุ่นละอองทั้งสองชนิดนี้จะเกิดขึ้นมากในช่วง 06.00-07.00 น. และจะค่อยๆ ลดลงแล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลา 15.00-18.00 น. จุดที่สามารถวัดปริมาณฝุ่นละอองได้มากจะเป็นบริเวณทางเข้า-ออกทางด้านโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) และบางบริเวณที่ระบบระบายอากาศทำงานไม่ทั่วถึง จากการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศของระบบระบายอากาศภายในอาคารจอดรถทั้ง 36 จุดในแต่ละชั้น พบว่าปริมาณอากาศที่สามารถระบายอากาศออกได้จริงไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับการคำนวณ จึงได้เสนอแนวทางแก้ไขระยะสั้น คือ ให้ผู้ที่ทำงานอยู่ในบริเวณพื้นที่อาคารจอดรถใต้ดินมีอุปกรณ์ป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็ก ส่วนแนวทางแก้ไขระยะยาว คือ เสนอให้มีการฉีดพ่นหมอกละอองน้ำใน 2 ช่วงเวลาเร่งด่วนที่มีการจราจรคับคั่ง และเสนอให้มีการติดตั้งพัดลมเป็นจุด ๆ บริเวณภายในอาคารจอดรถใต้ดิน เพื่อช่วยให้มีการไหลเวียนของอากาศได้ดียิ่งขึ้น พร้อมทั้งเสนอให้มีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการระบายอากาศออกได้เพียงพอ

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก; PM_{2.5}; PM₁₀; ยานพาหนะ; อาคารจอดรถใต้ดิน

Influence of Meteorological factors and Distribution of Particulate Matter at Underground Parking

Akaporn Prachanurak¹ and Pradthana Prachanurak^{2*}

¹ Department of Mathematics and Computer Science, Chulachomkiao Royal Military Academy

² Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

* Corresponding author, E-mail: pradthanap@g.swu.ac.th

Received: 4 October 2023; Revised: 15 February 2024; Accepted: 27 February 2024

Online Published: 25 April 2024

Abstract: This research focused on studying the amount of fine particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) generated from vehicle emissions at the underground parking area in Srinakharinwirot University. The methodology was performed by measuring the amount of particulate matter in underground basement 1 (floor A) and underground basement 2 (floor B) from Monday to Friday. Moreover, environmental factors, such as, humidity and temperature were measured. The result found that the average concentration of PM₁₀ ranged from 156.3-225.4 µg/m³, while PM_{2.5} ranged from 15.5-45.9 µg/m³. At some measurement points, the values exceeded the Air Quality standards. Both particulate matter types were found to be highest between 6.00-7.00 am and gradually decreased and increased again at 3.00-6.00 pm, respectively. The high particulate matter concentrations were identified at the entrances and exits near the demonstration school (Prasanmit) and some areas where the air circulation system was inadequate. The wind speed measurement at the air vents of the ventilation system inside the underground parking area all 36 points per floor revealed insufficient air volume compared to the calculated requirements. Short-term solutions proposed include providing dust protection equipment for individuals working in the underground parking area. Long-term solutions involve implementing urgent mist spraying during heavy traffic hours and installing fans at specific points within the underground parking facility to enhance air circulation. Additionally, the installation of additional exhaust fans to improve overall air ventilation efficiency is recommended.

Keywords: particulate matter; PM_{2.5}; PM₁₀; vehicle; underground parking



1. บทนำ

อนุภาคฝุ่นละออง (Particulate Matter; PM) เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่ประกอบด้วยสารต่าง ๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์หลายชนิด โลหะหนัก และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAH) โดยสารประกอบเหล่านี้บางชนิดถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาค การจำแนกประเภทของฝุ่นละอองจะแบ่งตามขนาดอนุภาคฝุ่นโดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง ดังนี้ (1) อนุภาคฝุ่นทั้งหมด (Total Suspended Particulate; TSP) เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน (2) อนุภาคฝุ่นหายใจที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM₁₀ และ 3) อนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) [1]

แหล่งที่มาของฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปมีมาจาก 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ (1) ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านตามธรรมชาติ ทำให้เกิดฝุ่น และ (2) ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การคมนาคมขนส่ง โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น [2] โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ทำให้เกิดอาการระคายเคืองตาและเกิดอันตรายต่อระบบหายใจ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM₁₀ และ PM_{2.5} ที่สามารถเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ ทำให้การทำงานของปอดเสื่อมลง เกิดการระคายเคืองเรื้อรังจนเป็นพังผืด และมีความเสี่ยงเป็นมะเร็งของระบบทางเดินหายใจ [3]

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากรในเมืองใหญ่ส่งผลให้ปริมาณยานพาหนะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งมักจะประสบปัญหาที่จอดรถเนื่องจากที่ดินมีราคาแพง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสร้างอาคารจอดรถใต้ดินเพื่อประหยัดพื้นที่ จากผลการศึกษาของ He และคณะ [4]

พบว่าจำนวนรถยนต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้มีการนิยมก่อสร้างที่จอดรถใต้ดินสำหรับการอยู่อาศัยที่สร้างขึ้นใหม่ เนื่องจากความต้องการพื้นที่จอดรถในปัจจุบันที่เพิ่มมากขึ้นและที่ดินมีราคาแพง จากผลการศึกษาของ Liu และคณะ [5] พบว่า อาคารจอดรถใต้ดินส่วนใหญ่ มักนิยมใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่ต่ำ ดังนั้นมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก มลพิษอื่น ๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (VOCs) ฯลฯ จึงส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ เช่น รถยก. แม่บ้าน หรือผู้เข้ามาใช้บริการ เป็นต้น

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ทำการศึกษาระดับอนุภาคขนาดเล็ก PM_{2.5} และ PM₁₀ ที่เกิดขึ้นจากยานพาหนะภายในบริเวณอาคารจอดรถใต้ดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) จังหวัดกรุงเทพมหานครเทียบกับมาตรฐานคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ที่กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ในบรรยากาศโดยทั่วไป ให้ค่าเฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง จะต้องไม่เกิน 37.5 µg/m³ [6] นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศของระบบระบายอากาศภายในอาคารจอดรถ เนื่องจากพื้นที่อาคารจอดรถใต้ดินเป็นแบบอาคารใต้ดินสองชั้นแบบปิด ซึ่งอาจมีบางบริเวณที่มีการระบายอากาศไม่ทั่วถึง โดยจากการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ทราบปริมาณของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากยานพาหนะที่เข้ามาใช้บริการ บริเวณที่มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กสูง ช่วงเวลาที่มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กสูง และระบบดูดอากาศภายในอาคารจอดรถในปัจจุบันเพียงพอหรือไม่ เพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์และเสนอแนะแนวทาง



บทความวิจัย

เบื้องต้นในการแก้ปัญหาที่เกิดจากผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็ก และลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้บริการในบริเวณนั้น

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

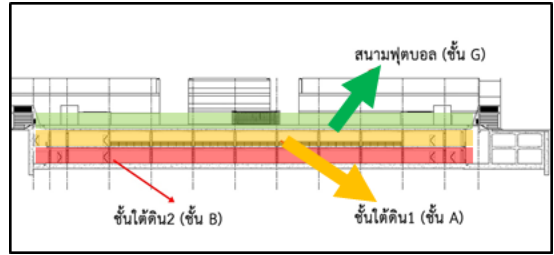
2.1 สถานที่เก็บตัวอย่างและจุดเก็บตัวอย่าง

อาคารจอดรถใต้ดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นอาคารจอดรถใต้ดิน 2 ชั้น และอาศัยเครื่องดูดอากาศในการระบายอากาศออกข้างนอก ส่วนด้านบนสุดของอาคารจอดรถเป็นสนามฟุตบอล (ชั้น G) ในการเก็บข้อมูล แบ่งการเก็บข้อมูลเป็น 2 ชั้น คือ บริเวณชั้นใต้ดิน 1 (ชั้นใต้ดิน A) และชั้นใต้ดิน 2 (ชั้นใต้ดิน B) แสดงในรูปแบบที่ 1

ในการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กได้กำหนดจุดตรวจวัดชั้นใต้ดิน A จำนวน 8 จุด ดังรูปที่ 2 เนื่องจากชั้นใต้ดิน A มีทางเข้าออกที่มาจากภายนอกทั้งหมด 4 ทาง รอบอาคารจอดรถ และทางลงไปชั้นใต้ดิน B อีก 2 ทาง รวมเป็น 6 ทาง

ส่วนชั้นใต้ดิน B มีจุดตรวจวัดจำนวน 6 จุด ดังรูปที่ 3 เนื่องจากชั้นใต้ดิน B มีทางเข้าออกเพียง 2 ทาง ที่เป็นทางลงมาจากชั้นใต้ดิน A

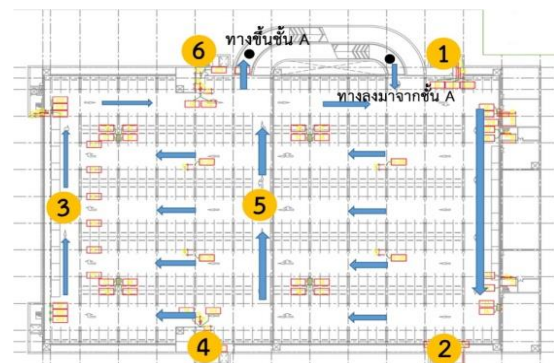
ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจะทำการเก็บข้อมูลจำนวนยานพาหนะ และปริมาณฝุ่นในวันและเวลาปกติ คือเฉพาะวันจันทร์-วันศุกร์ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 6.00-18.00 น. โดยจะทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นและปัจจัยอื่น ได้แก่ ความเร็วลม ความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิเฉลี่ย แยกเป็นในช่วงโมงเร่งด่วนที่มีปริมาณยานพาหนะจำนวนมาก ได้แก่ ช่วงเวลา 6.00-8.00 น. และ 15.00-18.00 น. จะทำการตรวจวัดทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ส่วนในช่วงเวลา 8.00-15.00 น. จะทำการตรวจวัดทุกชั่วโมง และเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด



รูปที่ 1 แผนผังด้านข้าง (cross section) ของอาคารจอดรถใต้ดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



รูปที่ 2 แผนผังทิศทางเดินรถของลานจอดรถชั้นใต้ดิน A และจุดตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก



รูปที่ 3 แผนผังทิศทางเดินรถของลานจอดรถชั้นใต้ดิน B และจุดตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก



บทความวิจัย

เป็นเครื่องมือวัดภาคสนามจะใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างจุดละประมาณ 2-3 นาที (ทำการวัด 3 ครั้ง) ในการเก็บแต่ละวันจะทำการเก็บตัวอย่างที่ชั้นใต้ดิน A ก่อน (8 จุด) แล้วจึงเก็บตัวอย่างที่ชั้นใต้ดิน B (6 จุด) ตามลำดับ

ในการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศของระบบระบายอากาศภายในอาคารจอดรถ ได้กำหนดจุดตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B จำนวน 36 จุดต่อชั้น จากการสำรวจพบว่าในแต่ละชั้นมีพัดลมดูดอากาศจำนวน 4 ตัว (a, b, c, d) โดยแต่ละตัวจะต่อท่อดูดอากาศแยกเป็น 3 ท่อ ซึ่งในแต่ละท่อจะประกอบด้วยช่องดูดอากาศท่อละ 3 ช่อง ดังรูปที่ 4 และในการตรวจวัดแต่ละช่องดูดอากาศจะทำการตรวจวัด 3 ครั้ง

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดประกอบด้วย เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก

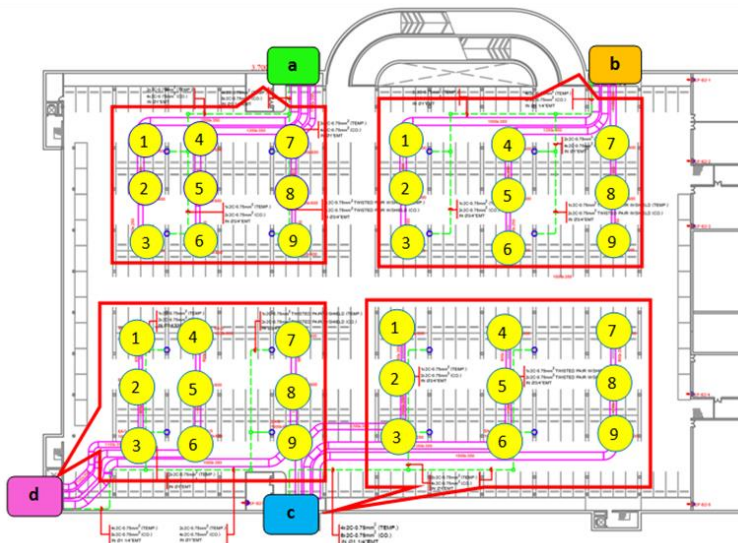
ยี่ห้อ Met One รุ่น Aerocet 831 เครื่องวัดความเร็วลมยี่ห้อ KIMO รุ่น VT210 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศยี่ห้อ KIMO รุ่น HD200

2.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องระบายออก

การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องระบายออกของแต่ละช่องดูดอากาศในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B ได้ทำการแบ่งพื้นที่เพื่อคำนวณปริมาณอากาศที่ไหลผ่านปากช่องลมในแต่ละช่องดูดอากาศเป็น 36 พื้นที่ย่อยแล้วนำไปคำนวณ โดยใช้สมการที่ 1

$$Q_{air} = Volume \times 35.28 \times ACH \times \frac{1}{60} \quad (1)$$

เมื่อ Q_{air} คือ ปริมาณอากาศที่ต้องการระบายออก (ft³/min หรือ CFM), $Volume$ คือ ปริมาตรอากาศภายในจุดที่ต้องการระบาย (m³), ACH คือ จำนวน Air Changes/hr. โดยค่า ACH ของอาคารจอดรถใต้ดินใช้ค่าเท่ากับ 10 [7]



รูปที่ 4 จุดตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศของระบบระบายอากาศในชั้นใต้ดิน A และ B



บทความวิจัย

ส่วนปริมาณอากาศที่ไหลผ่านช่องดูดอากาศแต่ละช่องที่ตรวจวัดได้ โดยการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศของระบบระบายอากาศภายในอาคารจอตลอดในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B (รูปที่ 4) แล้วนำไปคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2 เพื่อหาปริมาณอากาศที่ไหลผ่านช่องดูดอากาศแต่ละช่องที่ตรวจวัดได้

$$Q_{air} = V_{hood} \times A_{hood} \quad (2)$$

เมื่อ V_{hood} คือ ความเร็วในการพาวด์ได้ที่ปากช่องลม (Hood Face Velocity) โดยเครื่องวัดความเร็วลม (m/s), A_{hood} คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องลม (m^2), Q_{air} คือ ปริมาณอากาศที่ไหลผ่านปากช่องลม (m^3/s)

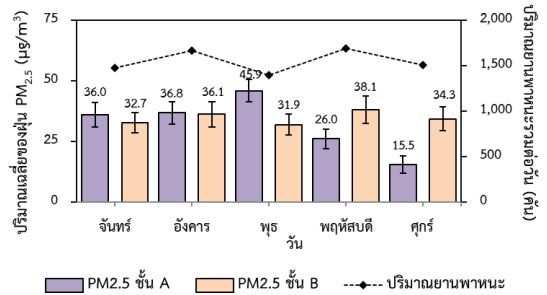
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในแต่ละจุด บริเวณชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B ของอาคารจอตลอดใต้ดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในวันจันทร์ถึงวันศุกร์ ตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. สามารถวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

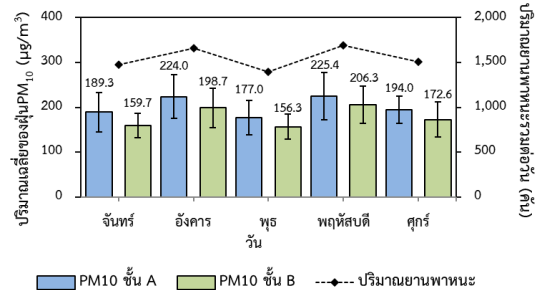
3.1 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยในแต่ละวัน

ตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูลทั้ง 5 วัน พบว่าบริเวณชั้นใต้ดิน A และ B มีปริมาณฝุ่นละอองขนาด $PM_{2.5}$ เฉลี่ย $32.4 \pm 4.4 \mu g/m^3$ และ $34.6 \pm 2.3 \mu g/m^3$ ตามลำดับ (รูปที่ 5) ส่วนปริมาณฝุ่นละอองขนาด PM_{10} บริเวณชั้นใต้ดิน A และ B เฉลี่ย $201.9 \pm 43.0 \mu g/m^3$ และ $178.7 \pm 20.3 \mu g/m^3$ ตามลำดับ (รูปที่ 6) จากการเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้กับปริมาณจราจรที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน พบว่าปริมาณยานพาหนะเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของฝุ่นละอองทั้งสองขนาด โดยปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยานพาหนะที่เข้ามาใช้บริการภายใน

อาคารจอตลอดส่งผลให้ค่าฝุ่นละอองทั้งสองประเภทที่ตรวจวัดได้มีค่าที่สูง จากข้อมูลการตรวจวัดฝุ่นละอองที่ได้ จะพบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาด $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ที่ตรวจวัดได้มีค่าที่สูงในวันอังคาร และวันพฤหัสบดี มากกว่าในวันอื่นๆ โดยพบว่าตลอดทั้งวันมียานพาหนะเข้ามาใช้บริการรวม 1,663 และ 1,691 คัน ตามลำดับ เนื่องจากเป็นวันที่มีการจัดตลาดนัดในพื้นที่มหาวิทยาลัย จึงมียานพาหนะเข้ามาใช้บริการลานจอตลอดใต้ดินจำนวนมาก ทั้งบุคคลภายนอกมหาวิทยาลัย เช่น ผู้ที่มาค้าขาย และยังมีบุคคลภายในมหาวิทยาลัย เช่น นิสิต อาจารย์และเจ้าหน้าที่



รูปที่ 5 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่ตรวจวัดได้ในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B



รูปที่ 6 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM_{10} ที่ตรวจวัดได้ในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B



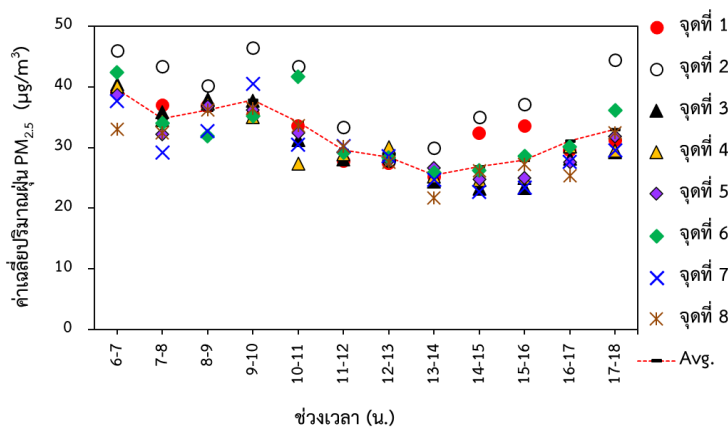
บทความวิจัย

จากการศึกษาของ Bai และคณะ [8] พบว่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ตรวจวัดได้ในอาคารจอดรถใต้ดินหลาย ๆ แห่ง นอกจากจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรถที่เข้ามาภายในอาคารจอดรถแล้ว ยังเพิ่มขึ้นตามประเภทยานพาหนะและความจุของยานพาหนะอย่างน้อยสำคัญเนื่องจากยานพาหนะแต่ละประเภทจะมีจำนวนผู้โดยสารที่บรรจุในรถไม่เท่ากัน ยานพาหนะที่มีความจุของผู้โดยสารสูง เช่น รถซีดาน และรถ SUV มีส่วนทำให้ความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ภายในลานจอดรถมากที่สุด อีกทั้งยังพบว่าในรถรุ่นเก่า ๆ จะปล่อยมลภาวะทางอากาศ เช่น เขม่า ฝุ่นละอองขนาดเล็ก เป็นต้น เพิ่มมากกว่ารถยนต์รุ่นใหม่ ๆ เนื่องจากในรถรุ่นเก่า ระบบการสันดาปเครื่องยนต์ไม่ดี ทำให้เกิดการปล่อยมลพิษออกมามากกว่า

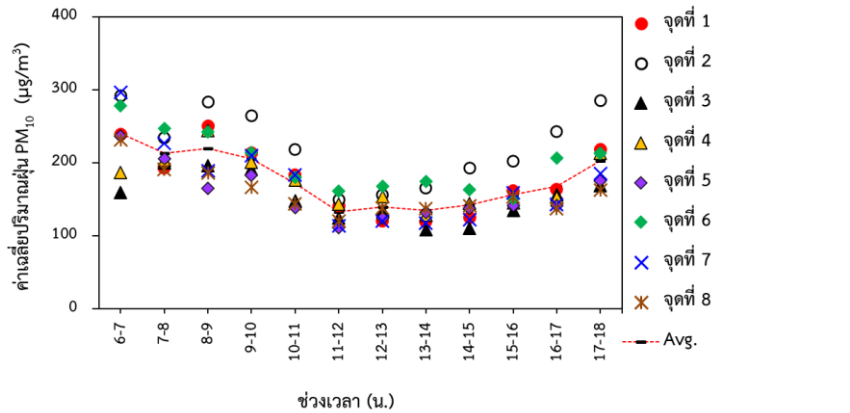
3.2 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา

ในการเก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองขนาด $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ได้นำค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลทั้ง 5 วันมาเฉลี่ย โดยแบ่งเป็นรายชั่วโมงตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น.

ผลการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นใต้ดิน A (รูปที่ 7 และรูปที่ 8) พบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ตรวจวัดได้จะมีค่ามากในช่วงเช้าตั้งแต่เวลา 06.00-10.00 น. โดยในช่วง 06.00-07.00 น. พบว่ามีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมากที่สุดคือมีปริมาณ $PM_{2.5}$ เฉลี่ย $39.7 \pm 3.5 \mu g/m^3$ และมีปริมาณ PM_{10} เฉลี่ย $240.1 \pm 45.7 \mu g/m^3$ หลังจากเวลา 10.00 น. ปริมาณฝุ่นละอองที่ตรวจวัดได้จะมีค่าลดลงและจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลาตั้งแต่ 15.00 น. เป็นต้นไปจนถึงเวลา 18.00 น. เนื่องจากในช่วงเช้าเป็นช่วงเวลาที่มียุโรปการมาส่งนักเรียนที่เรียนอยู่โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยใช้เส้นทางสัญจรภายในอาคารจอดรถใต้ดิน เป็นทางผ่านรวมถึงบุคลากรและนิสิตของทางมหาวิทยาลัยที่เดินทางมาเพื่อทำการสอน การเรียนหรือทำงานจึงทำให้ในช่วงนี้มีปริมาณฝุ่นละอองเกิดขึ้นในปริมาณมาก ส่วนในเวลาเย็นเป็นเวลาที่มีผู้ปกครองเดินทางมารับบุตรหลานกลับ และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเลิกงาน จึงทำให้ตรวจวัดค่าฝุ่นละอองได้ปริมาณที่สูงขึ้นเช่นกัน



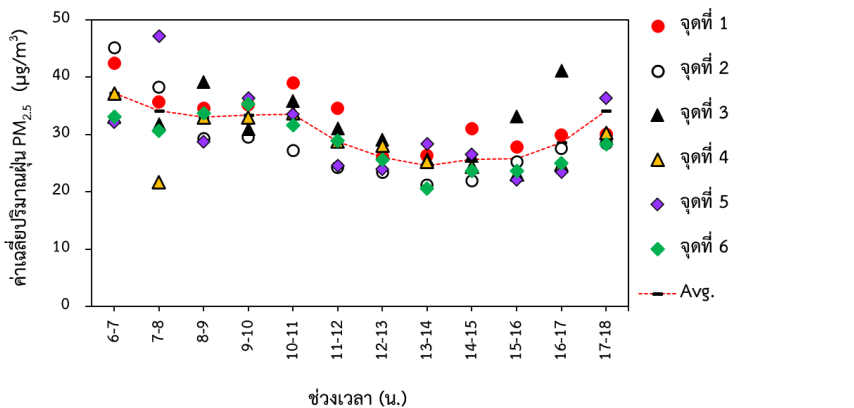
รูปที่ 7 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่ตรวจวัดได้แต่ละช่วงเวลาในชั้นใต้ดิน A



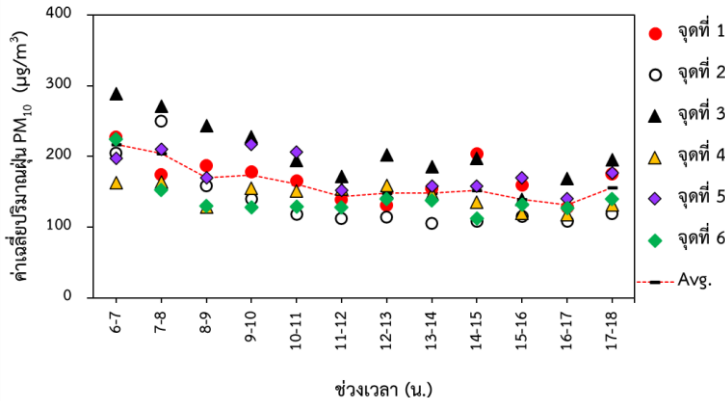
รูปที่ 8 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM₁₀ ที่ตรวจวัดได้แต่ละช่วงเวลาในชั้นใต้ดิน A

ส่วนในชั้นใต้ดิน B (รูปที่ 9 และรูปที่ 10) พบว่า ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ตรวจวัดได้จะมีค่า เป็นไปในทิศทางที่คล้ายกับชั้นใต้ดิน A คือมีปริมาณ มากในช่วงเช้าแล้วค่อยๆ ลดลงและเพิ่มขึ้นในช่วงเย็น โดยพบว่ามีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} และ PM₁₀ มากที่สุดในช่วง 06.00-07.00 น. โดยมีค่าเฉลี่ย 37.2±13.6 µg/m³ และ 217.3±75.9 µg/m³ ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Liu และคณะ [9] พบว่า ในช่วง

ชั่วโมงเร่งด่วนของวันทำงาน จะตรวจวัดปริมาณฝุ่น ละอองขนาดเล็กได้มากกว่าช่วงเวลาอื่น และยังพบว่า ระดับความเข้มข้นของ PM₁₀ จะขึ้นอยู่กับปริมาณ ความหนาแน่นยานพาหนะที่เข้าออกพื้นที่โรงจอดรถ เป็นหลัก ส่วนระดับความเข้มข้นของ PM_{2.5} นอกจาก จะขึ้นอยู่กับปริมาณยานพาหนะแล้วคุณภาพของ อากาศโดยรอบพื้นที่ยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความ เข้มข้นของ PM_{2.5} ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 9 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM_{2.5} ที่ตรวจวัดได้แต่ละช่วงเวลาในชั้นใต้ดิน B



รูปที่ 10 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM₁₀ ที่ตรวจวัดได้แต่ละช่วงเวลาในชั้นใต้ดิน B

3.3 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยในแต่ละจุดตรวจวัด

ในการวิเคราะห์ส่วนนี้ได้นำค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองขนาด PM_{2.5} และ PM₁₀ ในแต่ละวันมาเฉลี่ย โดยแบ่งเป็นแต่ละจุดตรวจวัด ในชั้นใต้ดิน A มีจำนวนจุดตรวจวัดทั้งหมด 8 จุด ส่วนชั้นใต้ดิน B มีจำนวนจุดตรวจวัดทั้งหมด 6 จุด จากผลการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นใต้ดิน A (รูปที่ 11 และรูปที่ 12) พบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงสุดที่จุดตรวจวัดที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 39.80±6.7 µg/m³) รองลงมาคือจุดที่ 6 และจุดที่ 1 ตามลำดับ (ค่าเฉลี่ย 32.45±5.3 และ 32.42±4.6 µg/m³ ตามลำดับ) สอดคล้องกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM₁₀ ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงสุดที่จุดที่ 2 เช่นกัน (ค่าเฉลี่ย 223.99±49.2 µg/m³) รองลงมาคือจุดที่ 6 และจุดที่ 1 (ค่าเฉลี่ย 199.97±38.5 และ 177.55±44.2 µg/m³ ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในชั้นใต้ดิน A มีค่าสูงในจุดที่ 2, 6 และ 1 เนื่องจากในจุดที่ 1 และจุดที่ 2 (รูปที่ 2) เป็นบริเวณทางเข้าออกที่อยู่ใกล้โรงเรียนสาริตมหารวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(ประสานมิตร) ซึ่งมีปริมาณยานพาหนะของผู้ปกครองที่เข้ามาใช้บริการเพื่อรับส่งบุตรหลานโดยผ่านทั้ง 2 จุดเป็นส่วนใหญ่ ส่วนในจุดที่ 6 เป็นบริเวณที่ยานพาหนะมีการสัญจรผ่านบ่อยกว่าจุดอื่น เพื่อใช้ในการผ่านเข้าออกแต่ละประตู และผ่านเพื่อลงไปลานจอดรถชั้น B อีกทั้งยังพบว่าในจุดดังกล่าวพัดลมดูดอากาศไม่สามารถดูดอากาศในบริเวณนั้นได้ทั่วถึง ในจุดที่ 6 จึงเป็นบริเวณที่อากาศนิ่งไม่มีการถ่ายเท ทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองเป็นจำนวนมาก และในบางครั้งพบว่า มีผู้ที่มาใช้บริการติดเครื่องยนต์ทิ้งไว้เพื่อนั่งรอในรถ ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่ตรวจวัดได้จึงเป็นฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของยานพาหนะ

สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chlebnikovas และคณะ [2] พบว่า ในโรงจอดรถแบบปิด แหล่งที่มาของฝุ่นละอองขนาดเล็กจะเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากท่อไอเสียของยานพาหนะเป็นหลัก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพเนื่องจากเป็นฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กมาก (0.3-10 ไมครอน) นอกจากนี้การปล่อยมลพิษจากการทำความร้อน การระบายอากาศ เครื่องปรับอากาศก็ทำให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยเช่นกัน และจาก

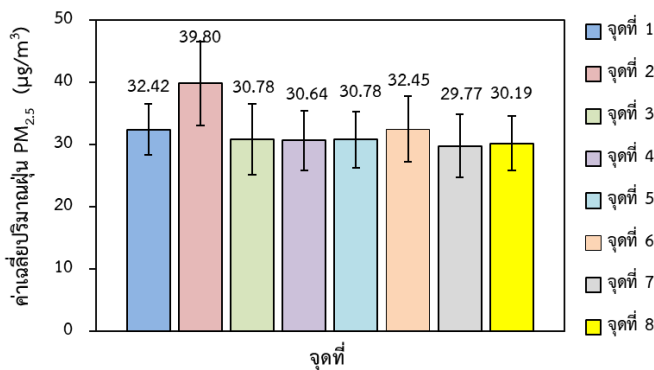


บทความวิจัย

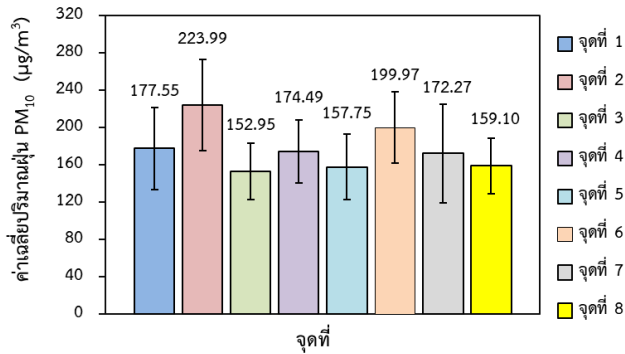
การศึกษาของ ซญาพรและคณะ [10] ได้ทำการศึกษากการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็กมากระดับต่ำกว่า 100 nm ในบรรยากาศในกรุงเทพมหานคร พบว่าปริมาณฝุ่นละอองประเภทนี้จะมีค่าสูงในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โดยมาจากท่อไอเสียของยานพาหนะ ซึ่งจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจได้

ในชั้นใต้ดิน B จากผลการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง (รูปที่ 13 และรูปที่ 14) พบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงสุดที่จุดที่ 3 (ค่าเฉลี่ย 34.07±6.8 µg/m³) รองลงมาคือจุดที่ 1 และจุดที่ 5 ตามลำดับ (ค่าเฉลี่ย 32.71±4.8 และ 30.29±6.9 µg/m³ ตามลำดับ) สอดคล้องกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM₁₀ ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงสุดที่จุดที่ 3 เช่นกัน (ค่าเฉลี่ย 207.08±41.5 µg/m³) รองลงมาคือจุดที่ 5 และจุดที่ 1 (ค่าเฉลี่ย 174.57±25.8 และ 168.48±28.0 µg/m³ ตามลำดับ) จากผลการตรวจวัดพบว่าปริมาณฝุ่นละออง

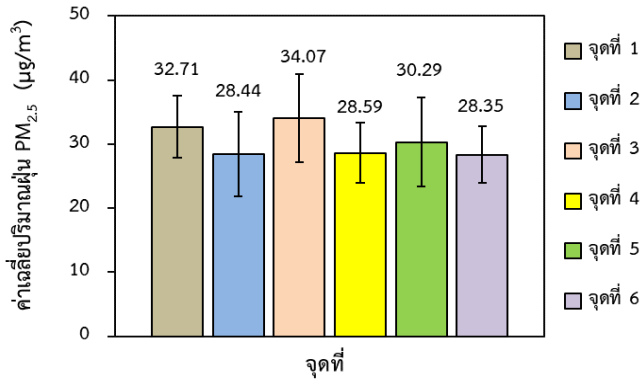
ขนาดเล็กในชั้นใต้ดิน B มีค่าสูงในจุดที่ 3, 5 และ 1 เนื่องจากในจุดที่ 3 ชั้น B (รูปที่ 3) เป็นพื้นที่อับและมีการถ่ายเทของอากาศน้อย เมื่อรถผ่านในบริเวณจุดที่ 3 ทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละออง ต่างจากจุดที่ 7 ในชั้น A (รูปที่ 2) ที่อยู่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งพบว่าในจุดที่ 7 ชั้น A มีการถ่ายเทของอากาศดีกว่า เพราะเชื่อมต่อกับทางออก 2 ทาง ส่วนในจุดที่ 5 ชั้น B ที่ตรวจพบว่ามีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กสูง เนื่องจากจุดนี้เป็นบริเวณที่ยานพาหนะมีการสัญจรผ่านบ่อยกว่าจุดอื่น เพื่อใช้ในการผ่านขึ้นไปลานจอดรถชั้น A อีกทั้งยังพบว่าในจุดดังกล่าวพัดลมดูดอากาศไม่สามารถดูดอากาศในบริเวณนั้นได้ทั่วถึงเช่นเดียวกับจุดที่ 6 ชั้น A ส่วนในจุดที่ 1 ชั้น B เป็นบริเวณที่เป็นทางลงมาจากชั้น A ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง พบว่ามักมีรถของผู้ปกครองที่เข้ามารับส่งบุตรหลานเข้ามาจอดสตาร์ทรถเพื่อรอในบริเวณนี้ เพราะใกล้ทางออกไปโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



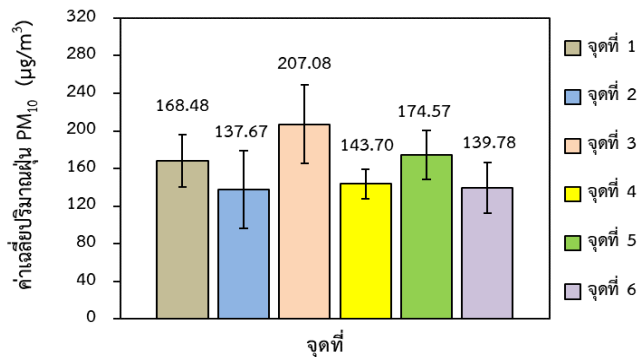
รูปที่ 11 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM_{2.5} ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดตรวจวัดในชั้นใต้ดิน A



รูปที่ 12 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM₁₀ ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดตรวจวัดในชั้นใต้ดิน A



รูปที่ 13 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM_{2.5} ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดตรวจวัดในชั้นใต้ดิน B



รูปที่ 14 ปริมาณเฉลี่ยของฝุ่น PM₁₀ ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดตรวจวัดในชั้นใต้ดิน B



บทความวิจัย

จากการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} และ PM₁₀ ที่อาคารจอดรถใต้ดินชั้น A และชั้น B เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศที่กำหนดให้ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ต้องมีค่าไม่เกิน 37.5 µg/m³ และ PM₁₀ ต้องมีค่าไม่เกิน 120 µg/m³ [6] ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ของชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B ในบางจุดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ รวมถึงค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM₁₀ ของชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ด้วยเช่นกัน ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพเมื่อได้หายใจเข้าไป

จากการตรวจวัดปริมาณ PM_{2.5} ในแต่ละจุดตรวจวัดพบว่าส่วนใหญ่มีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนด ซึ่งผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} มีมากกว่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM₁₀ โดยฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} สามารถถูกสูดเข้าลึกถึงทางเดินหายใจและปอดจนไปถึงถุงลมในปอดได้ [3] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ไปคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI ; Air Quality Index) [11] ซึ่งการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ของชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B มีค่าเฉลี่ย 32.1±5.1 µg/m³ และ 30.4±5.7 µg/m³ ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานของ EPA ของสหรัฐอเมริกา จะได้ค่า AQI ของ PM_{2.5} ของชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B อยู่ในช่วง 88-112 และ 85-95 ตามลำดับ แปลความหมายได้ว่าคุณภาพอากาศปานกลางถึงเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ ซึ่งอาจทำให้เกิดการระคายเคืองตา ไอหรือหายใจลำบาก แขนงหน้าอก ปวดศีรษะ อ่อนเพลียได้ [3]

Thongchom และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ในการรับสัมผัส PM₁₀ ของกลุ่มตัวอย่างพนักงานภายในอาคาร พบว่าหาก

พนักงานมีระยะเวลาทำงานที่มากกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน จะเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อตรวจวัดภายในอาคารมีค่าเฉลี่ยของ PM₁₀ เท่ากับ 38.1±14.0 µg/m³ โดยพบว่ากลุ่มตัวอย่างมีอาการทั่วไป 75%, ระคายเคืองเยื่อบุโพรงจมูก 57.4%, ระคายเคืองผิวหนัง 45.5% และระคายเคืองดวงตา 54.9% นอกจากนี้ Sundam และคณะ [13] ได้ศึกษาประเมินความเข้มข้นของ PM_{2.5} และผลกระทบของ PM_{2.5} ต่อสุขภาพระบบทางเดินหายใจของคนทำงานกลางแจ้งที่สัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็ก พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของ PM_{2.5} เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อสุขภาพเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจของผู้รับสัมผัสฝุ่นละอองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเข้มข้นสูงสุดของ PM_{2.5} ที่วัดได้คือ 122.9±2.07 µg/m³

3.4 ความเร็วลมที่ช่องดูดอากาศของระบบระบายอากาศภายในอาคารจอดรถใต้ดิน

การตรวจสอบว่าปริมาณอากาศที่ต้องระบายออกของแต่ละช่องดูดอากาศเพียงพอหรือไม่ จะทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าการตรวจวัดจริงในแต่ละช่องดูดอากาศที่นำมาคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องระบายออกจริงโดยใช้สมการที่ 2 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่าปริมาณอากาศในอาคารจอดรถใต้ดินชั้น A และ B ที่ต้องการระบายออกซึ่งได้จากการคำนวณ เมื่อเทียบกับปริมาณอากาศที่ได้จากการตรวจวัดนั้นไม่เพียงพอต่อการระบายอากาศออกปล่องดูดอากาศ ซึ่งปล่องดูดอากาศที่สามารถดูดอากาศได้เพียงพอส่วนใหญ่จะเป็นปล่องที่อยู่ใกล้กับตัวพัดลมดูดอากาศมากที่สุด เพราะท่อดูดอากาศจะเป็นที่ยาวต่อกัน และในแต่ละชั้นจะมีเครื่องดูด



บทความวิจัย

อากาศ (a, b, c, d) ที่ได้ติดตั้งไว้จำนวน 4 ตัว (รูปที่ 4) โดยเครื่องดูดอากาศแต่ละตัวจะต่อกับปล่องดูดอากาศ 9 ช่อง และบริเวณปากช่องลมไม่มีตัวพัดลมช่วยดูดอากาศ ทำให้กำลังในการดูดอากาศเสียน้อยลง

ตามระยะท่อ ซึ่งปล่องดูดอากาศที่อยู่ไกลจากพัดลมดูดอากาศ เช่น ปล่อง 3a, 6a, 9a เมื่อตรวจวัดแรงลมพบว่าจะมีแรงดูดน้อยกว่าปล่อง 1a, 4a, 7a เป็นต้น

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบปริมาณอากาศที่ต้องระบายออกจากการคำนวณและตรวจวัดได้ในแต่ละช่องดูดอากาศ (หน่วย: m^3/s) (n=216)

ช่องดูดอากาศ	ปริมาณอากาศที่ต้องระบายออก			
	ค่าที่คำนวณ	ค่าเฉลี่ยที่ตรวจวัด	ค่าที่คำนวณ	ค่าเฉลี่ยที่ตรวจวัด
	ชั้นใต้ดิน A		ชั้นใต้ดิน B	
1a	2.5	2.2 \pm 0.09	2.3	3.0 \pm 0.21
2a	2.4	1.0 \pm 0.08	2.2	1.6 \pm 0.09
3a	2.2	0.6 \pm 0.16	2	0.6 \pm 0.05
4a	2.5	1.7 \pm 0.08	2.3	2.5 \pm 0.17
5a	2.4	0.7 \pm 0.05	2.2	1.2 \pm 0.12
6a	2.2	0.2 \pm 0.9	2	0.5 \pm 0.05
7a	2.7	1.9 \pm 0.26	2.5	3.7 \pm 0.26
8a	2.5	0.8 \pm 0.12	2.3	1.0 \pm 0.09
9a	2.3	0.0 \pm 0.00	2.1	0.5 \pm 0.08
1b	2.7	1.4 \pm 0.08	2.5	2.9 \pm 0.09
2b	2.5	1.0 \pm 0.09	2.3	1.0 \pm 0.16
3b	2.3	0.4 \pm 0.05	2.1	0.5 \pm 0.05
4b	2.8	2.2 \pm 0.05	2.6	3.5 \pm 0.12
5b	2.7	0.7 \pm 0.09	2.5	1.4 \pm 0.09
6b	2.5	0.5 \pm 0.05	2.3	0.4 \pm 0.00
7b	2.8	2.4 \pm 0.08	2.6	3.0 \pm 0.12
8b	2.7	0.7 \pm 0.05	2.5	1.1 \pm 0.05
9b	2.5	0.0 \pm 0.00	2.3	0.3 \pm 0.05
1c	2.3	0.6 \pm 0.05	2.1	0.3 \pm 0.08
2c	2.3	1.2 \pm 0.08	2.1	1.6 \pm 0.05



ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบปริมาณอากาศที่ต้องระบายออกจากการคำนวณและตรวจวัดได้ในแต่ละช่องดูดอากาศ (หน่วย: m^3/s) (n=216)

ช่องดูดอากาศ	ปริมาณอากาศที่ต้องระบายออก			
	ค่าที่คำนวณ	ค่าเฉลี่ยที่ตรวจวัด	ค่าที่คำนวณ	ค่าเฉลี่ยที่ตรวจวัด
	ชั้นใต้ดิน A		ชั้นใต้ดิน B	
3c	2.6	1.1 \pm 0.09	2.4	2.5 \pm 0.17
4c	2.5	0.0 \pm 0.00	2.3	0.4 \pm 0.05
5c	2.5	0.7 \pm 0.17	2.3	1.1 \pm 0.08
6c	2.7	1.9 \pm 0.09	2.5	2.5 \pm 0.08
7c	2.5	0.4 \pm 0.08	2.3	0.5 \pm 0.00
8c	2.5	0.4 \pm 0.05	2.3	1.7 \pm 0.09
9c	2.7	1.6 \pm 0.05	2.5	2.4 \pm 0.05
1d	2.2	0.0 \pm 0.00	2.0	0.3 \pm 0.00
2d	2.2	0.7 \pm 0.05	2.0	1.1 \pm 0.05
3d	2.5	2.2 \pm 0.08	2.3	3.7 \pm 0.08
4d	2.2	0.3 \pm 0.08	2.0	0.4 \pm 0.00
5d	2.2	0.6 \pm 0.09	2.0	1.4 \pm 0.08
6d	2.5	1.7 \pm 0.09	2.3	3.0 \pm 0.16
7d	2.3	0.0 \pm 0.00	2.1	0.7 \pm 0.05
8d	2.3	0.8 \pm 0.08	2.1	1.4 \pm 0.09
9d	2.6	1.3 \pm 0.12	2.4	2.8 \pm 0.09

3.5 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

จากการตรวจวัดปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (รูปที่ 15 และรูปที่ 16) พบว่าจะมีค่าลดลงตั้งแต่ช่วงเวลา 06.00 น. เป็นต้นไปและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 17.00-18.00 น. ทั้งนี้เนื่องจากในเวลากลางวันอากาศร้อน ทำให้ความชื้นในบรรยากาศลดลง ความร้อนจะทำให้ไอน้ำมีการระเหย ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ลดลงใน

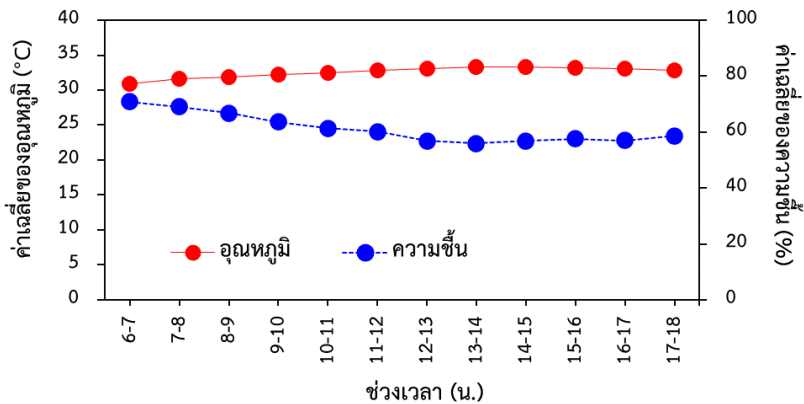
ช่วงเวลากลางวัน ตรงกันข้ามกับในช่วงเย็นที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิในตอนเย็นลดลงเล็กน้อยส่งผลให้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้น โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B มีทิศทางของการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B มีค่า 70.8 \pm 0.89% และ 68.0 \pm 1.1% ตาม



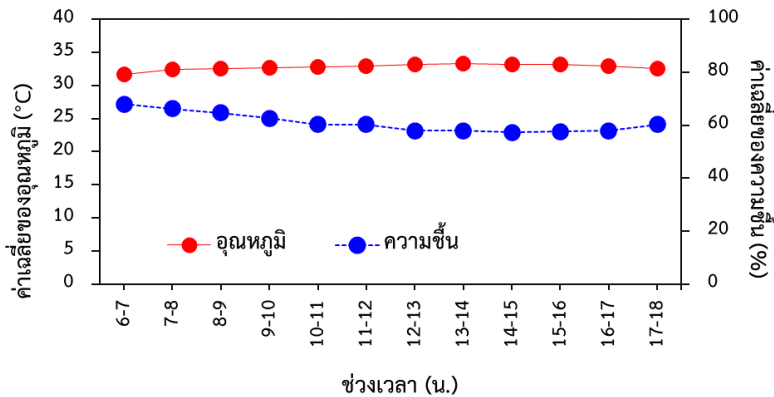
บทความวิจัย

ลำดับ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ 57.7±2.67% และ 57.2±2.09% ตามลำดับ การที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้น สอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (รูปที่ 15 และรูปที่ 16) ที่พบว่าในช่วงเช้า (06.00-07.00 น.) อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยจะมีค่าต่ำ หลังจากนั้นตั้งแต่เวลา 07.00 น. อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จะค่อยๆสูงขึ้น และจะ

ลดลงเล็กน้อยในช่วงเย็น (17.00-18.00 น.) โดยจากการตรวจวัดพบว่า อุณหภูมิต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่ชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B คือ 30.9±0.46°C และ 31.6±0.50°C ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดในพื้นที่ชั้นใต้ดิน A และชั้นใต้ดิน B คือ 33.4±0.54°C และ 33.2±0.13°C ตามลำดับ



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ที่ตรวจวัดได้ในชั้นใต้ดิน A



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ที่ตรวจวัดได้ในชั้นใต้ดิน B



บทความวิจัย

3.6 ข้อเสนอแนะเพื่อการลดผลกระทบปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก

แนวทางในการบรรเทาผลกระทบจากฝุ่นละอองขนาดเล็กสามารถเสนอแนวทางที่แบ่งเป็นในระยะสั้นและระยะยาว เพื่อลดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้เข้ามาใช้บริการและเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานภายในอาคารจอดรถใต้ดิน ได้ดังนี้

3.6.1 แนวทางการแก้ไขปัญหาระยะสั้น

ก) ให้ผู้ทำงานอยู่ในบริเวณพื้นที่อาคารจอดรถใต้ดินมีอุปกรณ์ป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็ก เช่น สวมหน้ากาก N95 เป็นต้น

3.6.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาระยะยาว

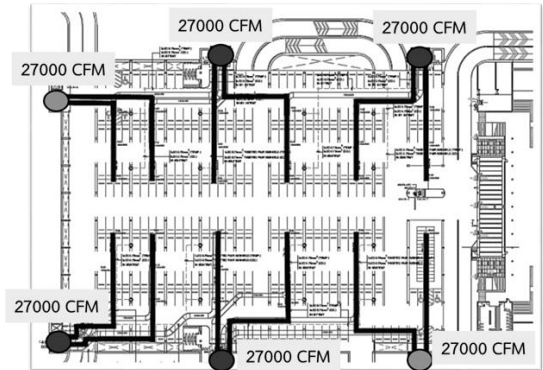
ก) ให้มีการติดตั้งจุดฉีดพ่นหมอกละอองน้ำขนาดเล็กใน 2 ช่วงเวลาที่มีการจราจรคับคั่ง คือ 06.00-08.00 น. และ 16.00-18.00 น. โดยทำการฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กสามารถจับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่แล้วตกลงสู่พื้น แต่เนื่องจากละอองน้ำเป็นละอองน้ำที่มีขนาดเล็กมาก จึงสามารถระเหยได้รวดเร็ว และไม่ทำให้เกิดน้ำเสียขึ้นภายในบริเวณอาคารจอดรถ

ข) ให้มีการติดตั้งพัดลม (รูปที่ 17) [14] เป็นจุด ๆ บริเวณภายในอาคารจอดรถใต้ดิน โดยเฉพาะจุดที่เป็นพื้นที่อับลม และจุดที่มีการตรวจวัดได้ค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กสูง เพื่อช่วยให้มีการไหลเวียนของอากาศได้ดียิ่งขึ้น

ค) ให้มีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศเพิ่มเพื่อให้สามารถระบายอากาศออกได้เพียงพอ ซึ่งพัดลมเดิมที่มีอยู่จะสามารถดูดอากาศได้สำหรับท่อ 2 เส้น หรือปล่อง 6 ปล่องเท่านั้น โดยให้เพิ่มพัดลมดูดอากาศอีกชั้นละ 2 ตัวแล้วต่อเชื่อมปล่องดูดอากาศดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 ตัวอย่างพัดลมที่ใช้ช่วยในการไหลเวียนของอากาศ



รูปที่ 18 ตัวอย่างการติดตั้งพัดลมดูดอากาศเพิ่มและการแบ่งปล่องดูดอากาศในชั้นใต้ดิน A และ B

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในอาคารจอดรถใต้ดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าปริมาณยานพาหนะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ที่พบว่าในวันที่มีปริมาณยานพาหนะเข้ามาใช้บริการในอาคารจอดรถมาก รวมถึงช่วงเวลาที่ปริมาณยานพาหนะเข้าออกมาก จะทำให้ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ และ



บทความวิจัย

PM₁₀ เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพต่อผู้ที่เข้ามาใช้บริการในอาคารจอดรถใต้ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานในบริเวณนั้น เนื่องจากตรวจพบว่าการระบายอากาศไม่สามารถระบายอากาศได้เพียงพอ และมีบริเวณที่อับลมที่ระบบระบายอากาศไม่ทั่วถึง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดจากยานพาหนะโดยสามารถทำได้หลายวิธี รวมถึงสวมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลเพื่อลดการสูดดมฝุ่นละอองขนาดเล็กเข้าสู่ร่างกาย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2564 หมายเลขโครงการ 177/2564 ผู้วิจัยขอขอบคุณนิสิตที่ช่วยเก็บข้อมูลในการทำวิจัย ส่วนพัฒนากายภาพมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเพื่อข้อมูลเบื้องต้นและสถานที่ในการเก็บข้อมูลวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเพื่อวัสดุอุปกรณ์ให้กับคณะผู้วิจัยเพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] X. Wang and H.O. Gao, Exposure to fine particle mass and number concentrations in urban transportation environments of New York city, Transportation Research Part D, 2011, 16, 384-391.

- [2] A. Chlebnikovas and R. Jasevičius, Air pollution with fine particles in closed parking and theoretical studies of the interaction of inhaled particles in respiratory tract, Buildings, 2022, 12, 1-19.
- [3] S. You, Z. Yao, Y. Dai and C.H. Wang, A comparison of PM exposure related to emission hotspots in a hot and humid urban environment: concentrations, compositions, respiratory deposition, and potential health risks, Science of The Total Environment, 2017, 599-600, 464-473.
- [4] B.J. He, D.X. Zhao, J. Zhu, A. Darko and Z.H. Gou, Promoting and implementing urban sustainability in China: an integration of sustainable initiatives at different urban scales, Habitat International, 2018, 82, 83-93.
- [5] Z. Liu, K. Cheng, H. Li, G. Cao, D. Wu and Y. Shi, Exploring the potential relationship between indoor air quality and the concentration of airborne culturable fungi: a combined experimental and neural network modeling study, Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25, 3510-3517.
- [6] <https://www.pcd.go.th/laws/30035>. (Accessed on 5 November 2023)
- [7] ASHRAE 62.1, Standard Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2022.



- [8] L. Bai, J.Q. Fu and Y.T. Sun, Analysis on factors that influence concentration of PM_{2.5} expelled in vehicle exhaust in underground parking lots of large shopping centers in Changchun, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020, 605, 1-8.
- [9] Z. Liu, H. Yin, G. Jin, J. Gao and W. Ding, On-site assessments on variations of PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂ and TVOC concentrations in naturally ventilated underground parking garages with traffic volume, Environmental Pollution, 2019, 247, 626-637.
- [10] C. Pheutfoo and S. Bualert, Size distribution of ambient nanosized particulate matters in urban area: Bangkok, KKU Research Journal, 2014, 4(4), 80-92. (in Thai)
- [11] <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-calculator/>. (Accessed on 15 November 2023)
- [12] T. Thongchom, N. On-si, C. Puongphan, T. Chumprasittichok and T. Neamhom, Health risks from indoor PM₁₀ and effects of sick building syndrome in office workers, Thai Journal of Public Health, 2021, 51(2), 170-180.
- [13] T.K.M. Sundram, E.S.S. Tan, S.C. Cheah, H.S. Lim, M.S. Seghayat, N.A. Bustami and C.K. Tan, Impacts of particulate matter (PM_{2.5}) on the health status of outdoor workers: observational evidence from Malaysia, Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29, 71064-71074.
- [14] <http://www.parking-net.com/parking-news/underground-parking-garage-ventilation>. (Accessed on 5 November 2023)

การย่อยสลายพลาสติกพอลิพรพิลีนโดย *Fictibacillus phosphorivorans* ที่แยกจากตะกอนดินน้ำจืด

ประดิษฐ์ เอี่ยมสะอาด*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pradinunt.e@aru.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 ตุลาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 20 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 28 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: พลาสติกที่สังเคราะห์ด้วยปิโตรเคมีได้รับความนิยมในการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมและการใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งพอลิพรพิลีนเป็นชนิดหนึ่งที่มีการใช้และตกค้างสะสมในระบบนิเวศปริมาณมาก เนื่องจากโครงสร้างพอลิเมอร์และการใช้สารเติมแต่งในกระบวนการผลิตจึงทำให้พอลิพรพิลีนถูกย่อยสลายได้ยากโดยวิธีการทางชีวภาพ การศึกษาในครั้งนี้สามารถแยกเชื้อแบคทีเรียจากตะกอนดินบ่อน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และเมื่อทดสอบ Drop Collapse Test พบว่า ไอโซเลต T2 สามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพได้ จึงนำมาศึกษาการย่อยสลายพอลิพรพิลีนโดยเพาะเลี้ยงในอาหาร Bushnell Haas (BH) ที่มีชิ้นส่วนพลาสติกเป็นเวลา 30 วัน พบว่า น้ำหนักของชิ้นส่วนพลาสติกหายไปคิดเป็น 10.25% นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นผิวของพลาสติกมีลักษณะขรุขระเมื่อศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยแบคทีเรีย จากการศึกษาสายพันธุ์ของแบคทีเรียไอโซเลต T2 ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ 16S rRNA ร่วมกับการศึกษาความสัมพันธ์ทางลำดับวิวัฒนาการ พบว่ามีความใกล้เคียงกับสายพันธุ์ *Fictibacillus phosphorivorans* ซึ่งยังไม่พบรายงานการย่อยสลายพลาสติกพอลิพรพิลีนมาก่อน ทั้งนี้พบว่า ผลจากการทดลองสามารถพัฒนาสายพันธุ์แบคทีเรียด้วยกระบวนการและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อมที่มีการสะสมปนเปื้อนของพลาสติกได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: พอลิพรพิลีน; การย่อยสลายทางชีวภาพ; *Fictibacillus phosphorivorans*; สารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ

Polypropylene Biodegradation by *Fictibacillus phosphorivorans* Isolated from Freshwater Sediment

Pradinunt Eiamsa-ard*

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology,
Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: pradinunt.e@aru.ac.th

Received: 10 October 2023; Revised: 20 February 2024; Accepted: 28 February 2024

Online Published: 25 April 2024

Abstract: Petroleum-based plastic is widely used either in extensive industrial or daily applications. Polypropylene is mostly used and accumulate in large quantities in the ecosystem. Due to the polymeric structure and supplemented additives in the production process, resulted in rare biodegradation of polypropylene. In this study, the total bacteria were isolated from freshwater sediment within Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University. The biosurfactant production has been observed in the bacteria isolate T2 after the Drop collapse test procedure. Polypropylene biodegradation efficiency was then investigated through the cultivation of the isolate T2 in the Brushnell Haas (BH) media composed of plastic sample for 30 days, yielding the plastic weight loss of 10.25%. In addition, the roughness of the plastic surface was occurred during SEM analysis provided evidence of bacterial biodegradation proceeded. According to the 16S rRNA sequencing and phylogenetic analysis, the bacteria isolate T2 was closely related to *Fictibacillus phosphorivorans* which had not previously been reported to polypropylene plastics biodegradation. Hence, the result would be a considerable development of bacterial strain through an appropriate process and technology regarding to the further remediating environment contaminated with plastics.

Keywords: Polypropylene; Biodegradation; *Fictibacillus phosphorivorans*; Biosurfactant



1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมหลายภาคส่วน เช่น บรรจุภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น เนื่องจากด้วยคุณสมบัติของพลาสติกที่เป็นวัสดุกันน้ำ น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น คงทน และยังเป็นวัสดุที่มีราคาถูก [1] แต่อย่างไรก็ตามการใช้พลาสติกก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นขยะที่มีความคงทนและสามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน [2] ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีในปัจจุบันจะสามารถนำพลาสติกกลับไปใช้ประโยชน์ได้ แต่พบว่ามีเพียง 10% ของขยะพลาสติกที่ถูกนำไปรีไซเคิล นอกจากนี้ยังมีการจัดการในรูปแบบการเผาในเตาเผา (Incineration) ประมาณ 14% และส่วนใหญ่ใช้วิธีการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ [3] ก่อให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกจำนวนมากในระบบนิเวศ และเมื่อเกิดการแตกหักหรือสึกกร่อนด้วยปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมจนกลายเป็นไมโครพลาสติก ซึ่งเป็นชิ้นส่วนพลาสติกที่มีขนาดเล็ก ($1\ \mu\text{m} - 5\ \text{mm}$) สามารถแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมได้ในบริเวณกว้าง [4] ดังนั้นการพิจารณาวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการขยะพลาสติกจึงเป็นสิ่งสำคัญ เช่น การควบคุมการใช้พลาสติก สนับสนุนการใช้พลาสติกประเภทย่อยสลายได้ทางชีวภาพ รวมทั้งการใช้เทคโนโลยีการย่อยสลายพลาสติกด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยอาศัยกิจกรรมการย่อยสลายจากจุลินทรีย์บางสายพันธุ์หรือกลุ่มของจุลินทรีย์ เป็นต้น [5]

การย่อยสลายพลาสติกด้วยวิธีการทางชีวภาพเกิดขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยการหลั่งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับวิถีการย่อยสลาย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ในกลุ่มไลเปส (Lipase Enzymes) ไฮโดรเลส

(Hydrolase) และ ดีไฮโดรจีเนส (Dehydrogenase) ทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์ (Polymer) ของพลาสติกมีขนาดเล็กลงเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) โมโนเมอร์ (Monomer) หรือเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (Mineralization) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ และได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO_2 และน้ำ [6, 7] แต่อย่างไรก็ตาม ในการย่อยสลายพลาสติกโดยจุลินทรีย์หรือกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น โครงสร้าง องค์ประกอบเคมี ลักษณะพื้นผิว และน้ำหนักโมเลกุลของชิ้นส่วนพลาสติกตั้งต้น รวมทั้งยังพบว่าเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ยังมีความจำเพาะเจาะจงกับชนิดของพันธะเคมีในสายยาวของพอลิเมอร์อีกด้วย [8]

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โครงสร้างหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาว (C_nH_{2n}) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีการผลิตมากเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) โดยทั่วไปพอลิโพรพิลีนนิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์และฉลากสินค้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายกิจกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร สิ่งทอ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ รวมทั้งชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างหลักของพอลิโพรพิลีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ($10,000 - 40,000\ \text{g/mol}$) และในกระบวนการผลิตยังมีการใช้สารที่ทำให้เกิดความคงตัวจึงทำให้การย่อยสลายพอลิโพรพิลีนด้วยวิธีการทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ยาก [9, 10] แต่อย่างไรก็ตาม มีการรายงานถึงสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีศักยภาพในการย่อยสลายไมโครพลาสติก



ชนิดพอลิโพรพิลีน เช่น แบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus* sp., *Rhodococcus* sp. และ *Phanerochaete chrysosporium* [11, 12] นอกจากนี้ ยังพบว่ามีการย่อยสลายโดยกลุ่มแบคทีเรีย (Consortium) ระหว่างแบคทีเรีย *Enterobacter cloacae* และ *Pseudomonas aeruginosa* [13] ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์เพียงไม่กี่สายพันธุ์ที่มีรายงานการย่อยสลายพอลิโพรพิลีนอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดเกี่ยวกับโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์ รวมทั้งการใช้สารเติมแต่งที่ทำให้พลาสติกมีความยืดหยุ่นและคงทน สูง [14] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยเฉพาะการย่อยสลายพลาสติกที่ไม่ผ่านการปรับปรุงลักษณะพื้นผิว (Un-pretreated Polypropylene) โดยในการทดลองครั้งนี้สามารถคัดเลือกแบคทีเรีย *Fictibacillus phosphorivorans* จาก ตะกอนดิน บ่อน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏ พระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ยังไม่พบรายงานเกี่ยวกับการศึกษาการย่อยสลายไมโครพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน จึงเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อนำไปสู่การพัฒนาสายพันธุ์เพื่อประยุกต์ใช้ในการจัดการขยะพลาสติกที่พบการสะสมปริมาณมากต่อไปในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน

การศึกษาการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติก ดำเนินการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยพิจารณาเลือกใช้พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ทำได้โดยตัดถุงพลาสติกใสประเภทถุงร้อน (100% Polypropylene) ให้มีขนาด 3 x 3 mm ที่สอดคล้องกับขนาดของอนุภาคไมโคร-

พลาสติก จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเอทานอล 70% เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ ทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ปรับปรุงจาก [15])

2.2 การคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ

การคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนดำเนินการโดย เก็บตัวอย่างตะกอนดินจากบ่อน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ที่ระดับความลึก 10 – 15 cm ซึ่งมีรายงานพบการสะสมของอนุภาคไมโครพลาสติก [16] นำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนัก 5 g เพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Luria-Bertani (LB medium) ปริมาตร 50 ml เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในอาหาร LB agar จนกระทั่งได้แบคทีเรียไอโซเลตที่บริสุทธิ์ก่อนนำไปทดสอบการผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ (Biosurfactant) ด้วยวิธี Drop Collapse Test โดยเพาะเลี้ยงแบคทีเรียไอโซเลตบริสุทธิ์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ LB เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดสอบด้วยการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที (Sigma 3-16 KL, Germany) แล้วนำมาทดสอบโดยการหยดส่วนใสปริมาตร 10 µl ลงบนจานเพาะเชื้อพลาสติกที่เคลือบด้วยน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ และน้ำมันพืชเปรียบเทียบกับน้ำกลั่นเป็นชุดการทดลองควบคุมพิจารณาเลือกไอโซเลตที่พบการกระจายตัวหรือการยุบตัว (collapse) ของหยดสารละลายส่วนใส ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ [17, 18]



2.3 การย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน

เพาะเลี้ยงแบคทีเรียไอโซเลตที่คัดเลือกได้จากการทดสอบ Drop Collapse Test ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Bushnell Haas (BH) ปริมาตร 50 ml ที่มีชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนที่เตรียมไว้น้ำหนักประมาณ 0.1 g ทำให้ปราศจากเชื้อด้วยเครื่องนิ่งฆ่าเชื้อแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 20 นาที เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 37°C ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 30 วัน โดยมีชุดการทดลองที่ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ BH ที่มีชิ้นส่วนพลาสติกโดยไม่ใช้เชื้อแบคทีเรียเป็นชุดควบคุมดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ (ปรับปรุงจาก [15]) เมื่อครบระยะเวลาการเพาะเลี้ยงกรองแยกชิ้นส่วนพลาสติกออกจากอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm (GF/C Glass Microfiber Filters, Whatman) ในระบบสูญญากาศแล้วนำชิ้นส่วนพลาสติกที่แยกได้มาแช่ในสารละลาย Sodium Dodecyl Sulfate 2% (v/v) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามด้วยล้างในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อจำนวน 2 รอบ แล้วทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักพลาสติก (0.0001 g) นำค่าที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกด้วยวิธีการศึกษาน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss Analysis) จากสมการ (ปรับปรุงจาก [5, 15])

$$\% \text{ Weight Loss} = \frac{(W_0 - W) \times 100}{W_0}$$

เมื่อ W_0 = น้ำหนักเริ่มต้นชิ้นส่วนพลาสติก (g)

W = น้ำหนักของชิ้นส่วนพลาสติก

วันที่ 30 ของการเพาะเลี้ยง (g)

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนภายหลังจากครบระยะเวลาการทดลอง 30 วัน โดยนำชิ้นส่วนพลาสติกที่ต้องการศึกษามาล้างในสารละลาย Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) 2% (v/v) ตามด้วยการล้างในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อทันที หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนพลาสติกไปล้างด้วยสารละลายเอทานอล 70% แล้วทำให้แห้งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์รูปร่างและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นส่วนพลาสติกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL Scanning Electron Microscope, JSM-5410LV) (ปรับปรุงจาก [13])

2.4 การระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่ย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน

สกัดดีเอ็นเอของแบคทีเรียไอโซเลตที่สามารถย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนที่ต้องการศึกษาด้วยชุดสกัดดีเอ็นเอทางการค้า (PureLink™ Genomic DNA Mini Kit) ก่อนส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนบริเวณ 16S rRNA โดยบริษัท Macrogen Inc. (Seoul, Korea) ซึ่งมีขั้นตอนการเพิ่มปริมาณสารพันธุกรรมของยีนบริเวณ 16S rRNA ด้วยเทคนิค Polymerase chain reaction (PCR) โดยใช้ไพรเมอร์ 27F' และ 1492R' ก่อนนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลนิวคลีโอไทด์ แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับความเหมือนของสายพันธุ์กับฐานข้อมูล GenBank, EMBL และ DDBJ ด้วย BLAST program (The National Center for Biotechnological Information, NCBI) ศึกษาความสัมพันธ์ของลำดับวิวัฒนาการโดยการสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ทางพันธุกรรม (Phylogenetic Tree) ด้วยวิธี Neighbor-Joining (MEGA Version 11.10.13) ทดสอบความ

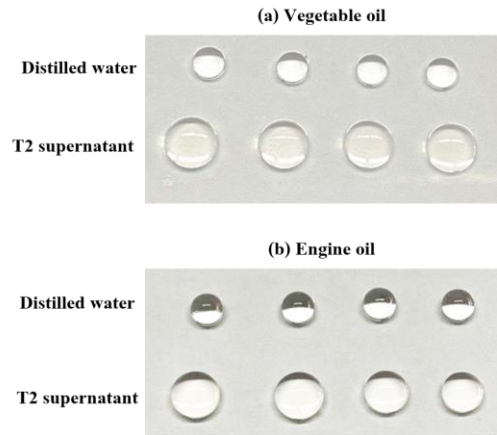


เชื่อมันด้วยค่า Bootstrap 1,000 ซ้ำ และคำนวณแผนภูมิทางสถิติด้วยวิธี Maximum Composite Likelihood [19]

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ

การทดสอบความสามารถในการผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพด้วยวิธี Drop Collapse Test ของแบคทีเรียไอโซเลตที่คัดแยกได้จากตะกอนดินบ่อน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา โดยการทดสอบการยุบตัวหรือกระจายตัว (Collapse) ของหยดสารละลายส่วนใสที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเปรียบเทียบกับหยดน้ำกลั่นบนผิวหน้าจานเพาะเชื้อที่เคลือบด้วยน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์และน้ำมันพืช ผลการทดลองพบว่าการยุบตัวของสารละลายส่วนใสของแบคทีเรียไอโซเลต T2 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นวงกว้าง (รูปที่ 1) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากตะกอนดินไอโซเลตอื่น จากผลการทดลองเป็นการบ่งชี้ได้เบื้องต้นว่าแบคทีเรียไอโซเลต T2 สามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพได้จึงพิจารณาคัดเลือกไปศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากการหลังสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพช่วยให้แบคทีเรียสัมผัสพื้นผิวของชิ้นส่วนพลาสติก และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ผิวเซลล์แบคทีเรีย (Cell Surface Hydrophobicity, CSH) ซึ่งเป็นกลไกหลักที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายพลาสติกทางชีวภาพ [20, 21] ดังตัวอย่างรายงานวิจัยที่พบว่าคุณสมบัติของสารลด



รูปที่ 1 Drop Collapse Test ของแบคทีเรียไอโซเลต T2 กับ (a) น้ำมันพืช และ (b) น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

แรงตึงผิวทางชีวภาพประเภท Lipopeptide ที่ผลิตโดยเชื้อ *Bacillus* sp. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) [22] สอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกพอลิเอทิลีนโดยแบคทีเรีย *Bacillus* sp. PE3 พบว่าน้ำหนักพลาสติกหายไปสูงสุดคิดเป็น 6.68% ในระยะเวลาการทดลอง 30 วัน เป็นผลจากการที่เชื้อสามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพประเภท Lipopeptide [21]

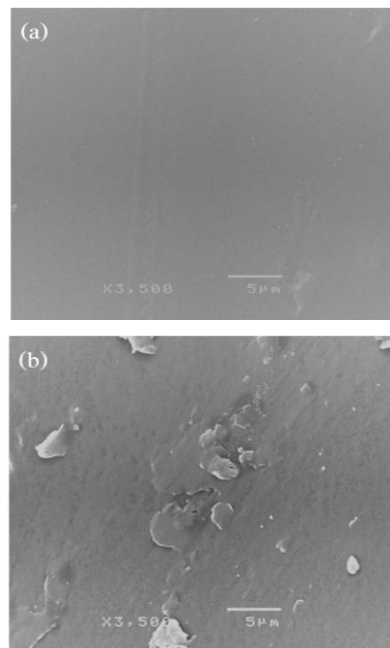
3.2 การย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน

โดยทั่วไปการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกโดยจุลินทรีย์เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้พลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับการเจริญเพิ่มจำนวนเซลล์ ซึ่งการย่อยสลายของพอลิเมอร์สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนแปลงลักษณะฐานวิทยาศาสตร์



หรือน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ เป็นต้น [15] ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ดำเนินการโดยการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นส่วนพลาสติกภายหลังจากการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียไอโซเลต T2 ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีชิ้นส่วนพลาสติก เป็นระยะเวลา 30 วัน ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักที่หายไปของชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนคิดเป็น 10.25% (± 0.006) ทั้งนี้เนื่องจากกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์โดยแบคทีเรียไอโซเลต T2 ทำให้พอลิเมอร์ถูกย่อยสลายและมีผลให้น้ำหนักของชิ้นส่วนพลาสติกลดลง [23] ในขณะที่น้ำหนักของชิ้นส่วนพลาสติกในชุดควบคุมมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง ทั้งนี้ยังพบรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีการศึกษาแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายไมโครพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนได้ จากการศึกษาน้ำหนักของพลาสติกที่หายไป ดังตัวอย่างเช่น น้ำหนักอนุภาคพลาสติกที่หายไปคิดเป็น 3.6% ภายหลังจากการเพาะเลี้ยง *Bacillus gottheilli* ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีอนุภาคพลาสติกในระยะเวลา 40 วัน [24] นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายไมโครพลาสติกพอลิโพรพิลีนโดย *Bacillus* sp. strain 27 และ *Rhodococcus* sp. strain 36 พบว่าน้ำหนักที่หายไปคิดเป็น 4.0% และ 6.4% ตามลำดับ [11] ทั้งนี้พบว่าการย่อยสลายพลาสติกของแบคทีเรียไอโซเลต T2 ในการทดลองครั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาการย่อยสลายโดยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์เดียวกันก่อนหน้านี้ แต่อย่างไรก็ตามยังคงจำเป็นต้องมีการศึกษาสภาวะหรือปัจจัยที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายพลาสติกพอลิโพรพิลีน รวมทั้งการพิจารณาใช้กลุ่มของจุลินทรีย์ (Consortium) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกทางชีวภาพต่อไป

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนภายหลังจากการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียไอโซเลต T2 เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวของชิ้นส่วนพลาสติกมีร่องรอยสีกร่อน ไม่เรียบและขรุขระ ซึ่งมีความแตกต่างกับพลาสติกในการทดลองชุดควบคุมที่พบว่ายังคงมีความเรียบของพื้นผิว (รูปที่ 2) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิวจากการทำลายโครงสร้างพอลิเมอร์โดยกิจกรรมของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของชิ้นส่วนพลาสติก [5, 25]



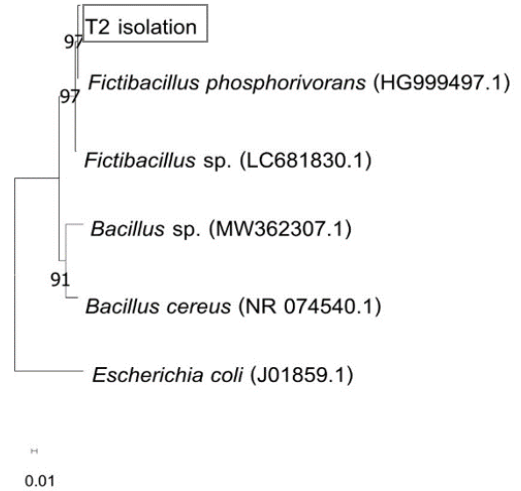
รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีน (a) ชุดควบคุม และ (b) ชุดการทดลองที่มีแบคทีเรียไอโซเลต T2 เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ BH ที่ระยะเวลา 30 วัน



3.3 การระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่ย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน

การคัดเลือกแบคทีเรียจากตัวอย่างตะกอนดินบ่อน้ำในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พบว่าแบคทีเรียไอโซเลต T2 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกภายหลังจากการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ BH ที่มีชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนในระยะเวลา 30 วัน แบคทีเรียไอโซเลต T2 จัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก (Gram Positive) รูปร่างท่อนขนาด 0.5-1.0 μm เซลล์มักเรียงต่อกันเป็นโซ่ การศึกษาลักษณะการเจริญบนอาหารแข็งพบว่าโคโลนีมีรูปร่างกลม ขอบเรียบ ผิวหน้าเรียบและมันวาว เมื่อเปรียบเทียบกับความเหมือนของข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนบริเวณ 16S rRNA พบว่าแบคทีเรียไอโซเลต T2 มีความใกล้เคียงกับแบคทีเรียสายพันธุ์ *Fictibacillus phosphorivorans* ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ของลำดับวิวัฒนาการที่พบว่าแบคทีเรียไอโซเลต T2 มีลำดับทางพันธุกรรมใกล้เคียงกับ *F. phosphorivorans* โดยมีค่า Bootstrap เท่ากับ 97% (รูปที่ 3)

ผลจากการทดลองในครั้งนี้แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนจากแบคทีเรียสายพันธุ์ *F. phosphorivorans* เป็นครั้งแรก โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานเกี่ยวกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของแบคทีเรีย *F. phosphorivorans* ที่พบว่าสามารถย่อยสลาย Kerosene และ Diesel ได้มากกว่า 90% เนื่องจากแบคทีเรียสามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพได้ [26] จากผลการทดลองยังสามารถระบุได้ว่าแบคทีเรียไอโซเลต T2 สามารถใช้



รูปที่ 3 แผนภูมิความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของแบคทีเรียไอโซเลต T2 กับแบคทีเรียสายพันธุ์ใกล้เคียง โดยมี *E. coli* (J01859.1) เป็น Outgroup

พลาสติกพอลิโพรพิลีนเป็นแหล่งพลังงานได้จากการทดลองเพาะเลี้ยงเชื้อเป็นระยะเวลา 30 วัน ในอาหารเลี้ยงเชื้อ BH ที่มีชิ้นส่วนพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบของอาหารที่จำกัดแหล่งคาร์บอน [15] ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าแบคทีเรียไอโซเลต T2 สามารถใช้พลาสติกพอลิโพรพิลีนในการเจริญได้

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาในครั้งนี้เป็นการรายงานครั้งแรกเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *F. phosphorivorans* ที่แยกได้จากตะกอนดินบ่อน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ในการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน พบว่าแบคทีเรียสามารถสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพจากการศึกษาด้วยวิธี Drop Collapse Test ซึ่งเป็นการประเมินความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคุณสมบัติ



ไม่ละลายน้ำ (Hdrophobic) ในระดับเบื้องต้น นอกจากนี้ยังได้ ศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย ชิ้นส่วนพลาสติกพอลิโพรพิลีนในอาหารเลี้ยงเชื้อ BH ที่จำกัดแหล่งคาร์บอน พบว่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นส่วนพลาสติก คิดเป็น 10.25% (± 0.006) ภายหลังจากการเพาะเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองอาจนำไปสู่การใช้จุลินทรีย์ในการจัดการปัญหาการสะสมของขยะพลาสติกได้ แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาวิธีการย่อยสลายชิ้นส่วนพลาสติกหรือกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง นำไปสู่การพัฒนาสายพันธุ์จุลินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.L. Andrady and M.A. Neal, Applications and societal benefits of plastics, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2009, 364(1526), 1955-1984.
- [2] Z. Cai, M. Li, Z. Zhu, X. Wang, Y. Huang, T. Li, H. Gong and M. Yan, Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors, *Microorganisms*, 2023, 11, 1661.
- [3] G. Lear, J.M. Kingsbury, S. Franchini, V. Gambarini, S.D.M. Maday, J.A. Wallbank, L. Weaver, and O. Pantos, Plastics and the microbiome: impacts and solutions, *Environmental Microbiome*, 2021, 16(2), 1-19.
- [4] A. Tareen, S. Saeed, A. Iqbal, R. Batool and N. Jamil, Biodeterioration of microplastics: A promising step towards plastics waste management, *Polymers*, 2022, 14(11), 2275.
- [5] J.M. Jeon, S.J. Park, T.R. Choi, J.H. Park and Y.H. Yang, Biodegradation of polyethylene and polypropylene by *Lysinibacillus* species JJY0216 isolated from soil grove, *Polymer Degradation and Stability*, 2021, 191, 109662.
- [6] Y. Tokiwa, B.P. Calabia, C.U. Ugwu and S. Aiba, Biodegradability of plastics, *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, 10(9), 3722-3742.
- [7] S.Y. Ren. and H.G. Ni, Biodeterioration of microplastics by bacteria isolated from mangrove sediment, *Toxics*, 2023, 11(5), 432.
- [8] N. Mohanan, Z. Montazer, P.K. Sharma and D. B. Levin, Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics, *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11, 580709.
- [9] Y. Zheng, E.K. Yanful, and A.S. Bassi, A review of plastic waste biodegradation, *Critical Reviews in Biotechnology*, 2005, 25(4), 243-250.
- [10] A.F. Samat, D. Carter and A. Abbas, Biodeterioration of pre-treated polypropylene by *Aspergillus terreus* and *Engyodontium album*, *npj Materials Degradation*, 2023, 7, 28.



- [11] H.S. Auta, C.U. Emenike, B. Jayanthi and S.H. Fauziah, Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment, *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127, 15-21.
- [12] N. Shimpi, M. Borane, S. Mishra, M. Kadam and S.S. Sonawane, Biodegradation of isotactic polypropylene (iPP)/poly(lactic acid) (PLA) and iPP/PLA/nano calcium carbonates using *Phanerochaete chrysosporium*, *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(2), 522-530.
- [13] S. Skariyachan, N. Taskeen, A.P. Kishore, B.V. Krishna and G. Naidu, Novel consortia of *Enterobacter* and *Pseudomonas* formulated from cow dung exhibited enhanced biodegradation of polyethylene and polypropylene, *Journal of Environmental Management*, 2021, 284, 112030.
- [14] A.S. Dey, H. Bose, B. Mohapatra and P. Sar, Biodegradation of unpretreated low-density polyethylene (LDPE) by *Stenotrophomonas* sp. and *Achromobacter* sp., isolated from waste dumpsite and drilling fluid, *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11, 603210.
- [15] S. Habib, A. Iruthayam, M.Y. Abd Shukur, S.A. Alias, J. Smykla and N.A. Yasid, Biodeterioration of untreated polypropylene microplastic particles by antarctic bacteria, *Polymers*, 2020, 12(11), 2616.
- [16] N. Tabburee, W. Tantipanathip and P. Eiamsa-ard, Microplastic contamination in freshwater sediment within Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, *ARU Journal Science and Technology*, 2022, 4(1), 56-65. (in Thai).
- [17] N. Panjiar, S.G. Sachan and A. Sachan, Screening of bioemulsifier-producing microorganisms isolated from oil-contaminated sites. *Annals of Microbiology*, 2015, 65, 753-764.
- [18] S.M. Shagufta and P.V. Dharani, Screening and isolation of bacteria producing biosurfactants from Waste, *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2022, 16(1), 567-577.
- [19] S. Ali, A. Rehman, S.Z. Hussain and D.A. Bukhari, Characterization of plastic degrading bacteria isolated from sewage wastewater, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2023, 30(5), 103628.
- [20] E. Kaczorek, A. Pacholak, A. Zdarta and W. Smulek, The impact of biosurfactants on microbial cell properties leading to hydrocarbon bioavailability increase, *Colloids Interfaces*, 2018, 2(3), 35.
- [21] R. Kavitha and V. Bhuvaneshwari, Assessment of polyethylene degradation by biosurfactant producing ligninolytic bacterium, *Biodegradation*, 2021, 32(5), 531-549.



- [22] N. Nehal and P. Singh, Optimization of cultural condition of *Bacillus* sp. MZ540316: Improve biodegradation efficiency of lipopeptide biosurfactant against polyethylene, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13, 15471-15487.
- [23] J. Ru, Y. Huo and Y. Yang, Microbial degradation and valorization of plastic wastes, *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11, 442.
- [24] H.S. Auta, C.U. Emenike and S.H. Fauziah, Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation, *Environmental Pollution*, 2017, 231, 1552-1559.
- [25] H. Nakatani, Y. Ohshima, T. Uchiyama and S. Motokucho, Degradation and fragmentation behavior of polypropylene and polystyrene in water, *Scientific Reports*, 2022, 12(1), 18501.
- [26] R. Pandey, P. Sharma, S. Rathee, H.P. Singh, D.R. Batish, B. Krishnamurthy and R.K. Kohli, Isolation and characterization of a novel hydrocarbonoclastic and biosurfactant producing bacterial strain: *Fictibacillus phosphorivorans* RP3, *3 Biotech*, 2021, 11(2), 105.



การปรับปรุงกระบวนการประกอบเครื่องกรองน้ำเพื่อลดเวลาการผลิตและความเสี่ยงทางการยศาสตร์

ภัทรศยา ตันติวัฒน์กุล* กฤษฎี ขาวหู่ นัทษกร วงศ์วรพิทักษ์ วิศรุต มากทองดี และ
คุณานนท์ อะหนนท์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: phattarasaya.t@eng.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 กันยายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 16 มกราคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 8 มีนาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการประกอบเครื่องกรองน้ำรุ่น R และ U โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเวลามาตรฐาน ปรับปรุงกระบวนการประกอบเครื่องกรองน้ำ ออกแบบการทำงานให้เป็นมาตรฐาน และลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ เนื่องจากกระบวนการประกอบเครื่องกรองน้ำมีการใช้พนักงานในการดำเนินการผลิตเป็นหลักจึงอาจเกิดความเมื่อยล้าจากการปฏิบัติงาน จากการศึกษาวิธีการทำงาน ศึกษาเวลาของกระบวนการ ทำการหาเวลามาตรฐาน และวิเคราะห์การทำงานโดยใช้แผนภูมิคน-เครื่องจักร พบว่ากระบวนการทดสอบต่อกรองใช้เวลามาก พนักงานมีเวลาว่างงานและมีการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น จึงใช้เทคนิคการตั้งคำถามแบบ 5W1H เพื่อวิเคราะห์ปัญหา นำหลักการ ECRS และหลักการยศาสตร์มาใช้ในการปรับปรุงการทำงาน โดยปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานให้ง่ายขึ้น จัดลำดับงานและตำแหน่งสถานีงานใหม่ ออกแบบบ่อทดสอบและเครื่องจับเวลาทดสอบเร็ว ผลการวิจัยสามารถกำหนดเวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการ ลดเวลาของการทดสอบต่อกรองของผลิตภัณฑ์รุ่น R และ U จากเดิม 514.97 วินาที เหลือ 351.23 วินาที คิดเป็นร้อยละ 31.8 ที่ลดลง นอกจากนี้การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์สำหรับท่าทางการทำงานลดลงจากระดับความเสี่ยงสูงเป็นระดับความเสี่ยงปานกลาง โดยคะแนนประเมินด้วยวิธี RULA และ REBA ลดลงจาก 7 คะแนน เป็น 4 คะแนน และจาก 10 คะแนน เป็น 7 คะแนน ตามลำดับ

คำสำคัญ: การปรับปรุงกระบวนการผลิต; การศึกษาวิธีการทำงาน; เวลามาตรฐาน; อีซีอาร์เอส; การยศาสตร์

Improvement of the Water Purifier Assembly Process to Reduce Process Time and Ergonomic Risk

Phattarasaya Tantiwattanakul^{*}, Krit Khaonun, Tasakorn Wongworapitak,
Visarut Markthongdee and Kunanon Arnon

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

^{*} Corresponding author, E-mail: phattarasaya.t@eng.kmutnb.ac.th

Received: 8 September 2023; Revised: 16 January 2024; Accepted: 8 March 2024

Online Published: 25 April 2024

Abstract: This research studies the assembly process of water purifiers for the R and U models, aiming to determine standard times, improve the assembly process, design the standard working process, and reduce ergonomic risks. Since the assembly of water purifiers uses employees mainly in production, it can lead to worker fatigue. The results from the work and time study, determining the standard times, and analyzing man-machine charts, revealed that the filter tube testing process consumed a significant amount of time, and workers had idle time and engaged in unnecessary movements. To address these issues, we utilized the 5W1H questioning technique to investigate the problem. Subsequently, we applied the principles of ECRS and ergonomics to improve the process. This involved simplifying work procedures, rearranging the work sequence, establishing new workstations, and designing equipment for leak testing and timing. From the results, the standard time of each process was determined. The improvements significantly reduced the time required for filter tube testing for both the R and U models, reducing it from 514.97 seconds to 351.23 seconds, equivalent to a 31.8 percent decrease. Additionally, the ergonomic risk assessment for working postures was reduced from a high-risk level to a medium-risk level. Both the RULA and REBA scores decreased from 7 points to 4 points and from 10 points to 7 points, respectively.

Keywords: Production improvement; Method study; Standard time; ECRS; Ergonomics



1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตเครื่องกรองน้ำ มีผลิตภัณฑ์หลากหลายรุ่น กระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์มีหลายขั้นตอนและใช้พนักงานในการดำเนินการผลิตเป็นหลัก งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์จำนวน 2 รุ่น คือ ผลิตภัณฑ์ R และ U เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่คาดการณ์ว่าจะมียอดขายมากที่สุด ซึ่งในปัจจุบันพบปัญหาไม่ทราบกำลังการผลิตที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์ทั้งสองรุ่น เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ จึงยังไม่มี การกำหนดเวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการผลิต การวางแผนการผลิตดำเนินการโดยใช้ประสบการณ์ของผู้วางแผน ซึ่งอาจไม่แม่นยำและไม่สอดคล้องกับกำลังการผลิตที่แท้จริง ในปัจจุบันพบปัญหาการผลิตล่าช้าไม่ได้ตามแผน บริษัทกรณีศึกษาจึงต้องการทราบเวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการ และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตให้ใช้เวลาในการผลิตลดลง นอกจากนี้กระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์มีการใช้พนักงานปฏิบัติงานเป็นหลัก ซึ่งอาจเกิดความเมื่อยล้า หรืออาการบาดเจ็บจากการปฏิบัติงานได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเวลามาตรฐาน ปรับปรุงกระบวนการประกอบเครื่องกรองน้ำรุ่น R และ U ออกแบบการทำงานให้เป็นมาตรฐาน และลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์

1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิธีการทำงานเป็นการศึกษาขั้นตอนการทำงาน นำไปสู่การวิเคราะห์ปัญหาเพื่อปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยการศึกษาการทำงานของไลน์การผลิตน้ำอัดลม จากการวิเคราะห์ความสูญเสียพบว่า มีพนักงานว่างงาน จึงจัดแบ่งงานและ

จัดขั้นตอนการทำงานใหม่ ผลการปรับปรุงสามารถลดกำลังคนจาก 5 คนเหลือ 4 คน รวมถึงประสิทธิภาพการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.5 [1]

เวลามาตรฐานเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวางแผนการผลิต วางแผนกำลังคน รวมถึงการประเมินการทำงานของพนักงาน มีการศึกษาและหาเวลามาตรฐานในแผนกเย็บกางเกงของโรงงานผลิตเสื้อผ้าเปรียบเทียบกับเวลามาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนด และเวลาที่ได้จากการทำงานจริง ผลจากการศึกษาทำให้โรงงานเข้าใจการประเมินอัตราการทำงานของพนักงาน และนำเวลามาตรฐานไปใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการผลิต การจ่ายค่าตอบแทน และการประเมินให้เงินจูงใจกับพนักงาน [2]

ECRS เป็นหลักการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานโดยวิธีการศึกษางาน ซึ่งประกอบไปด้วย การกำจัดงานที่ไม่จำเป็นหรือไม่มีประโยชน์ออกไป (Eliminate) การรวมงานหลาย ๆ ส่วนให้เป็นขั้นตอนเดียวกัน (Combine) การจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ (Rearrange) และการปรับปรุงการทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify) [3] หลักการ ECRS นั้นได้มีการประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ใช้หลักการ ECRS และเทคนิคอื่น ทำการจัดสมดุลสายการผลิตใหม่ ปรับปรุงการวางตำแหน่งของอุปกรณ์และเครื่องมือให้เหมาะสม ผลจากการปรับปรุงกระบวนการพบว่าเวลาที่พนักงานว่างงานลดลงร้อยละ 22.41 และสามารถลดพนักงานได้ 3 คน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 7.89 [4] การปรับปรุงการผลิตยางรองล้อรถยนต์ โดยใช้เทคนิคอื่น และหลักการ ECRS ในขั้นตอนการอบยาง ช่วยให้สามารถลดกิจกรรมที่ไม่จำเป็นและไม่เพิ่มมูลค่า (Non Value Added; NVA)



14 กิจกรรม และลดกิจกรรมที่จำเป็นแต่ไม่เพิ่มมูลค่า (Necessary but Non Value Added; NNVA) จำนวน 2 กิจกรรม และในขั้นตอนการขนส่ง สามารถลด NVA 4 กิจกรรม และ NNVA 8 กิจกรรม [5] การปรับปรุงกระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์กล่องวงจรปิด ใช้การจัดสมดุลสายการผลิต และการลดความสูญเปล่าด้วยหลักการ ECRS จัดลำดับขั้นตอนการทำงานให้เหมาะสม หลังการปรับปรุง รอบเวลาในการประกอบชิ้นงานลดลง 525 วินาที จำนวนพนักงานในกระบวนการประกอบลดลงจาก 10 คน เหลือ 9 คน จำนวนสถานีงานลดลงจาก 10 เหลือ 9 สถานีงาน และประสิทธิภาพกระบวนการผลิตโดยรวม เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.79 [6] การปรับปรุงกระบวนการบีมขึ้นรูปในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์เพื่อลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์และเพิ่มปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลา โดยใช้การศึกษาด้วยเทคนิคตั้งคำถาม 5W1H หลักการ ECRS และหลักเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหว ผลจากการออกแบบวิธีการทำงานใหม่และสร้างอุปกรณ์ขนถ่ายเศษชิ้นงานสามารถลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์จากเดิม 8.18 นาทีต่อครั้ง เป็น 5.51 นาทีต่อครั้ง และปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิมเฉลี่ย 422 ชิ้นต่อชั่วโมง เป็น 477 ชิ้นต่อชั่วโมง [7]

กระบวนการผลิตที่ใช้แรงงานคนในการปฏิบัติงานจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการทำงานที่ถูกต้องตามหลักการยศาสตร์ เพื่อป้องกันการเกิดความล้ม การบาดเจ็บ หรืออุบัติเหตุในการปฏิบัติงาน การประเมินความเสี่ยงทางกายศาสตร์ สามารถชี้บ่งระดับความเสี่ยงหรือระดับอันตรายของการทำงานของพนักงานได้ เช่น การวิเคราะห์หาสาเหตุความเมื่อยล้าและการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อของพนักงานในกระบวนการ

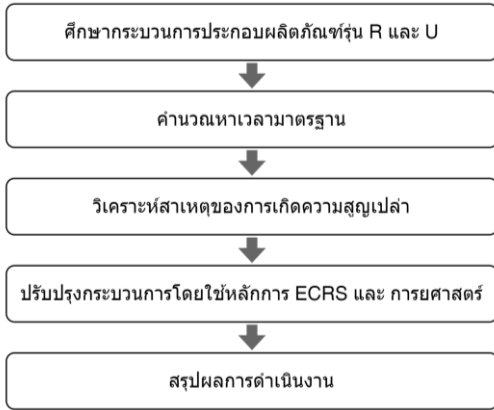
ประกอบกล่องวงจรปิด โดยประเมินท่าทางการทำงานด้วยวิธี RULA (Rapid Upper Limb Assessment) และ REBA (Rapid Entire Body Assessment) พบว่ามีความเสี่ยงสูง ควรปรับปรุงทันที จึงทำการปรับปรุงสถานีงานโดยเปลี่ยนโต๊ะทำงาน ปรับปรุงจุดรับงานเพิ่มอุปกรณ์พยักกึ่งนั่งเพื่อลดความเมื่อยล้า ผลการปรับปรุงคะแนนประเมินคะแนน RULA และ REBA พบว่างานมีความเสี่ยงลดลงจาก 7 คะแนน เป็น 5 คะแนน และจาก 11 คะแนน เป็น 9 คะแนน ตามลำดับ [8] นอกจากนั้นมีการนำวิธีการ RULA และ REBA ไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในการทำงานของเกษตรกรชาวสวนยางพารา ซึ่งพบว่ามี การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นในขั้นตอนการนวดยางให้เป็นแผ่นบางโดยใช้เท้านวด ส่งผลให้มีปัญหาปวดเมื่อยบริเวณด้านหลัง โดยออกแบบและสร้างเครื่องนวดแผ่นยางที่สามารถปรับเปลี่ยนระดับความสูงให้เหมาะสมกับผู้ใช้งาน ผลการปรับปรุงสามารถลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ได้ คะแนนประเมินวิธี RULA จากเดิม 7 คะแนน ลดลงเหลือ 3 คะแนน และคะแนนประเมินวิธี REBA จากเดิม 11 คะแนน ลดลงเหลือ 4 คะแนน [9]

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากการศึกษากระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์ หาเวลามาตรฐาน จากนั้นวิเคราะห์ความสูญเปล่าของกระบวนการ เพื่อนำไปกำหนดแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงสองแนวทาง คือ การใช้หลักการ ECRS และหลักการยศาสตร์ ขั้นตอนสุดท้ายทำการสรุปผลการดำเนินงาน



บทความวิจัย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

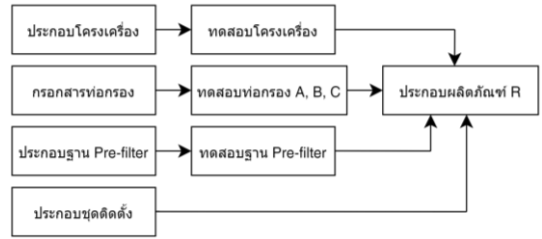
2.1 ศึกษากระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เครื่องกรองน้ำรุ่น R และ U ซึ่งมีชิ้นส่วนประกอบหลักและขั้นตอนการประกอบผลิตภัณฑ์แตกต่างกันเล็กน้อย ผลิตภัณฑ์รุ่น R ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ โครงเครื่อง ท่อกรอง ฐานพีวีซี และชุดติดตั้ง การประกอบผลิตภัณฑ์มี 8 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์รุ่น U ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ โครงเครื่อง ท่อกรอง และชุดติดตั้ง โดยการประกอบผลิตภัณฑ์มี 9 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3 โดยผลิตภัณฑ์ทั้งสองรุ่นมีขั้นตอนการทดสอบท่อกรองเหมือนกัน

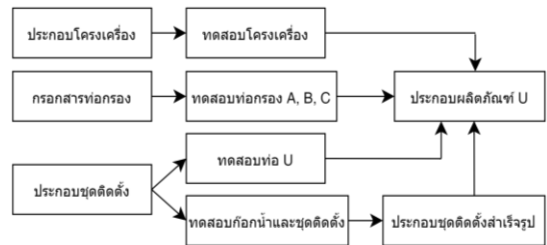
2.2 การจัดทำเวลามาตรฐาน

เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่และยังไม่มีเวลามาตรฐาน จึงหาเวลามาตรฐานโดยมีขั้นตอนดังนี้ 1) กำหนดจำนวนรอบการจับเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ตาราง Maytag 2) ประเมินอัตราเร็ว (Rating Factor) และหาประสิทธิภาพจากตาราง Westinghouse 3) กำหนดเวลาเผื่อ และ 4) กำหนดเวลามาตรฐานโดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติ} (1 + \% \text{เวลาเผื่อ}) \quad (1)$$



รูปที่ 2 ขั้นตอนการประกอบเครื่องกรองน้ำรุ่น R



รูปที่ 3 ขั้นตอนการประกอบเครื่องกรองน้ำรุ่น U

2.3 วิเคราะห์สาเหตุของการเกิดความสูญเปล่า

ใช้แผนภูมิคน-เครื่องจักร (Man-machine Chart) วิเคราะห์การทำงานร่วมกันระหว่างคนและเครื่องจักร เพื่อดูสัดส่วนการเสียเวลารอคอยของคนและเครื่องจักร

2.4 กำหนดแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค 5W1H และหลักการ ECRS

จากผลการวิเคราะห์ความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์ ทำการตั้งคำถามเพื่อวิเคราะห์หาเหตุผลในการทำงานตามวิธีการเดิมด้วยเทคนิค 5W1H และนำเสนอการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้หลักการ ECRS เพื่อลดเวลาของกระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์

2.5 ปรับปรุงการทำงานโดยใช้หลักการยศาสตร์

ทำการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA และ REBA [10] โดยที่ RULA เป็นการประเมินการทำงานในท่าหนึ่ง หรือมุ่งเน้นการประเมินท่าทางการ



เคลื่อนไหวของร่างกายส่วนบน โดยทำการสังเกตการเคลื่อนไหว การทำงานซ้ำ การยกน้ำหนัก และให้คะแนนท่าทางโดยเปรียบเทียบตารางการพิจารณาของอวัยวะต่างๆ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ แขนท่อนบน แขนท่อนล่าง ข้อมือ และการหมุนของข้อมือ และกลุ่มที่สองคือ คอ หลัง และขา ส่วนวิธี REBA เป็นการประเมินท่าทางการทำงานที่ครอบคลุมตำแหน่งของร่างกายทั้งหมด โดยสังเกตตำแหน่งและลักษณะการเคลื่อนไหวของส่วนต่างๆ ของร่างกาย แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก คือ หลัง คอ และขา กลุ่มที่สองคือ แขนท่อนบน แขนท่อนล่าง และข้อมือ คะแนนที่ได้จากการวิเคราะห์ท่าทางการทำงานด้วยวิธี RULA

และ REBA สามารถแปลผลระดับความเสี่ยงและแนวทางการดำเนินการสำหรับแต่ละระดับได้ดังตารางที่ 1 [11] จากนั้นทำการออกแบบและจัดสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงานให้เหมาะสมกับความสามารถและข้อจำกัดด้านร่างกายผู้ปฏิบัติงานโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงพิจารณาข้อจำกัดของสถานที่ปฏิบัติงานด้วย

2.6 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ทำการจับเวลาการทำงานของกระบวนการหลังปรับปรุง และประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA และ REBA เปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

ตารางที่ 1 เกณฑ์จัดระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์จากการประเมินด้วยวิธี RULA และ REBA

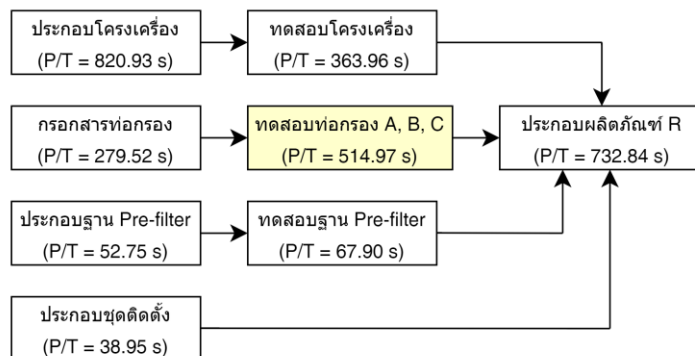
Score	Action Level	Risk	Action
RULA			
1-2	1	Low	Acceptable posture if not maintained or repeated for long period
3-4	2	Medium	Investigations and possible work changes are required
5-6	3	High	Investigations are required, as well as possible quickly work changes
7 or more	4	Very high	Investigations are required, as well as possible immediately work changes
REBA			
1	0	Insignificant	Actions are not required
2-3	1	Low	Actions may be required
4-7	2	Medium	Actions are required
8-10	3	High	Actions are quickly required
11-15	4	Very high	Actions are immediately required

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

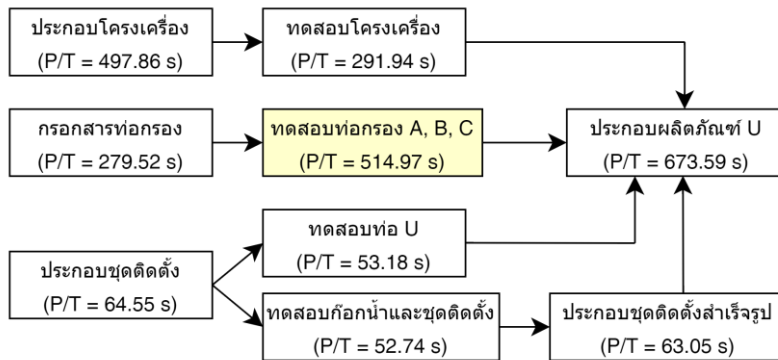
3.1 เวลามาตรฐาน

การหาเวลามาตรฐานของแต่ละขั้นตอนการประกอบผลิตภัณฑ์ เริ่มจากคำนวณหาจำนวนรอบการจับเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ตาราง Maytag จากนั้นหาเวลาเฉลี่ยที่ได้จากการจับเวลา นำไปคูณกับอัตราเร็ว ได้เป็นเวลาปกติ และคำนวณหาเวลามาตรฐาน จากสมการที่ (1) โดยค่าอัตราเร็วและเวลาเพื่อได้มาจากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญของบริษัท กรณีศึกษา ผลการประเมินอัตราเร็วตามวิธีของ Westinghouse พิจารณาจากองค์ประกอบ 4 ด้าน ได้แก่ คะแนนดังนี้ ทักษะความชำนาญ (+0.08) ความพยายาม (+0.02) สภาพแวดล้อมในการทำงาน (0.00) ความสม่ำเสมอ (-0.04) คะแนนรวมทั้ง 4 ด้าน เท่ากับ +0.06 หรือคิดเป็นค่าอัตราเร็ว 1.06% และในส่วนของเวลาเพื่อ แบ่งออกเป็น เวลาเพื่อสำหรับบุคคล 5% และเวลาเพื่อความเครียดแปรผัน 5% คิดเป็นเวลาเพื่อรวมเท่ากับ 10% เวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอนการประกอบผลิตภัณฑ์ R และ U แสดง ดังรูปที่ 4 และ 5 เนื่องจากขั้นตอนการประกอบและทดสอบ เครื่องมือ ท่อกรอง ฐาน Pre-filter และ ชุดติดตั้ง ใช้พนักงานคน

ละทีมและสามารถดำเนินการพร้อมกันได้ โดยไม่ต้องรอให้กระบวนการก่อนหน้าเสร็จก่อน ดังนั้นการคำนวณหารอบเวลา (Cycle Time) ของการประกอบผลิตภัณฑ์ จำนวนจากขั้นตอนการทำงานที่ใช้เวลามากที่สุด รอบเวลาของการประกอบผลิตภัณฑ์ R เท่ากับ 1917.73 วินาที จำนวนจากเวลาที่ใช้ในการประกอบโครงสร้างเครื่อง 820.93 วินาที ทดสอบโครงสร้าง 363.96 วินาที และ ประกอบผลิตภัณฑ์ R 732.84 นาที รอบเวลาของการประกอบผลิตภัณฑ์ U เท่ากับ 1468.08 วินาที จำนวนจากเวลาที่ใช้ในการกรอกสารท่อกรอง 279.52 วินาที ทดสอบท่อกรอง 514.97 วินาที และ ประกอบผลิตภัณฑ์ 673.59 นาที เมื่อพิจารณาขั้นตอนการผลิตพบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งสองรุ่นมีขั้นตอนการทดสอบท่อกรองเหมือนกัน และใช้เวลาในสถานงาน (Processing Time; P/T) เท่ากันคือ 514.97 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการทดสอบท่อกรองทั้ง 3 ประเภท (A, B, และ C) และในปัจจุบันพบปัญหาความสูญเสียเปล่าจากการรอคอยงานจากกระบวนการทดสอบท่อกรองเพื่อนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงงานที่ขั้นตอนการทดสอบท่อกรอง



รูปที่ 4 เวลามาตรฐานของการประกอบผลิตภัณฑ์ R



รูปที่ 5 เวลามาตรฐานของการประกอบผลิตภัณฑ์ U

3.2 สาเหตุของการเกิดความสูญเปล่า

ผลิตภัณฑ์ R และ U มีการใช้ท่อกรอง 3 ชนิดเหมือนกัน คือ ท่อกรอง A, B, และ C การทดสอบท่อกรองจึงต้องทำทั้งหมด 3 รอบ การวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานในหัวข้อนี้จะพิจารณาขั้นตอนและเวลาของการทดสอบท่อกรอง 1 รอบ แสดงดังตารางที่ 2 เวลาทั้งหมดที่ใช้ต่อ 1 รอบ เท่ากับ 140.79 วินาที (เป็นเวลาที่ได้จากการจับเวลายังไม่ได้คำนวณเป็นเวลาดังมาตรฐาน) พบว่าพนักงานว่างงานหรือมีการรอคอยในขั้นตอนการตรวจสอบฟองอากาศด้วยการสังเกต 50.99 วินาที เวลาทำงานของพนักงานคิดเป็นร้อยละ 63.8 ของเวลาในการทดสอบท่อกรอง

3.3 ผลการตั้งคำถามด้วยเทคนิค 5W1H

จากตารางที่ 2 พนักงานมีเวลาว่างที่ขั้นตอนการตรวจสอบฟองอากาศ จึงทำการวิเคราะห์และตั้งคำถามในขั้นตอนย่อยของการทำงานคือ การยกเครื่องทดสอบท่อกรอง และการยื่นสังเกตฟองอากาศ ดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 2 แผนภูมิคน-เครื่องจักร (ก่อนปรับปรุง) ขั้นตอนการทดสอบท่อกรอง 1 รอบ

พนักงาน	เวลา (วินาที)	แทนทดสอบ	เวลา (วินาที)
1.หยิบท่อกรองมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบ	22.24	กำลังติดตั้งท่อกรอง	22.24
2.เปิดวาล์วลมเข้า ยกเครื่องทดสอบลงบ่อทดสอบ	10.11	กำลังถูกยกเข้าบ่อทดสอบและอัดลมเข้าไปที่กรอง	10.11
ว่างงาน	50.99	กำลังทดสอบรั่วที่บ่อทดสอบ	63.62
3.ตรวจสอบฟองอากาศ	12.63		
4.ปิดวาล์วลม ยกเครื่องทดสอบออกจากบ่อ	10.13	กำลังถูกยกออกจากบ่อทดสอบและใส่ลมออกจากท่อกรอง	10.13
5.ถอดท่อกรองออกจากเครื่องทดสอบและเช็ดเก็บลงกล่อง	34.69	กำลังถอดท่อกรอง	34.69
		พนักงาน	แทนทดสอบ
เวลาว่าง (วินาที)	50.99		0
เวลาทำงาน (วินาที)	89.80		140.79
เวลาทั้งหมด (วินาที)	140.79		140.79
%เวลาทำงาน	63.8%		100%

**ตารางที่ 3** การตั้งคำถามในขั้นตอนยกเครื่องทดสอบท่อกรอง

หัวข้อ	คำถาม	คำตอบ
What	ทำอะไร	ยกแท่นทดสอบ
	ทำไมต้องยก	เพื่อไปจุ่มบ่อทดสอบ
Where	ทำที่ไหน	สถานีทดสอบท่อกรอง
	ทำไมต้องสถานที่นั้น	เป็นสถานที่ทดสอบท่อ
When	ทำเมื่อไร	หลังจากเปิดวาล์วลมเข้าท่อจนมีความดันลม 3 บาร์
	ทำไมต้องทำหลังจากนั้น	เพื่อเช็ครั่วที่บ่อทดสอบ
Who	ใครเป็นคนทำ	พนักงานสถานีทดสอบท่อ
	ทำไมต้องเป็นคนนั้น	เป็นผู้รับผิดชอบสถานีนี้
How	ทำอย่างไร	ใช้มือ 2 ข้างยกแท่นทดสอบไปยังบ่อทดสอบ ที่อยู่ใต้ด้านขวา
	ทำไมต้องทำอย่างนั้น	เพราะตำแหน่งของบ่อทดสอบอยู่ห่างจากโต๊ะ
	(ถามเพิ่มเติม) ย้ายตำแหน่งบ่อทดสอบได้ไหม	ย้ายตำแหน่งบ่อทดสอบได้

ตารางที่ 4 การตั้งคำถามในขั้นตอนการยื่นสังเกตฟองอากาศ

หัวข้อ	คำถาม	คำตอบ
What	ทำอะไร	ยื่นสังเกตแท่นทดสอบ
	ทำไมต้องยื่นสังเกตแท่นทดสอบ	สังเกตการรั่วของท่อกรองระหว่างทดสอบ
	(ถามเพิ่มเติม) ระหว่างการทดสอบสามารถนำเวลาว่างไปทำอย่างอื่นได้ไหม	สามารถเช็คท่อที่เปียกอยู่ ระหว่างรอสังเกตท่อได้
Where	ทำที่ไหน	สถานีทดสอบท่อกรอง
	ทำไมต้องสถานที่นั้น	เป็นสถานที่ทดสอบท่อ
When	ทำเมื่อไร	หลังจากนำท่อที่ทดสอบไปแช่ในอ่างน้ำ
	ทำไมต้องทำหลังจากนั้น	เป็นข้อกำหนดของโรงงาน
Who	ใครเป็นคนทำ	พนักงานสถานีทดสอบท่อ
	ทำไมต้องคนนั้น	เป็นผู้รับผิดชอบสถานีนี้
How	ทำอย่างไร	ก้มลงไปมองรอบๆท่อเพื่อสังเกตว่ามีฟองอากาศออกจากจุดที่รั่วหรือไม่
	ทำไมต้องทำอย่างนั้น	ทำให้มองเห็นฟองอากาศง่ายขึ้น
	สามารถเปลี่ยนบ่อทดสอบเป็นวัสดุที่ใสที่ทำให้สามารถมองการรั่วของท่อได้ในระดับสายตาได้ไหม	สามารถเปลี่ยนวัสดุของบ่อน้ำให้เป็นบ่อใสได้ เพื่อมองการรั่วของท่อกรองได้สะดวกขึ้น



จากการถามคำถามสามารถสรุปแนวทางในการปรับปรุงได้ดังนี้

- สามารถย้ายตำแหน่งบ่อทดสอบได้เพื่อลดระยะทางการยกเครื่องทดสอบมาที่บ่อทดสอบ
- สามารถเช็คท่อกรองที่เปียกอยู่ระหว่างรอสังเกตท่อได้
- สามารถเปลี่ยนวัสดุของบ่อทดสอบให้มีความโปร่งใสได้ เพื่อให้มองเห็นฟองอากาศเมื่อพบการรั่วของท่อกรองได้สะดวกขึ้น

3.4 ปรับปรุงการทำงานโดยใช้หลักการ ECRS

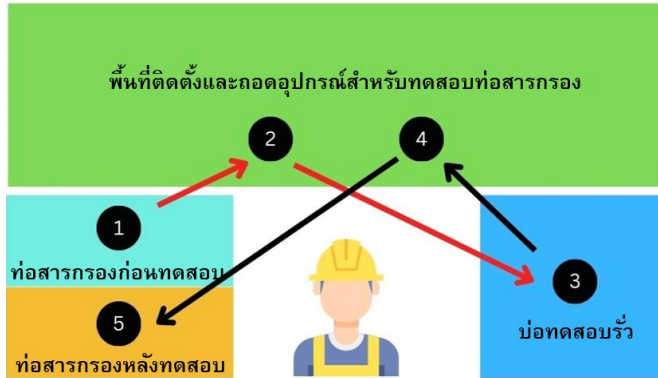
หลักการ ECRS ที่ใช้ในการปรับปรุงการทำงาน ได้แก่ การจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ และการปรับปรุงการทำงานในห้วงขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) จัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ เพื่อลดความสูญเปล่าด้านเวลา โดยย้ายขั้นตอนการเช็คท่อกรองและเก็บลงกล่อง จากเดิมที่ทำเป็นขั้นตอนสุดท้าย ไปทำในช่วงเวลาว่างระหว่างรอสังเกตฟองอากาศ

2) ปรับปรุงการทำงานให้ง่ายขึ้น โดยจัดตำแหน่งสถานีงานใหม่และเปลี่ยนวัสดุของบ่อทดสอบ การจัดตำแหน่งสถานีงานแบบเดิมแสดงดังรูปที่ 6 พนักงานมีการเคลื่อนที่มาก เนื่องจากบ่อทดสอบอยู่ทางด้านขวาที่หมายเลข 3 ในขณะที่ตำแหน่งจัดเก็บท่อกรองก่อนและหลังทดสอบอยู่ที่ด้านซ้าย ที่หมายเลข 1 และ 5 ตามลำดับ จึงทำการจัดสถานีงานใหม่ โดยย้ายบ่อทดสอบมาไว้ด้านหน้าของพนักงานและย้ายกล่องเก็บท่อกรองที่ผ่านการทดสอบแล้วไปไว้ด้านขวาของพนักงานดังรูปที่ 7 เพื่อให้พนักงานเคลื่อนที่น้อยลง และเนื่องจากบ่อทดสอบเดิมเป็นอ่างพลาสติกแบบทึบไม่โปร่งใส ทำให้พนักงานสังเกตฟองอากาศเมื่อเกิดการรั่วได้ยากและต้องก้มลงไปมองที่ท่อกรองเพื่อสังเกต

ฟองอากาศ อีกทั้งขนาดของบ่อทดสอบเดิมมีความกว้างและยาวมากเกินไป ทำให้เมื่อจัดตำแหน่งสถานีงานใหม่แล้วไม่สามารถวางบ่อทดสอบที่ตำแหน่งด้านหน้าของพนักงานได้ (ตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 7) จึงออกแบบบ่อทดสอบใหม่ ขนาด 61x16x16 เซนติเมตร โดยใช้วัสดุเป็นอะคริลิกใส ดังรูปที่ 8 ซึ่งเป็นขนาดที่พอเหมาะกับการใช้งานและสามารถจัดวางบ่อทดสอบไว้ที่ด้านหน้าของพนักงานได้ และความสะดวกของบ่อช่วยให้พนักงานสังเกตเห็นฟองอากาศได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องก้มลงไปมองรอบท่อกรอง นอกจากนี้พบว่าในขั้นตอนการทดสอบรั่ว การทำงานแบบเดิมไม่มีการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการสังเกตฟองอากาศ พนักงานจึงต้องคาดการณ์เวลาเอง ซึ่งพนักงานแต่ละคนใช้เวลาไม่เท่ากัน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว แผนกวิจัยและพัฒนาของบริษัทฯ จึงศึกษาจึงกำหนดเวลามาตรฐานที่เหมาะสมในการทดสอบรั่วเป็นเวลา 30 วินาที และงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องจับเวลาทดสอบรั่ว โดยให้พนักงานกดปุ่มเมื่อเริ่มการทดสอบรั่ว เครื่องจะนับเวลาถอยหลัง 30 วินาที เมื่อครบเวลาแล้วไฟสถานะสีเขียวจะติดค้างไว้เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อบ่งบอกพนักงานว่าครบกำหนดเวลาในการทดสอบแล้ว เครื่องจับเวลานี้ใช้งานง่ายและช่วยให้พนักงานรู้เวลาทดสอบที่แน่นอน

หลังจากจัดตำแหน่งสถานีงานใหม่ ปรับขั้นตอนการทำงาน ใช้บ่อทดสอบใหม่ และทดสอบรั่วตามเวลามาตรฐานที่กำหนด 30 วินาที ทำการเก็บข้อมูลโดยใช้แผนภูมิคน-เครื่องจักร หลังการปรับปรุง พบว่าพนักงานไม่มีเวลาว่างหรือการรอคอย และเวลารวมที่ใช้ในกระบวนการทดสอบท่อกรองลดลงจากเดิม 140.79 เหลือ 89.92 วินาที แสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 6 ตำแหน่งการจัดสถานีงานก่อนปรับปรุง



รูปที่ 7 ตำแหน่งการจัดสถานีงานหลังปรับปรุง



รูปที่ 8 บ่อทดสอบหลังปรับปรุง



ตารางที่ 5 แผนภูมิคน-เครื่องจักร (หลังปรับปรุง) ขั้นตอนการทดสอบท่อกรอง 1 รอบ

พนักงาน	เวลา (วินาที)	แท่นทดสอบ	เวลา (วินาที)
1.หยิบท่อกรองมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบ	21.28	กำลังติดตั้งท่อกรอง	21.28
2.เปิดวาล์วลมเข้า ยกเครื่องทดสอบลงบ่อทดสอบ	11.87	กำลังถูกยกเข้าบ่อทดสอบและอัดลมเข้าไปท่อกรอง	11.87
3.เช็ดท่อที่ทดสอบเสร็จแล้วของรอบก่อนหน้า และเก็บลงกล่อง	18.31	กำลังทดสอบรั่วที่บ่อทดสอบ	30
4.ตรวจสอบฟองอากาศ	11.69		
5.ปิดวาล์วลม ยกเครื่องทดสอบออกจากบ่อ	11.34	กำลังถูกยกออกจากบ่อทดสอบและใส่ลมออกจากท่อกรอง	11.34
6.ถอดท่อกรองออกจากเครื่องทดสอบ	15.33	กำลังถอดท่อกรอง	15.33
		พนักงาน	แท่นทดสอบ
เวลารว่าง (วินาที)		0	0
เวลาทำงาน (วินาที)		89.82	89.82
เวลาทั้งหมด (วินาที)		89.82	89.82
%เวลาทำงาน		100%	100%

3.5 ปรับปรุงการทำงานโดยใช้หลักการยศาสตร์

ทำการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ก่อนดำเนินการปรับปรุง การประเมินท่าทางการทำงาน ด้วยวิธี RULA ทำการประเมิน 16 ขั้นตอน ได้คะแนนความเสี่ยงโดยรวมเท่ากับ 7 แสดงดังตารางที่ 6 เมื่อนำคะแนนประเมินท่าทางไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับ

ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ (ตารางที่ 1) อยู่ในระดับความเสี่ยงสูงมาก และต้องมีการปรับปรุงทันที และการประเมินด้วยวิธี REBA จำนวน 15 ขั้นตอน ได้คะแนนความเสี่ยงโดยรวมเท่ากับ 10 แสดงดังตารางที่ 7 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ระดับความเสี่ยงสูง ควรปรับปรุงจากการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ทั้งสองวิธี พบว่าพนักงานมีการใช้อวัยวะบางส่วนของร่างกายที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะส่วนคอ ลำตัว แขนส่วนบน มือและข้อมือ ซึ่งอาจทำให้มีโอกาสเกิดการบาดเจ็บของอวัยวะนั้น ๆ ได้มากกว่าปกติ การปรับปรุงเพื่อลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ มีรายละเอียดดังนี้

1) ปรับระดับความสูงของแท่นทดสอบ แท่นทดสอบเดิมมีความสูงต่ำกว่ามาตรฐานทำให้พนักงานมีลักษณะการทำงานที่ก้มคอ ท่าทางการทำงานของพนักงานก่อนปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 9 อ้างอิงตามมาตรฐานความสูงที่เหมาะสมในการทำงานทำยืนของชายไทยในโรงงานอุตสาหกรรม [12] ความสูงที่เหมาะสมของการทำงานที่ระดับเอวอยู่ที่ 95.51 เซนติเมตร ซึ่งหลังจากย้ายตำแหน่งบ่อทดสอบไปอยู่ด้านหน้าของพนักงาน (ตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 7) แท่นทดสอบที่ตำแหน่งใหม่มีความสูง 90 เซนติเมตร และบ่อทดสอบที่เป็นอะคริลิกใสสูง 16 เซนติเมตร รวมเป็น 106 เซนติเมตร เนื่องจากไม่สามารถปรับความสูงแท่นทดสอบได้ จึงนำเสนอให้นำไม้พาเลทที่มีความสูงไม่เกิน 10 เซนติเมตร มาวางบนพื้นเพื่อให้พนักงานยืนบนพาเลทขณะทำงาน จะได้ความสูงที่เหมาะสมและพนักงานไม่ต้องก้มคอ

2) การปรับปรุงวิธีการทำงานโดยใช้หลักการ ECRS ตามที่นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้าช่วยให้การทำงานมีลักษณะที่ถูกต้องตามหลักการยศาสตร์ พนักงานไม่ต้องก้มลงไปตรวจสอบฟองอากาศในลักษณะที่อวัยวะส่วน

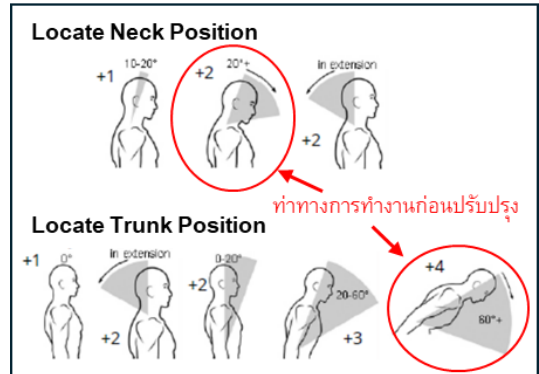


หลังก้มลงเกิน 60 องศา ดังรูปที่ 9 และไม่ต้องยกเครื่องทดสอบไปมา ในลักษณะที่บิดและหมุนลำตัวมาก ทำทางการทำงานของพนักงานก่อนและหลังปรับปรุง แสดงดังรูปที่ 10

ทำการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์หลังปรับปรุงกระบวนการทำงาน ด้วยวิธี RULA และ REBA แสดงดังตารางที่ 6 และ 7 พบว่าความเสี่ยงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนปรับปรุง ดังตารางที่ 8 หลังการปรับปรุงคะแนนรวมของวิธี RULA เท่ากับ 4 คะแนน และวิธี REBA เท่ากับ 7 คะแนน งานนั้นมีความเสี่ยงลดลงอยู่ในระดับปานกลาง

ตารางที่ 6 ผลการประเมินด้วยวิธี RULA

No.	หัวข้อประเมิน	Before		After	
		ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
1	ตำแหน่งแขนส่วนบน	4	3	3	3
2	ตำแหน่งแขนส่วนล่าง	2	2	1	1
3	ข้อมือ	2	2	1	1
4	การหมุนของข้อมือ	1	1	1	1
5	สรุปผล ชั้นตอนที่ 1-4	4	4	3	3
6	การใช้กล้ามเนื้อแขนหรือมือในการทำงาน	1		1	
7	แรงหรือภาระงานในส่วนแขนหรือมือ	2		1	
8	สรุปผล ชั้นตอนที่ 6-7	7		5	
9	ส่วนคอ	2		1	
10	ส่วนลำตัว	5		1	
11	ส่วนขา	1		1	
12	สรุปผล ชั้นตอนที่ 9-11	6		1	
13	กล้ามเนื้อขาหรือเท้า	1		1	
14	แรงหรือภาระงานในส่วนขาหรือเท้า	0		0	
15	สรุปผล ชั้นตอนที่ 13-14	7	3	2	
16	คะแนนความเสี่ยงโดยรวม	7	2	4	



รูปที่ 9 ทำทางการทำงานของพนักงาน ก่อนปรับปรุง



(ก) ก่อนปรับปรุง



(ข) หลังปรับปรุง

รูปที่ 10 ทำทางการทำงานของพนักงาน

ก่อนและหลังปรับปรุง

ตารางที่ 7 ผลการประเมินด้วยวิธี REBA

No.	หัวข้อประเมิน	Before		After	
		ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
1	ส่วนคอ	2	2	2	2
2	ส่วนลำตัว	4	4	2	2
3	ส่วนขา	1	1	1	1
4	สรุปผล ชั้นตอนที่ 1-3	5	5	3	3
5	แรงที่ใช้หรือภาระงาน	1	1	1	1
6	สรุปผล ชั้นตอนที่ 4-5	6		4	
7	แขนส่วนบน	4		3	
8	แขนส่วนล่าง	1		1	
9	ข้อมือ	3		2	
10	สรุปผล ชั้นตอนที่ 7-9	5		4	



ตารางที่ 7 (ต่อ)

No.	หัวข้อประเมิน	Before		After	
		ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
11	การจับยึดวัตถุ	2		2	
12	สรุปผล ขั้นตอนที่ 10-11	7		6	
13	การเคลื่อนไหวและ กิจกรรมของงาน	1		1	
14	ประเมินคะแนนรวม	9		6	
15	คะแนนความเสี่ยงโดยรวม	10		7	

ตารางที่ 8 ผลการประเมิน REBA และ RULA

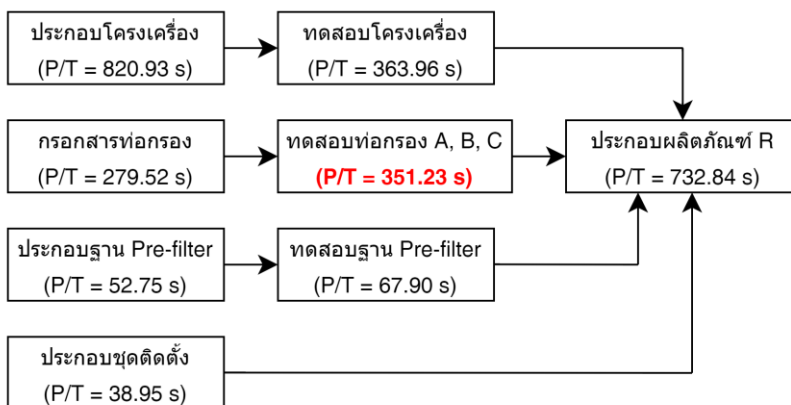
วิธีประเมิน	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
RULA	7 (Very high)	4 (Medium)
REBA	10 (High)	7 (Medium)

ตารางที่ 9 เวลามาตรฐานกระบวนการทดสอบต่อกรอง (หลังการปรับปรุง)

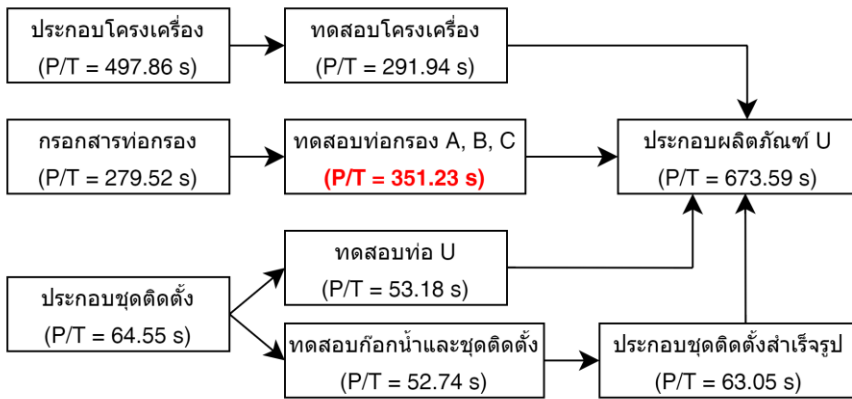
เวลาเฉลี่ยจากการจับเวลา (วินาที)	301.23
อัตราเร็ว (%)	1.06
เวลาปกติ (วินาที)	319.30
เวลาเผื่อ (%)	10
เวลามาตรฐาน (วินาที)	351.23

3.6 เวลามาตรฐานหลังการปรับปรุง

ทำการจับเวลากระบวนการทดสอบต่อกรองหลังการปรับปรุงเพื่อคำนวณหาเวลามาตรฐาน โดยมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการหาเวลามาตรฐานก่อนปรับปรุง (หัวข้อ 2.2) เวลาเฉลี่ยที่ได้จากการจับเวลาจำนวน 10 ครั้ง เท่ากับ 301.23 วินาที นำไปคูณกับอัตราเร็ว (จากการประเมิน) ได้เวลาปกติเท่ากับ $301.23 \times 1.06\% = 319.30$ จากนั้นนำเวลาปกติไปคูณกับเวลาเผื่อ ได้เวลามาตรฐานเท่ากับ $319.30 \times 10\% = 351.23$ แสดงดังตารางที่ 9 เวลามาตรฐานของกระบวนการทดสอบต่อกรองของผลิตภัณฑ์รุ่น R และ U เท่ากับ 351.23 วินาที แสดงดังรูปที่ 11 และ 12 ทำให้รอบเวลาของการประกอบผลิตภัณฑ์ R และ U เท่ากับ 1917.73 วินาที (ประกอบโครงเครื่อง 820.93 วินาที + ทดสอบโครงเครื่อง 363.96 วินาที + ประกอบผลิตภัณฑ์ R 732.84 วินาที) และ 1304.35 วินาที (กรอกสารต่อกรอง 279.52 วินาที + ทดสอบต่อกรอง 351.23 วินาที + ประกอบผลิตภัณฑ์ 673.59 นาที) ตามลำดับ



รูปที่ 11 เวลามาตรฐานของการประกอบผลิตภัณฑ์ R (หลังปรับปรุง)



รูปที่ 12 เวลามาตรฐานของการประกอบผลิตภัณฑ์ U (หลังปรับปรุง)

4. บทสรุป

การนำหลักการ ECRS และหลักการยศาสตร์มาใช้ในการปรับปรุงการทำงาน โดยปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานให้ง่ายขึ้น จัดตำแหน่งสถานีงานใหม่ รวมถึงการออกแบบบ่อทดสอบใหม่ ทำให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการทดสอบท่อกรองของผลิตภัณฑ์รุ่น R และ U ลดลงจาก 514.97 วินาที เหลือ 351.23 วินาที คิดเป็นร้อยละ 31.8 และผลการปรับปรุงด้านการยศาสตร์ช่วยให้พนักงานมีท่าทางการทำงานที่เหมาะสมขึ้น ลดโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและบาดเจ็บจากการทำงานได้ ผลรวมคะแนนการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงานลดลงจากเดิม โดยการประเมินด้วยวิธี RULA จาก 7 คะแนน (ความเสี่ยงสูง) เหลือ 4 คะแนน (ความเสี่ยงปานกลาง) และการประเมินด้วยวิธี REBA จาก 10 คะแนน (ความเสี่ยงสูง) เหลือ 7 คะแนน (ความเสี่ยงปานกลาง) แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมและติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาเวลาของการประกอบผลิตภัณฑ์พบว่า ผลิตภัณฑ์ U มีรอบเวลาดลดลงจาก 1468.08 เหลือ 1304.34 วินาที คิดเป็นร้อยละ 11.2 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ R ยังคงมีรอบเวลาเท่าเดิม เนื่องจากงานวิจัยนี้พิจารณาเลือกปรับปรุงกระบวนการทดสอบท่อกรอง เพราะเป็นกระบวนการที่ใช้ร่วมกันทั้งสองผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามควรมีการปรับปรุงกระบวนการเพิ่มเติมในอนาคต ได้แก่ กระบวนการประกอบโครงเครื่องของผลิตภัณฑ์ R กระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์ R และ U จะทำให้สามารถลดรอบเวลาของการประกอบผลิตภัณฑ์ลงได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Ranetakkharaphong, A work study and human reduction in the production line: Case study of Thai Namthip co., Ltd., Thai-Nichi Institute of Technology, Thailand, 2016. (in Thai)



- [2] N. Kriengkarakot, P. Kriengkarakot, P. Thepsang and K. Bunlulilp, Calculating the standard time of workers in a garment factory case study: Sewing shorts model A1314, Journal of Ubon Rajathanee University, 2006, 8(1), 79-88. (in Thai)
- [3] K. Pipatpanyanugoon, Work study, 4th Ed., Pakorbmetrai, Thailand, 1996. (in Thai)
- [4] S. Buaphan, Productivity improvement in the electronics industry, Thesis, Silpakorn University, Thailand, 2020. (in Thai)
- [5] J. Kanlayapo and J. Ngaoprasertwong, Waste reduction in tire flap manufacturing process, Engineering Journal Chiang Mai University, 2021, 28(1), 78-92. (in Thai)
- [6] S. Saisanguansub, Process improvement by production line balancing case study of closed circuit television assembly process, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2017. (in Thai)
- [7] N. Wattanasungsuth and W. Meethom, Improvement of pressing process in automotive industry, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 78-89. (in Thai)
- [8] W. Sangsoda, S. Wongweragiat and L. Ratana-arporn, Workstation improvement for muscular fatigue and injury reduction among assembly operators in a closed circuit camera industry, The 14th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference (The 14th KU-KPS Conference), Proceeding, 2017, 612-623. (in Thai)
- [9] W. Madtharak, Working loss reduction of para rubber plantation farmers using ergonomics assessment: a case study in Manung district, Stun province area, The Journal of Industrial Technology, 2018, 14(1), 13-21. (in Thai)
- [10] W. Waiyakam, N. Yodpijit and S. Limnararat, Ergonomics assessment for lifting tasks in automotive parts manufacturer. The Conference of Industrial Engineering Network 2012, Proceedings, 2012, 492-502. (in Thai)
- [11] C. Na Takuathung and P. Diloksumpun, Ergonomic risk assessments of timber harvesting workers in teak plantations, Phrae province, The Journal of Science and Technology, 2021, 10(2), 223-233. (in Thai)
- [12] Y. Bunterngrchit, S. Chantanaraj, A. Tantasukitwanich and S. Chomposri, Preliminary anthropometric study of Thai industrial workers. The 10th International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice, Proceedings, 2005.

พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคานกริดเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตย์

สินีนางู แก้วประสิทธิ์* สายันต์ ศิริมนตรี และ ชนะชัย ทองโคม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sineenat.kaew@dome.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 28 ธันวาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 8 มีนาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 25 มีนาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคานกริดเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยทำการทดสอบคาน 2 กลุ่ม ได้แก่คานที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d Ratio) เท่ากับ 1.00 และ 2.00 จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง คานทดสอบมีขนาด $0.20 \times 0.45 \times 2.4$ เมตร รูปแบบการเสริมกำลังมี 2 แบบ ได้แก่ U-wrap และ Fully wrap ผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังแบบ Fully wrap สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนซึ่งแสดงในรูปของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากกว่าแบบ U-wrap นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเมื่อเทียบกับคานอ้างอิงในคานกลุ่มที่ 2 มีมากกว่าคานกลุ่มที่ 1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกลับจะเห็นเด่นชัดเมื่อคานมีค่า a/d Ratio สูง และมีผลน้อยเมื่อคานมี a/d ratio ต่ำอันเป็นผลจากพฤติกรรมแบบกลไกอาร์ช (Arch Action) ซึ่งการถ่ายแรงเฉือนจะประกอบไปด้วย Compression Strut และ Tension Tie ทำให้กำลังรับแรงเฉือนส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคานกริดในแนว Compression Strut

คำสำคัญ: คานลึกลับคานกริดเสริมเหล็ก; เสริมกำลังรับแรงเฉือน; แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened with Carbon Fiber under Static Loading

Sineenat Kaewprasit^{*}, Sayan Sirimontree and Chanachai Thongchom

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

^{*} Corresponding author, E-mail: sineenat.kaew@dome.tu.ac.th

Received: 28 December 2023; Revised: 8 March 2024; Accepted: 25 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: This study investigates the shear behavior of reinforced concrete (RC) deep beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The experiment was divided into two groups of deep beams, which had a shear span to effective depth ratios (a/d ratios) of 1.00 and 2.00. In total, six identical specimens with dimensions of 0.20 x 0.45 x 2.4 meters were applied by two techniques to strengthen the RC deep beams: U-wrap and Fully wrap. Experimental results reveal that shear strength, in terms of load carrying capacity of the beams strengthened by Fully wrap type CFRP was higher than that of the beams strengthened by U-wrap type CFRP. The increase in the load carrying capacity compared to the reference beam in Group 2 beams was greater than that in Group 1 beams, indicating that the effectiveness of shear strengthening was evident when the beams had a/d ratio was high and it was little effected when the beam was a low a/d ratio. As a result, when the beam has a lower a/d ratio, the more concrete will play an important role in resisting high shear force as a result of Arch action behavior. The shear force transfer consists of Compression strut and Tension tie. The most of shear strength depended on the compressive strength of the concrete in the compression strut.

Keywords: RC Deep Beams; Shear Strengthening; Carbon Fiber Reinforced Polymer



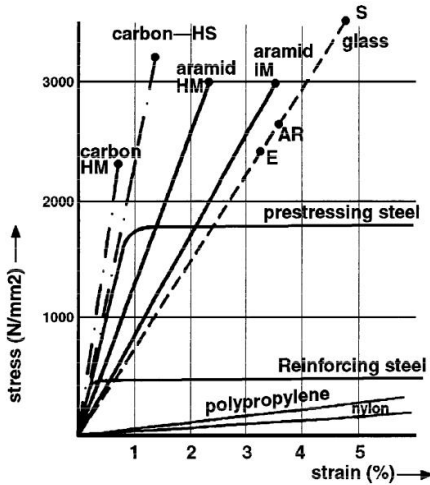
1. บทนำ

การวิบัติด้วยแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะเป็นการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนทำให้เกิดหน่วยแรงดึงหลัก (Principle Tensile Stress) บริเวณที่แรงเฉือนสูง เช่น ใกล้จุดรองรับ ในบริเวณที่ไม่มีโมเมนต์ดัดสูงซึ่งการวิบัติจะเริ่มด้วยการแตกร้าวในแนวตั้งเนื่องจากโมเมนต์ดัดจากนั้นรอยร้าวจะแผ่ขยายต่อเนื่องเป็นการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือน เรียกว่า “แรงเฉือนดัด”(Flexural Shear) การวิบัติด้วยแรงเฉือนเป็นการวิบัติแบบเปราะ (Brittle) โดยไม่มีการเตือน ดังนั้นหลักการที่สำคัญในออกแบบคือการออกแบบให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดไม่น้อยกว่ากำลังต้านทานแรงดัดในทุกๆ หน้าตัดตลอดความยาวคาน จึงต้องมีการออกแบบให้ปริมาณของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีเพียงพอที่จะทำให้คานวิบัติด้วยแรงดัด ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเหนียว คานเล็กคือคานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือน (a) ต่อความลึกประสิทธิภาพ (d) (Shear Span/Effective Depth Ratio, a/d) อยู่ระหว่าง 1.00 ถึง 2.00 มีบริเวณที่มีพฤติกรรมการต้านแรงเฉือนแบบกลไกอาร์ช (Arch Action) ที่กำลังต้านทานแรงเฉือนส่วนใหญ่จะมาจากกำลังอัดของคอนกรีตในแนวทแยง (Strut) รับแรงอัด แต่เมื่ออัตราส่วน a/d มีค่ามากขึ้นผลของกลไกอาร์ชจะลดลง ทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตมีค่าลดลง ส่งผลให้เหล็กปลอกมีบทบาทในการทำหน้าที่รับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่มีการออกแบบคานเพื่อรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ อาทิ การปรับปรุงการใช้งานโครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น การเสื่อมสภาพของวัสดุตามอายุการใช้งานและสภาพแวดล้อม [1, 2] อาจจำเป็นต้องทำการเสริมกำลัง

รับแรงเฉือนให้กับคาน การเสริมกำลังรับแรงเฉือนมีหลากหลายวิธีแต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีค่าอัตราส่วน a/d มากกว่า 2.5 (Slender Beam) ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานเล็กที่มีค่าอัตราส่วน a/d น้อยกว่า 2.5 ที่ได้รับการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

คานช่วงเดียวจะมีพฤติกรรมเป็นคานลึก (Deep Beam) เมื่ออัตราส่วน a/d ของคานมีค่าไม่เกิน 2.0 มีการรับแรงเฉือนเป็นแบบกลไกอาร์ช ซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดัดทำหน้าที่เป็นตัวยึด (Tie) ที่รับแรงดึงขนาดคงที่พาดฐานรองรับทั้งสอง ในขณะที่คอนกรีตจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงอัดในแนวทแยง (Strut) โดยรอยร้าวจะเกิดขึ้นและขยายตัวพาดระหว่างจุดของแรงกระทำและฐานรองรับเป็นแนวเอียง รอยร้าวนี้จะทำลายความต้านทานแรงเฉือนตั้งแต่ระดับเหล็กเสริมรับแรงดัดจนถึงคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดทำให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงอัดที่เป็นผลมาจากโมเมนต์ได้คานเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน เรียกว่า Shear Compression Failure

พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP) เป็นวัสดุเสริมกำลังที่ใช้อย่างแพร่หลายทดแทนการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยแผ่นเหล็กเนื่องจากมีกำลังรับแรงดึงสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเสริมกำลังชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกแก่การติดตั้งและไม่กระทบต่อน้ำหนักของโครงสร้างเดิม ทนต่อสภาพแวดล้อมและไม่เกิดสนิม [1, 3] การวางทิศทางของเส้นใย FRP ขวางกับแนวแกน



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ [5]

ของชิ้นส่วนหรือตั้งฉากกับรอยร้าวจากแรงเฉือนที่อาจเกิดขึ้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน [4]

มีผลการศึกษามากมายเกี่ยวกับผลจากการเสริมกำลังโครงสร้างคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กด้วย FRP ทั้งการเปรียบเทียบชนิดของเส้นใยที่แตกต่างกันระหว่างเส้นใย CFRP และ GFRP [6, 7] รูปแบบและทิศทางของเส้นใยที่แตกต่างกัน [6-10] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อซ่อมแซมโครงสร้างที่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน [11, 12] และเสริมกำลังโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ [10]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า รูปแบบการติดตั้ง ชนิดวัสดุเสริมกำลังและทิศทางของเส้นใยที่แตกต่างกันจะให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน การเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP มักเกิดการวิบัติจากการหลุดล่อนของ CFRP กับผิวคอนกรีต (CFRP Debonding) งานวิจัยนี้

จะทำการศึกษาพฤติกรรมคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพผลต่างกันที่ 1.00 และ 2.00 โดยจะศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กกับแรงเฉือนต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน ACI318-19 และเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ โดยการทดสอบคานตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติของคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กที่มีค่าอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย CFRP โดยการทดสอบรูปแบบการเสริมกำลังมี 2 วิธี ได้แก่ U-wrap และ Fully Wrap คานตัวอย่างมีจำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง จะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มตามค่าอัตราส่วน a/d แต่ละกลุ่มจะประกอบไปด้วย คานอ้างอิง 1 ตัว และคานที่เสริมกำลัง 2 ตัว รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 1

2.1 รายละเอียดคานตัวอย่าง

คานตัวอย่างมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ $0.20 \times 0.45 \times 2.4$ เมตร มีการเสริมเหล็กกับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเท่ากันทุกตัวอย่าง การทดสอบจะให้น้ำหนักกระทำสองจุดโดยมีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างถูกออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วันเท่ากับ 21 MPa เหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก



ไม่น้อยกว่า 400 MPa สำหรับเหล็กปลอกใช้เหล็กเส้นกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 200 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 240 MPa รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 2

วัสดุที่ใช้เสริมกำลังได้แก่ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เส้นใยทิศทางเดียวและใช้อุปกรณ์เสริมเป็นวัสดุเชื่อมประสานโดยสมบัติเชิงกลเป็นไปตามรายงานของผู้ผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2 การติดตั้งเป็นวิธีการแบบเปียก (Wet Lay-Up) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน มยผ.1508-15 [13]

คานตัวอย่าง B1U และ B2U ติดตั้ง CFRP ในลักษณะพันรอบ 3 ด้าน (U-wrap) จำนวน 2 ชั้น ตลอดช่วงการเงื่อนไข คานตัวอย่าง B1F และ B2F ติดตั้ง CFRP ในลักษณะพันรอบ 4 ด้าน (Fully Wrap) จำนวน 2 ชั้น ตลอดช่วงการเงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 3

2.2 การติดตั้งเครื่องมือวัด

คานทดสอบเป็นคานช่วงเดียวมีฐานรองรับเป็นแบบ Simply Support มีช่วงคานทดสอบ 2,000 มิลลิเมตร ให้นำหนักโดย Hydraulic Jack ผ่าน Load cell มายังคานถ่ายแรง (Transfer Beam) มีการวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานด้วย Displacement Transducer (DT1,DT2) ที่มีค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน (SG1,SG2) เหล็กเสริมรับแรงดึง (SG3,SG4) และที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะวัดค่าโดยเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (Electrical Strain Gauge) มีความยาวเกจขนาด 5 มิลลิเมตร อุปกรณ์ทั้งหมดถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Data Locker) เพื่อส่งและบันทึกข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์ รายละเอียดและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเสริมกำลังคานตัวอย่าง

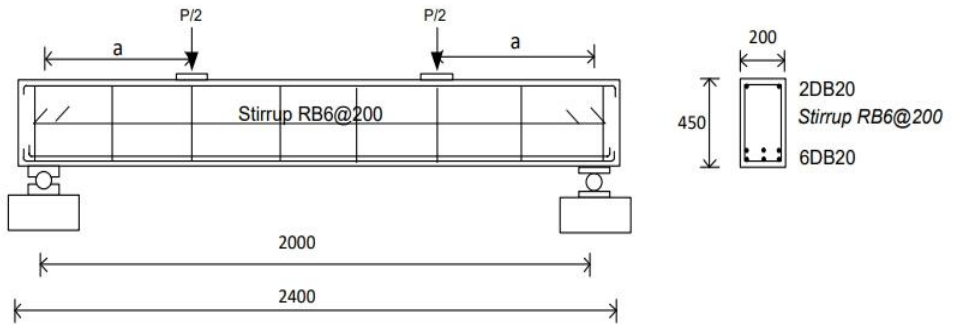
กลุ่ม	a/d Ratio	ชื่อคานตัวอย่าง	รายละเอียดการเสริมกำลัง	แนวของเส้นใย
1	1.00	BR1	-	-
		B1U	U-wrap 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°*
		B1F	Fully wrap 2 ชั้นตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°
2	2.00	BR2	-	-
		B2U	U-wrap 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°
		B2F	Fully wrap 2 ชั้นตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°

* การทำมุมของเส้นใยชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 กับความยาวของคาน

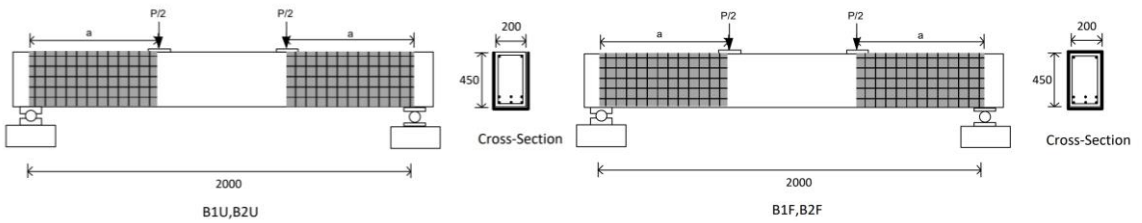
ตารางที่ 2 สมบัติของ CFRP Sheet และ Epoxy Resin

วัสดุ	กำลังรับแรงดึง (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่นต่อแรงดึง (MPa)	อัตราการยืดตัวจนขาด	กำลังรับแรงยึดเกาะต่อแรงดึง (MPa)	ความหนา (mm/ply)
CFRP	4,000	230,000	1.7%	-	0.129
Epoxy	30	4,500	0.9%	>4	-

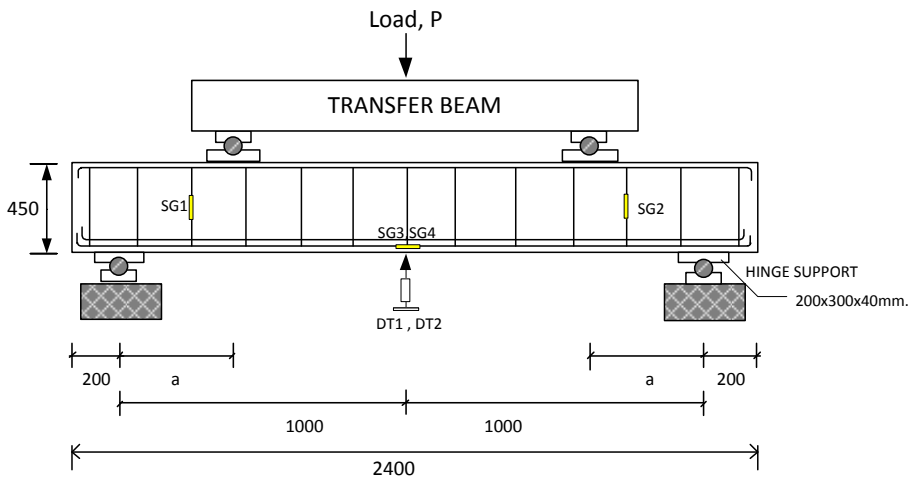
(7 วัน @ +23°C)



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานตัวอย่าง



รูปที่ 3 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด



3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

คานตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ 1 และ 2 ที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ คานตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Static Loading) จนกระทั่งวิบัติ พฤติกรรมทางโครงสร้างของคานทดสอบจะถูกนำเสนอและวิเคราะห์ผลในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูป กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ ผลจากการทดสอบสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูป

พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกของคานทดสอบแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงคานแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าคานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

จนเกิดการวิบัติและน้ำหนักบรรทุกตกลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นการวิบัติแบบเปราะเนื่องจากแรงเฉือน คานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนแบบ U-wrap (B1U) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นได้น้อยเมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1) ประมาณร้อยละ 7.49 เนื่องจากมีการสูญเสียการยึดเหนี่ยว (Debond) ระหว่าง CFRP และผิวคอนกรีต และมีการปริออก ส่วนคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนแบบ Fully Wrap (B1F) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะเพิ่มมากกว่าคาน B1U เล็กน้อย แต่จะมีความสามารถในการเสียรูปก่อนเกิดการวิบัติมากกว่าคานอ้างอิงและคาน B1U อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของคานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap

คานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2.00 จะเห็นว่าคานอ้างอิง (BR2) มีการแอ่นตัวก่อนการวิบัติได้มากเมื่อเทียบกับกรณีของคาน BR1 แต่กำลังรับน้ำหนักจะน้อยกว่า BR1 อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อคานมีการเสริมกำลังแบบ U-wrap (B2U) น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นมากกว่า BR2 ประมาณร้อยละ 28.69 และมีการหลุดร่อนของ CFRP ทำให้การแอ่นตัวที่สภาวะประลัยน้อยกว่าคานอ้างอิง คานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap (B2F) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการแอ่นตัวที่สภาวะประลัยสูงกว่าคานอ้างอิง BR2 อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ผลจากการทดสอบ

กลุ่ม	ชื่อคานตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกประลัย (kN)	การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกประลัย (%)	การแอ่นตัวสูงสุด (มม.)	รูปแบบการวิบัติ
1	BR1	934	-	9.94	Shear Compression
	B1U	1,004	7.49	9.39	CFRP Debonding
	B1F	1,072	14.78	16.33	Shear Compression
2	BR2	324.8	-	12.06	Shear Compression
	B2U	418	28.69	7.35	CFRP Debonding
	B2F	764	135.22	17.36	Flexural Compression



ค่าแอนตัวสูงสุดที่สภาวะประลัยสามารถแสดงให้เห็นถึงความเหนียว (Ductility) ของโครงสร้าง จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 พบว่า คานเสริมกำลังแบบ U-wrap (B1U,B2U) มีค่าการแอนตัวตัวลดลง ในขณะที่คานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap (B1F,B2F) มีค่าการแอนตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1,BR2) แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังแบบ U-wrap ทำให้ความเหนียวของคานมีค่าลดลง มีการหลุดร่อนของ CFRP ที่ส่วนปลาย (Debonding) ของ U-wrap ในขณะที่การเสริมกำลังแบบ Fully Wrap ทำให้ความเหนียวของคานมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการโอบริดของ CFRP ช่วยยับยั้งการแตกร้าวแยกออกจากกันของคอนกรีตในแนวทแยง ทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงใกล้ถึงจุดครากก่อนเกิดการวิบัติได้

คานกลุ่มที่มีอัตราส่วน a/d มากกว่าจะมีค่าการแอนตัวที่สภาวะประลัยสูงกว่า เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน a/d น้อย จะมีพฤติกรรมเป็นแบบคานลึกมากและมีแนวโน้มที่จะวิบัติโดยรอยร้าวทแยงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงทแยงที่มีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะมีหน่วยแรงถึงจุดครากและเกิดการเสียรูปที่มากขึ้นได้

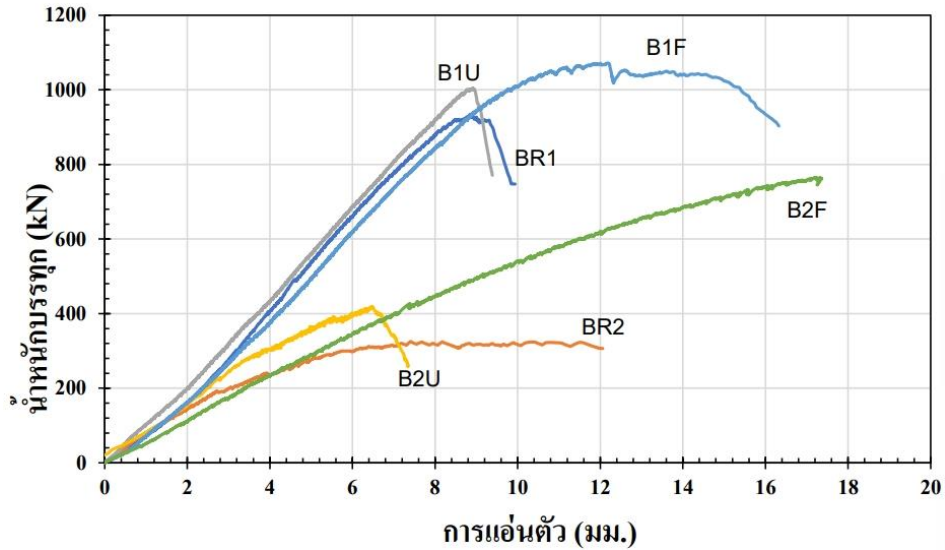
3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียด

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ช่วงแรกกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงเนื่องจากหน่วยแรงและความเครียดเกิดขึ้นที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อย เมื่อคานเกิดรอยร้าวและความกว้างของรอยร้าวขยายมากขึ้น จะเกิดหน่วยแรงดึงที่สูงขึ้นในแผ่น CFRP คานที่เสริมกำลังแบบ

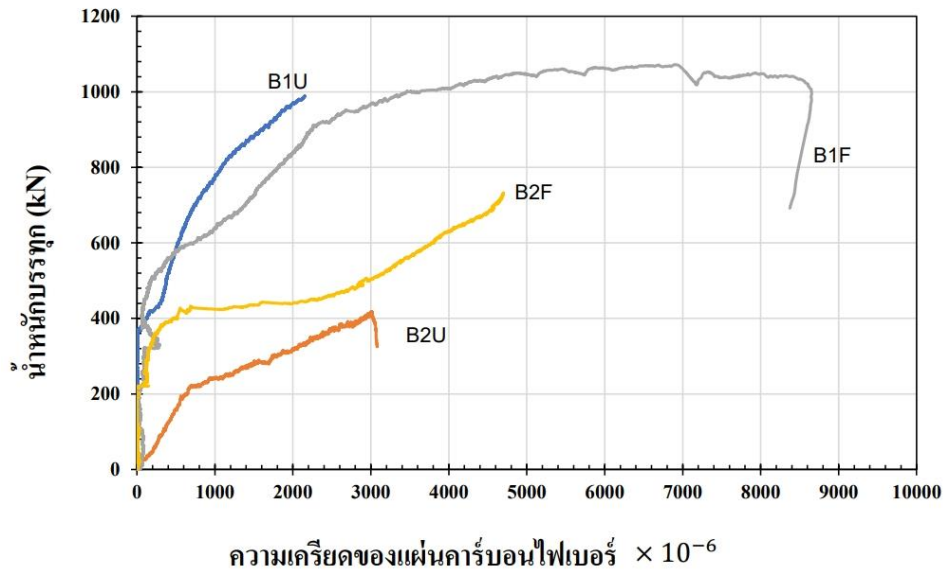
Fully Wrap จะมีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าคานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap เนื่องจากไม่เกิดการหลุดร่อน (Debonding) หน่วยแรงในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคานทดสอบกลุ่มที่ 1 เริ่มเพิ่มขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกสูงกว่าของคานทดสอบกลุ่มที่ 2 แสดงให้เห็นว่าคานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 นั้นมีกำลังรับหน่วยแรงเฉือนในคอนกรีตสูงกว่าในคานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2.00

3.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load)

น้ำหนักบรรทุกประลัย คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานสามารถรับได้และแสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงเฉือนของคานทดสอบ จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้เมื่อเปรียบเทียบคานในแต่ละกลุ่มพบว่า คานเสริมกำลังทั้งหมด (B1U,B2U,B1F,B2F) สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1,BR2) โดยจะสังเกตเห็นว่าการเสริมกำลังแบบ Fully Wrap มีความสามารถในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกประลัยมากกว่าแบบ U-wrap เนื่องจากการพันรอบทั้งสี่ด้านเป็นการพันโอบริดโครงสร้างคานไว้ทั่วทั้งบริเวณช่วงเฉือน เมื่อคานเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือน CFRP จะทำหน้าที่โอบริดและรับแรงดึงทำให้คานทดสอบสามารถต้านทานแรงเฉือนและรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้สูงขึ้น หากพิจารณาที่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเมื่อเทียบกับคานอ้างอิงของคานกลุ่มที่ 1 จะมีค่าน้อยกว่ากลุ่มที่ 2 เนื่องจากการเสริมกำลังจะมีผลน้อยในคานที่มีพฤติกรรมเป็นแบบคานลึก (Deep Beam) มาก ผลของการเสริมกำลังจะมีมาก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน
a/d ratio เท่ากับ 1.00 และ 2.00



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



เมื่อคานามีพฤติกรรมค่อนข้างไปทางเป็นคานาชะลูด (Slender Beam) ทั้งนี้เป็นเพราะคานาลึกจะมีกลไกสำคัญในการรับแรงเฉือนมาจากคอนกรีตเป็นหลัก หรือที่เรียกว่า Arch action เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะแสดงให้เห็นถึงกำลังต้านแรงเฉือนของหน้าตัดคานาเมื่อแปรเปลี่ยนอัตราส่วน a/d ของคานา คอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดแต่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน เนื่องจากการวิบัติโดยแรงเฉือนเป็นการวิบัติแบบเปราะส่วนการวิบัติโดยโมเมนต์ดัดเป็นการวิบัติแบบเหนียวดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบเหล็กปลอกให้เพียงพอที่คานาจะวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด กำลังต้านแรงเฉือนจะประกอบด้วยส่วนที่ต้านโดยคอนกรีต และเหล็กรับแรงเฉือน โดยแรงเฉือนต้านทานสูงสุดต้องไม่น้อยกว่า

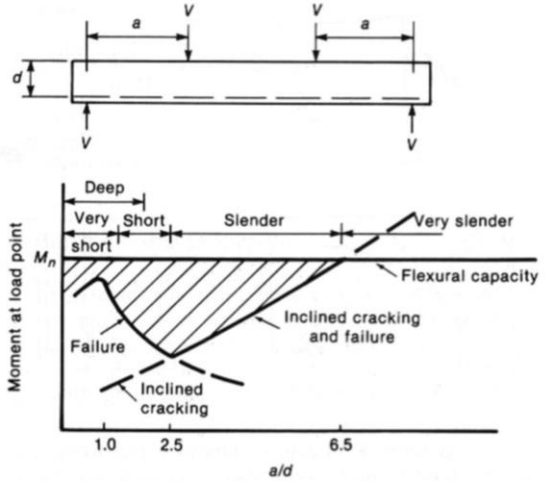
$$V_n = M_n / a \quad (1)$$

เมื่อ M_n คือ โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด (Nominal moment capacity)

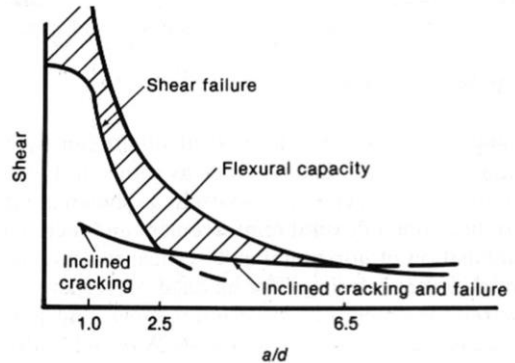
$$M_n = A_s f_y (d - a/2) \quad (2)$$

งานวิจัยนี้ใช้ Strut and Tie Model ในการคำนวณออกแบบคานาดังกล่าว กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จะให้ผลที่ค่อนข้างปลอดภัยเนื่องจากการวิบัติของคานาลึกเป็นการวิบัติแบบเปราะ น้ำหนักบรรทุกประลัยของคานาอ้างอิง BR1 และ BR2 ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 535 และ 318 kN ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ

พื้นที่แรงเงาแสดงถึงผลของของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยเหล็กปลอกและ CFRP จะเห็นว่าเมื่อคานามีอัตราส่วน a/d ต่ำ ผลของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนนั้นจะน้อยมากโดยคอนกรีตจะมีส่วนในการรับ



รูปที่ 7 กำลังต้านแรงเฉือนของหน้าตัดคานา คอนกรีตที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือนในรูปของโมเมนต์ดัดที่คานารับได้สูงสุดเมื่อเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือน [14]



รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วน a/d ที่มีต่อกำลังต้านแรงเฉือนของคานาที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือน [15]

แรงเฉือนเป็นหลัก และเมื่ออัตราส่วน a/d มีค่าเพิ่มขึ้น ผลของการเสริมกำลังจะเพิ่มมากขึ้นในขณะที่การต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตลดลง การเสริมเหล็กปลอกหรือเสริม CFRP รับแรงเฉือนที่เพียงพอจะทำให้คานาสามารถพัฒนากำลังรับน้ำหนักประลัยไปจนถึงกำลังต้านทานแรงดัดได้



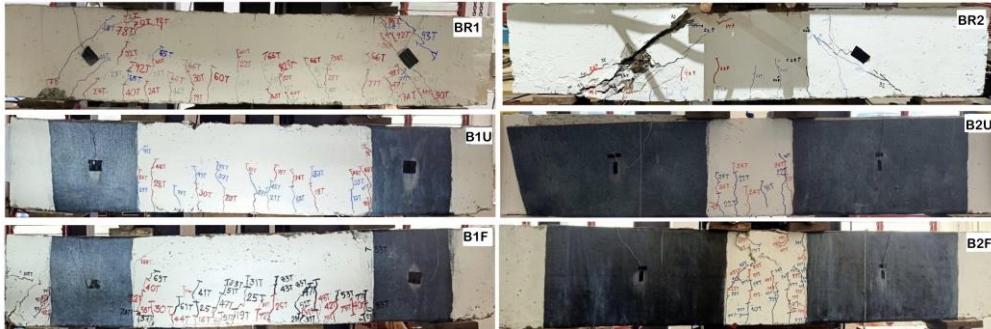
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลจากงานวิจัยในอดีต

งานวิจัย	ขนาดคาน ตัวอย่าง (มม.)	ชื่อคานตัวอย่าง	a/d Ratio	รายละเอียดการเสริมกำลัง	อัตราการเพิ่มขึ้น ของน้ำหนักบรรทุก เฉลี่ย (%)
		B1U	1.00	U-wrap ด้วย CFRP 2 ชั้น ตลอด ช่วงเฉือน	7.49
S. Kaewprasit (งานวิจัยนี้)	200 x 450 x 2400	B2U	2.00		28.69
		B1F	1.00	Fully Wrap ด้วย CFRP	14.78
		B2F	2.00	2 ชั้น ตลอดช่วงเฉือน	135.22
A.H. Zaher [7]	140 x 450 x 1900	G2.BCa1	1.25	U-wrap	59.4
		G2.BCa2	1.50	ตลอดช่วงเฉือน	62
		G2.BCa3	1.75		74.6
M.M. Hason [16]	150 x 280 x 1400	G2-a/d1-F-p0.4	1.00	Fully Wrap	18.06
		G3-a/d1.75-F-p0.4	1.75	ตลอดช่วงเฉือน	22.65
W. Li [17]	180 x 350 x 2000	B1U	1.00	Strip U-wrap ตลอดช่วงเฉือน	2.5
		B2U	1.50		12.8
		B3U	2.00		31.8

จากการศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยในอดีตที่ทำการทดสอบเสริมกำลังรับแรงเฉือนโครงสร้างคานลึกลคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยมีคานตัวอย่างที่มีค่า a/d มากกว่าหนึ่งค่า ดังแสดงข้อมูลต่าง ๆ ในตารางที่ 4 ได้แก่ ขนาดของคานตัวอย่าง กำลังของวัสดุ รายละเอียดการเสริมเหล็กและรูปแบบการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่ต่างกัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยตรงได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ยพบว่า ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อคานที่เสริมกำลังมี a/d Ratio เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ยก็เพิ่มขึ้นตาม กล่าวคือ a/d Ratio มีผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกลคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อคานมี a/d Ratio สูง และจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อคานมีค่า a/d Ratio ต่ำ

3.3 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ

การวิบัติโดยทั่วไปของคานลึกลคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสาเหตุมาจากแรงเฉือนเป็นหลัก ณ ตำแหน่งของ Strut รับแรงอัด (Compression Strut) โดยรอยร้าวทแยงจะเกิดขึ้นเป็นเส้นตรงจากตำแหน่งฐานรองรับไปยังจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ทำมุม 45 องศากับแนวคาน รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่ได้มาจากแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) แต่เกิดจากแรงดึงในแนวทแยงที่มีผลมาจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด และรอยร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงในแนวทแยงมีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต คานทดสอบทั้งหมดมีรอยร้าวแรกที่ปรากฏในช่วงกลางคานเนื่องจากแรงดัดและพัฒนาเป็นรอยร้าวในรูปแบบของ Flexural-Shear Crack เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นลักษณะของรอยร้าวและการวิบัติจะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะการแตกร้าวและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

คาน BR1 เกิดการแตกร้าวขึ้นที่บริเวณฐานรองรับในลักษณะเอียงทำมุม 45 องศากับแนวคานและขยายไปในแนวแฉงจนถึงตำแหน่งที่แรงกระทำ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉือน (Shear Crack) รอยร้าวมีความกว้างมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ คาน BR2 เกิดรอยร้าวแฉงที่ strut บริเวณช่วงเอวของคาน (Web Shear Crack) และขยายไปจนถึงตำแหน่งฐานรองรับและตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ ความกว้างของรอยร้าวเพิ่มขึ้นและเกิดการทรุดตัวบริเวณจุดที่แรงกระทำทำให้เกิดการระเบิดออกของคอนกรีตใน Strut รับแรงอัด (Strut Crushing) เรียกการวิบัตินี้ว่า Shear Compression Failure

คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap B1U และ B2U เกิดรอยร้าวบริเวณใกล้ขอบของ CFRP ทั้งสองข้าง เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มมากขึ้นรอยร้าวแฉงจะปรากฏออกมาจากช่วงเฉือนทั้งสองข้าง คานเกิดการทรุดตัวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure) และมุมบนของแผ่น CFRP จะเริ่มปริและหลุดออกจากผิวคาน (CFRP Debonding) สำหรับคานที่เสริมกำลังแบบ Fully wrap คาน B1F เกิดรอยร้าวแฉงบริเวณฐานรองรับจำนวนมากพัดผ่านไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำขอบของ CFRP ปรีออกจากผิวคอนกรีตเล็กน้อย

คอนกรีตในช่วงเฉือนที่ถูกห่อหุ้มด้วย CFRP ถูกบดอัดจนกระทั่งคานเกิดการทรุดตัวและเกิดรอยร้าวแฉงขนาดใหญ่ที่มุมของคาน แต่แผ่น CFRP ไม่มีการฉีกขาดหรือหลุดออกจากผิวคอนกรีตเป็นการวิบัติแบบ Shear Compression Failure คาน B2F เกิดรอยร้าวในช่วงกลางของคานลักษณะเป็นแนวตั้งและขยายไปตามแนวของแผ่น CFRP เมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เริ่มปรากฏรอยร้าวจากตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำและวิบัติจากการบดอัดของคอนกรีต (Concrete Crushing) บริเวณที่น้ำหนักกระทำ เป็นการวิบัติแบบ Flexural Compression Failure

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 การเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้ง 2 วิธี ได้แก่แบบ U-wrap และ Fully-wrap สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้โดยรูปแบบที่ดีที่สุดคือ Fully Wrap น้ำหนักบรรทุกประลัยเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.78 และ 135.22 สำหรับคานที่ a/d Ratio เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap จะมีการหลุดล่อนของ CFRP บริเวณส่วนปลายสุดของรูปตัวยูขณะรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด



4.2 เมื่ออัตราส่วน a/d มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าการแอ่นตัวที่สภาวะประลัยของคานอ้างอิงและคานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap จะเพิ่มขึ้น แต่คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap จะมีค่าการแอ่นตัวลดลงเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนของ CFRP เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

4.3 การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวทแยงที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติโดยแรงเฉือนได้ ทำให้อานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้มากขึ้น

4.4 ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะเห็นได้ชัดเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d สูง และมีผลน้อยเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d ต่ำ เนื่องจากเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d น้อย คอนกรีตจะมีบทบาทสำคัญในการรับแรงเฉือนมาก อันเป็นผลจากกลไกการต้านแรงเฉือนแบบอาร์ช (Arch Action)

5. กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ได้รับทุกการศึกษาและทุนวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และได้รับความอนุเคราะห์จาก Retrofit Structure Special, Co. Ltd. ช่วยสนับสนุนวัสดุเสริมกำลังและผู้เชี่ยวชาญด้านการติดตั้ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Lenwari, Strengthening of reinforced concrete structures with fiber-reinforced polymers, 1ST Ed., Chulalongkorn University Press, BKK, Thailand, 2018.
- [2] V. Chovichian, Reinforced concrete design (Working Stress Design: WSD), 6th Ed., BKK, Thailand, 2012.
- [3] ISBN 978-974-458-669-8, Guide to Strengthening Building Structures, 1994. (in Thai).
- [4] ACI 440.2R-17, Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2007, 31.
- [5] ACI 440R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2002, 12.
- [6] M.M. Elsonbaty, W.M. Montaser and A.H. Zaher, Strengthening of R.C deep beams using CFRP and GFRP, Civil Engineering Research Magazine (CERM), 2018, 40(4), 331-345.
- [7] A.H. Zaher, W.M. Montaser and M.M. Elsonbaty, Strengthening and repairing of RC deep beams using CFRP and GFRP, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 2020, 11(1), 64-85.
- [8] M.R. Islam, M.A. Mansur and M. Maalej, Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems, Cement and Concrete Composites, 2004, 413-420.



- [9] H.A. Ghanim, A.A. Asi, M.A. Jaber and M. Alqam, Shear and flexural behavior of reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP composites, *Modern Applied Science*, 2017, 110-122.
- [10] R. Hongthong, A. Beniaphong and T. Jairtalawanich, Strengthening of deteriorated reinforced concrete deep beam caused by chloride with carbon fiber sheets, *RMUTP Research Journal*, 2020, 14(2), 160-172. (in Thai).
- [11] M. Rasheed, Retrofit of reinforced concrete deep beams with different shear reinforcement by using CFRP, *Civil and Environmental Research*, 2016, 8(5), 6-14.
- [12] M.S. Alexin and P.M. Philip, Shear behavior of RC deep beams retrofitted with CFRP sheets, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2018, 6(6), 1-4.
- [13] ISBN 978-974-16-5863-3, Standard for Strengthening Reinforced Concrete Structures with Fiber-Reinforced Composite Materials, 2008. (in Thai).
- [14] J.G. MacGregor, Reinforced concrete mechanics and design, Prentice-Hall. Inc., NJ, USA, 1997.
- [15] T.T.C. Hsu, Unified theory of reinforced concrete, CRC Press., FL, USA, 1993.
- [16] M.M. Hason, A.N. Hanoon, S.J. Saleem, F. Hejazi and A.W.A. Zand, Characteristics of experimental ductility energy index of hybrid CFRP reinforced concrete deep beams, *SN Applied Sciences*, 2021, 3, 200.
- [17] W. Li and C.K.Y. Leung, Effect of shear span depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with u-wrapping FRP strips, *Composite Structures*, 2017, 141-157.

Reducing Harmful Effects on Human Health of Car Vibrations using a Combination of Unsupervised and Supervised Machine Learning Algorithm

Chatlatanagulchai Withit and Pachara Juyploy *

Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: pachara.j@ku.th

Received: 7 February 2024; Revised: 18 March 2024; Accepted: 25 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: Car vibrations are typically common, but it's crucial to determine the level of shaking that signifies a potential threat to human health. In this research, the machine learning algorithm was employed to predict potential failures in car suspension systems, with the goal of enhancing vehicle reliability and safety. A combination of unsupervised and supervised machine learning algorithms is applied to classify data, isolate outlier, and predict fault diagnosis outcomes in the simulation context with a dataset of a car suspension system. In general, either unsupervised or supervised learning techniques can contribute to a valuable predictive maintenance when dealing with larger datasets in a car suspension system either usual or unusual conditions. Therefore, the results may not cover unknow patterns within unusual conditions, such as high amplitude sinusoidal and step road profile. In this research, a combination of unsupervised and supervised learning techniques is proposed to identify car suspension issues caused by poorly maintained vehicles, potentially impacting human health. The findings from the simulation indicate that a combination of unsupervised and supervised machine learning algorithms can effectively classify fault diagnosis and isolate unknow patterns for future training models. Moreover, the identification of non-groupable elements using a combination of these learning techniques is illustrated through outlier detection on unknown patterns. Therefore, the research results enable engineers to assess devices for maintenance and repair needs, aiming to reduce or eliminate car vibrations, which can pose serious harm to human health.

Keywords: Car Suspension Systems; Machine Learning Algorithm; Predictive Maintenance; Supervised; Unsupervised Learning Techniques



1. Introduction

Several research studies have explored the effects of whole-body vehicle vibrations on human health over the last few decades. Furthermore, based on a study by the Land Transportation Safety and Health Association in Japan 2022 [1], there has been a rise in occupational accidents involving workers in the road transportation industry falling from heights during loading and unloading activities after driving. The data reveals that in Japan, more than 10,000 work-related accidents occur annually in cargo-handling operations, constituting 10% of all occupational accidents. As, the causes of car vibration can be harmful to human health, leading to issues such as motion sickness, lower back pain, stomach and digestive conditions, and so on. According to the study by Junya Tatsuno and Setsuo Maedo in 2023 [2], which investigated the effects of whole-body vibration exposure in vehicles, car vibrations were found to be linked to health problems, including back pain, sciatica, digestive disorders, genitourinary problems, and hearing damage. As the positive effects of car vibrations have drawn the attention of researchers in the medical field, there have consequently been reported experiments investigating the effects of vibration on car suspension. For example, Sedeh and Keivan's research in 2006 [3] employed a car model with an active suspension system to assist in controlling and achieving a smooth ride, optimizing

and amplitude, and minimizing variations in car acceleration. Similarly, Ufuk Kirbas (2022) [4] conducted a study on the effects of car speeds on manholes cover, exploring the impact on vibrations and the potential to cause discomfort and affect human health. The research results found that whole body vibration is not adversely affected by the human body according to the vibration dose value scale defined in the standard. However, it can be influenced at various ride speeds with depths of 7.5 cm and above in 50 passes. Hence, while previous experimental studies have applied various techniques to minimize the potentially dangerous effects of vibrations on a vehicle suspension, machine learning (ML) emerges as another important tool that can be used to assess and predict variations in car suspension that can impact human health. Researchers have shown how machine learning has had a deeply impact for predictive and detection purposes in different contexts. For example, Yorulmus, Bahadir, and Bolat [5] employed machine learning algorithm to predict brake quality defects in the automobile industry during quality inspection operations. The study found that two specific machine learning models, Gradient Boost and CatBoost algorithms, provided the most significant benefits for detecting the correlation between quality control data and customer complaints. Kong G, Lin K, and Hu Y [6] developed machine learning-based tools for



accuracy prediction about the risk number of patients' death with sepsis in intensive care units (ICUs). The medical information for intensive care consisting of medical records such as heart rate, systolic blood pressure, diastolic blood pressure, and so on from 86 predictor variables was used as a primary data source. The work of these researchers [7] also serves as another example of applying machine learning-based approaches to predict maintenance in health care sector. Various machine learning techniques were employed, including supervised and unsupervised learning, to develop precise predictive models for IoT maintenance in healthcare. These models were trained using historical data to establish the relationship between sensors readings and maintenance events. The models can also differentiate between various stages or severity levels of a diabetic retinopathy as evidenced by the increased classification accuracy. Theissler et al. [8] has conducted a study with the aim of reviewing papers to explore the use of four main types of machine learning. For example, studies of Wang and Yin [9], Yin and Huang [10], Ying Wang et al [11] and Safavi S et al. [12] focus on fault detection and isolation for vehicle suspensions systems using a clustering-based method.

The main contribution of the research work is twofold. Firstly, a car suspension system model was built, incorporating simulation datasets for both the

front and rear suspensions. The model was then simulated to generate various virtual measurements corresponding to different types of faults. Second, a combination of unsupervised and supervised machine learning techniques was proposed for detecting anomalies as high amplitude sinusoidal and step road profile in car suspension systems. Simulations have been conducted with propose a combination of these learning techniques to classify data, isolate outlier, and predict fault diagnosis outcomes in a full car suspension model. Moreover, these models are not only applicable for training datasets but also testing with new different types of fault diagnosis.

2. Human Health and Car Vibration

2.1 Effects of Car Vibration on Human Health

Several studies have shown the positive impact of car vibrations on human safety and health. For example, Sitnik, Magdziak-Tokowicz, Wrobel, and Kardasz [13] investigated vehicle vibration's impact on human health and found that both vibrations and noise may lead to harmful effects, including balance disorder or motion sickness, neck, and occiput area pain. Similar to the research conducted by Tatsuno and Maeda [2], the study examined the impact of whole-body vibration exposure during vehicle rides, revealing potential health problems such as back pain, sciatica, digestive, disorders, genitourinary problems, and hearing damage.

2.2 Automobile Suspension Model

In this study, the utilized non-linear full vehicle model [14],[15] is comprised of seven degrees of freedom shown in Fig. 1

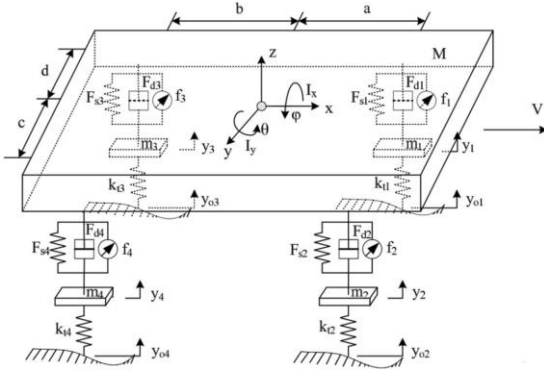


Fig. 1 Car suspension model

F_{si} and F_{di} denote the forces generated by the nonlinear stiffening spring and the piece-wise linear damper, respectively, which can be calculated using Eq. (1) and (2), where i is 1 to 4 [9]. These equations are:

$$F_{si} = k_i(\Delta y_i) + k_{ni}(\Delta y_i)^3 \quad (1)$$

$$F_{di} = \begin{cases} b_{ei}\Delta\dot{y}_i, \Delta\dot{y}_i > 0 \\ b_{ci}\Delta\dot{y}_i, \Delta\dot{y}_i \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

where, k_i is the linear stiffness coefficient and k_{ni} is the nonlinear stiffness coefficient; b_{ei} and b_{ci} are the extension movement and the compression movement damping coefficients, respectively; Δy_i denotes the suspension deflections and $\Delta\dot{y}_i$ denotes the deflection velocity. Through the utilization of Lagrange equations, one can employ

the subsequent nonlinear motion equations to depict the complete car suspension model as follow:

$$M\ddot{y} + \sum_{i=1}^4 F_{di} + \sum_{i=1}^4 F_{si} = \sum_{i=1}^4 f_i \quad (3)$$

$$I_y\ddot{\theta} + \cos\theta \left[a \sum_{i=1}^4 F_{di} + b \sum_{i=1}^4 F_{si} \right] = a(f_1 + f_2) - b(f_3 + f_4) \quad (4)$$

$$I_x\ddot{\varphi} + \cos\varphi \left[d \sum_{i=1}^4 F_{di} - c \sum_{i=1}^4 F_{si} \right] = d(f_2 + f_4) - c(f_1 + f_3) \quad (5)$$

$$m_1\ddot{y}_1 - F_{d1} - F_{s1} + k_{t1}(y_1 - y_{01}) = -f_1 \quad (6)$$

$$m_2\ddot{y}_2 - F_{d2} - F_{s2} + k_{t2}(y_2 - y_{02}) = -f_2 \quad (7)$$

$$m_3\ddot{y}_3 - F_{d3} - F_{s3} + k_{t3}(y_3 - y_{03}) = -f_3 \quad (8)$$

$$m_4\ddot{y}_4 - F_{d4} - F_{s4} + k_{t4}(y_4 - y_{04}) = -f_4 \quad (9)$$

Here, M represents the mass of the car body, while I_x and I_y denote the rotary inertias for the roll motion and the pitch motion, respectively. Moreover, the variables are defined as: y_i represents the unsprung mass displacement, y_{0i} is the road input, θ and φ represent the pitch and roll motions, respectively. m_i denotes the unsprung mass, k_{ti} is the stiffness of the tire, and f_i corresponds to the force generated by the corresponding actuator. a , b , c , and d represent the corresponding distances from the suspension to the mass center of the car body.

3. Related Algorithm

Machine learning algorithms can be divided into four categories according to the purpose and the main categories. First, the supervised learning relies on labeled training data to learn patterns and make predictions on new or unseen data which commonly used for classification and regression. Secondly, the unsupervised learning involves in finding patterns and structures in data without explicit labelling or targeting outcomes which commonly used for tasks such as clustering, anomaly detection, and dimensionality reduction. Thirdly, the semi-supervised learning is a combination of both labeled and unlabeled data during the training process which commonly used in various real-world applications. Lastly, Reinforcement learning is a form of machine learning that focuses on learning by trial and error.

3.1 PCA algorithm

The Principal Component Analysis (PCA), which is one of the earliest methods based on data, is capable of efficiently transforming measurements into a lower-dimensional space of principal components and capturing the variabilities within the data. Let's assume that $X \in R^{N \times m}$ denotes a dataset obtained through measurements.

$$X = \begin{bmatrix} x_1^T \\ x_2^T \\ \vdots \\ x_N^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{Nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

In this context, where $x_i, i = 1, 2, \dots, N$ represents a single sample, N represents the number of samples, and m represents the number of variables. It is generally necessary to preprocess the measurements X by performing zero mean visualization and unit variance processing. The matrix X^0 has been adjusted to have zero mean and unit variance. The Singular Value Decomposition (SVD) algorithm is employed to process the covariance matrix of X^0 . The matrix X^0 can be expressed in the following manner:

$$X^0 = TP^T + \hat{X} \quad (11)$$

Where \hat{X} represents the residual subspace, while $T \in R^{N \times \beta}$ and $P \in R^{N \times \beta}$ represent the score matrix and the loading matrix, respectively.

3.2 K-means algorithm

The K-means algorithm [16], [17] is used for clustering data without expert guidance using an unsupervised approach. The main purpose is to extract information from the data automatically. Data points within the same group, referred to as a cluster, are closer to each other than to points in other clusters, based on a criterion of similarity or dissimilarity. Each data point is assigned to a cluster when it is located close to the cluster's centroid or center of gravity.

Where (x_1, \dots, x_n) are the dataset. Γ is the classification distance criterion, which measures the distance between a specific data point and the



centers of the established classes. $C = (c_k, \dots, c_n)$ represent the collection of class centers, and $G = (g_1, \dots, g_n)$ represent the set of clusters. The criterion Γ is the sum of Euclidean distances between each data point and the center of the nearest class.

$$\Gamma(C, G) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n g_{ik} \|x_i - c_k\|^2 \quad (12)$$

g_{ik} is a binary variable equal to 1 if the cluster of the indexed data is k and 0 . Otherwise, the Euclidean distance is determined by the following definition.

$$d(x_i, c_k) = \|x_i - c_k\|^2 = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_{ij} - c_{kj})^2} \quad (13)$$

3.3 ANN algorithm

Artificial Neural Networks (ANNs) aim to emulate natural brains and demonstrate remarkable capabilities in data processing and learning. The basic building block of a neural network, known as a neuron, functions as a processing unit with multiple inputs and a single output. Fig. 2 illustrates a multilayer neural network consisting of multiple layers of neurons, typically three layers [18] (an input layer that receives signals from a specific source, a hidden layer that processes the data, and an output layer that transmits the processed data externally). Therefore, the network results are calculated with a continuous function $G(x)$ that can be represented as

$$G(x) = W\sigma(Vx + b) + \varepsilon(x) \quad (14)$$

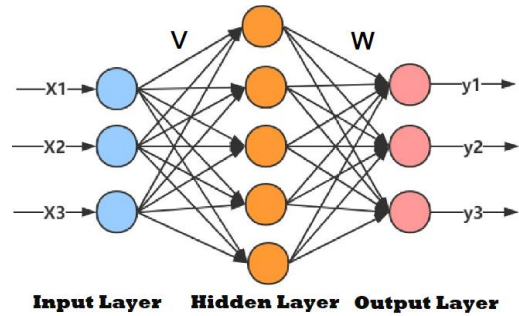


Fig. 2 Neural Network layers

In this context, the input vector is represented as x , while V and W denote the weight matrices for the hidden layers and output layer, respectively. The hidden layer utilizes an activation function, often a sigmoidal or RELU function denoted as $\sigma(\cdot)$. The threshold is denoted as b . $\varepsilon(x)$ represents the bounded approximation error of the neural network. During the error backpropagation training procedure, the feed-forward phase involves presenting an input pattern x to the network and generating a response y in the layers. In training mode, the error of the output layer ($\|y_d - y\|$, where y_d is the desired output) is propagated back to the input layer of the network. The weights are adjusted using the steepest descent gradient method. The updating rules described in Eq. (15) and Eq. (16) are used to modify the weights of the output and hidden layers in order to discretize the output error.

$$\dot{W} = -\eta_1 \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial W} \right) \quad (15)$$

$$\dot{V} = -\eta_2 \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial V} \right) \quad (16)$$



The learning rates, η_1 and η_2 , are chosen by the designer. The output errors are denoted as $\bar{E} = \left(\frac{1}{2}\right) E^T E$ and $E^T = y_d - y$. The updating rules can be simplified to the following equations:

$$\dot{W} = -\eta_1 \sigma(V^T x) E^T \quad (17)$$

$$\dot{V} = -\eta_2 (\sigma_d W E)^T \quad (18)$$

Where σ_d represents the derivative of the activation function of the hidden layer, denoted as $\sigma(\cdot)$. The introduction and utilization of the Rectified Linear Unit () activation function addresses the issue of "vanishing and exploding gradients" encountered in the sigmoid functions. ReLU as follows.

$$\text{ReLU}(x) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

The ReLU formula shows that if the input x is less than 0, the output is equal to 0; if the input x is greater than 0, the output is equal to the input.

4. Research Methods

Chamseddine and Noura [19] revealed that the vehicle suspension faults involve the reduction or alteration of suspension component functions, such as changes in the spring or damper coefficients. Table 1 provides a comprehensive summary of all the parameter values pertaining to the full car suspension [10]. The research focuses on simulating spring damage to the vehicle suspension

regarding the assumption of an usual road with amplitude of 5 mm. The simulation scenarios including four categories with various coefficient reductions are employed as shown in Table 2 that used in the research paper study.

Table 1 Parameters of the full car suspension model

PARAMETERS	
Vehicle body mass	$M = 1000 \text{ kg}$
Front wheels unsprung mass	$m_1 = m_2 = 25 \text{ kg}$
Rear wheels unsprung mass	$m_3 = m_4 = 45 \text{ kg}$
Pitch motion rotary inertia	$I_x = 550 \text{ kg m}^2$ $I_y = 1848 \text{ kg m}^2$
Front and Rear wheels linear stiffness coefficient	$k_1 = k_2 = 15000 \text{ N s/m}$ $k_3 = k_4 = 17000 \text{ N s/m}$
Front and Rear wheels nonlinear stiffness coefficient	$k_{n1} = k_{n2} = 15000 \text{ N s/m}^3$ $k_{n3} = k_{n4} = 17000 \text{ N s/m}^3$
Positive and Negative damping coefficient	$b_{ei} = 1500 \text{ N s/m}$ $b_{ci} = 1000 \text{ N s/m}$
Stiffness of tires	$k_{ti} (i = 1, 2, 3, 4) = 250000 \text{ N s/m}$
Distance	$a = 1.2, b = 1.4, c = 0.7, d = 0.8 \text{ (m)}$
Vehicle velocity	$V = 10 \text{ m/s}$

Table2 Simulation scenarios

Categories	Spring Coefficient Reduction (%)
Good	10%-30%
Usual	40%-50%
Fail	60%-80%
Fail high (Severe)	90%-100%



5. Research Simulation

The acceleration data obtained from the left front wheel suspension is studied and the car parameters are used from Table 1. The event occurs at the 20-second mark, with the spring coefficient reductions starting from 10% up to 100% for every 2% increment, at a sampling frequency of 100 Hz. At every increment value of spring reductions, the simulation generates for 2000 data points with the time consumption of 20 s. The fault scenario in the spring coefficient is ranged from 60% to 100% reduction.

5.1 Fault Detection

Fault detection consists of cluster and classification data. First, data preparation and K-Means Clustering were used to cluster the acceleration data obtained from simulation. Second, data preparation and Artificial Neural Network (ANN) were applied to classify all acceleration data and then the categories were labeled as following: Good, Usual, Fail, Fail high.

5.2 Data Preparation:

The acceleration data from research simulation section were analyzed the standardize using mean and standard deviation; then the standardized data were performed using the Principal Component Analysis (PCA). K-Means clustering was applied to categorize data into clusters.

5.3 K-Means Clustering:

The K-Means algorithm was used to group the data into four clusters by aligning the number of simulation categories ($K = 4$) and calculate its membership values based on the similarity of the extracted features. The K-Means algorithm is configured with the following parameters. The distance metric utilizes the squared Euclidean distance, one replicate is employed, a singleton action is applied for the empty cluster action, and the maximum number of iterations are set as 100. Each cluster represents a distinct pattern of acceleration measurements associated with a specific level of suspension damage. The algorithm provides the different types and levels of damage as shown in Table 3 and Fig. 3.

Table 3 Spring reduction clusters acceleration data using the K-Means Clustering

Spring Reduction (%)	Cluster	Membership (%)	Centroid points		
			Mean	Stdv.	PCA
0%-40%	3	41.17	2.65 $\times 10^{-5}$	1.68282 07×10^{-2}	-5.2803 $\times 10^{-3}$
43%-65%	2	29.41	3.62 $\times 10^{-5}$	1.67759 19×10^{-2}	-4.038 $\times 10^{-4}$
68%-80%	1	17.64	4.69 $\times 10^{-5}$	1.67508 05×10^{-2}	5.65447 $\times 10^{-3}$
83%-90%	4	11.76	5.66 $\times 10^{-5}$	1.67736 12×10^{-2}	11.0090 9×10^{-3}

Each centroid point represents the main suspension characteristic of its cluster. However, the differences between the centroid points reflect the variations in the level of fault in each group. Therefore, the centroid points obtained from the K-Means Clustering process will be useful for understanding the distinct fault diagnosis outcomes in a spring pattern in the suspension system based on the grouped accelerometer data.

5.4 Artificial Neural Network (ANN)

After extract feature process, the acceleration data were labeled into each category as shown in Table 2. The data were used to train the ANN classification model to better classify the datasets which used to predict the new acceleration data. The ANN classification model has the hyperparameter values as follows:

- The network consists of two hidden layers, where the first layer has 20 and the second layer has 10.
- The Rectified Linear Unit (ReLU) was applied as the activation functions to both layers with the iteration limit of 1000.

The cross-validation datasets were chosen to verify the machine learning model from 5% of total dataset; these validation datasets are not part of the training data. Thus, this training model gives an accuracy of results at 97.1%. A confusion matrix was employed to evaluate the

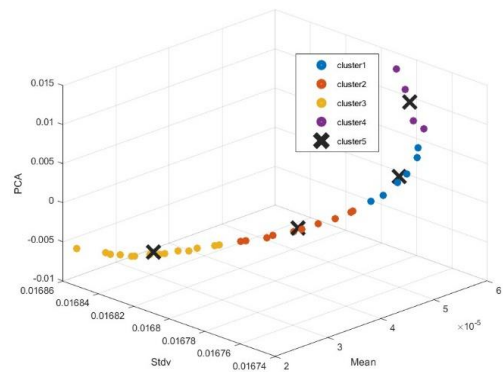


Fig. 3 Four clusters acceleration data using the K-Means Clustering

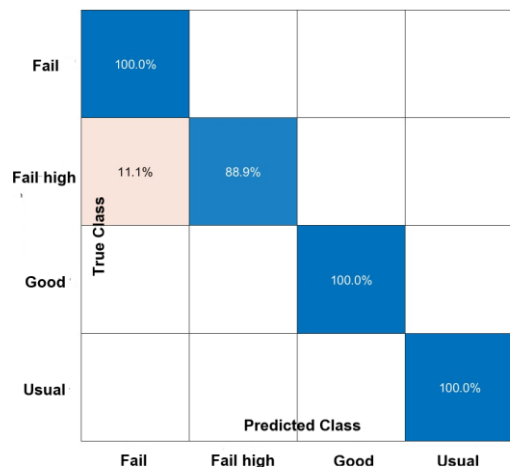


Fig. 4 Confusion matrix trained in ANN model

model's performance in identifying fault categories of car suspension as shown in Fig. 4. The model can predict and perform well for all suspension outcomes. However, only Fail high datasets are predicted 88.9% in Fail high category and 11.1% in Fail category.



5.5 Road Profiles Simulation

In this section, usual and unusual road profiles are explored. The road profile is assumed to be the sinusoidal form. According to Mohammed H.U. Bhuiyan [20], the drowsiness is most effectively induced by low frequency whole-body vibration, which is less than 10 Hz. Also, Nurkan Yagiz [14] presented the control of a vehicle active suspension for the road profiles with amplitudes from 5 to 30 mm.

The unusual road profiles consist of high amplitude sinusoidal and step road profile as shown

in Fig.5. These road profile variations are frequently observed in real-world situations.

Whereas “a” defines as 5-mm amplitude road profile “b” defines as 15-mm sinusoidal road profile; “c” defines as 1-cm step up road profile; and “d” defines as 1-cm step down road profile. A step-up road typically refers to a road that suddenly transitions from a lower elevation to a higher elevation while a step-down road profile denotes a road that undergoes an abrupt transition from a higher, creating a sudden change in slope.

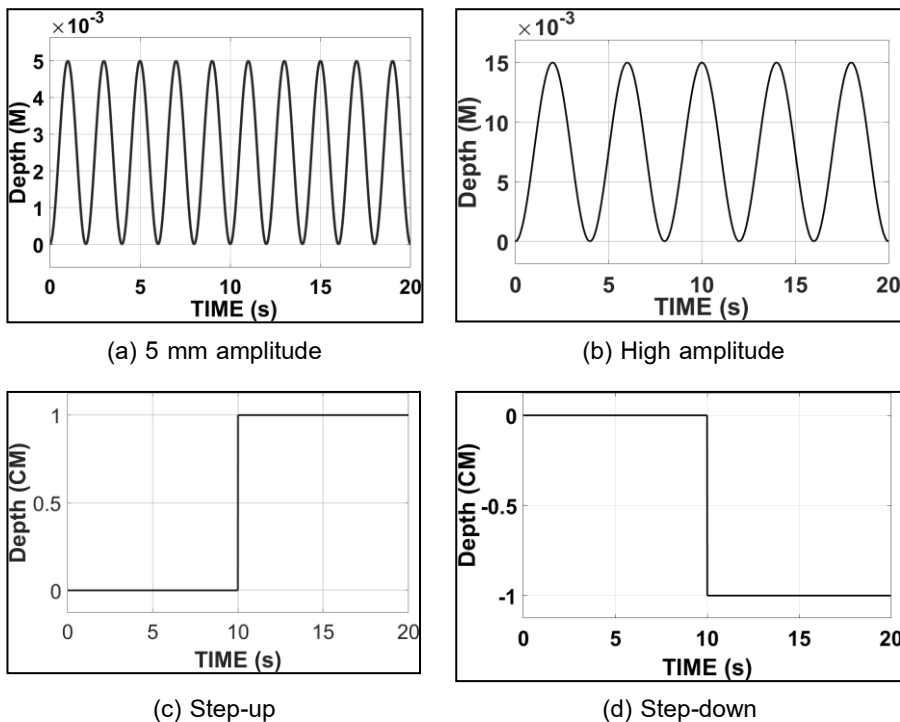


Fig. 5 Road profiles



6. Results

For car suspension purposes, all new datasets for both usual and unusual road profiles were examined. All conditions of road profiles are explored including usual road with amplitude of 5 mm, 15-mm sinusoidal road profile, 1-cm step up road profile, and 1-cm step down road profile with spring reduction of 30% (good) and 100% (Fail high). Table 4 shows the results of car suspension prediction by using ANN model. As seen from Table 4, it can be concluded that the model provides accurate predictions for usual road profiles but struggles to predict correctly under unusual road profile conditions.

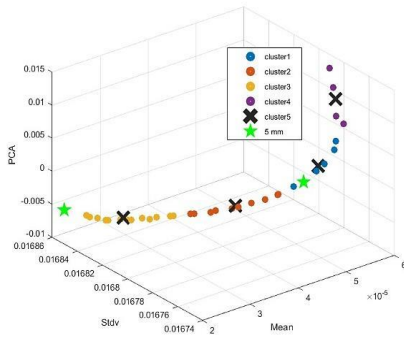
In order to predict unusual road profiles, each dataset was plotted alongside the clusters using the K-Means Clustering model. In Figure 6 (B, C, D),

it is apparent that the unusual datasets do not align neatly with the clusters, classifying them as outliers.

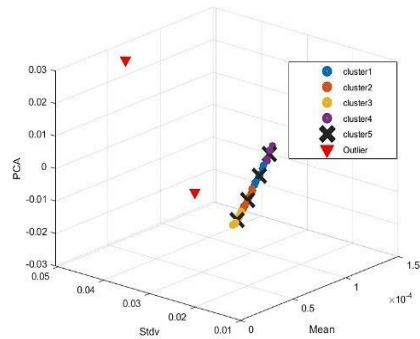
Then, the distances between the outliers and centroids of all clusters were calculated as shown in Table 5. The boundary for the entire dataset will be calculated and established by utilizing the farthest member dataset. Each dataset from the cluster has its distance value. The simulation demonstrates that if a dataset's distance of each spring reduction (%) for any road profiles falls outside the established boundary, the data will be identified as an outlier and prediction may not be reliable. As shown in Table 5, in the case of 15-mm sinusoidal, 1-cm step-up, and 1-cm step-down road profiles, all distance values exceed the established boundaries, resulting in outlier data. Thus, the fault car suspension cannot be predicted.

Table 4 Fault car suspension prediction for each road profiles

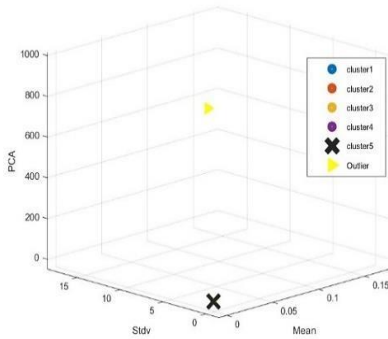
Dataset	Road Profiles	Spring Reduction (%)	Prediction
Set-1	5-mm Sinusoidal	30	Good
Set-2	5-mm Sinusoidal	100	Fail high
Set-3	High amplitude sinusoidal	30	Fail high
Set-4	High amplitude sinusoidal	100	Good
Set-5	1-cm Step-up	30	Fail high
Set-6	1-cm Step-up	100	Fail high
Set-7	1-cm Step-down	30	Good
Set-8	1-cm Step-down	100	Good



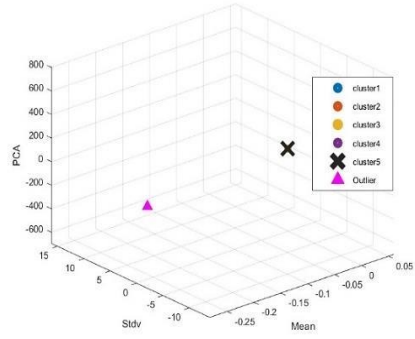
A. 5-mm amplitude



B. 15-mm sinusoidal



C. 1-cm Step-up



D. 1-cm Step-down

Fig. 6 shows the dataset falls inside and outside the cluster

7. Discussion and Conclusions

As the car suspension is a crucial component that significantly impacts both vibration and overall car performance. Excessive car vibrations can have various effects on humans. Although the vibrations are not considered harmful in the short term, prolonged exposure to vibrations can lead to health issues, such as discomfort and fatigue, muscle strain, impact on the spine, and so on. Moreover, numerous human health issues, such as low back

pain and musculoskeletal disorders, can be attributed to the whole-body vibrations induced by the car vibrations. When vibrations are transmitted to the driver through a contact surface, they can pose a potential risk, contributing to musculoskeletal diseases and joint pain. Bhuiyan, Fard, and Robinson [21] investigated the interrelationships between the various components of whole-body vibration, physiological and cognitive parameters leading to driver drowsiness, as well as the effects



Table 5 Distance between the outliers and centroids

Road Profiles	Spring Reduction (%)	Cluster	Boundary	Distance
5-mm Sinusoidal	30	1	0.0025462	0.00160
		2	0.00279005	0.00445
		3	0.00205699	0.00933
		4	0.00204542	0.00695
	100	1	0.0025462	0.01198
		2	0.00279005	0.00592
		3	0.00205699	0.00105
		4	0.00204542	0.01733
1-cm Step-up	30	1	0.0025462	608.985
		2	0.00279005	608.991
		3	0.00205699	608.996
		4	0.00204542	608.979
	100	1	0.0025462	611.396
		2	0.00279005	611.402
		3	0.00205699	611.407
		4	0.00204542	611.390
15-mm Sinusoidal	30	1	0.00254620	0.03874
		2	0.00279005	0.04201
		3	0.00205698	0.04503
		4	0.00204542	0.03641
	100	1	0.00254620	0.0451
		2	0.00279005	0.04127
		3	0.00205698	0.03857
		4	0.00204542	0.04883
1-cm Step-down	30	1	0.00254620	565.651
		2	0.00279005	565.645
		3	0.00205698	565.64
		4	0.00204542	565.656
	100	1	0.00254620	567.481
		2	0.00279005	567.475
		3	0.00205698	567.47
		4	0.00204542	567.487

of vibration parameters, including frequency, amplitude, waveform, and duration of the vibration. The paper found that a data link exists between whole-body vibration and driver drowsiness.

Hence, there is a need for research to identify methods for minimizing or predicting car vibrations before they occur. Therefore, a thorough examination of a comprehensive car suspension model was conducted, and fault diagnosis outcomes related to road profiles and spring reductions were identified to ensure the functional safety and long-term reliability of vehicle throughout their operational lifespan. The results showed that the model is equipped to effectively detect and isolate unfamiliar patterns in car suspension faults through the utilization of both unsupervised and supervised machine learning algorithms. This simulation results in decreased errors and time, while concurrently improving the accuracy of predictive outcomes. As a result, drivers can perform car maintenance to prevent the occurrence of detrimental vibrations. Moreover, all obtained results demonstrate that utilizing a combination of unsupervised and supervised machine learning algorithms is very effective and can be used to improve outcomes in car suspension. Future work will focus on further enhancing these values and elevating the performance of the model by exploring additional health studies related to vibration induced effects in other sports, such as cycling.



8. References

- [1] http://rikusai.or.jp/wpcontent/uploads/pdfs/niyak_u-guideline_kaisetsu_H30.pdf. (Accessed on 22 August 2022)
- [2] J. Tatsuno and S. Maeda, Effect of whole-body vibration exposure in vehicles on static standing balance after riding, *Vibration*, 2023, 6(2), 343-358.
- [3] S.S. Sedeh, R.S. Sedeh and K. Navi, Reducing harmful effects of road excitations on human health by designing car active suspension systems, *The 2006 International Conference on Bioinformatics and Computational Biology, Proceeding*, 2006, 236-241.
- [4] U. Kirbaş, Investigation of the effects of whole-body vibration exposure on vehicle drivers when travelling over covered manholes embedded in public roadways, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2022, 88, 1-12.
- [5] M.H. Yorulmuş, H.B. Bolat and C. Bahadır, Predictive quality defect detection using machine learning algorithms: A case study from automobile industry, *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2021), Proceeding*, 2022, 263-270.
- [6] G. Kong, K. Lin and Y. Hu, Using machine learning methods to predict in-hospital mortality of sepsis patients in the ICU, *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2020, 20, 1-10.
- [7] M.P. Talawar and H. Pant, M.S. Sayyed, M.S. Tamboli, M.N. Shaik, M.V. Ganesan, Predictive maintenance in healthcare IoT: A machine learning-based approach, *European Chemical Bulletin*, 2023, 12(4), 15909-15922.
- [8] A. Theissler, J. Pérez-Velázquez, M. Kettelgerdes and G. Elger, Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry, *Reliability engineering and system safety*, 2021, 215, 1-21.
- [9] G. Wang and S. Yin, Data-driven fault diagnosis for an automobile suspension system by using a clustering based method, *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(6), 3231-3244.
- [10] S. Yin and Z. Huang, Performance monitoring for vehicle suspension system via fuzzy positivistic C-means clustering based on accelerometer measurements, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 20(5), 2613-2620.



- [11] Y. Wang, X. Zheng, L. Wang, G. Lu, Y. Jia, K. Li and M. Li, Sensor fault detection of vehicle suspension systems based on transmissibility operators and Neyman–Pearson test, *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 232, 1-13.
- [12] K. Wu, J. Liu, M. Li, J. Liu and Y. Wang, Multi-mode active suspension control based on a genetic K-means clustering linear quadratic algorithm, *Applied Sciences*, 2021, 11(21), 1 - 24.
- [13] L.J. Sitnik, M. Magdziak-Tokfowicz, R. Wróbel and P. Kardasz, Vehicle vibration in human health, *Journal of KONES*, 2013, 20(4), 411-418.
- [14] N. Yagiz and Y. Hacioglu, Backstepping control of a vehicle with active suspensions, *Control Engineering Practice*, 2008, 16(12), 1457-1467.
- [15] M. Dumitriu, I.I. Apostol and D.I. Stanica, Influence of the suspension model in the simulation of the vertical vibration behavior of the railway vehicle car body, *Vibration*, 2023, 6(3), 512-535.
- [16] S. Eke, T. Aka-Ngnui, G. Clerc, and I Fofana. Characterization of the operating periods of a power transformer by clustering the dissolved gas data, *IEEE 11th International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives (SDEMPED)*, 2017, 298-303.
- [17] N.L. Wibowo, M.A. Soeleman and A.Z. Fanani, Antlion optimizer algorithm modification for initial centroid determination in K-means algorithm, *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, 2023, 7(4), 870-883.
- [18] H.H. Bafroui and A. Ohadi, Application of wavelet energy and Shannon entropy for feature extraction in gearbox fault detection under varying speed conditions, *Neurocomputing*, 2014, 133, 437-445.
- [19] A. Chamseddine and H Noura. Control and sensor fault tolerance of vehicle active suspension, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(3), 416-433.
- [20] M.H. Bhuiyan, M. Fard and S.R. Robinson, Effects of whole-body vibration on driver drowsiness: A review, *Journal of Safety Research*, 2022, 81, 175-189.
- [21] M.H. Bhuiyan, M. Fard and S.R. Robinson, Effects of whole-body vibration on driver drowsiness: A review, *Journal of safety research*, 2022, 81, 175-189.



การออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลาเลท

ขวัญชัย เสวีพันธ์¹ นิตยา ศิริวัฒน์² และ วรณลักษณ์ เหล่าทวิทรัพย์¹

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาเทคโนโลยี, วิทยาลัยพัฒนาชุมชนเมือง, มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: nittaya.sir@nmu.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มีนาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 26 มีนาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลาเลท โดยประยุกต์เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) วิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน ร่วมกับหลักการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องยิงพาลาเลทต้นแบบสำหรับการผลิตพาลาเลท จากการศึกษากระบวนการผลิตไม้พาลาเลทของบริษัทตัวอย่างที่ผลิตและจัดจำหน่ายพาลาเลทขนาดต่างๆ ปัจจุบันใช้แรงงานคนในการยิงประกอบไม้พาลาเลท 1 ตัว ใช้เวลา 7 นาที จึงใช้ QFD วิเคราะห์ความต้องการใช้งานเครื่องยิงพาลาเลท พบว่าความต้องการที่สำคัญคือ เครื่องสามารถประกอบและติดตั้งได้ง่าย เครื่องมีรูปทรงและขนาดที่เหมาะสม เครื่องใช้งานได้ง่าย และการทำงานของเครื่องมีประสิทธิภาพ จากข้อมูลดังกล่าวนำมาใช้เป็นข้อมูลเพื่อสร้างบ้านคุณภาพทำให้ได้รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องยิงพาลาเลท และข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลาเลทต้นแบบตามหลักทางวิศวกรรม เมื่อทดสอบประสิทธิภาพเครื่องยิงพาลาเลทต้นแบบ ใช้ความดันลมในการยิงปืนตะปู 5 บาร์ ในการยิงตะปูขนาด 1.5 นิ้ว ยิงตะปู 36 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 2 ตัว ต่อ 1 แผ่น รวม 72 ตำแหน่ง ใช้เวลา 5 นาที ในการประกอบพาลาเลท 1 ตัว ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

คำสำคัญ: เครื่องยิงพาลาเลท; การผลิตไม้พาลาเลท; ออกแบบวิศวกรรม; เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ

Design and development of the Pallet Shot Machine

Kwanchai Saeweenan¹, Nittaya Siriwan^{2*} and Wannalak Laotaweesub¹

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

² Department of Technology, Urban Community Development Collage, Navamindradhiraj University

* Corresponding author, E-mail: nittaya.sir@nmu.ac.th

Received: 6 June 2023; Revised: 20 March 2024; Accepted: 26 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: This research aims to design and develop a pallet nailing machine by applying the qualitative function distribution (QFD) technique to analyse user requirements and utilising engineering design principles as a guideline for modeling the prototype pallet nailing machine for pallet production. From the study of the wood pallet manufacturing process of the sample companies that produce and distribute pallets in various sizes, we found that it took manual labour 7 minutes to assemble one wooden pallet. Therefore, QFD is used to analyse the demand for pallet-nailing machine machines. From QFD analysis, it can be concluded that the important requirements for the machine are easy to assemble and install, reasonable shape and size, and efficient operation. Then this information can be used to build a quality pallet house, revealing the technical details of the pallet nailing machine. As a result, these technical details help the research team to gain the specifications for the design and development of the prototype pallet nailing machine based on engineering principles. When testing the performance of the prototype pallet nailing machine by using an air pressure of 5 bar to shoot 1.5-inch nails to 36 positions, 2 nails per one sheet, totaling 72 positions, it took 5 minutes to assemble 1 pallet, which achieved research objectives.

Keywords: Pallet shooting machine; Wood pallet products; Product design; Qualitative function distribution techniques



1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาที่ทางบริษัทตัวอย่างพบคือการใช้แรงงานคนในการทำงาน ใช้เวลานานในการผลิต ทำให้เกิดความเมื่อยล้าในการทำงานและได้จำนวน พาลेतที่น้อยไม่ได้ตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งในการทำงานของผู้ผลิตพาลेतแต่ละชิ้นต้องนำไม้มาวางเรียงตามตำแหน่งต่างๆ ตามรูปแบบของพาลेत จากนั้นจึงตะปูด้วยปืนยิงตะปูที่ละตัว อัตราการยิงตะปูพาลेतแต่ละชิ้นจึงมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่แข็งแรง และพาลेतที่ได้นั้นไม่มีคุณภาพเท่าที่ควร คือ ความไม่ได้นากของพาลेतหลังประกอบไม้ที่นำมาใช้ในการทำพาลेतเป็นไม้เนื้ออ่อน เช่น ไม้ยางพารา ไม้เบญจพรรณ และไม้สน เป็นต้น ทางบริษัทจึงมีความต้องการที่จะเพิ่มจำนวนพาลेतให้มากขึ้นและลดระยะเวลาในการผลิต เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าจากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลेतต้นแบบที่สามารถไปสร้างเป็นเครื่องยิงพาลेत ที่สอดคล้องกับตามความต้องการของผู้ใช้งาน จึงทำการศึกษาและวิเคราะห์ความต้องการที่แท้จริง ของการใช้งานเครื่องยิงพาลेत โดยประยุกต์หลักการเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ QFD เป็นเครื่องมือที่ช่วยปรับปรุงการพัฒนางจรในการผลิตสินค้าที่ตรงกับความต้องการลูกค้า [1-5] QFD บรรลุเป้าหมายเหล่านี้โดยใช้การออกแบบเครื่องมือที่เรียกว่า “House of Quality” (HOQ) [6] ด้วยระดับของคุณลักษณะด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า[7] โดยมีกลุ่มเป้าหมายที่ทำการศึกษาคือความต้องการ คือกลุ่มแรงงานในบริษัทในไนน์เวิร์ค เอนจิเนียริ่ง เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นการตรวจสอบพฤติกรรมของวัสดุในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม ซึ่งในงานวิจัยตะขอเครนได้ออกแบบปรับปรุงพื้นที่หน้าตัดส่วนที่รับแรงทำการวิเคราะห์โดย Computer-Aided Design (CAD) และ Computer Aided เทคโนโลยีทางวิศวกรรม (CAE) อิงตามวิธี Finite Element Analysis สามารถลดต้นทุนการผลิต และปัจจัยด้านความปลอดภัยเพิ่มขึ้น [8] เช่นเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยการออกแบบแอสซีสำหรับยานพาหนะการเกษตร ยังมีข้อเสนอแนะให้นำไปสร้างชิ้นงานจริงเพื่อทดสอบการใช้งานในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันผล [9] เพื่อนำมาประเมินสมรรถนะทางเลือกและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสำคัญในการออกแบบและสร้างเครื่องยิงพาลेत

2. การดำเนินการวิจัย

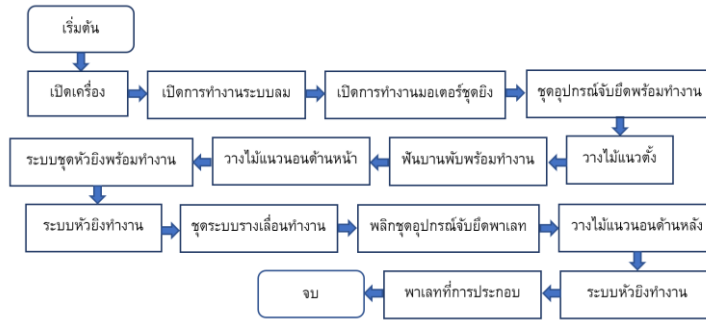
งานวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินการ มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนนี้ ได้ทำการศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตไม้พาลेत มีรายละเอียดดังรูปที่ 1

2.2 สํารวจรวบรวมข้อมูลความต้องการ

ขั้นตอนนี้จะทำแบบฟอร์มคำถาม โดยมี 5 คำถามหลักเกี่ยวกับเครื่องยิงพาลेत ได้แก่ 1) ท่านต้องใช้เครื่องยิงพาลेतเมื่อไร 2) ปัจจัยอะไรที่เป็นข้อพิจารณาในการตัดสินใจซื้อเครื่องยิงพาลेत เพราะเหตุใด 3) สิ่งที่คุณชอบหรืออยากให้มีในเครื่องยิงพาลेत เพราะเหตุใด 4) คุณเคยใช้เครื่องยิงพาลेतหรือไม่ ถ้ามี มีปัญหาในการใช้งานอย่างไรบ้าง 5) คุณมีคำแนะนำที่จะปรับปรุงเครื่องยิงพาลेतอย่างไรบ้าง แล้วใช้แบบฟอร์มคำถามดังกล่าวไปสำรวจความ



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตเครื่องยิงพาลาเท

ต้องการด้วยวิธีการสัมภาษณ์และสังเกตการณ์ โดยสำรวจจากกลุ่มพนักงานผู้เชี่ยวชาญ รวมทั้งหมด 6 ท่าน จากผลการสำรวจได้นำมาวิเคราะห์เพื่อแปลงเป็นความต้องการของกลุ่มแรงงาน ผู้ผลิตเครื่องยิงพาลาเทตามหลักการของ QFD แล้วนำมาจัดกลุ่มความต้องการของกลุ่มแรงงานแบ่งเป็น 5 กลุ่มหลัก และความต้องการ 21 ข้อ จากข้อมูลความต้องการนี้ได้นำไปทำการสนทนากลุ่มจากผู้เชี่ยวชาญในด้านความพึงพอใจต่อความต้องการเครื่องยิงพาลาเทอีกครั้ง โดยกำหนดค่าคะแนนสำรวจ ด้วยสเกล 1 ถึง 5 แล้วนำคะแนนที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ดังระบุในช่อง B2 และได้ทำการกำหนดค่าคะแนนสำคัญของความต้องการ ต้องการประเมินของกลุ่มผู้วิจัย โดยใช้ช่วงค่าคะแนนอยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 ดังค่าที่ระบุในช่อง B1 ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในตารางที่ 1

จากการสัมภาษณ์โดยการสนทนากลุ่มใช้ประเด็นคำถามปลายเปิดโดยผู้ให้สัมภาษณ์เป็นพนักงานผู้เชี่ยวชาญจำนวน 6 ท่าน ได้ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ เพื่อใช้ในการกำหนดรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องยิงพาลาเทต้นแบบ ทำให้ได้บ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คะแนนความสำคัญของความต้องการและความพึงพอใจต่อการใช้เครื่องมือยิงพาลาเท

กลุ่มความต้องการ	ความต้องการ	B1	B2
การประกอบและติดตั้งสะดวก	ถอดประกอบชิ้นส่วนได้ง่าย	4	3.7
	พินบานพับถอดประกอบง่าย	4	3.3
	ทำความสะอาดภายในเครื่องได้ง่าย	4	4
	เครื่องขนย้ายได้สะดวก	4	3
รูปทรง ขนาดเหมาะสม	ขนาดของเครื่องเหมาะสมกับการใช้งาน	4	4
	เครื่องน้ำหนักเบา	3	3.7
	เครื่องมีฐานตั้งที่มั่นคง	3	3.7
	ไม้พาลาเทไม่หล่นออกจากเครื่อง	3	3.3
	ไม้พาลาเทมั่นคงขึ้นเมื่อยิงตะปู	3	3
การใช้งาน	ชุดปืนสามารถยิงได้เร็ว	3	3.7
	ควบคุมการทำงานได้ง่าย	4	4.3
	มีความปลอดภัยในการใช้งาน	5	3.7
	สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าในครัวเรือนได้	4	4.7
	ชุดปืนสามารถปรับความเร็วในการยิงได้	5	3.3
	ใส่ไม้พาลาเทได้ง่าย	5	4
	ไม่สั่นสะเทือนขณะใช้งาน	4	4
การทำงานของเครื่อง	ยิงไม้พาลาเทได้รวดเร็ว	5	3.7
	ยิงไม้พาลาเทได้แม่นยำและคงที่	5	4
	เครื่องสามารถยิงต่อเนื่องยาวนาน	5	3
	เครื่องปรับความเร็วในการยิงตะปูได้	2	1
ราคา	ราคาเครื่องเหมาะสม	3	4.3



จากรูปที่ 2 ข้อมูลจากการวิเคราะห์ QFD ทำให้ทราบ ว่า ข้อกำหนดทางเทคนิคที่สำคัญต่อการออกแบบ เครื่องยิงพาลาทันแบบ ซึ่งมีค่าอิทธิพลสูงที่สุดเรียงตามลำดับ ได้แก่ มีระบบการขับเคลื่อนที่ รวงเลื่อนมั่นคง ความเร็วรอบของมอเตอร์ มีระบบการควบคุมการทำงานง่าย และปลอดภัย ขนาดของตัวเครื่อง ลักษณะของช่องป้อน ซึ่งมีค่าอิทธิพลด้วยระดับ คะแนน 0.08, 0.07, 0.07, 0.07, 0.07, 0.06 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องยิงพาลาทันแบบต่อไป

สำหรับการออกแบบเครื่องยิงพาลาทัน นั้น ได้นำข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ ดังรูปที่ 2 เป็นแนวทางการออกแบบเครื่องยิงพาลาทัน โดยคำนึงถึงค่าอิทธิพล ค่าเป้าหมาย และข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะเชิงเทคนิค ในการพิจารณาความสัมพันธ์คุณลักษณะเชิงเทคนิคนี้ ต้องคำนึงถึงระดับความสัมพันธ์เชิงบวกซึ่งจะส่งผลเสริมกัน และเชิงลบจะส่งผลขัดแย้งกัน ซึ่งรายละเอียดการออกแบบจะแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดการออกแบบ

ลำดับ	ข้อมูลเชิงเทคนิค	ค่าเป้าหมาย	รายละเอียดการออกแบบ
1	มีระบบการขับเคลื่อนที่รวงเลื่อนมั่นคง	ขับเคลื่อนโดยใช้บอลสกรู	เลือกใช้มอเตอร์ 1 เฟส AC 220V ความถี่ 1 HP ความเร็วรอบ 3,000 rpm
2	ความเร็วรอบของมอเตอร์	≤ 5 นาที	ใช้อัตราทด 1 : 15 จะได้ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000/15 = 200 rpm
3	ขนาดรางเลื่อน	ยาว = 1,795 มม.	จะทำหน้าที่รับน้ำหนักของอุปกรณ์ที่นำมาประกอบกับสไลด์บล็อก
4	มีอุปกรณ์ป้องกันอันตราย	มี	มีสวิตช์ฉุกเฉินเพื่อหยุดเครื่อง ตัดวงจรไฟฟ้าในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน
5	ขนาดของตัวเครื่อง	สูง 1,992 มม.	พิจารณาจากความสูงเฉลี่ยของผู้ชายไทย มีความสูง 171 ซม. (ข้อมูลจาก NECTEC : ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ) ดังนั้นกำหนดความสูงของเครื่องที่ 1,992 มม.
6	ลักษณะของช่องป้อน	ป้อนง่าย	ออกแบบให้ป้อนแนวตั้ง ให้ช่องป้อนอยู่ทางด้านหน้าของเครื่อง (มองจากด้านหน้า)

2.3 การออกแบบและสร้างเครื่องยิงพาลาทัน

การสร้างเครื่องยิงพาลาทัน ได้นำความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มาพิจารณาในการออกแบบและสร้างเครื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรที่นำมาใช้งาน โดยการออกแบบอย่างเป็นระบบ (Systematic Design) [10-13]

หลังจากที่ได้ศึกษาข้อมูลและได้กำหนดกรอบแนวคิดแล้ว จากนั้นพิจารณาแนวคิดในการออกแบบไว้เป็น 2 แนวคิด ดังตารางที่ 3

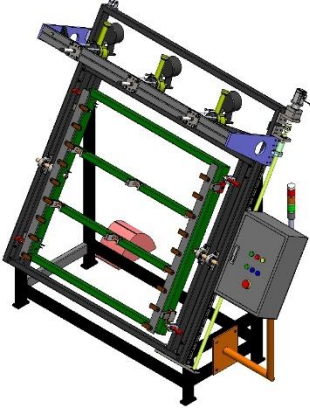
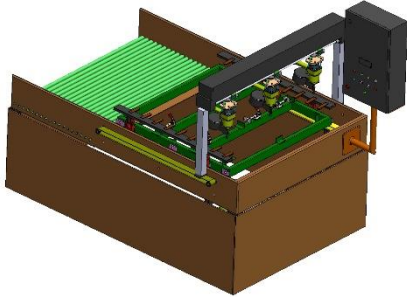
หลังจากคัดเลือกเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบทั้ง 2 แนวความคิดแล้ว ได้ข้อสรุปว่า ดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องตามแนวคิดที่ 1 คือ ใช้ชุดอุปกรณ์จับยึดพาลาทันแบบแนวตั้ง

2.4 คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องยิงพาลาทัน

ผู้วิจัยพิจารณาและกำหนดกรอบคุณลักษณะที่เป็นส่วนหนึ่งของเครื่อง เพื่อใช้สำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องยิงพาลาทัน โดยสรุปไว้ในตารางที่ 4 สิ่งใดต้องมีและสิ่งใดที่ควรจะมี ดังต่อไปนี้



ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบแนวความคิดที่ 1 และ 2

เครื่องยิงพาลेत	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวความคิดที่ 1</p>	<ul style="list-style-type: none"> - กลไกมีความซับซ้อนน้อยกว่า - ชิ้นส่วนผลิตง่ายกว่า - สามารถเคลื่อนย้ายได้ - ใช้งานง่ายกว่า - มีขนาดเหมาะสม 	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการยิงพาลेतได้ช้ากว่า
 <p>แนวความคิดที่ 2</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการยิงพาลेतได้เร็วกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - กลไกมีความซับซ้อนมากกว่า - ชิ้นส่วนผลิตยากกว่า - ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ - ใช้งานยากกว่า - มีขนาดใหญ่

หลังจากกำหนดกรอบคุณลักษณะที่เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องแล้วได้พิจารณาร่วมกันเพื่อเลือกเหล็กสำหรับโครงเครื่อง รวมไปถึงการเลือกใช้กลไกต่างๆ ที่สำคัญ การเลือกใช้วัสดุในการผลิตตลอดจนอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ เขียนแบบ และสร้างเครื่องยิงพาลेत ตัวอย่างดังตารางที่ 5 ถึงตารางที่ 9


จากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการเลือกใช้วัสดุในการสร้างชุดหัวยิงทั้ง 2 แนวคิดแล้ว ได้สรุปร่วมกันว่าควรเลือกใช้แนวคิดที่ 1 คือเหล็กกล่อง เนื่องจากเหล็กกล่องมีกระบวนการเตรียมชิ้นงานเชื่อมประกอบง่ายกว่า และมีรูปทรงสมส่วน มีความสวยงามมากกว่า



ตารางที่ 4 สรุปคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องเพื่อใช้ในการออกแบบ

การเปรียบเทียบความจำเป็นในการทำโครงงาน		ความจำเป็น	
สิ่งที่ควรคำนึง	คุณลักษณะ	สิ่งที่มี	สิ่งที่ควรมี
1. หน้าที่	- สร้างพาเลทสำหรับรองรับของที่มีน้ำหนักมาก	✓	
2. ความสามารถ	- สามารถผลิตพาเลทที่มีขนาด 1,100 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร เป็นทรงสี่เหลี่ยมได้ประมาณ 5 นาที/ตัว	✓	
3. คุณสมบัติของเครื่อง	- มีขนาดเครื่องที่เหมาะสม - มีการใช้งานที่สะดวกและปลอดภัย - ดูแลรักษาทำความสะอาดได้ง่าย	✓ ✓ ✓	
4. กระบวนการทำงาน	- ให้คนนำไม้สนที่ผ่านการแปรรูปมาแล้ววางลงบนชุดอุปกรณ์จับยึดพาเลท ซึ่งเลือกใช้การจับยึดด้วยเหล็กแผ่นและสปริงตัน ปีนจะเคลื่อนที่ลงมาตามรางเลื่อนแล้วหยุดตรงตำแหน่งที่กำหนดไว้ด้วยโปรแกรม PLC ที่เขียนไว้	✓	
5. การเคลื่อนย้าย	- สามารถเคลื่อนย้ายได้		✓
6. รูปร่างของเครื่อง	- เครื่องยังพาเลท ที่มีขนาดโดยรวม ความกว้าง x ความยาว x ความสูง ประมาณ 1,024 x 2,334 x 1,913 มิลลิเมตร		✓

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกวัสดุในการสร้างชุดติดตั้งหัวยิง


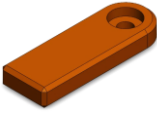
ชุดติดตั้งหัวยิง	ข้อดี	ข้อเสีย
 (ภาพหน้าตัดเหล็กกล่อง) แนวคิดที่ 1 โครงเหล็กกล่อง	- กระบวนการเชื่อมประกอบง่ายกว่า - รูปร่างมีความสมดุลมากกว่าและสวยงามกว่า	- หากรับแรงกดอัดและชั้นแน่นจะมีการยุบตัวง่ายกว่า
 (ภาพหน้าตัดเหล็กฉาก) แนวคิดที่ 2 โครงเหล็กฉาก	- รับภาระแรงบีบอัดได้ดีกว่า	- กระบวนการเชื่อมประกอบยากกว่า - รูปร่างมีความสมดุลน้อยกว่าและสวยงามน้อยกว่า

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกวัสดุในการสร้างชุดหัวยิง



ชุดหัวยิง	ข้อดี	ข้อเสีย
 (ภาพหน้าตัดเหล็กกล่อง) แนวคิดที่ 1 โครงเหล็กกล่อง	- กระบวนการเชื่อมประกอบง่ายกว่า - รูปร่างมีความสมดุลมากกว่าและสวยงามกว่า	- หากรับแรงกดอัดและชั้นแน่นจะมีการยุบตัวง่ายกว่า
 (ภาพหน้าตัดเหล็กตัวยู) แนวคิดที่ 2 โครงเหล็กตัวยู	- ราคาถูกกว่า - สามารถเคลือบสีตกแต่งได้ - แข็งแรงมากกว่า	- ด้านทานการกัดกร่อนได้น้อยกว่า - สแตนเลส





ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุทำฟันบานพับ

ฟันบานพับ	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 เหล็ก</p>	<ul style="list-style-type: none"> - มีความแข็งแรงทนทาน - มีอายุการใช้งานนานกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องเสียค่าใช้จ่ายการตกแต่งและเคลือบผิว - ตัดเฉือนขึ้นรูปได้ยากกว่า
 <p>แนวคิดที่ 2 Polyacetal (POM)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เสียค่าใช้จ่ายการตกแต่งและเคลือบผิว - ตัดเฉือนขึ้นรูปได้ง่ายกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการสึกกร่อน

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบการออกแบบชุดส่งกำลังชุดหัวยิง

ชุดส่งกำลังชุดหัวยิง	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 ส่งกำลังด้วยเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ลดแรงเสียดทานได้น้อยกว่า - มีประสิทธิภาพน้อยกว่า - มีความแม่นยำน้อยกว่า
 <p>แนวคิดที่ 2 ส่งกำลังด้วยบอลสกรู</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ลดแรงเสียดทานได้ดีกว่า - มีประสิทธิภาพสูง - มีความแม่นยำสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาแพงกว่า

ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการออกแบบชุดกำหนดขั้นตอนการทำงาน

ควบคุมการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 ระบบควบคุม PLC</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการควบคุม - เสถียรมากกว่า - มีความปลอดภัยมากกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พื้นที่ติดตั้งมากกว่า - ราคาแพงกว่า
 <p>แนวคิดที่ 2 ไมโครคอนโทรลเลอร์</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า - ราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความปลอดภัยน้อยกว่า - มีสัญญาณรบกวน



หลังจากพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียแล้ว ได้สรุปร่วมกันว่าควรเลือกใช้แนวคิดที่ 1 คือ เหล็กนำมาสร้างพื้นบานพับ เนื่องจาก มีความแข็งแรงทนทาน และมีอายุการใช้งานที่นานกว่าจากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียชุดส่งกำลังชุดหัวยิงแล้ว ได้สรุปร่วมกันว่าควรเลือกใช้แนวคิดที่ 2 คือ ส่งกำลังด้วยบอลสกรู เนื่องจากลดแรงเสียดทานได้ดีกว่า และเพิ่มประสิทธิภาพกับความแม่นยำได้ดี

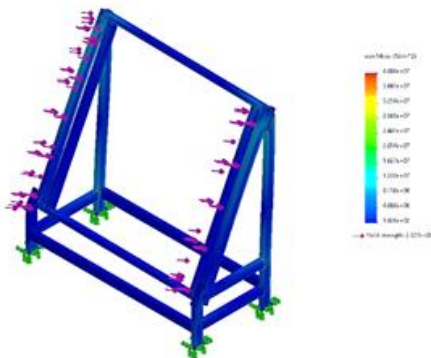
จากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียชุดกำหนดขั้นตอนการทำงานแล้ว ได้สรุปร่วมกันว่าควรเลือกใช้แนวคิดที่ 1 คือ ระบบควบคุม PLC เนื่องจากควบคุมระบบที่ซับซ้อนได้ดีกว่า มีความปลอดภัยและสามารถแก้ไขหลังการติดตั้งได้ง่ายกว่า

หลังจากสร้างเครื่องจักรแล้วจึงทำการทดลองการใช้งานของ เครื่องจักร ซึ่งมีวัตถุประสงค์ เพื่อพิจารณาและประเมินความสามารถในการควบคุมระบบการ

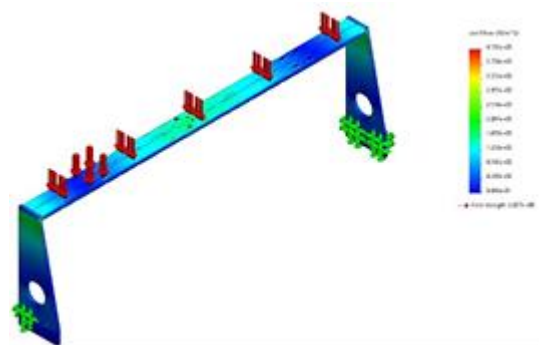
ออกแบบ และผลกระทบของการทำงานต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5 การประเมินสมรรถนะแบบทางเลือก

ทุกแบบทางเลือกจะถูกนำมาประเมินสมรรถนะทางเลือกและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสำคัญสำหรับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ CAD/CAM [14] เพื่อค้นหาจุดในการปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงของแต่ละชิ้นส่วน โดยในงานวิจัยนี้ ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมเพื่อตรวจสอบจุดอ่อนของชิ้นส่วนและการตรวจสอบจุดอ่อนของชุดอุปกรณ์ โดยแรงที่กระทำภายนอกจากชุดหัวยิง กระบอกสูบไหลดเท่ากับ 1,500 N ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งผลการประเมินของแบบทางเลือกทั้ง 2 แบบ มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับแรง 1,500 N โดยไม่มีชิ้นส่วนใดเกิดการเสียรูป



รูปที่ 3 ตัวอย่างการประเมินสมรรถนะทางเลือก



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ชุดหัวยิงที่เกิดการเสียรูป



3. การทดสอบ

3.1 วิธีการทดสอบเครื่องยิงพาลेत

3.1.1 ทดสอบความสามารถในการประกอบพาลेत ขนาด 1,100 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร

3.1.2. เครื่องยิงพาลेतสามารถประกอบพาลेतได้ ภายในเวลา 5 นาที/1ตัว

3.1.3. วิเคราะห์หาสาเหตุความบกพร่องต่างๆ และ นำไปปรับปรุงแก้ไข

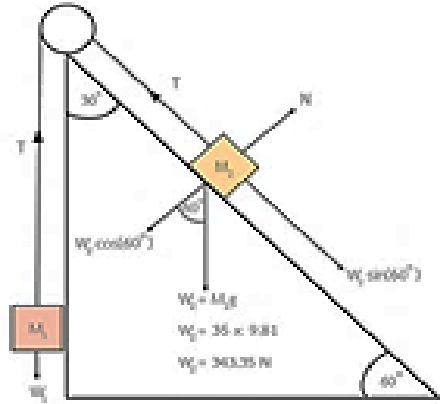
3.1.4 ก่อนทำการทดสอบเครื่องยิงพาลेत จะต้อง ตรวจสอบเช็คความพร้อมในการทำงานของเครื่อง เพื่อ ป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาด

3.2 ผลการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบครั้งที่ 1 ปัญหาคือ การเคลื่อนที่ของชุดหัวยิงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้พร้อมกัน จึงทำให้ตำแหน่งการยิงตะปูไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน

ดังนั้นจึงได้แก้ไขโดยการหาน้ำหนัก $M_2 = 7.7810$ ดังรูปที่ 5 จึงนำถ่วงทรายขนาด 8 กิโลกรัม มา ถ่วงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของชุดหัวยิงให้ เคลื่อนที่ได้พร้อมกัน หลังจากได้ทำการแก้ไขถ่วง ถ่วงทรายแล้วจึงทำการทดสอบ

3.2.2 การทดสอบครั้งที่ 2, 3, 4 และ 5 การทดสอบ ประสิทธิภาพของปืนยิงตะปู ที่ความดันลม 5 บาร์ โดยกำหนดขนาดตะปู 1.5 นิ้ว ยิงตะปูตำแหน่งละ 2 ตัว/แผ่น โดยทดสอบที่ระยะเวลา 5 นาที สามารถ ประกอบพาลेतได้ 1 ตัว จากการทดสอบครั้งที่ 2, 3, 4 และ 5 ผลการทดสอบปรากฏว่า การทดสอบ ประสิทธิภาพของปืน ยิงตะปู การทดสอบเป็นไปตาม ขอบเขตสามารถยิงตะปู 2 ตัว/แผ่น ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5 F.B.D. แรงที่กระทำ

3.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องยิงพาลेत โดยกำหนดขนาดพาลेतที่ 1,100 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร โดยทดสอบที่ระยะเวลา 5 นาที สามารถ ประกอบพาลेतได้ 1 ตัว จากการทดสอบครั้งที่ 5 ผล การทดสอบปรากฏว่า การทดสอบประสิทธิภาพของ เครื่องยิงพาลेत โดยขนาดพาลेतที่ได้ประมาณ 1,100 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลา 5 นาที/1ตัว

3.3 ผลการทดสอบหลักการทำงานของเครื่อง

การทดสอบหลักการทำงานของแต่ละชุดของเครื่อง ยิงพาลेत คือ การทดสอบประสิทธิภาพของปืนยิง ตะปู สามารถยิงขนาดตะปู 1.5 นิ้ว ตำแหน่งละ 2 ตัว/ แผ่น ที่ระยะเวลา 5 นาที สามารถประกอบพาลेतได้ 1 ตัว ได้เป็นอย่างดี การทดสอบประสิทธิภาพของ เครื่องยิงพาลेत โดยขนาดพาลेतที่ได้ประมาณ 1,100 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลา 5 นาที สามารถประกอบพาลेतได้ 1 ตัว ซึ่งเป็นไปตาม เป้าหมาย



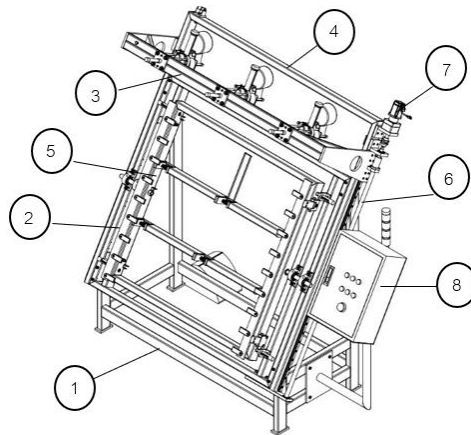
ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพครั้งที่ 5 ของเครื่องยิงพาลาท ในเวลา 5 นาที

ผลการทดสอบ ครั้งที่ 5

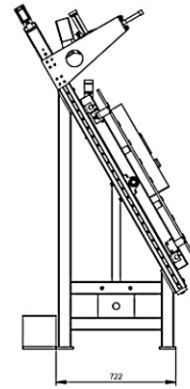
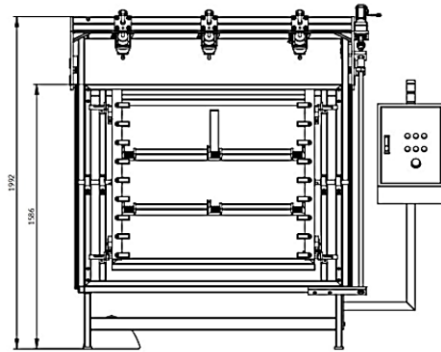
ครั้งที่	เวลาที่ประกอบพาลาท (นาที)	ยอมรับได้	ยอมรับไม่ได้	ขนาดพาลาท	
				ยอมรับได้	ยอมรับไม่ได้
1	4.55	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
2	4.56	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
3	4.56	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
4	4.54	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
5	4.57	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	

ตารางที่ 11 รายละเอียดส่วนประกอบของเครื่องยิงพาลาท

Part No.	Part Name	Material	Q'ty
01	ชุดโครงเครื่อง	Steel	1
02	ชุดติดตั้งอุปกรณ์จับยึด	Steel	1
03	ชุดติดตั้งหัวยิง	Steel	1
04	ชุดหัวยิง	Steel	1
05	ชุดอุปกรณ์จับยึดพาลาท	Steel	1
06	ชุดส่งกำลังชุดหัวยิง	Steel	1
07	ชุดต้นกำลัง	Steel	1
08	ชุดควบคุมการทำงาน	Steel	1



รูปที่ 6 แบบร่างส่วนประกอบเครื่องยิงพาลาท



รูปที่ 7 แบบโครงสร้างเครื่องยิงพาลาท



รูปที่ 8 เครื่องยิงพาลาท

3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะจริงกับสมรรถนะเป้าหมาย

สมรรถนะเป้าหมายที่สำคัญสำหรับกรณีศึกษานี้คือเครื่องยิงพาลาทสามารถประกอบพาลาทที่มีขนาด 1,100 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร เป็นทรงสี่เหลี่ยมได้ประมาณ 5 นาที/1 ตัว ได้ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะทางวิศวกรรมคือค่าแรงสามารถรับแรงได้ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1500 N จากผลการประเมินพบว่าในทุกๆ แบบทางเลือกมีสมรรถนะที่สอดคล้องกับค่าเป้าหมาย และแต่ละแบบทางเลือกมีคุณลักษณะที่

ใกล้เคียงกัน เนื่องจากโครงสร้างเป็นรูปแบบเดียวกัน ส่วนที่แตกต่างเป็นประเภทของเหล็กที่เลือกใช้งานเท่านั้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลาทต้นแบบ โดยการสำรวจความต้องการของกลุ่มแรงงานผู้ผลิตไม้พาลาทและประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพในการกำหนด รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องยิงพาลาทต้นแบบที่สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการออกแบบที่



อธิบายขั้นตอน การดำเนินกิจกรรมอย่างเป็นระบบ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ไม่ได้รับประกันว่าเมื่อดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวแล้วจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีในครั้งเดียว ซึ่งเป็นลักษณะโดยธรรมชาติของกระบวนการออกแบบที่ต้องมีการทำซ้ำเพื่อแก้ไขและปรับปรุงจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรเป็นจำนวนมากตามจำนวนครั้งของการทำซ้ำเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง ด้วยเหตุนี้ จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เชื่อมโยงกับเทคนิค FBS เพื่อพัฒนาเป็นขั้นตอนการออกแบบ ที่สามารถนำไปสู่การแปลความเพื่อกำหนดโจทย์ปัญหาและขอบเขตของการออกแบบได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ การแปลงความต้องการเป็นหน้าที่และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และคุณลักษณะทางวิศวกรรม รวมทั้งมีการบ่งชี้ข้อจำกัดของการออกแบบไว้ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการ ทำให้ความเสี่ยงในการเกิดข้อผิดพลาดลดลงและนำไปสู่การลดจำนวนการทำซ้ำกระบวนการออกแบบจากการทดสอบและใช้งานจริงของเครื่องยิงพาลเลท ผลทดสอบเครื่องยิงพาลเลทที่ใช้งานได้จริงเป็นที่น่าพอใจตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ คือ เครื่องยิงพาลเลทสามารถประกอบพาลเลทที่มีขนาด 1,000 x 1,100 x 120 มิลลิเมตร เป็นทรงสี่เหลี่ยมได้ 5 นาที/1 ตัว ซึ่งสามารถลดกำลังการผลิตจากเดิม 2 นาที/ 1 ตัว เป็นที่ยอมรับและพึงพอใจของบริษัท และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย กิตติกรรมประกาศ

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลเลท ได้จัดอนุสิทธิบัตร ชื่อการประดิษฐ์เครื่องยิงพาลเลท วันที่ออกสิทธิบัตร 18/01/2565 เลขที่สิทธิบัตร 19099 และขอขอบคุณ บริษัท ไนน์เวิร์ค เอนจิเนียริง จำกัด เป็นอย่างสูง ในความอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อการดำเนินงานวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Yoji, Development history of quality function deployment, The customer driven approach to quality planning and deployment, Asian Productivity, Organization Minato, Tokyo, Japan, 1994.
- [2] A. Yoji, The method for motivation by quality function deployment (QFD). Nang Yan Business Journal, 2012, 1(1), 1-9.
- [3] C.M. Annappa and K.S. Panditrao, Integration of quality function deployment and value engineering in furniture Manufacturing Industry for Improvement of Computer Work Station, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2(6), 2013, 45-52.
- [4] E.S. Jaiswal, A case study on quality function deployment (QFD), Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2012, 3(6), 27-35.
- [5] N. Kongprasert, A needling recapping device design through QFD approach, The International Conference on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM), Proceeding, 2016, I-8.
- [6] J. Rebecca and A.P. Putra, Trash click design using house of quality, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 662, 1-5.



- [7] I. Andreea, and L. Monica, QFD integrated in new product development – biometric identification system case study, *Procedia Economics and Finance*, 2015, 23, 986-991.
- [8] A. Manee-ngam, P. Saisirirat and P. Suwankan, Hook design loading by the optimization method with weighted factors rating method, *Energy Procedia*, 2017, 138, 337-342.
- [9] K. Sookramoon, S. Bunchoowit, W. Permchart, C. Suetrong and S. Kingthong, Finite element investigation on chassis design for agricultural vehicle, *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, 2023, 11(1), 94-106.
- [10] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen and K.-H. Grote, *Engineering design a systematic approach*, 3rd Ed., Springer-Verlag London Limited., London, UK, 2007.
- [11] F.G. Tsegaw, K. Balasundaram and M.S. Senthil Kumar, Case study on improvement of conceptual product design process by using quality function deployment, *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 2017, 03(4), 1-10.
- [12] N. Janthong and S. Chaloeiphak, Combining QFD and FBS in a design methodology of engineered products: A case study of woven bag clamping Devices, *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 2019, 14(1), 33-43.
- [13] S. Ngermtong and V. Layluk, Systematic design of double enveloping worm cutting attachment on lathe, *Sripatum Review of Science and Technology*, 2018, 10, 129-145.
- [14] K. Prasad and S. Chakraborty, A QFD-based decision making model for computer - aided design software selection, *Management Science Letters*, 2016, 6, 213-224.



ประสิทธิภาพของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการลดระดับความเครียดของสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (PC-Plank Girder) ภายใต้น้ำหนักบรรทุก

ปรัชญา ยอดดำรงค์¹ ชิชญาส์ บุญมี^{2*} และ กิตติภูมิ รอดสิน³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาครุศาสตร์โยธา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 18 มีนาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 27 มีนาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างแผ่นพื้นของสะพานข้ามคลองแพรกสี จ.สมุทรสงคราม เนื่องจากสะพานมีการใช้งานมาอย่างยาวนาน จึงได้ทำการตรวจสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ด้วยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสมือนจริง ผลของการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymers: CFRP) จากผลของการเสริมกำลังโครงสร้างโดยการติดตั้งแผ่น CFRP จำนวน 2 ชั้น พบว่า การเสริมกำลังสามารถทำให้ระดับค่าความเครียดและการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางแผ่นพื้นได้สะพานโดยรวมมีค่าลดลงร้อยละ 4.33 สำหรับความเครียดและ 3.68 สำหรับการแอ่นตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถช่วยในการลดระดับความเครียด และการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกได้ และจากการประเมินค่าโมเมนต์ตัดในโครงสร้างสะพานส่วนบนโดยวิธี LRFR ค่า Rating Factor (RF) ทั้งระดับ Inventory และระดับ Operation พบว่าหลังเสริมกำลังด้วย CFRP สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 35 แสดงว่า สะพานยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น โดยไม่เกิดการวิบัติและสามารถใช้สะพานได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: การทดสอบสะพาน; เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์; การเสริมกำลัง

The Performance of Carbon Fiber in Decreasing the Strain Level of the PC-Longitudinal Bridge (PC-Plank Girder) under Service Load

Pruchaya Yoddumrong¹, Chichaya Boonmee^{2*} and Kittipoom Rodsin³

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Bangkok

² Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th

Received: 26 June 2023; Revised: 18 March 2024; Accepted: 27 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: This research focuses on studying the effectiveness of carbon fiber reinforcement in increasing the strength of the floor structure of the bridge over the Canal Phrae Kluang, Samut Songkhram Province. Due to the prolonged use of the bridge, an inspection and evaluation of the load-bearing capacity of the bridge were conducted through quasi-static load tests. The results of the structural strength assessment were used in the design of structural reinforcement using Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP). From the results of the reinforcement with the installation of two layers of CFRP, it was found that the reinforcement could reduce the levels of stress and deformation in the middle area of the bridge floor by 4.33% for stress and 3.68% for deformation. This demonstrates that CFRP reinforcement can help in reducing the levels of stress and deformation caused by increased load, and from the assessment of the moment capacity in the upper bridge structure using the LRFR method, both at the Inventory and Operation levels, it was found that after reinforcement with CFRP, the bridge can withstand an increased load capacity by 35%. This indicates that the bridge can still handle an increased load without experiencing failure and can be used safely.

Keywords: Bridge Load Test; Carbon Fiber Reinforced Polymer; Strengthening



1. บทนำ

ในปัจจุบันสะพานเป็นโครงสร้างที่ถูกใช้งานไม่น้อยไปกว่าถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง และสะพานยังช่วยให้สามารถเดินทางไปยังแหล่งต่างๆที่เข้าถึงได้ยาก เช่น การข้ามแม่น้ำ หรือการใช้ข้ามผ่านถนนตามแยกต่างๆ เป็นต้น จากการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันอันเนื่องมาจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและความเจริญของประเทศ ทำให้สะพานหรือโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสะพานถูกใช้มาอย่างยาวนานนั้น ต้องมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน อีกทั้งยังมีการฝ่าฝืนข้อกฎหมายของน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานของสะพาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อกรรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานทำให้สะพานมีอายุการใช้งานที่สั้นลงกว่าที่ได้ถูกออกแบบไว้ ดังนั้นการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทำให้เรามั่นใจว่า สะพานที่ใช้งานในปัจจุบันนั้นมีความปลอดภัยเพียงพอหรือไม่ อย่างเช่นในงานวิจัยของ Sukit et al [1] ที่ได้ทำการประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจรของโครงสร้างสะพานโดยวิธี Load and Resistance Factor Rating (LRFR) โดยในงานวิจัยได้ใช้พาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกลงเพลาก็คงว่าที่ได้กำหนดโดยสะพานที่ใช้ในการศึกษาเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรง (Plank Girder) ช่วงความยาว 9 เมตร จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างสะพานส่วนบนมีค่า Shear และ Moment Rating Factor เท่ากับ 11.69, 4.28 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 1 โดยสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย แต่โครงสร้างส่วนล่างมีค่า Shear Rating Factor เท่ากับ 0.83 มีค่าน้อยกว่า 1 ทำให้สะพานไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาได้และสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง [2] ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม

การรับแรงของสะพานข้ามคลองลาดน้ำไทร และสะพานข้ามคลองต่างๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Load Test) [3-10] เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างคานสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานจริง อีกทั้งยังได้มีการปรับปรุงโครงสร้างสะพานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานโดยการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เสริมโพลีเมอร์ ตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 [11] จากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมา [12-15] พบว่า การติดตั้ง CFRP มีผลทำให้การรับกำลังดัดของคานสูงขึ้นและช่วยลดการแตกร้าวในคอนกรีต และพบว่าเมื่อนำ CFRP มาเสริมกำลังในท้องพื้นสะพาน ทำให้เกิดค่าความเครียดใต้พื้นสะพานลดลงเมื่อโครงสร้างพื้นสะพานรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างคานสะพานอีกครั้งภายหลังการเสริมกำลังด้วย CFRP เสร็จสิ้น

2. วิธีการวิจัยและตัวอย่างการทดสอบ

2.1 วิธีการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างคานสะพาน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาดต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างด้วยทฤษฎีทางโครงสร้างต่าง ๆ และการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์การวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักอันแท้จริงของสะพาน และการประมาณอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของสะพาน จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีผลต่อการรับแรงของโครงสร้างคานสะพานอย่างละเอียด วิธีการที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันก็คือ การใช้ผลการทดสอบ

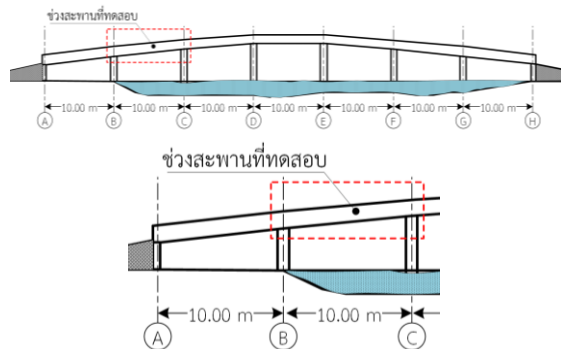


น้ำหนักบรรทุกจริง (Load Test) ในการศึกษา ใช้วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของสะพานทั้งแบบสถิต (Static) การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานนั้นจะดำเนินการโดยวิธี Bridge Diagnostics Instruments Test (BDI) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ที่พัฒนาขึ้นมาจากความต้องการทราบถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างจริงว่ามีค่าเป็นเท่าใด โดยการประยุกต์หลักการพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นและความเครียดในตัวโครงสร้างเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำทดสอบน้ำหนักบรรทุกจรประกอบไปด้วย การติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด เครื่องมือวัดการแอ่นตัว และเครื่องมือวัดความเร่งที่มีความแม่นยำสูงในบริเวณจุดที่สำคัญตลอดช่วงความยาวของสะพานเครื่องมือที่ใช้สามารถที่จะแปลงสัญญาณที่ได้จากการวัดออกมาในรูปของคลื่นไฟฟ้าไปยังส่วนบันทึกข้อมูลซึ่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะมีลักษณะเฉพาะสำหรับสะพานแต่ละแบบที่มีความแตกต่างกันในเรื่องวัสดุ ระบบโครงสร้าง ช่วงความยาว สภาพการยึดรั้งของจตุรรองรับ โดยข้อมูลต่างๆ จะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบ ซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้ประกอบในการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนัก โดยมีรูปแบบช่วงสะพานที่ทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 1

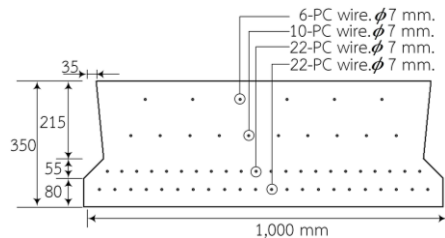
2.2 ตัวอย่างการทดสอบ

ในการทดสอบโครงสร้างพื้นสะพานได้แสดงตำแหน่งช่วงสะพานในการทดสอบไว้ในรูปที่ 1 โดยลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสะพานมีความยาวช่วง 7 ช่วง โดยในแต่ละช่วงยาว 10 เมตร โดยมีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

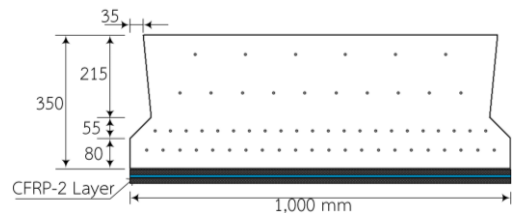
(PC.PLANK GIRDER) วางบนคานสะพาน โดยรายละเอียดหน้าตัดสะพานได้แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีขนาดหน้าตัดของ PC.PLANK GIRDER เท่ากับ 0.35x1.00 เมตร มีความยาว 10 เมตร โดยมีคุณสมบัติของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ดังแสดงดังรูปที่ 3 มีสมบัติของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 1 ตำแหน่งสะพานสำหรับทำการทดสอบ



รูปที่ 2 รายละเอียดหน้าตัด PC- PLANK GIRDER



รูปที่ 3 รายละเอียดหน้าตัด PC- PLANK GIRDER ที่เสริมกำลังด้วย CFRP



ตารางที่ 1 สมบัติของ PC - Longitudinal Bridge

รายการ	ปริมาณ
Section Area, (mm ²)	327.6 x10 ³
Moment of Inertia, (mm ⁴)	3,417 x10 ⁶
กำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c)	350 ksc
กำลังที่จุดครากของลวดอัดแรง (f_{py})	14,399 ksc
มอดุลัสยืดหยุ่น (E_s), (ksc)	2.04x10 ⁶
ความเครียดที่จุดคราก (ϵ_{ps})	0.007
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดอัดแรง	7 มิลลิเมตร
จำนวนลวดอัดแรง	60 เส้น

ตารางที่ 2 สมบัติของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการเสริมกำลัง

รายการ	ปริมาณ
ความหนา (t_f)	0.16 mm.
ความเค้นดึงประลัย (f_{fu}^*)	38,000 ksc
มอดุลัสยืดหยุ่น (E_f)	2,270,000 ksc
ความเครียดที่จุดแตกหัก (ϵ_{fu}^*)	0.0167

2.3 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการตรวจสอบเพื่อหาค่าการแอ่นตัว (Deflection) ค่าความเครียด (Strain) ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) โดยได้สรุปอุปกรณ์ต่างๆไว้ในตารางที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้ Strain Gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการเสียรูปของโครงสร้าง โดยวัดการยืดหดตัวของโครงสร้าง โดยกำหนดให้ เครื่องหมาย - เป็นการหดตัว และถ้าเครื่องหมาย + เป็นการยืดตัวของโครงสร้าง, LVDT (Linear Variable Displacement





Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการเสียรูปโดยวัดค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง อาศัยการเคลื่อนตัวเข้า - ออกของการตรวจวัด ที่สัมผัสกับโครงสร้างที่ต้องการทราบค่าการเคลื่อนที่, Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเร่งของการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยอาศัยหลักการที่เมื่ออุปกรณ์เกิดการสั่นไหวจะทำให้วงจรไฟฟ้าที่อยู่ภายในอุปกรณ์มีค่าความต้านทานหรือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากนั้นจึงประเมินค่าความเร่งจากสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ดังกล่าว อุปกรณ์ Accelerometer จะใช้ในการวัดระดับการสั่นไหวและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง และส่วนอุปกรณ์ Data Logger ชนิดไร้สายสำหรับบันทึกข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บและแปลงข้อมูลจาก จากเซ็นเซอร์เข้ามาในรูปแบบของสัญญาณ Analog และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณ Digital ซึ่งสามารถส่งต่อไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผล โดยรูปที่ 4 ได้แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพานบริเวณท้องแผ่นดินสะพาน



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพานได้แผ่นดินสะพาน



ตารางที่ 3 Specifications of sensors

Name	Sensor	Specifications
Strain gauge		Gauge length: -2000 to +2000 micro strain
Displacement sensor		Full scale length: 50 mm
Accelerometer		Integrated 3-axis high performance accelerometer Adjustable input range: 8G
Data Logger		Wireless Sensor

3. ผลการทดสอบ

ในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานก่อนเสริมและหลังเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์นี้ ได้ทำการทดสอบในสภาวะสถิต (Static Load Test) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้ง (LVDT) เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัว และติดตั้ง strain gauge (SG) เพื่อตรวจวัดค่าการยืดหดตัวที่ผิวท้องคานสะพาน โดยมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถออกเป็น 2 ช่องทางเดินรถ ในการทดสอบนี้ใช้รถบรรทุกชนิด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น จำนวน 2 คัน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรถบรรทุกในการทดสอบนี้มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 25 ตันต่อคัน ในการวิจัยนี้ได้ใช้รถบรรทุก 2 คัน เคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 2 ช่องทาง โดยไปจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 ตามแนวเส้นประใน 1 ช่วงความยาวสะพาน โดยในการทดสอบกรณีนี้จะมีน้ำหนักบรรทุกบนสะพานมากที่สุด ดังนั้นจึงเป็นกรณีที่แสดงออกถึงขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

ของสะพานที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดและในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้แบ่งหัวข้อการอธิบายผลการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการติดตั้ง Strain gauge สำหรับวัดการยืดหดตัวที่ผิวคอนกรีตบริเวณใกล้กับฐานรองรับของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต และบริเวณกึ่งกลางคานของคานสะพานคอนกรีต เพื่อตรวจสอบว่าสะพานเป็นระบบคานต่อเนื่องหรือเป็นแบบคานช่วงเดียว จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานของคานสะพานคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกทำให้เกิดการยืดตัวที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต มีค่าเป็นบวก มีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 46 micro-strain (Tensile Strain) และค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณใกล้กับ

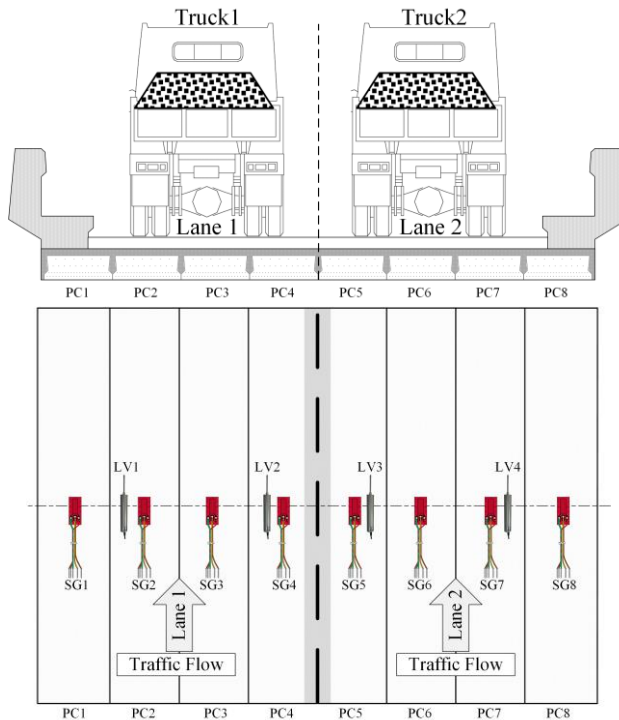


ฐานรองรับของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8 micro-strain (Tensile Strain) ดังแสดงในรูปที่ 6 จากผลของความเครียดที่เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าจุดรองรับของพื้นสะพานเป็นแบบยึดหมุนโดยสมบูรณ์

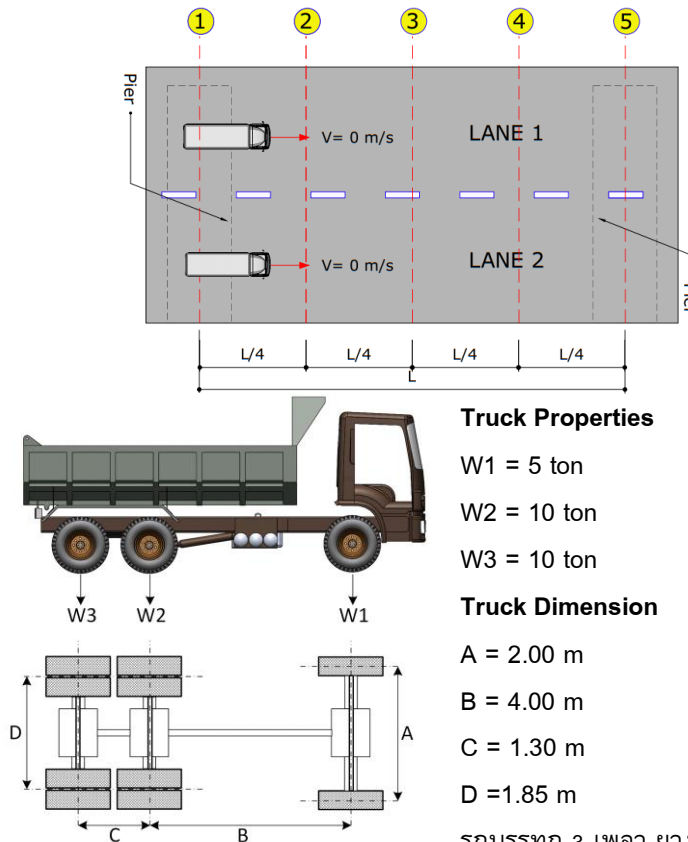
3.2 ผลการทดสอบแบบสถิตศาสตร์หลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

จากผลการทดสอบพบว่า หลังจากที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปตรงตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางสะพาน พบว่าค่าการยืดหดตัว (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานของพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรง ภายใต้ผลของน้ำหนักบรรทุกที่ใหญ่หนึ่งตรงตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน มีความเครียดสูงสุดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 44.12 micro-

strain ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสะพานก่อนเสริมกำลัง ซึ่งมีค่าความเครียดเฉลี่ยเท่ากับ 46.12 micro-strain โดยมีค่าความเครียดลดลงหลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP ร้อยละ 4.33 ดังแสดงในรูปที่ 7 และทำให้ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางสะพานมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.83 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสะพานก่อนเสริมกำลังซึ่งมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.90 มิลลิเมตร โดยมีค่าการแอ่นตัวลดลงหลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP ร้อยละ 3.68 ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 จากผลการทดสอบทั้งหมดได้สรุปเป็นตารางที่ 4 โดยจะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP ทำให้ค่าความเครียดและการแอ่นตัวบริเวณท้องสะพานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

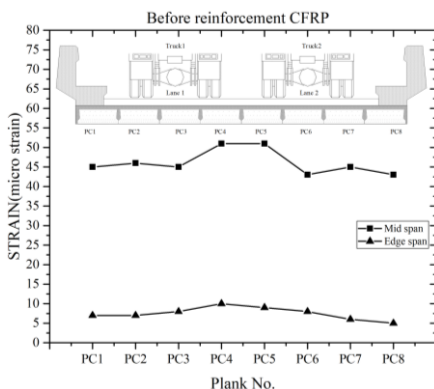


รูปที่ 5 ตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับการทดสอบ

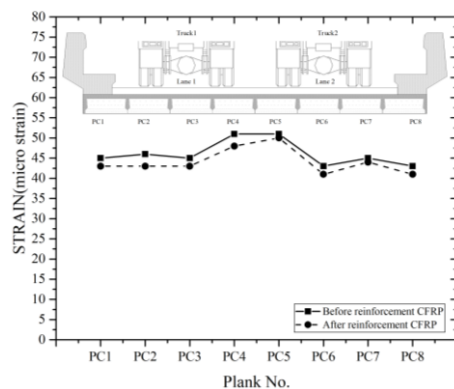


รถบรรทุก 3 เพลา ยาง 10 เส้น น้ำหนัก 25 ตัน

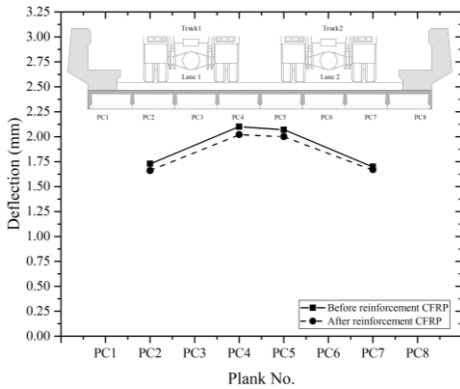
รูปที่ 6 ตำแหน่งการเดินรถบรรทุกสำหรับการทดสอบแบบสถิตย์และรายละเอียดน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณใกล้ฐานรองรับ ก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP



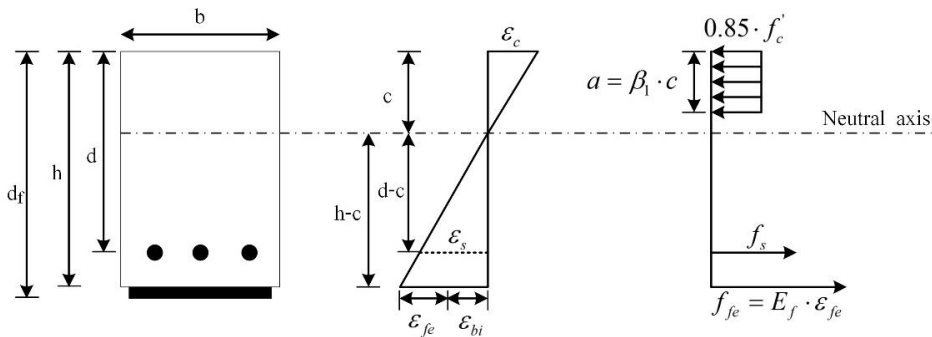
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางสะพาน ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วย CFRP



ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบระยะแอนตัวและค่าความเครียด ของสะพาน

รายการ	ก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP	หลังเสริมกำลังด้วย CFRP
ระยะแอนตัว (mm)	1.90	1.84
ค่าความเครียด $\mu\epsilon$	46.12	44.12

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบระยะแอนตัวบริเวณกึ่งกลางสะพาน ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วย CFRP



รูปที่ 10 การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและความเค้นภายในของหน้าตัดคานภายใต้การตัด

4. การทำนายเชิงทฤษฎีของพฤติกรรมรับแรงดัดเนื่องจากการเสริมกำลังด้วยเส้นใย CFRP

ในส่วนนี้เป็นขั้นตอนการคำนวณตามทฤษฎีโดยใช้วิธีการที่ยึดตามสมการ ACI-440 เป็นหลัก ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการต้านทานโมเมนต์ดัดและความเครียดของการเสริมกำลังด้วย CFRP ทำให้แผ่นพื้นสะพานมีความแข็งแรงขึ้น

4.1 หลักการเสริมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเส้นใย

หลักการเสริมกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเหมือนกับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง กล่าวคือโมเมนต์ต้านทานสูงสุดที่ได้จากการออกแบบ (M_n) เมื่อคูณตัวลดกำลัง (ϕ) แล้วจะต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดปรัลย (M_u) ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\phi M_n \geq M_u \quad (4.1)$$



โดยที่

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + (\psi_f \cdot M_{nf})]$$

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s \cdot \left[d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right]$$

$$M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left[d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right]$$

โดยที่

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor) มีค่าเท่ากับ 0.90

M_n คือ โมเมนต์ดัดต้านทานสูงสุดที่ได้จากการออกแบบ

M_u คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

M_{ns} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานเนื่องจากเหล็กเสริม

M_{nf} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเนื่องจากเส้นใยที่ใช้เสริมกำลัง

ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง (Strength reduction factor) มีค่าเท่ากับ 0.85

4.2 ระดับค่าความเครียดที่ใช้ออกแบบ

ค่าความเครียดที่ใช้ออกแบบการเสริมกำลังด้วยเส้นใยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

4.2.1 ค่าความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (ϵ_{bi})

โดยค่าความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (h - kd)}{I_{cr} \cdot E_c} \quad (4.2)$$

โดยที่

ϵ_{bi} คือ ความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

M_{DL} คือ โมเมนต์ดัดประลัยเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ($kN \cdot mm$)

h คือ ความลึกของหน้าตัดคาน (mm)

k คือ ตัวคูณระยะระหว่างศูนย์ถ่วงแรงอัดในคอนกรีต

$$k = \left[\sqrt{(\rho n)^2 + (2 \cdot \rho \cdot n)} \right] - (\rho n)$$

d คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดจากผิวบนมาถึงเหล็กเสริมรับแรงดึง (mm)

I_{cr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงรัว (mm^4)

E_c คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
 $= 15,100 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ MPa}$

4.2.2 ความเครียดก่อนการหลุดล่อนของเส้นใย CFRP

เพื่อป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของเส้นใย ดังนั้น ค่าความเครียดของเส้นใยจะถูกควบคุมไว้ตามสมการที่ 4.3

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n_f \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (4.3)$$

โดยที่

ϵ_{fd} คือ ความเครียดก่อนการหลุดล่อนออกของเส้นใย

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

n_f คือ จำนวนชั้นการติดตั้งของเส้นใย

E_f คือ มอดุลัสความยืดหยุ่นของเส้นใย (MPa)

t_f คือ ความหนาของเส้นใย (mm)

ϵ_{fu} คือ ความเครียดของเส้นใย



4.2.3 ความเครียดประสิทธิผลของเส้นใย CFRP

จากสมการที่ 4.3 หมายความว่าค่าความเครียดของเส้นใยเพื่อป้องกันการวิบัติจากการแตกหลุดล่อนต้องมีค่าน้อยกว่า ค่าความเครียดของเส้นใยที่ใช้ออกแบบคูณกับตัวลดกำลัง ดังนั้นค่าความเครียดประสิทธิผลที่ใช้ออกแบบ ใช้สมการที่ 4.4 แต่ถ้าสมการที่ 4.4 มีค่ามากกว่าสมการที่ 4.3 ให้ใช้สมการที่ 4.3 สรุปคือให้ใช้ค่าความเครียดของเส้นใยที่น้อยที่สุดเป็นค่าควบคุมในการออกแบบ

$$\varepsilon_{fe} = \left[\left(\varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) \right) - \varepsilon_{bi} \right] \leq \varepsilon_{fd} \quad (4.4)$$

โดยที่

ε_{fe} คือ ความเครียดประสิทธิผลของเส้นใย

ε_{cu} คือ ความเครียดประลัยของคอนกรีต
= 0.003

d_f คือ ความลึกจากผิวคานบนลงมาถึงระยะที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย (mm)

c คือ ระยะจากผิวที่เกิดแรงอัดสูงสุดไปยังแนวแกนสะเทินของหน้าตัดคาน (mm)

ε_{bi} คือ ความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

ε_{fd} คือ ความเครียดก่อนการหลุดล่อนออกของเส้นใย

4.3 ความเค้นประสิทธิผลที่ใช้ออกแบบการเสริมกำลังด้วยเส้นใย

ความเค้นประสิทธิผลของการเสริมกำลัง เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่เพิ่มขึ้นก่อนที่หน้าตัดคาน เกิดการวิบัติเนื่องจากการตัด สามารถหาได้จากระดับของความเครียดในเส้นใยที่สมมุติให้อยู่ในช่วงของพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ตามสมการที่ 4.5

จากสมการตั้งที่กล่าวมาได้ทำการคำนวณโดยสรุปไว้ในตารางที่ 5 และจากการคำนวณการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของสะพาน ก่อนและหลังเสริมกำลังความแข็งแรงให้กับโครงสร้างใต้ท้องพื้นสะพานด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานเพิ่มขึ้นหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP ร้อยละ 21.05 คิดเป็น 1.21 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการเพิ่มโมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลัง CFRP

รายการ	ปริมาณ
ε_{bi}	= 0.0012
ε_{fd}	= 0.0285
$0.9\varepsilon_{fu}$	= 0.0128
ε_{fe}	= 0.0088
ψ_f	= 0.85
β_1	= 0.82
f_{fe}	= 20,002 ksc
f_{ps}	= 2,234.82 ksc
A_{ps}	= 184.73 cm ²
A_f	= 19.20 cm ²
Effective depth, d	= 32 cm
d_f	= 35 cm
c	= 14.53 cm

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (4.5)$$

โดยที่

f_{fe} คือ ความเค้นประสิทธิผล (MPa)

E_f คือ มอดุลัสความยืดหยุ่นของเส้นใย (MPa)

ε_{fe} คือ ความเครียดประสิทธิผลของเส้นใย



ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดของสะพาน

รายการคำนวณ	ก่อนเสริม	หลังเสริม
การเสริมกำลัง	CFRP	CFRP
กำลังรับโมเมนต์ดัด (kN-m)	4,421	5,351

5. การประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน

การประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพานสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของโครงสร้างหลัก ประกอบด้วย โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) โดยโครงสร้างส่วนบนได้ทำการประเมินในรูปของค่า Rating Factor (RF) ตามมาตรฐาน Load and Resistance Factor Rating (LRFR) ของ AASHTO และโครงสร้างส่วนล่างทำการประเมินในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลัง (Capacity) และภาระ (Demand) ในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างหรือที่เรียกว่า C/D Ratio (Capacity/Demand Ratio) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) เท่านั้น เนื่องจากเป็นการเสริมกำลังที่ได้ท้องพื้นสะพาน โดยจะประเมินความปลอดภัยจากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ทารด้วยน้ำหนักบรรทุกที่อยู่บนสะพานโดยใช้สมการตาม 5.1 [15] โดยมาตรฐานของ AASHTO (LRFD) ได้จำแนกระดับของการประเมินความปลอดภัยออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่

ระดับ Inventory เป็นการประเมินในระดับขั้นตอนการออกแบบที่สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 ตามอายุที่ออกแบบไว้ได้อย่างปลอดภัย และระดับ Operation เป็นการประเมินในระดับการใช้งานภายใต้รูปแบบของน้ำหนักบรรทุกจร HL-93

$$RF = \frac{[\phi M_n - (\gamma_{DC} \cdot M_{DL}) - \gamma_{DW} \cdot M_{DW}]}{\gamma_{LL} \cdot (M_{LL} + IM_{LL})} \quad (5.1)$$

โดยที่

$$\phi = 0.9$$

$$\gamma_{DC} = 1.25$$

$$\gamma_{DW} = 1.50$$

$$\gamma_{LL(INV)} = 1.75$$

$$\gamma_{LL(OPE)} = 1.35$$

M_{DL} คือ โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ($kN \cdot m$)

M_n คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP ($kN \cdot m$)

M_{DW} คือ โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของผิวจราจรและ Barrier ($kN \cdot m$)

M_{LL} คือ โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกจร ($kN \cdot m$)

$$I = 0.33$$

ค่าตัวแปรที่ใช้ในการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพานโดยนำมาจากการคำนวณการรับโมเมนต์ดัดของสะพานทั้งก่อนและหลังเสริมโดยได้สรุปไว้ในตารางที่ 7



ตารางที่ 7 สรุปค่าตัวแปรที่ใช้ในการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน

Moment	ปริมาณ
M_n ก่อนเสริมกำลัง	= 4,421 kN-m
M_n หลังเสริมกำลัง	= 5,351 kN-m
M_{DL}	= 1,177 kN-m
M_{DW}	= 98 kN-m
M_{LL}	= 893.45 kN-m

ในตารางที่ 8 เป็นตารางแสดงค่า Rating Factor ที่ระดับ Inventory และระดับ Operation ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่า RF มากกว่า 1 แสดงให้ทราบถึง โครงสร้างสะพานส่วนบนมีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกจรที่ทำการทดสอบได้อย่างปลอดภัย

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบเพื่อประเมินความสามารถของสะพานในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานก่อนและหลังการเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (CFRP) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (CFRP) สามารถทำให้ระดับค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางแผ่นใต้พื้นสะพานโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนสามารถช่วยในการลดระดับความเครียดใต้ท้องพื้นสะพานที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรได้

ตารางที่ 8 ค่า Rating factor ของโมเมนต์ดัดในโครงสร้างสะพานส่วนบน ช่วงความยาวสะพาน 10 เมตร

ระดับ	ก่อนเสริม	หลังเสริม
	CFRP	CFRP
Inventory	1.14	1.54
Operation	1.47	1.99

2. หลังเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ ค่าการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางสะพานโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน สามารถช่วยในการลดระดับการแอ่นตัวของแผ่นพื้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรได้

3. หลังจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน (Unloading) พบว่ามีการคืนตัวเมื่อพิจารณาค่าความเครียดและรวมถึงค่าการแอ่นตัวของสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกไม่พบการคงค้างของค่าการตอบสนองที่แสดงถึงการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) โดยโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบโดยรวมมีการตอบสนองอยู่ในช่วง Elastic

4. จากการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (CFRP) ทำให้สะพานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มร้อยละ 21.05

5. จากการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานโดยวิธี LRFR ค่า Rating Factor (RF) ทั้งระดับ Inventory และระดับ Operation มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า สะพานยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยไม่เกิดการวิบัติ และสามารถใช้สะพานได้อย่างปลอดภัย



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Yindeesuk, V. Nusuwan, W. Kongkaew and R. Kumpoopong, Application of assessment of the ability to withstand the live load of bridge structures by the Load and resistance factor rating (LRFR) method in applying for permission for vehicles with over-axle weight and size beyond specified limits, Civil Engineering Magazine, Engineering Institute of Thailand, Bangkok, Thailand, 2012.
- [2] W. Amornprasitpol, R. Kamphuphong, A. Monthr and A. Sawatphanit, In-situ investigation of distribution factors and impact factors for enhancing design of box beam and plank girder bridges with continuous deck slab, The National Convention on Civil Engineering (NCCE 25), Proceeding, 2020, 1-10.
- [3] Department of Rural Roads, Project to inspect and evaluate the capability of the bridge in the route RY.3031 crossroads TL.331 - TL.3191 and route TL.36 - TL.331, Pluak Daeng District, Rayong province, Department of Rural Roads, Thailand, 2020.
- [4] E. Lantsoght, C. Veen, A. Boer and D.A. Hordijk, State-of-the-art on load testing of concrete bridges, Engineering Structures, 2017, 150, 231-241.
- [5] D. Hester, J. Brownjohn, M. Bocian and Y. Xu, Low-cost bridge load test: Calculating bridge displacement from acceleration for load assessment calculations, Engineering Structures, 2017, 143, 358-374.
- [6] V. Ha Nguyen, S. Schommer, S. Maas and A. Zurbes, Static load testing with temperature compensation for structural health monitoring of bridges, Engineering Structures, 2016, 127, 700-718.
- [7] E.O.L. Lantsoght, C. van der Veen, A. de Boer and D.A. Hordijk, State-of-the-art on load testing of concrete bridges, Engineering Structures, 2017, 150, 231-241.
- [8] P. Lu, Z. Xu, Y. Chen and Y. Zhou, Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model, Engineering Structures, 2020, 214, 1-12.
- [9] A. Bayraktar, T. Turker, J. Tadla, A. Kursun and A. Erdis, Static and dynamic field load testing of the long span Nissibi cable-stayed bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 94, 136-157.
- [10] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA, 2008.



- [11] L.C. Hollaway, and H.N. Garden, An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fiber composite plates used to strengthen reinforced concrete beams, *Composite Structures*, 1998, 42, 175-188.
- [12] L. Lam and J.G. Teng, Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete, *Construction and Building Materials*, 2003, 17, 471-489.
- [13] S. Byung-Jik, L. Sang-Youl, J. Hyo-Seon, Long-term performance of a fiber-reinforced polymer slab bridge superstructure-field load test and ratings, *Composites: Part B*, 2013, 45, 644-656.
- [14] N. Graisor, and P. Chotickai, Behavior of concrete bridges strengthened with CFRP, Thesis, Kasetsart University, Thailand, 2012.
- [15] T. Pinkaew and M. Chanintonleela, Bridge design, June Publishing, Bangkok, Thailand, 2015.



หลักเกณฑ์การตรวจสอบโครงสร้างสะพานและการวางแผนเพื่อซ่อมบำรุงรักษา: กรณีศึกษาเกณฑ์ที่ใช้ในประเทศไทยและต่างประเทศ

ธวัชชัย ปัญญาคิด*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thawatchai@ormutto.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 ธันวาคม 2023; วันที่ทบทวนบทความ: 13 มีนาคม 2024; วันที่ตอบรับ: 28 มีนาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: สะพานเป็นองค์ประกอบสำคัญและมีคุณค่าต่อโครงสร้างพื้นฐานทางบกและทางราง ดังนั้นการแก้ไขสะพานจึงสำคัญต่อผู้จัดการสินทรัพย์และวิศวกร แต่อย่างไรก็ตาม การวางแผนการซ่อมบำรุงของสะพานเมื่อถูกใช้งานไปนานๆ ก็จะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างต่อเนื่องตามอายุการใช้งาน การตรวจสอบสภาพการใช้งานของสะพานและการซ่อมบำรุงรักษาจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะช่วยในการตรวจสอบและการซ่อมบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานให้มีความมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ใช้งานอย่างปลอดภัย ประเทศญี่ปุ่น และ สหรัฐอเมริกา ในฐานะประเทศที่พัฒนาแล้วต่างก็เคยประสบปัญหาการเสื่อมสภาพของสะพานเนื่องจากอายุการใช้งานที่มากขึ้น ทำให้ทั้งสองประเทศนี้ได้มีการพัฒนาระบบการตรวจสอบสภาพของสะพานและวิธีการซ่อมบำรุงรักษาสะพานมาก่อนแล้ว สำหรับประเทศไทยและเวียดนามนั้นถือว่าเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาจึงยังคงต้องมีการดำเนินการพัฒนาฝีมือเพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบสะพานและวิธีการซ่อมบำรุงรักษาให้มีความเหมาะสมที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการเดินทางรวมทั้งระบบการขนส่งเพื่อรองรับการพัฒนาด้านเศรษฐกิจของประเทศ บทความนี้ได้นำเสนอมาตรการในการตรวจสอบสะพานที่มีประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบระหว่างประเทศไทยแล้วได้แก่ประเทศ สหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น กับประเทศที่กำลังพัฒนาซึ่งได้แก่ประเทศไทยและเวียดนามนี้ โดยบทความนี้ได้นำเสนอเอกสารที่ใช้อ้างอิงในการตรวจสอบสะพาน การเตรียมบุคคลากรหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการตรวจสอบสะพาน และการกำหนดระดับการเสื่อมสภาพของสะพานในแต่ละประเภท เพื่อให้ผู้ดูแลหรือเกี่ยวข้องของแต่ละประเทศ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาสะพานต่อไป

คำสำคัญ: การเสื่อมสภาพ; การตรวจสอบสะพาน; การซ่อมบำรุงสะพาน



The Criteria for Bridge Structures Inspecting and Planning for Maintenance: A Case Study of Thailand and the Other Countries

Thawatchai Phanyakit*

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

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

Received: 12 December 2023; Revised: 13 March 2024; Accepted: 28 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: Bridges are critical and valuable components of any road and rail transportation network. Therefore, bridge remediation has always been a top priority for asset managers and engineers. However, long-term use of bridge structure leads to deterioration. Therefore, bridge inspection and bridge maintenance are needed to gain maximum efficiency of bridge serviceability and safety. Developed countries like Japan and USA have encountered more deteriorated bridges due to old age or long use. As a result, both countries have developed manuals for bridge inspection and maintenance. Thailand and Indonesia, as developing countries, are still developing their own manual to support transport system for national economic development purpose. This article presents the criteria for inspecting bridge structures and planning for maintenance compared between developed countries, such as USA and Japan and developing countries, such as Thailand and Indonesia. In addition, it also reports references for bridge inspection, preparation of persons involved in bridge inspection, and specification of bridge deterioration levels that persons involved in each country can apply them to bridge maintenance planning.

Keywords: Deterioration; Bridge inspection; Maintenance bridge



1. บทนำ

การเสื่อมสภาพของสินทรัพย์เชิงโครงสร้างเป็นปัญหาทั่วไปที่เกิดขึ้นทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องกับอายุของสะพานได้กลายเป็นปัญหาสำคัญที่วิศวกร ผู้จัดการสินทรัพย์ และสังคมทั่วโลกต้องเผชิญ [1] การเสื่อมสภาพส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการขนส่งสินค้า น้ำหนักเพลาที่มากเกินไป สถานการณ์แวดล้อม และอายุที่มากขึ้น [1-2] การเพิ่มขึ้นของอายุเป็นกลไกที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับโครงสร้างพื้นฐานโยธาทุกประเภท ดังนั้นควรดำเนินการตรวจสอบเป็นประจำเพื่อติดตามการเสื่อมสภาพซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของสะพานสั้นลงเพื่อรักษาประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานที่เหมาะสมที่สุดในระหว่างการให้บริการ นอกจากนี้กิจกรรมการตรวจสอบควรได้รับการพิจารณาเป็นกระบวนการตัดสินใจด้านกลยุทธ์ที่จำเป็นในการรักษาสะพานเนื่องจากมีข้อจำกัดด้านต้นทุน

ประเทศญี่ปุ่นได้มีการจัดสรรต้นทุนการบำรุงรักษาสะพานมากถึง 17 ล้านเหรียญสหรัฐ จากสะพานที่มีอยู่ 730,000 แห่งในประเทศ โดยประมาณร้อยละ 10 ของสะพานจะเสื่อมสภาพเนื่องจากอายุที่มากขึ้นในปี 2570 โดยสะพานส่วนใหญ่มีอายุ 50 ปีขึ้นไป [3]

เช่นเดียวกับสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันมีสะพานทั้งหมดกว่า 17,000 แห่งทั่วประเทศโดยประมาณร้อยละ 42 ของสะพานทั้งหมดจะถึงขีดสุดอายุการใช้งาน (อายุ 50 ปีขึ้นไป) ดังนั้นการเพิ่มนั้นถือว่ามีความเสี่ยงหรือมีข้อบกพร่องในโครงสร้าง ในระดับปานกลาง และขออนุมัติงบประมาณ 125 พันล้านเหรียญสหรัฐสำหรับการฟื้นฟูหรือปรับปรุงในปี 2014 [4-5] สะพานเก่าแก่ ดังนั้น ทั้งสองประเทศจึงได้พัฒนาเอกสารและคู่มือ

สำหรับการตรวจสอบสะพานและวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในด้านระบบการจัดการสะพาน

สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญรวมทั้งสะพานในช่วงปี 1980 [6] หน่วยงานที่รับผิดชอบคือกรมทางหลวง Department of Highway, DOH ซึ่งได้พัฒนาระบบการตรวจสอบทางหลวงแห่งเดนมาร์กในปี 1989 เพื่อสนับสนุนระบบการจัดการและบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Management and Maintenance System - BMMS) สำหรับสะพานทางหลวงคอนกรีตในประเทศไทย [8, 9] แต่ BMMS ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ในปัจจุบันได้ [8] อย่างไรก็ตาม ตามข้อมูลสำมะโนร้อยละ 12 (สะพาน 1,818 แห่ง) ของสะพานคอนกรีตที่มีอยู่ทั้งหมดในประเทศส่วนใหญ่จะมีอายุมากกว่า 50 ปีในปี 2024 ซึ่งต้องการการบำรุงรักษาในระดับที่สูง ดังนั้น ประเทศไทยจึงเตรียมแผนการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานโดยมีการจัดสรรงบประมาณสูงถึงกว่า 63 พันล้านเหรียญสหรัฐสำหรับสะพานเกือบ 15,000 แห่ง ตั้งแต่ปี 2013 ถึง 2020 [6]

ในขณะเดียวกัน รัฐบาลอินโดนีเซียได้จัดสรรงบประมาณ 42 พันล้านเหรียญสหรัฐตั้งแต่ปี 2013 ถึง 2018 ให้กับกระทรวงโยธาธิการและการเคหะ (Ministry of Public Works and Public Housing) ประเทศอินโดนีเซียเพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งงบประมาณในส่วนนี้ถูกจัดสรรไว้สำหรับงานสะพาน แหล่งน้ำ ทางหลวง ที่อยู่อาศัย และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด อินโดนีเซียมีแม่น้ำมากกว่า 330 สาย จนถึงปี 2019 มีการสร้างสะพานมากกว่า 18,000 แห่งทั่วประเทศ [7] แม้ว่าจะมีการสร้างสะพานจำนวนมาก



แต่มาตรฐานระบบการจัดการสะพานก็ยังไม่ดีขึ้น ซึ่งมาตรฐานล่าสุดอยู่ในช่วงปลายปี 1993 ระบบปัจจุบันกำหนดให้หน่วยงานตรวจสอบสะพานอยู่ภายใต้อำนาจของรัฐบาลแต่ละจังหวัดโดยไม่มีกฎเกณฑ์ที่เข้มงวดว่าจะต้องดำเนินการตรวจสอบบ่อยเพียงใด

สำหรับประเทศไทยและอินโดนีเซียนั้นถือว่าเป็นประเทศที่อยู่ในฐานะประเทศที่กำลังพัฒนาจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคิดวิธีและสร้างคู่มือในการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานให้มีความเหมาะสมที่สุดอย่างต่อเนื่องเท่าที่จะสามารถทำได้ในปัจจุบัน

ดังนั้นการปรับปรุงเอกสารการตรวจสอบสะพานจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการคิดค้นขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของแต่ละประเทศ จากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยเพื่อหาแนวทางปฏิบัติที่เป็นไปในปัจจุบันเกี่ยวกับการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานที่ใช้ใน 4 ประเทศได้แก่ ไทย อินโดนีเซีย ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา บทความนี้จะสรุปผลการศึกษานี้เกี่ยวกับการตรวจสอบ บุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบ และวิธีการประเมินสภาพสะพานเพื่อช่วยให้ผู้ดูแลโครงข่ายสะพานของประเทศที่กำลังพัฒนาสามารถนำแนวทางปฏิบัติที่นำมาใช้ในการพัฒนาหรือสร้างระบบการตรวจสอบและการบำรุงรักษาสะพาน

1.1 เอกสารอ้างอิงในการตรวจสอบสะพาน

การตรวจสอบสะพานคาดว่าจะเพิ่มขึ้นไปทั่วโลก ซึ่งได้รับม้อมกับปัญหาดังกล่าว ประเทศอินโดนีเซียดำเนินการตรวจสอบสภาพสะพานโดยใช้ระบบการจัดการสะพานระหว่างเมือง หรือ Interurban Bridge Management System (IBMS) ประเทศที่พัฒนาแล้วบางประเทศเช่นสหรัฐอเมริกา

และญี่ปุ่นได้พัฒนาและปรับปรุงคู่มือการตรวจสอบสะพานเพื่อวัตถุประสงค์ด้านระบบการตรวจสอบสะพาน ในขณะที่ประเทศไทยได้ตั้งระบบการจัดการและบำรุงรักษาสะพาน (BMMS) ซึ่งเป็นแนวทางในการตรวจสอบและซ่อมแซม การทบทวนขั้นตอนที่เหมาะสมและหนักแน่นซึ่งใช้ใน 4 ประเทศ (สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไทย และอินโดนีเซีย) สำหรับการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานแสดงดังตารางที่ 1 [8-12]

1.2 การที่เกี่ยวข้องของการตรวจสอบสะพาน

บุคลากรในการรับรองและมีประสบการณ์เป็นสิ่งที่สำคัญต่อกระบวนการตรวจสอบสะพาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องมีการฝึกอบรมการตรวจสอบให้แก่ผู้ตรวจสอบสะพานอย่างต่อเนื่อง ในตารางที่ 2 แสดงชื่อตำแหน่ง หน้าที่ และคุณสมบัติของเจ้าหน้าที่ที่ดำเนินการโครงการตรวจสอบสะพานในประเทศอินโดนีเซีย [12]

สำหรับหน่วยงานกรมทางหลวง (DOH) ภายใต้การกำกับของกระทรวงคมนาคม (Ministry of Transport, MOT) มีหน้าที่รับผิดชอบในการก่อสร้าง และการบำรุงรักษาโครงข่ายสะพานทั่วประเทศไทย ระบบการจัดการและบำรุงรักษาสะพาน (BMMS) [11] ได้กำหนดอำนาจหน้าที่ความรับผิดชอบสำหรับเจ้าหน้าที่เป็นเพียงแค่ผู้ตรวจสอบสะพานเท่านั้น ซึ่งผู้ตรวจสอบสะพานมีอำนาจในการวางแผนการตรวจสอบสะพาน เตรียมการสำหรับตรวจสอบ ดำเนินการตรวจสอบ จัดทำรายงานการตรวจสอบว่าควรจะมีการดำเนินการซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาหรือไม่ ในคู่มือการตรวจสอบสะพานนั้นจะต้องมีการรับรองโดยผู้ตรวจสอบสะพานที่มีความ



เชี่ยวชาญในการตรวจสอบ และสามารถวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมสะพานได้อย่างชัดเจน ในทำนองเดียวกันระบบการจัดการและบำรุงรักษาสะพาน (BMMS) ในประเทศญี่ปุ่นก็ไม่ได้มีคู่มือสำหรับการตรวจสอบสะพานตามระยะเวลา (Manual for Bridge Periodic Inspection MBPI) เช่นเดียวกันที่กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติ ผู้ช่วยช่างเทคนิคและผู้ช่วยผู้ตรวจสอบสะพานเหมือนกับประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ผู้ทำหน้าที่ตรวจสอบสะพานควรมีความเข้าใจเพียงพอในการตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบสะพานจะต้องมีคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานภาคสนามและความเข้าใจขั้นพื้นฐานในการออกแบบและสร้างสะพาน นอกจากการตรวจสอบสะพานแล้ว ผู้จัดการตรวจสอบสะพานจำเป็นต้องมีใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรม หรือเรียกว่า ใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรม (Professional Engineer License) ในการออกแบบ การก่อสร้าง และจัดการสะพาน [10] ในสหรัฐอเมริกา มีหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการพัฒนาและจัดการสะพานในภูมิภาค (Regional Development Bureau) กระทรวงที่ดิน โครงสร้างพื้นฐาน การขนส่ง และการท่องเที่ยว (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism) รวมไปถึงเทศบาล บริษัททางด่วน และองค์กรสาธารณชนอื่น ๆ จะตั้งคณะกรรมการผู้ตรวจสอบจัดการ ประเมิน และรายงานตรวจสอบและซ่อมแซมสะพานเป็นประจำอยู่ [3]

ทั้งนี้ การตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานในสหรัฐอเมริกาดำเนินการโดยเฉพาะสะพานที่เป็นของรัฐจะถูกดูแลโดยกรมการขนส่ง (Departments of Transportations, DOT) ของ แต่ละรัฐ [2] ในขณะที่เดียวกันองค์การบริหารทางหลวงของรัฐ หรือ

Federal Highway Administration (FHWA) มีหน้าที่รับผิดชอบด้านแผนการตรวจสอบสะพานแห่งชาติ รวมถึงการจัดสรรเงินทุนจากรัฐบาลผ่านทางหน่วยงานที่รวบรวมฐานข้อมูลสะพานแห่งชาติทั้งหมดของประเทศ (National Bridge Inventory, NBI) [13] ผู้ตรวจสอบสะพานแบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง ซึ่งผู้ตรวจสอบสะพานดังกล่าวจะต้องจัดทำแผนการตรวจสอบสะพานและมีประสบการณ์อย่างน้อย 10 ปีในด้าน การตรวจสอบสะพาน สำหรับตำแหน่งนี้จะต้องผ่านการฝึกอบรมการตรวจสอบสะพานและมีใบประกอบวิชาชีพและมีทั้งประสบการณ์ร่วมการตรวจสอบสะพานเป็นเวลา 2 ปี และมีใบประกอบวิชาชีพ ต้องมีประสบการณ์ร่วมการตรวจสอบสะพานเป็นเวลา 5 ปี) ผู้ประเมินน้ำหนักบรรทุกควรจะเป็นวิศวกรมืออาชีพและตำแหน่งคนขับยานพาหนะที่ใช้เพื่อตรวจสอบสะพานในส่วนที่อยู่ใต้จำเป็นต้องมีการฝึกอบรมการตรวจสอบอย่างเข้มงวด [2, 9]

สหรัฐอเมริกา มีเอกสารอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบสะพานที่ครอบคลุมและทันสมัยกว่าเมื่อเทียบกับอีกสามประเทศ เอกสารอ้างอิงของสหรัฐระบุตำแหน่งเจ้าหน้าที่สะพาน หน้าที่ และคุณสมบัติอย่างละเอียดและเจาะจงมากขึ้นหมายความว่าเอกสารที่ใช้อ้างอิงของสหรัฐอเมริกาเป็นผลมาจากเทคโนโลยีการพัฒนา วัสดุ เทคนิคการประเมิน และวิธีการก่อสร้างเพื่อจัดการกับความท้าทายในปัจจุบันของปัญหาสะพาน

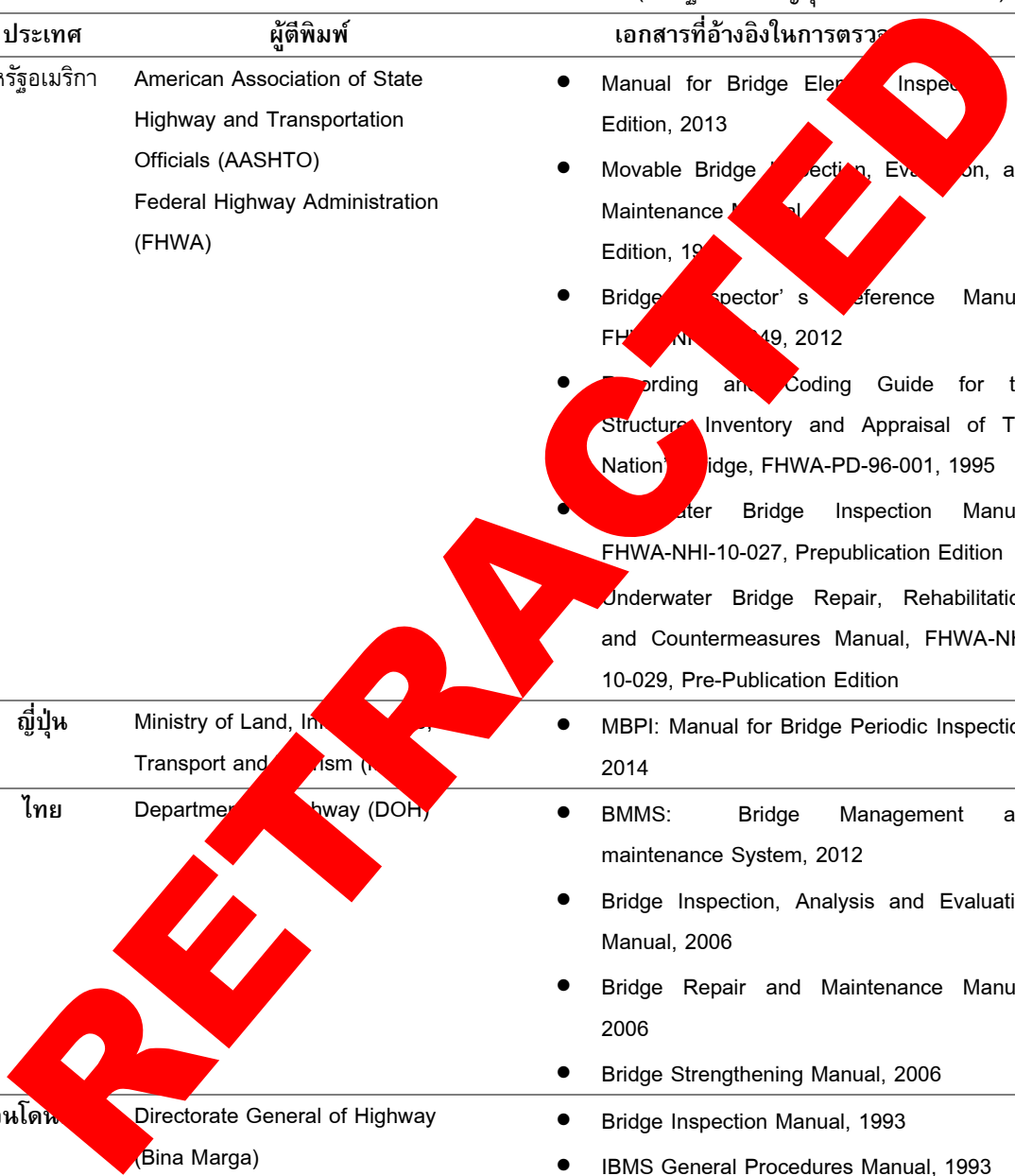
ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเอกสารอ้างอิงที่ในการตรวจสอบสะพานเพื่อสร้างมาตรฐานและลดความซับซ้อนของขั้นตอนที่บังคับใช้ในทุกพื้นที่ของประเทศ





ตารางที่ 1 ตัวอย่างขั้นตอนและเอกสารที่ใช้อ้างอิงใน 4 ประเทศ (สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไทย อินโดนีเซีย) [12]

ประเทศ	ผู้ตีพิมพ์	เอกสารที่อ้างอิงในการตรวจ
สหรัฐอเมริกา	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Federal Highway Administration (FHWA)	<ul style="list-style-type: none"> ● Manual for Bridge Element Inspection, 1st Edition, 2013 ● Movable Bridge Inspection, Evaluation, and Maintenance Manual, 1st Edition, 1993 ● Bridge Inspector's Reference Manual, FHWA-NHI-99-049, 2012 ● Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of The National Bridge, FHWA-PD-96-001, 1995 ● Underwater Bridge Inspection Manual, FHWA-NHI-10-027, Prepublication Edition ● Underwater Bridge Repair, Rehabilitation, and Countermeasures Manual, FHWA-NHI-10-029, Pre-Publication Edition
ญี่ปุ่น	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT)	<ul style="list-style-type: none"> ● MBPI: Manual for Bridge Periodic Inspection, 2014
ไทย	Department of Highway (DOH)	<ul style="list-style-type: none"> ● BMMS: Bridge Management and maintenance System, 2012 ● Bridge Inspection, Analysis and Evaluation Manual, 2006 ● Bridge Repair and Maintenance Manual, 2006 ● Bridge Strengthening Manual, 2006
อินโดนีเซีย	Directorate General of Highway (Bina Marga)	<ul style="list-style-type: none"> ● Bridge Inspection Manual, 1993 ● IBMS General Procedures Manual, 1993 ● Bridge Maintenance and Rehabilitation Manual, 1993 ● Bridge Design Code Vol. 1, 1992





ตารางที่ 2 บุคลากรที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงานตรวจสอบสะพานในประเทศไทยอินโดนีเซีย

ตำแหน่ง	หน้าที่	คุณสมบัติ
คณะอนุกรรมการออกแบบสะพานสำนักทางหลวง (The Sub-Directorate of Bridge Design of Directorate General of Highways, DGH)	<ul style="list-style-type: none"> จัดเตรียมแผนการตรวจสอบ วางกลยุทธ์การตรวจสอบ กำหนดแผนการฝึกอบรมให้แก่ผู้ตรวจสอบสะพาน ทดสอบคุณสมบัติและออกไปรับรองให้เป็นหน่วยที่สามารถตรวจสอบสะพานได้ 	- ไม่ระบุ
ผู้ตรวจสอบสะพานระดับจังหวัด (Provincial bridge inspectors)	<ul style="list-style-type: none"> เตรียมแผนงานในการตรวจสอบ กำหนดและดำเนินการมาตรฐานการตรวจสอบสะพานทั้งหมด นำข้อมูลรายการตรวจสอบสะพานเข้าสู่ระบบระบบการจัดการและบำรุงรักษาสะพาน (BMS) ติดต่อประสานงานกับ Bina Marg เพื่อจัดพื้นที่เพื่อการศึกษาตรวจสอบ จัดตั้งคู่มือเกี่ยวกับขั้นตอนการตรวจสอบ พิจารณาการพาหุตรวจสอบ BMS และ 	<ul style="list-style-type: none"> จบปริญญาตรีด้านวิศวกรรมโยธา มีประสบการณ์อย่างน้อย 5 ปีเกี่ยวกับงานด้านสะพาน
เจ้าหน้าที่ตรวจสอบ (Inspectors)	<ul style="list-style-type: none"> รับผิดชอบต่อความปลอดภัยของสาธารณะชน รับผิดชอบต่อความปลอดภัยของตนเองของผู้ตรวจสอบ 	- ไม่ระบุ

2. ประเภทของการตรวจสอบ

การตรวจสอบสะพานมีหลายประเภท แต่โดยทั่วไปการตรวจสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การตรวจสอบตามปกติ การตรวจสอบเชิงลึก และการตรวจสอบพิเศษ นอกจากนี้ ระยะเวลาการหยุดพักการตรวจสอบจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับผลการตรวจสอบครั้งก่อนหน้า [2] ในสหรัฐอเมริกามีการใช้ระดับการตรวจสอบสะพาน 7 ประเภทตาม AASHTO และ FHWA ซึ่งการ

ตรวจสอบเบื้องต้นจะทำได้ตามปกติเมื่อสะพานเพิ่งเปิดใช้ ในขณะที่เดียวกันการตรวจสอบตามปกติจะดำเนินการในเวลาน้อยกว่า 24 เดือน นอกจากนี้ การตรวจสอบภาวะวิกฤตการแตกหัก (Fracture-Critical inspection) จะดำเนินการภายในเวลาไม่ถึง 24 เดือน จากนั้น การตรวจสอบได้นำจะดำเนินการในเวลาน้อยกว่า 60 เดือน การตรวจสอบอื่น ๆ เช่น การตรวจสอบความเสียหายการตรวจสอบเชิงลึก และการตรวจสอบพิเศษจะดำเนินการตามช่วงเวลาต่าง ๆ [2, 7-9]



ข้อมูลการตรวจสอบทั่วไปจะทำการรวบรวมและรายงานต่อรัฐบาลกลางทุกปี

การตรวจสอบตามปกติเป็นประเภทการตรวจสอบสะพานประเภทเดียวที่กำหนดโดยประเทศญี่ปุ่นอย่างเป็นทางการ ซึ่งการตรวจสอบก่อนหน้านี้จะดำเนินการไม่เกิน 2 ปี หลังจากที่เปิดให้ประชาชนใช้งานภายใต้ระเบียบของคู่มือสำหรับการตรวจสอบสะพานตามระยะเวลา (Manual for Bridge Periodic Inspection MBPI) จากนั้น การตรวจสอบตามปกติจะดำเนินการทุก ๆ 5 ปีตามการตรวจสอบ MBPI โดยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตาอย่างใกล้ชิด ส่วนการตรวจสอบตามระยะเวลานั้นไม่ได้ระบุในเอกสารคู่มือสำหรับการตรวจสอบสะพานตามระยะเวลา (MBPI) อย่างไรก็ตาม กระบวนการที่ดิน โครงสร้างพื้นฐาน การขนส่ง การท่องเที่ยว และ หน่วยงาน (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MITI)) ได้ทำการตรวจสอบบางอย่างที่จำเป็นเป็นประจำเพื่อประเมินสภาพ (Degradation Category) และความรุนแรง (Harshness) [2] ประเทศญี่ปุ่นที่ไม่ได้ดำเนินการตรวจสอบทั่วไป การตรวจสอบขั้นต้นและการตรวจสอบในขณะที่เกิดความผิดปกติและการตรวจสอบเฉพาะ (เช่น ความเสียหาย การดัดแปลง ปฏิบัติการที่รวมตัวกับต่าง เป็นต้น) ประเทศญี่ปุ่นมีหน้าที่ในการจัดการจราจรที่คับคั่งทางหลวงโดยเริ่มตั้งแต่การตรวจสอบสะพาน การดำเนินการ ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการด้วยการบันทึก

ระบบการจัดการและบำรุงรักษาสะพาน (BMMS) ของประเทศไทยได้กำหนดการตรวจสอบสะพานออกเป็น 3 ประเภทตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

ของไทย (DOH) ดังนั้น ในประเทศไทยจึงมีการตรวจสอบเป็นประจำทุกปีโดยกำหนดให้ระดับสภาพของสะพานโดยรวม (Overall Condition Rating, OCR) น้อยกว่า 3 ($OCR < 3$) จะถูกตรวจสอบด้วย $OCR \geq 4$ การตรวจสอบดังกล่าวเน้นทุก 4 ปีโดยค่า $OCR \leq 3$ และจะตรวจสอบด้วย $OCR \geq 4$ ในขณะเดียวกัน การตรวจสอบจะดำเนินการตามช่วงเวลาตามข้อกำหนดเนื่องจากการตรวจสอบเพิ่มเติมหลังจากที่ความเสียหายของสะพาน [8]

การตรวจสอบโครงสร้างสะพาน 4 ประเภทในรูปแบบของผู้อำนวยความสะดวกทั่วไปของ Bina Marga (Directorate General of Bina Marga) ของอินโดนีเซียแสดงดังรูปที่ 1 การตรวจสอบวัสดุสามารถดำเนินการได้ตั้งแต่อันแรกจากนั้นจึงดำเนินการตรวจสอบโดยละเอียดในช่วงระยะเวลาสูงสุด 5 ปี โดยจะทำการตรวจสอบเป็นประจำทุกปี นอกจากนี้กำหนดการในการตรวจสอบพิเศษนั้นยังไม่มีมาตรฐานชัดเจน เนื่องจากการตรวจสอบประเภทนี้จะดำเนินการในกรณีพิเศษเท่านั้น เช่น เมื่อผู้ตรวจสอบประสบปัญหาการขาดบุคลากรที่มีการฝึกอบรม และมีประสบการณ์ [12] นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบทั่วไปด้วยสายตาของทั้ง 4 ประเทศ ซึ่งข้อดีคือจะช่วยให้ได้รับข้อมูลการตรวจสอบที่แม่นยำ ถูกต้อง และเป็นปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจสอบข้อมูลขึ้นอยู่กับวิจรรย์ญาณของผู้ตรวจสอบสะพาน ด้วยเหตุนี้ผลลัพธ์ของข้อมูลการตรวจสอบจึงบ่งบอกถึงวิธีการที่อาจจะแฝงด้วยอคติ ดังนั้น ทักษะและประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบสะพานจึงมีความสำคัญเนื่องจากความรับผิดชอบของผู้ตรวจสอบสะพาน



3. ระบบการจัดระดับสภาพของสะพาน

คุณภาพการจัดการสะพานขึ้นอยู่กับข้อมูลเกี่ยวกับสภาพของสะพาน ดังนั้น การจัดระดับสภาพของโครงสร้างสะพานจึงเป็นสิ่งสำคัญ ระบบการจัดระดับสภาพจะเป็นการประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานเพื่อคาดการณ์โอกาสการเสื่อมสภาพของสะพาน [2] ทำให้สามารถกำหนดแผนการเร่งด่วนในการบำรุงรักษาและการฟื้นฟูตามระยะเวลาได้อย่างเหมาะสม ระบบการจัดระดับสภาพของสะพานทั้ง 3 ประเทศ นั่นคือ สหรัฐอเมริกา ไทย และอินโดนีเซียสามารถจำแนกได้ตามลักษณะทางกายภาพของสภาพองค์ประกอบสะพานที่ปรากฏ เช่น โครงสร้างส่วนล่างของสะพาน (Substructure) โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) และพื้นสะพาน (Deck) การจัดระดับสภาพของสะพานในประเทศไทยจะประยุกต์ใช้การประเมินเชิงพรรณนาเกี่ยวกับชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน จากนั้นทำการแบ่งระดับสภาพของสะพานตามอยู่ในเชิงตัวเลขโดยมีตั้งแต่ระดับ 5 คือ อยู่สภาพดีมาก จนถึงระดับรุนแรง นั่นคือ ระดับ 0 ดังตารางที่ 3 [12] การแบ่งระดับสภาพของสะพานในประเทศไทยนั้นตรงกันข้ามกับระดับสภาพของอินโดนีเซียซึ่งเรียงจากระดับของสภาพสะพานจากตัวเลข 0 ถึง 5 ดังตารางที่ 4 ในการประเมินสภาพของสะพานประกอบแต่ละส่วนและการกำหนดระดับสภาพของสะพานไม่ว่าจะเป็นระดับ "ดีเยี่ยม" "พอใช้" หรือ "รุนแรง" ของแต่ละองค์ประกอบนั้น จะพิจารณาตามวิธีมาตรฐานและประสบการณ์ทางวิศวกรรมของวิศวกรตรวจสอบสะพาน [12]

การแบ่งระดับสภาพของสะพานในประเทศไทยนั้นตรงกันข้ามกับระดับสภาพของอินโดนีเซียซึ่งเรียงจากระดับของสภาพสะพาน จากตัวเลข 0 ถึง 5 ดังตารางที่ 4

วิธีการประเมินระดับสภาพของสะพานที่ใช้ในญี่ปุ่นนั้นเกี่ยวข้องกับการปฏิบัติจริง (การดำเนินการติดตามผล) การตีความข้อมูลการตรวจสอบสะพานที่ขึ้นอยู่กับในการจัดระดับความเร่งด่วนในการซ่อมแซมสะพานตามจำเป็นในแต่ละระดับดังต่อไปนี้ [5]

ตารางที่ 3 การจัดระดับสภาพของสะพานในประเทศไทย [12]

ระดับ	คำอธิบาย
5	ดีเยี่ยม ไม่มีข้อบกพร่องหรือโครงสร้างใหม่
4	สภาพดี มีการพิจารณาถึงการบำรุงรักษา การซ่อมแซม และการบำรุงรักษาตามกำหนดเวลาอย่างสม่ำเสมอ
3	พอใช้ โครงสร้างอยู่ในสภาพพอใช้ และต้องได้รับการพิจารณาซ่อมแซมและบำรุงรักษาตามกำหนดเวลา
2	ปกติ สภาพชำรุดซึ่งต้องได้รับการซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาเป็นพิเศษ
1	รุนแรง ข้อบกพร่องที่รุนแรงของโครงสร้างสะพานต้องได้รับการซ่อมแซมหรือบูรณะอย่างเร่งด่วนเพื่อให้กลับคืนสู่สภาพเดิม
0	เสื่อมสภาพ โครงสร้างสะพานได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงจนต้องดำเนินการรื้อถอนและสร้างใหม่



รูปที่ 1 ขั้นตอนการตรวจสอบสะพานในอินโดนีเซีย [12]



บทความวิชาการ

ตารางที่ 4 การจัดระดับสภาพของสะพานในประเทศไทยอินโดนีเซีย [12]

ระดับ	คำอธิบาย
0	ไม่มีข้อบกพร่องหรือโครงสร้างใหม่
1	มีข้อบกพร่องเล็กน้อยมาก แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อด้านความปลอดภัยและการให้บริการของสะพาน
2	มีข้อบกพร่องที่ต้องตรวจสอบหรือบำรุงรักษาในอนาคต
3	มีข้อบกพร่องที่ต้องตรวจสอบหรือบำรุงรักษาทันทีเพราะอาจส่งผลร้ายแรงภายใน 12 เดือน
4	มีสภาพวิกฤตและข้อบกพร่องร้ายแรงที่ต้องดำเนินการทันที
5	วัสดุเกิดความเสียหายหรือไม่สามารถใช้งานได้ อีกต่อไป

ตารางที่ 5 ระดับการประเมินระดับความเสียหายในการซ่อมบำรุงรักษาสะพานในประเทศไทย [10]

ระดับ	คำอธิบาย
A	ไม่จำเป็นต้องซ่อมแซม
B	ไม่จำเป็นต้องซ่อมแซมเร่งด่วน
C1	จำเป็นต้องซ่อมแซมทันทีสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
C2	จำเป็นต้องซ่อมแซมโดยด่วนเพื่อความเสียหายของโครงสร้างสะพาน
E1	จำเป็นต้องตอบสนองฉุกเฉิน เพื่อความเสียหายของโครงสร้างสะพาน
E2	จำเป็นต้องมีการตอบสนองฉุกเฉินเพิ่มเติม
M	จำเป็นต้องจัดการกับปัญหาด้านการบำรุงรักษา
S1	ต้องการการตรวจสอบอย่างละเอียด
S2	ต้องการการติดตามผลการซ่อมแซม

ซึ่งการตรวจสอบดำเนินการโดยวิศวกรที่มีประสบการณ์ [10] อย่างไรก็ตาม การติดตามผลนี้อาจทำให้ได้ข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการเสื่อมสภาพของสะพานในอนาคต ประสิทธิภาพและความเร็วในการบำรุงรักษาไม่ได้เป็นไปตามมาตรฐานตัวเลข เช่น ความถี่และระยะเวลาของรอยแตก ผลการประเมินระดับความเสียหายที่ซ่อมบำรุงรักษาจะจัดกลุ่มเป็นระดับความสมบูรณ์ดังตารางที่ 6 [2, 10] ความหมายของระดับคือการประเมินโครงสร้างสะพานที่สร้างขึ้น [10]

ระบบการวัดระดับความสมบูรณ์และระบบการจัดการความเสียหายในการซ่อมบำรุงรักษาควรดำเนินการแยกกัน อย่างไรก็ตาม โดยปกติจะดำเนินการตามขั้นตอนโดยที่ ระดับ "I" เท่ากับระดับ A และ B, ระดับ "II" มีค่าเท่ากับระดับ C1 และ M, เกรด "III" เท่ากับระดับ C2, และระดับ "IV" เทียบเท่ากับ E1 และ E2 หากการพิจารณาในระดับ I ถึง IV ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเหมาะสมและขาดการตรวจสอบอย่างละเอียด จะต้องจัดทำบันทึกผลกระทบดังกล่าวและดำเนินการตรวจสอบโดยละเอียดอย่างเร่งด่วนเพื่อให้ได้ผลที่จะต้องนำไปใช้สำหรับการพิจารณาตัดสินใจสำหรับระดับ I ถึง IV [10] การกำหนดระดับสภาพของสะพานในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีการเดียวกันกับประเทศไทยและอินโดนีเซียแต่มีทางเลือกในการจำแนกประเภทมากกว่า ดังตารางที่ 7 ผู้มีอำนาจตัดสินใจสามารถนำประเภทการจัดระดับสภาพเหล่านี้ไปใช้ในการจัดการและกำหนดเวลาการซ่อมแซม/การฟื้นฟูสภาพสะพานที่เสื่อมโทรม [2] การเปรียบเทียบระบบการจัดระดับสภาพระหว่างสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไทย และอินโดนีเซียแสดงดังตารางที่ 7 [2, 8 – 10, 12]



ตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการประเมินระดับในการตรวจสอบโครงสร้างสะพานระดับชาติ หรือ National Bridge Inspection (NBI) ของสหรัฐอเมริกา มีความละเอียดและเจาะจงมากกว่าระบบของอีกสามประเทศที่เหลือ แม้ว่าประเมินระดับจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่คำอธิบายและคำนิยามที่กำหนดสำหรับแต่ละระดับนั้นต่างกัน ซึ่งระบบการประเมินระดับที่มีความละเอียดสูงจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการประเมินสภาพของสะพาน ดังนั้น ระบบการประเมินระดับของสหรัฐอเมริกาจึงเป็นข้อมูลอ้างอิงที่ดีที่ประเทศอื่น ๆ สามารถนำไปใช้เพื่อการเปรียบเทียบ [2] ด้วยเหตุนี้การได้มาซึ่งข้อมูลอาจไม่สมบูรณ์สำหรับเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจเกี่ยวกับลำดับความสำคัญในการจัดการสะพาน ระบบการประเมินระดับสภาพของสะพานในสหรัฐอเมริกา ไทย และอินโดนีเซียเป็นประโยชน์ในประเทศที่ต้องการที่จะคาดการณ์สถานการณ์การเสื่อมสภาพของสะพานได้อย่างไรก็ตาม ระบบการประเมินระดับสภาพที่ใช้ในประเทศอื่น ๆ นั้นเหมาะสมสำหรับประเทศที่ต้องการข้อมูลเบื้องต้นของการตัดสินใจ เนื่องจากต้องดำเนินการดำเนินการซ่อม

ตารางที่ 6 ระบบการประเมินระดับความสมบูรณ์ในประเทศญี่ปุ่น [12]

เกรด	สภาพ	คำอธิบาย
I	ดี	การให้บริการของสะพานไม่
II	การบำรุงรักษา	การบำรุงรักษาแต่ยังคงมีการจัดการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
III	การซ่อมแซม	การให้บริการของสะพานอาจมีบกพร่อง และควรมีการประเมินตั้งแต่เนิ่นๆ
IV	การตอบสนองฉุกเฉิน	การให้บริการของสะพานมีบกพร่องหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นอย่างมาก และควรมีการประเมินอย่างเร่งด่วน

บำรุงทันทีเมื่อมีความจำเป็น โดยไม่มีข้อมูลในการทำนายการเสื่อมสภาพของสะพาน

ตารางที่ 7 ระบบการประเมินระดับสภาพของสะพาน ทั้ง 4 ประเทศ (อเมริกา ญี่ปุ่น ไทย และอินโดนีเซีย) [12]

การกำหนดสภาพสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างสะพาน ((National Bridge Inspection, NBI)	อเมริกา	ญี่ปุ่น	ไทย	อินโดนีเซีย
	ระดับ NBI	ความสมบูรณ์	ระดับ BMMS	ระดับ BIM
สะพานที่พบข้อบกพร่อง	9	I	5	0
พบข้อบกพร่องเล็กน้อยบางอย่าง	8		4	
พบการเสื่อมสภาพเล็กน้อยในองค์ประกอบโครงสร้าง	7	II		1
	6		3	2



ตารางที่ 7 (ต่อ)

การกำหนดระดับสภาพสำหรับการตรวจสอบ โครงสร้างสะพานระดับชาติ ((National Bridge Inspection, NBI)	อเมริกา	ญี่ปุ่น	ไทย	อินโดนีเซีย
	ระดับ NBI	ความ สมบูรณ์	BMMs	BIM
องค์ประกอบโครงสร้างพื้นฐานทั้งหมดแข็งแรง แต่อาจมี บางส่วนที่สูญหาย เสื่อมสภาพ หลุดร่อน หรือลอก	5			
การสูญเสียหน้าตัด การเสื่อมสภาพ การหลุดร่อน การหลุด ร่อนของคอนกรีตมีเพิ่มขึ้น	4			3
การสูญเสียหน้าตัด เป็นต้น ก่อให้เกิดความเสียหายต่อ โครงสร้างพื้นฐาน	3	III,		
มีการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบโครงสร้างพื้นฐาน เพิ่มขึ้น				
การเสื่อมสภาพขนาดใหญ่หรือการสูญเสียหน้าตัด ชั้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญ หรือเปลี่ยนแปลงแนวตั้ง แนวนอนที่ชัดเจนที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้าง	1		1	4
สภาพย่อย นอกเหนือไปจากแผนการแก้ไข	0		0	5

4. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลที่สำคัญในการตรวจสอบและประเมินสภาพโครงสร้างสะพานในประเทศอินโดนีเซีย ไทย ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา โดยสังเขป ข้อเสนอแนะที่ได้คือการดำเนินการตรวจสอบสะพานและกลยุทธ์การบำรุงรักษาที่ใช้ใน 4 ประเทศ ดังที่กล่าวมาข้างต้นแตกต่างกัน แต่ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินสภาพมีความคล้ายคลึงกัน แต่ความแตกต่างที่สำคัญคือการสื่อสารที่ใช้อ้างอิงสำหรับการตรวจสอบสะพาน และแผนงานด้านบุคลากรที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการตรวจสอบสะพาน และระบบการจัดระดับของสภาพ ที่สามารถการใช้งานของสะพานได้อย่างปลอดภัยซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้สามารถนำมาใช้เป็น

ประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องในประเทศกำลังพัฒนาสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบโครงข่ายสะพานและวางกลยุทธ์การบำรุงรักษาได้โดยพบว่าการตรวจสอบโครงสร้างสะพานและกลยุทธ์การบำรุงรักษาของประเทศสหรัฐอเมริกามีความครอบคลุมและสอดคล้องกันมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการตรวจสอบด้วยการชำรุดหรือเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานด้วยสายตา นั้นขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ที่ตรวจสอบสะพาน ด้วยเหตุผลนี้ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบอาจอาจเป็นวิธีการที่แฝงไปด้วยอคติ ดังนั้นผู้ตรวจสอบสะพานที่มีทักษะและมีประสบการณ์ในการตรวจสอบสะพานจึงมีความสำคัญต่อการตัดสินใจที่จะกำหนดวิธีซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงโครงสร้างสะพานด้วยวิธีการใด



วัตถุประสงค์ของบทความนี้เป็นการเปรียบเทียบปัญหาในการซ่อมบำรุงรักษาสะพานเฉพาะส่วนที่เป็นจุดสำคัญที่เกิดขึ้นกับสะพานที่มีอยู่ในประเทศไทยหรืออินโดนีเซียกับประเทศที่พัฒนาแล้วอย่างสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นในด้านคุณภาพและการใช้งานตลอดจนแนวปฏิบัติด้านการจัดการการบำรุงรักษา เพื่อนำข้อมูลของปัญหาเหล่านี้ไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบการจัดการการบำรุงรักษาสะพานใหม่ รวมถึงการสร้างฐานข้อมูลทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แก้ไขปัญหาการซ่อมบำรุงรักษาเหล่านี้ หรืออย่างน้อยก็ช่วยลดผลกระทบในทางลบลงได้ หวังว่าระบบการตรวจสอบและกลยุทธ์ในการวางแผนเพื่อการซ่อมบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานจากที่ได้นำเสนอไว้ในบทความนี้จะ เป็นประโยชน์ในการบำรุงรักษาและการจัดการสะพานที่มีอยู่ไม่เพียงแค่นในประเทศไทยหรืออินโดนีเซียเท่านั้น แต่ยังรวมถึงในประเทศกำลังพัฒนาอื่น ๆ ต่อไปนี้ด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.C. Scutaru, C.C. Coman, G. Bocu and N. Taranu, 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS), Proceedings, 2018, 231-238.
- [2] Y. Jeong, W. Wang, M. Lee and J. Lee, Bridge inspection practices and bridge management programs in China, Japan, Korea and US, Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2018, 3(2), 126-135.
- [3] https://www.mlit.go.jp/road/road_e/s3_maintenance.html. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (Accessed on 10 June 2024)
- [4] <https://infrastructure.report/career/wp-content/uploads/2023/02/> (Accessed on 15 June 2024)
- [5] A.B. Sørensen and B. Min, Bridge management: Inspection, Maintenance, Assessment and Repair, London, UK, 1990. pp. 28-30.
- [6] S.S. Wadhwa and K.N. Jha, Determination of bridge health index using analytical hierarchy process, Construction Management and Economics, 2012, 30(2), 133-149.
- [7] <https://www.google.com/search?q=%5B7%5D%09Indonesia>. (Accessed on 25 April 2023)
- [8] Thailand Department of Highway 10-30, Bridge Management and Maintenance System, Bangkok, Thailand, 2012. (in Thai)
- [9] <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbis.cfm>. (Accessed on 10 October 2023)
- [10] https://www.mlit.go.jp/road/road_e/pdf/RoadMaintenance.pdf. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (Accessed on 16 June 2023)



[11] https://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12145983_01.pdf (Accessed on 2 December 2023)

[12] S.D Puspitasari, S Harahap and I.R. Suyanto, Bridge inspection implementations and maintenance planning - A comparative analysis of low productive countries, AIP Conference Proceedings, 2023, 2482, 040007

RETRACTED



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบปกปิดข้อมูล (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) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 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 เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ 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

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังกล่าวการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech/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/jointtech/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 ๒๐ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๗

บทความ (Articles)

- Inventory Management to Reduce Product Administration Costs and Design Improvement of Packaging to Reduce Shipping Cost: A Case Study of AAA Company Limited, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 1-15.
- Design and Construction of Compost Production System Controlled by the Internet of Things, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 16-31.
- Optimal Power Allocation in NOMA System Based on Artificial Intelligence Methods, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 32-45.
- Physical Properties, Compressive Strength and Microstructure of Interlocking Concrete Paving Block Containing Bamboo Ash, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 46-61.
- Production Planning and Machine Maintenance Schedule of Dragon Green Energy Company, Limited, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 62-80.
- Energy Performance Indicator of the Chiller Water System in the Government Lottery Office, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 81-94.
- Development of Mathematical Model for Reverse Logistics Management: A Case Study of Plastic Recycling, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 95-111.
- Influence of Meteorological factors and Distribution of Particulate Matter at Underground Parking, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 112-129.
- Polypropylene Biodegradation by *Fictibacillus phosphorivorans* Isolated from Freshwater Sediment, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 130-140.
- Improvement of the Water Purifier Assembly Process to Reduce Process Time and Ergonomic Risk, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 141-156.
- Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened with Carbon Fiber under Static Loading, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 157-170.
- Reducing Harmful Effects on Human Health of Car Vibrations using a Combination of Unsupervised and Supervised Machine Learning Algorithm, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 171-185.
- Design and development of the Pallet Shot Machine, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 186-200.
- The Performance of Carbon Fiber in Decreasing the Strain Level of the PC-Longitudinal Bridge (PC-Plank Girder) under Service Load, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 201-215.
- RETRACTED: The Criteria for Bridge Structures Inspecting and Planning for Maintenance: A Case Study of Thailand and the Other Countries, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 216-230.