

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

ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๗

VOLUME 20 | ISSUE 3 | 2024 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๓ 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 Chindapasirt	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 ของภาคการศึกษาและ อุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและ กระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรม คอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้อง ของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดย กองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิใน สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ ผู้นิพนธ์ (Author) และ ผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) และไม่ได้สังกัด หน่วยงานเดียวกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นต้นสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบ ออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่ นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการ และคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีกำหนดการออกปีละ 3 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 จะ จัดพิมพ์ระหว่างเดือนกันยายน – ธันวาคม ของทุกปี

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ 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 3 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) ทั้งนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัล (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) และฐานข้อมูล Google Scholar ซึ่งทำให้การสืบค้นและการอ้างอิงข้อมูลบทความด้วยระบบออนไลน์นั้นถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

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

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชา ข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

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

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
ผลของการเพิ่มกระแสไฟเชื่อมพอกผิวแข็งแบบอาร์กด้วยลวดเชื่อม E3-UM-600 ต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีสำหรับอุปกรณ์เตรียมดินในงานเกษตร (Effect of Increasing Arc Welding Current with E3-UM-600 on Abrasive Wear Behavior of Agricultural Soil Preparation Equipment) <i>Nirun Promkesa</i>	1-14
การศึกษาสภาวะอากาศและผลกระทบต่อด้านพลังงานในระบบปรับอากาศจากการระบายอากาศในห้องผู้ป่วยติดเชื้อโควิด-19 (Study of Air Conditions and Energy Impact in Air Conditioning Systems from Ventilation in COVID-19 Patient Wards) <i>Pawinee Suksuntornsiri, Teerapat Teadrit, Wasan Theansuwan</i>	15-33
ลักษณะเฉพาะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของสารทำความเย็น R134a ขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดง (Heat Transfer and Flow Characteristics of Refrigerant R134a during Boiling Inside a Plate Heat Exchanger with a Copper Foam Insert) <i>Tanachon Chomamuang, Phanurut Roek-orot, Kitti Nilpueng</i>	34-45
การออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย (Design and Development of Cotton Seed Sorting Machine) <i>Kwanchai Saeweenan</i>	46-61
การพัฒนาอิฐมอดูดูดซับโดยการใช้ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย (Development of Absorbing Brick using Macadamia Shell Charcoal Powder) <i>Boonsin Nadondu, Thongchai Khrueaphue, Sermsak Thipwong, Parinyawatr Dhinnabuttra, Saksit Chuenchomnakjad</i>	62-73



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การออกแบบบอร์ดแปลงสัญญาณระหว่าง CAN bus และ Modbus สำหรับรถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Designing a Signal Conversion Circuit Board between CAN bus and Modbus for Automated People Mover) <i>Kokiat Aodsup, Surachai Wongfookeat</i>	74-90
การประเมินเทคโนโลยีและต้นทุนระหว่างเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิมและแบบเพิ่มขึ้นด้วยเทคโนโลยีฉีดเส้นวัสดุ (Techno-Economic Assessment between Traditional and Fused Deposition Modeling- based Additive Manufacturing Technology) <i>Chanipa Nivasanon, Pornthep Anussornnitisarn, Kasin Ransikarbum</i>	91-106
การพัฒนาและศึกษาสมรรถนะรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ (Development and Performance Study of Electric Wheelchair for the Elderly) <i>Worapong Boonchouytan, Nutjired Kheowsakul, Supawadee Makon, Chatree Homkhiew</i>	107-121
กระแสมภายในเตาอบไม้ยางพาราและรูปแบบการจัดวางกองไม้กรณีศึกษา ไม้ยางพาราแปรรูปสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์ (Airflow and Wood stack Configuration in Rubber Wood Kiln Drying A Case Study of Processed Rubber Wood for Furniture) <i>Girachat Chajjareon, Kamonchanok Kongroiyu, Wongsatorn Srisamrit</i>	122-137
ผลของการกรองสารละลายตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ส่งผลต่อการกำจัดและการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน (Effects of Filtration for Lead Solutions and Effluent Organic Matter (EfOM) from Wastewater Treatment Systems for Affecting Rejection and Fouling with Nanofiltration (NF) Membrane) <i>Apinya Onsarn, Supatpong Mattaraj, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Tiammanee Rattanaweerapan, Sompop Sanongraj</i>	138-154
การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งและการขึ้นรูปแบบสลับทงที่มีต่อการบางลงของถ้วยก้นโค้ง (Study on Influences of Curved Ratio and Reverse Drawing Technique on Thinning of Curved Bottom Cup) <i>Varunee Premanond, Pongnatee Thanomkulbud, Jiraporn Sripraserd</i>	155-170



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การเปรียบเทียบระหว่างผลกระทบของภาพสีและสีขาวดำด้วยการเรียนรู้เชิงลึก: กรณีศึกษาการตรวจจับก้อนน้ำที่มีข้อบกพร่องในสายการผลิต (Comparison Between Impacts of Color and Gray Images by Deep Learning: A Case Study of Defective Water Tap Detection in Production Line) <i>Annop Piyasinchart, Phisit Pornpongtechavanich, Paradorn Boonpoor, Pakkasit Sriamorntrakul, Therdpong Daengsi</i>	171-185
อีวิริสติกสองเฟสสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งของรถบรรทุกสินค้าที่มีข้อจำกัดความจุ (Two-Phase Heuristic Approach for Solving Capacitated Vehicle Routing Problem) <i>Kanokporn Boonjubut, Jirawat Lopandung, Prat Boonsam</i>	186-199
อิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนที่มีต่อกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัด (Effect of Glass Fiber and Municipal Solid Waste Incineration on Bending Stress of Compacted Cement Sand) <i>Chalermpon Wungsumpow, Sakol Pochalard, Pimnapat Kammawong, Sunantha Simachan, Araya Boonmee, Keeratikan Piriyakul</i>	200-218
การออกแบบและสร้างต้นแบบของอนุกรมสแต็กโมดูลของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายสูงสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวงจรส่วนหน้าของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (A Design and Implement Series Stack Modules of DC-DC High Step-Up Converter for Front-End of Photovoltaic Cells Application) <i>Tanee Yusomboon, Passakorn Udomsup, Hata Sawachan, Koson Chaicharoenaudomrung, Anusak Bilsalam</i>	219-235
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2



ผลของการเพิ่มกระแสไฟเชื่อมพอกผิวแข็งแบบอาร์กด้วยลวดเชื่อม E3-UM-600 ต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีสำหรับอุปกรณ์เตรียมดินในงานเกษตร

นรินทร์ พรหมเกษ*

สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตร, คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: nirun.p@rmutsb.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 ธันวาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 22 สิงหาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 5 กันยายน 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเพิ่มกระแสไฟเชื่อมในกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E3-UM-600 ที่ส่งผลต่อสมบัติทางโลหวิทยา และสมบัติทางกล สำหรับงานเชื่อมพอกผิวหน้าอุปกรณ์เตรียมดินงานเกษตร เพื่อหาสภาวะของกระแสไฟในการเชื่อมที่เหมาะสม โดยทำการเชื่อมพอกแข็งลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI1050 แบบซ้อนทับแนวจำนวน 3 ชั้น กำหนดกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม 90-130 แอมแปร์ ผลการศึกษาพบว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบข้อบกพร่องในบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณพื้นที่กระแทกร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็ง การเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่ต่ำทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อมมีค่าสูงซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น ค่าความกว้างและการซึมลึกของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยกระแสไฟเชื่อมที่ 90 แอมแปร์ ให้ค่าความนูนสูงสุดของแนวเชื่อมเฉลี่ย 4.3 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ การเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมสูงทำให้ความร้อนเข้าสู่ชั้นงานสูง เกิดการเจือจางสูงทำให้ค่าความแข็งต่ำ การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อมพบธาตุโครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) และซิลิคอน (Si) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุส่งผลให้ค่าความแข็งแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น อัตราการสึกหรอลดลง โดยงานวิจัยนี้สภาวะการเชื่อมพอกแข็งที่ดีที่สุดคือ กระแสไฟเชื่อมที่ 90 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแนวเชื่อมสูงสุดเฉลี่ย 634HV และค่าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ยที่ 0.268 %

คำสำคัญ: กระแสไฟเชื่อม; การเชื่อมพอกแข็ง; การสึกหรอ; อุปกรณ์เตรียมดิน

Effect of Increasing Arc Welding Current with E3-UM-600 on Abrasive Wear Behavior of Agricultural Soil Preparation Equipment

Nirun Promkesa *

Department of Farm Machinery Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvamabhumi

* Corresponding author, E-mail: nirun.p@rmutsb.ac.th

Received: 7 December 2023; Revised: 22 August 2024; Accepted: 5 September 2024

Online Published: 18 December 2024

Abstract: This research studies the effect of increase welding current in hard-faced welding process arc type with flux-covered welding wire E3-UM-600 that affect the metallurgical and mechanical properties welding hardfacing surface for agricultural soil preparation equipment to find appropriate welding current conditions. The AISI1050 medium carbon steel was welded simulating a 3 layer overlapping weld with a welding current of 90-130 A. The results of the study found that the weld line was complete with no defects in base metal area heat-affected zone and the hardened weld Welding with low welding current resulted in high values of the weld line convexity. When the welding current was increased, the width and penetration depth of the weld line increased. The welding current of 90A gives an average maximum weld convexity of 4.3 millimeters. Microstructure of the weld metal consists of martensite and austenite. Welding with high welding current causes high heat to enter the workpiece high dilution causing low hardness. Analysis of the chemical composition of the weld metal found the elements chromium (Cr), manganese (Mn), molybdenum (Mo) and silicon (Si). The increase in the amount of trace elements this results in an increase in the weld hardness value decreased wear rate. The best condition in this research is welding current of 90A has the highest average weld hardness of 634 HV and the lowest average wear percentage is 0.268 %.

Keywords: Welding current; Hardfacing; Wear; Soil preparation equipment



1. บทนำ

อุปกรณ์เตรียมดินใช้สำหรับเตรียมความลึกของชั้นหน้าดินสำหรับการเตรียมแปลงปลูก เช่น การปลูกอ้อย ซึ่งในบางพื้นที่มักพบชั้นดินดานที่มีความแข็ง ซึ่งจะต้องใช้รีปเปอร์ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 1 มีลักษณะเหมือนคราดติดท้ายรถแทรกเตอร์ เพื่อไถระเบิดดินดานที่ระดับความลึก 30-75 เซนติเมตร เพื่อให้ดินร่วนซุยก่อนทำการปลูกพืช เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ทำให้ผิวหน้าของรีปเปอร์เกิดการสึกหรอ (Wear) กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing-welding) ใช้ในงานเพิ่มความแข็งแรงบริเวณผิวของวัสดุเพื่อป้องกันการสึกหรอหรือการกัดกร่อน โดยการเพิ่มโลหะผสมลงบนพื้นผิวของวัสดุเดิม [1-4] เช่น เชื่อมซ่อมในเครื่องจักรกลเกษตร เครื่องจักรสำหรับการเตรียมดิน หรือ เครื่องจักรในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ [5] การเชื่อมพอกแข็งสามารถทำได้หลายวิธีทั้งนี้การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเชื่อม เช่น ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม ปริมาณความร้อนเข้า (Heat Input) หรือชนิดของลวดเชื่อม [6] ซึ่งการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา เช่น การศึกษาเปรียบเทียบกระแสไฟเชื่อม AC และกระแสไฟเชื่อม DCEP พบว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC ให้อัตราการเจือจางของโลหะเชื่อมต่ำกว่ากระแส DCEP ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค และความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อม [7] หรือ การเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์บนแผ่นเหล็กกล้าโดยทำการเชื่อมเดินแนวทับซ้อนเป็นชั้น ผลการทดลองพบว่า ตำแหน่งที่มีปริมาณของคาร์บอนไนโตรเจนสูง แสดงค่าอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำกว่า [8]



รูปที่ 1 รีปเปอร์ระเบิดดินดาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มกระแสไฟเชื่อมพอกผิวแข็งแบบอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E3-UM-600 โดยทำการเชื่อมบนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI1050 จำนวนชั้นเชื่อม 3 ชั้น ซึ่งเป็นการเติมเนื้อโลหะเชื่อมให้ใกล้เคียงกับขนาดของรีปเปอร์ และทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค การเจือจางของเนื้อเชื่อม และสมบัติทางกล เพื่อเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเชื่อมพอกผิวแข็งบริเวณผิวหน้าที่เกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนอุปกรณ์เตรียมดินในงานเกษตรต่อไป

2. ขั้นตอนการศึกษา

2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อม

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด AISI1050 เป็นโลหะฐานสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ความหนา 19 มิลลิเมตร ทำการเจียระไนผิวดิบของชิ้นงานออกก่อนทำการเชื่อม โดยใช้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม

Chemical composition of Base Material and Filler Metal (%)		
Elements	AISI1050	DIN8555 E 3-UM-600
C	0.54	0.40
Si	0.26	0.37
Mn	0.68	1.15
p	0.03	0.01
S	0.01	0.008
Cr	0.29	4.65
Mo	0.02	0.53
Fe	Bal.	Bal.

ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งประเภทไฮโดรเจนต่ำ ตามมาตรฐาน DIN8555 E3-UM-600 ซึ่งเป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ซึ่งใช้กับงานเชื่อมพอกแข็งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตร มีค่าความแข็ง 624 HV ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) จำนวน 1 แนวเชื่อม โดยเชื่อมแบบซ้อนทับแนวจำนวน 3 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ในการเชื่อมแสดงในตารางที่ 2 เชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1050 แบบไม่สายลวด (Non-waving) โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานสาขาช่างเชื่อมอาร์กโลหะ ด้วยมือ ระดับ 1 ใช้เครื่องเชื่อมยี่ห้อ Fronius

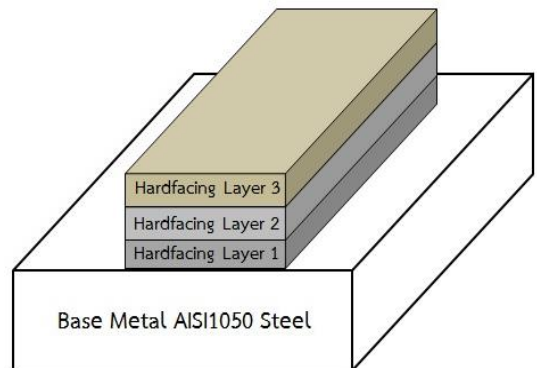
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง

กระแสไฟเชื่อม (Amps)	แรงดันอาร์ก (Volt)	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ขั้วไฟเชื่อม
90-130	88	250	DCEP

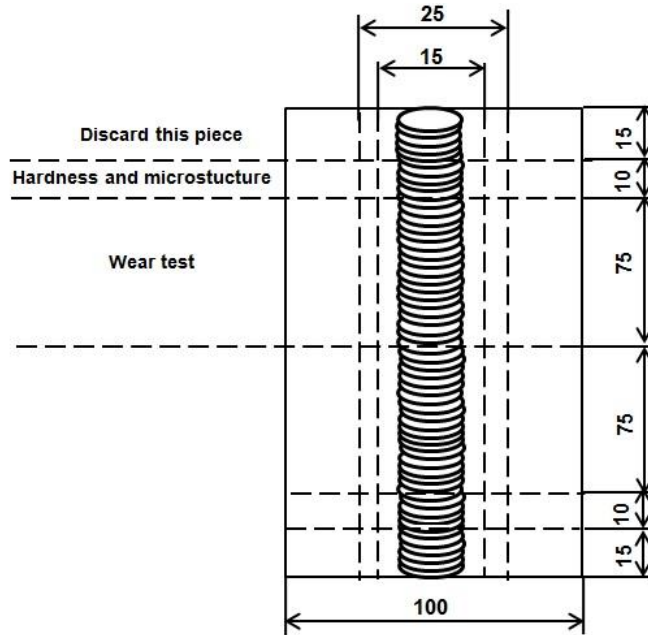
รุ่น Transpocket 2500 ก่อนทำการเชื่อมมีการให้ความร้อนบนชิ้นงาน (Preheat) ที่อุณหภูมิ 150°C (ตามคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อม) และทำการควบคุมอุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อมไม่ต่ำกว่า 150°C ในการเชื่อมชั้นถัดไป

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยนำชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งไปตัดตามขวาง (Cross-section) ดังแสดงในรูปที่ 3



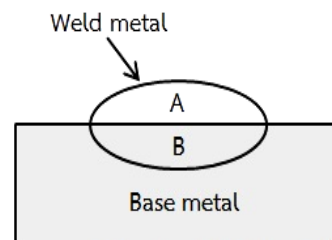
รูปที่ 2 ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง



รูปที่ 3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแนวเชื่อมพอกแข็ง

จากนั้นทำการขึ้นเรือน (Mounting) โดยหล่อด้วยเรซินและนำมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 ถึงเบอร์ 2000 ขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 5 μm และล้างด้วยน้ำสะอาดเป่าให้แห้ง ทำการกัดกรด (Etching) ด้วยกรดไนตริก 60 ml ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก (HCL) 20ml ตามมาตรฐาน ASTM E407 ใช้เวลาจุ่มแช่ 10 วินาที และตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องไมโครสโคป วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณใกล้ผิวด้านบน (Top Surface) ของชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical-Microscope) ยี่ห้อ Leicadmim รุ่น SDM2500M และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อประเมินโครงสร้างพื้นฐานของรอยเชื่อม และวิเคราะห์

การเจือจาง (Dilution) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม จากรูปโครงสร้างมหภาค โดยทำการวัดพื้นที่โลหะเดิมที่หลอมละลาย (B) และพื้นที่โลหะเชื่อม (A) เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมด้วยโปรแกรม ImageJ ดังแสดงในรูปที่ 4



$$\text{Percentage of Dilution (D)} = \frac{B}{A+B} \times 100$$

รูปที่ 4 พื้นที่คำนวณหาอัตราการเจือจาง

2.3 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ตรวจสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ในบริเวณใกล้ผิวด้านบนของแนวเชื่อม โดยทำการเตรียมผิวให้ได้ระนาบและปาดผิวเรียบในบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ

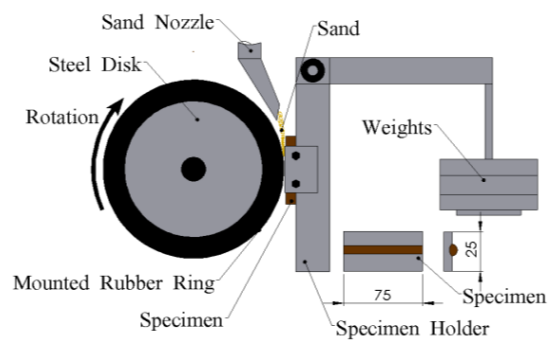
2.4 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบความแข็งชิ้นงานเชื่อมโดยกดผ่านโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E384 แบบวิกเกอร์ (Vickers) ทำการกดทดสอบบริเวณภาคตัดตามขวางของชิ้นงานเชื่อม ในแนวตั้ง ใช้แรงกด 300 gf เวลากดแช่ 10 วินาที เริ่มกดบริเวณโลหะชิ้นงาน (Base Metal) ผ่านบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ถึงบริเวณแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 โดยแต่ละบริเวณ กดทดสอบ 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย ซึ่งมีระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ 0.5 มิลลิเมตร

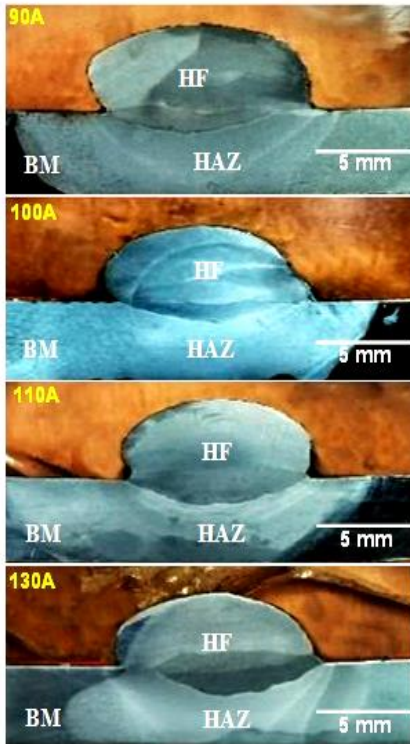
2.5 การทดสอบการสึกหรอ

โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 มีขนาด 25x25x75 มิลลิเมตร ใช้วิธีการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูตามมาตรฐาน ASTM G65 ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำการทดสอบการขัดถูด้วยทรายขนาด 250 μm มีอัตราการไหล 300 g/min ความเร็วรอบของล้อขัด 200 rpm เวลาในการทดสอบ 30 นาที ต่อชิ้น ใช้น้ำหนักกดทดสอบ 5 kg ภาคตัดขวางของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบข้อบกพร่อง

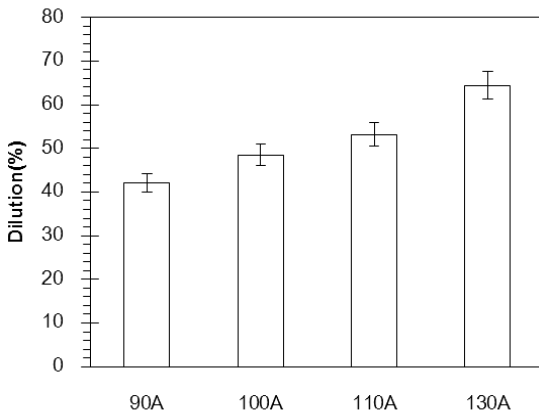
ในบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (HF) การเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่สูงทำให้ค่าความหนาของแนวเชื่อมมีค่าต่ำลงโดยกระแสไฟเชื่อมที่ 90 A ให้ค่าความหนาสูงสุดของแนวเชื่อมเฉลี่ย 4.3 มิลลิเมตร ในขณะที่กระแสไฟเชื่อม 130 A ให้ค่าความหนาของแนวเชื่อมต่ำสุดเฉลี่ย 3.2 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมสูงทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การซึมลึกสูงความหนาของแนวเชื่อมต่ำเปอร์เซ็นต์การเงาจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าการเงาจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90-130 A มีค่าการเงาเท่ากับ 4.2 % , 48.5 % , 53.2 % , และ 64.4 % ตามลำดับ โดยกระแสไฟเชื่อม 90 A ให้ค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน 1.908 kJ/mm ขณะที่กระแสไฟเชื่อม 130 A ให้ค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน 2.745 kJ/mm ซึ่งการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่สูงทำให้เกิดความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานสูงส่งผลทำให้เกิดการเงาในโลหะเชื่อมสูง



รูปที่ 5 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 [9]



รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 7 การเจือจางของเนื้อโลหะเชื่อม

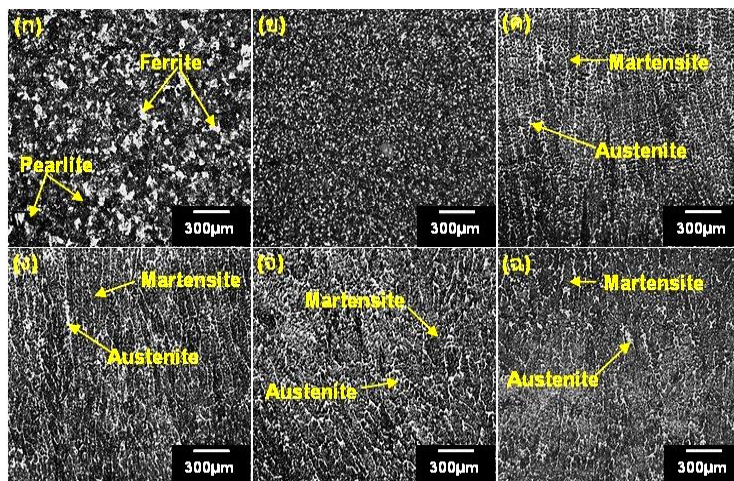
3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะชิ้นงาน (Base Metal) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI1050 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง ซึ่งใช้กระแสไฟเชื่อมที่ต่างกัน พบว่า รูปที่ 8 (ก) พบโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ (Ferrite) มีลักษณะเป็นเม็ดเกรนสีขาวสว่างกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ลักษณะเป็นเกรนสีดำขนาดใหญ่เป็นโครงสร้างพื้น [10] รูปที่ 8 (ข) แสดงโครงสร้างบริเวณกระแทกร้อน (HAZ) เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอิทธิพลของความร้อน เมื่อรอยเชื่อมเกิดการเย็นตัวพบโครงสร้างที่มีลักษณะเกรนละเอียดกว่าบริเวณโลหะฐาน [11] รูปที่ 8 (ค) – (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90-130 A บริเวณใกล้ผิวด้านบนของชั้นเชื่อมพอกแข็งที่ 3 พบว่าทุกกระแสไฟเชื่อมปรากฏโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะของเดนไดรต์ (Dendrite) คือโครงสร้างที่เกิดจากเย็นตัวไม่สมดุลของโลหะหลอมเหลวสู่ของแข็งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ลักษณะคล้ายกับกิ่งก้านของต้นไม้ที่ประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite) และโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) โดยเฟสมาเทนไซต์มีลักษณะเป็นสีเข้มกระจายอยู่ และมีโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลังจากการเย็นตัวของแนวเชื่อม มีลักษณะเป็นเฟสสีขาวสว่างกระจายอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลมาจากเนื้อเชื่อมพอกแข็งมีปริมาณธาตุคาร์บอน ไครเมียม นิกเกิล แมงกานีส และธาตุอื่นๆ ผสมอยู่จึงสามารถทำให้เกิดโครงสร้างดังกล่าว [12]

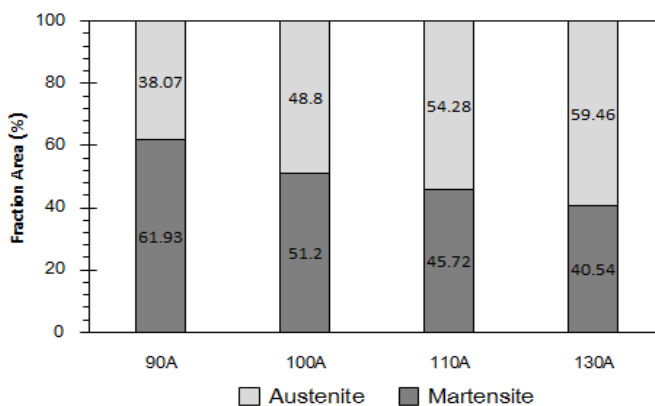


รูปที่ 9 แสดงสัดส่วนโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งบริเวณใกล้ผิวด้านบนของชั้นเชื่อมพอกแข็งที่ 3 ซึ่งทำการวัดหาปริมาณของเฟสดังกล่าวในรูปที่ 10 พบว่าการเชื่อมพอกแข็งที่ใช้กระแสไฟเชื่อมที่ต่ำมีปริมาณมาร์เทนไซต์สูงกว่าการใช้กระแสไฟเชื่อมที่สูง ซึ่งการใช้กระแสไฟเชื่อมสูงทำให้ค่าความร้อนเข้าสู่ชั้นงานสูง อัตราการเย็น

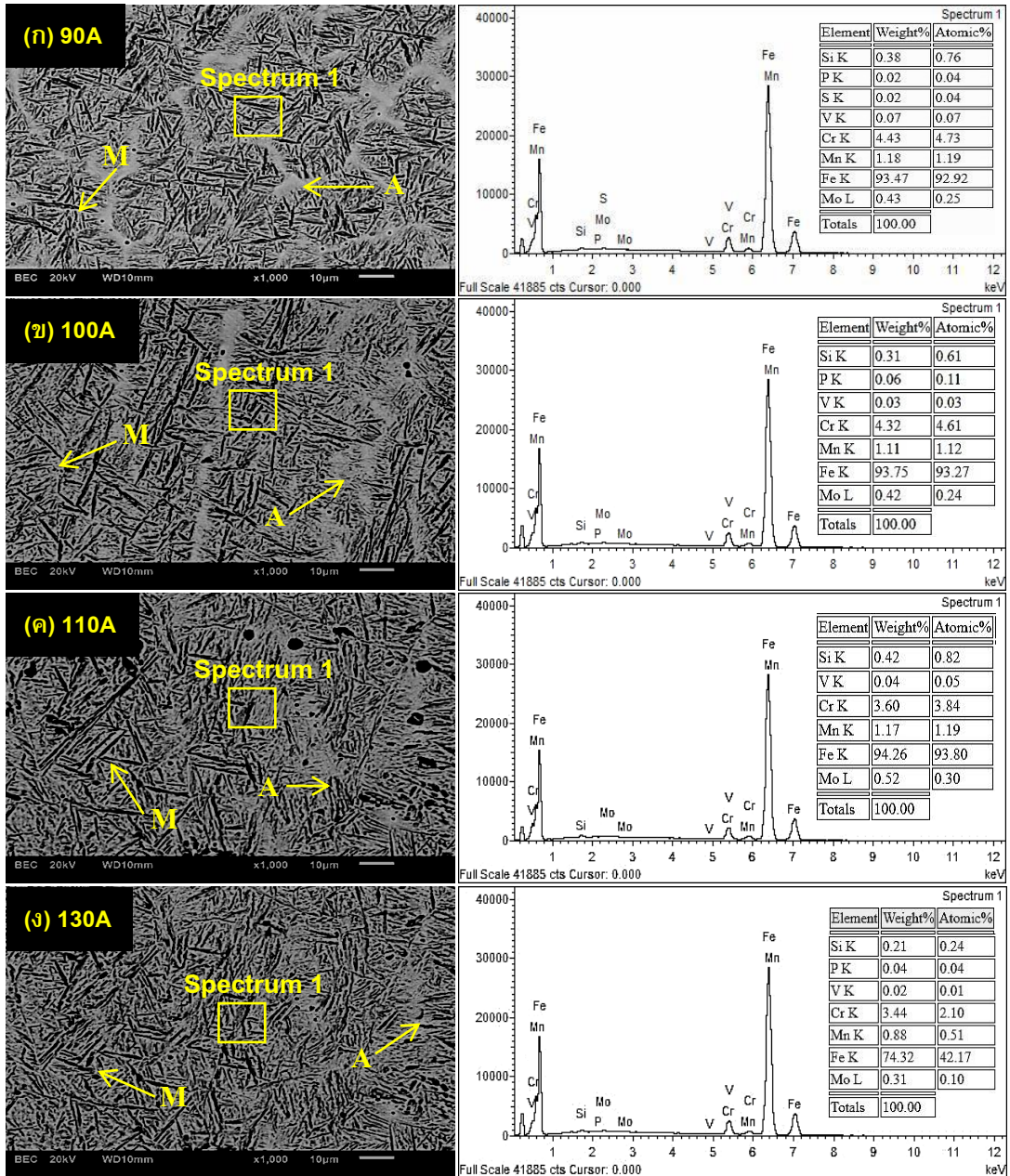
ตัวของเนื้อเชื่อมช้ากว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่ต่ำ ส่งผลทำให้ปริมาณมาร์เทนไซต์ในชั้นพอกแข็งลดลง โดยกระแสไฟเชื่อม 90 A พบปริมาณมาเทนไซต์สูงสุดที่ 61.93 % และกระแสไฟเชื่อม 130 A พบปริมาณมาเทนไซต์ต่ำสุดที่ 40.54 % ซึ่งปริมาณของเฟสมาเทนไซต์มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมบริเวณภาคตัดขวาง (ก) Base Metal (ข) HAZ (ค) 90 A (ง) 100 A (จ) 110 A และ (ฉ) 130 A



รูปที่ 9 สัดส่วนโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง



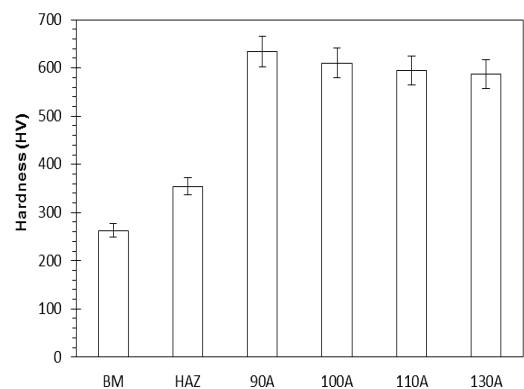
รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเชิงปริมาณบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

จากการการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) บริเวณภาคตัดขวางใกล้ผิวด้านบนแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นเชื่อมที่ 3 ที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแสไฟเชื่อม 90-130A ดังแสดงในรูปที่ 10 ถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิคสเปกโทรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) ในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบว่าส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมพอกแข็งมีธาตุหลักอยู่จำนวน 5 ธาตุ ประกอบด้วยซิลิคอน (Si) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และโมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งกระแสไฟเชื่อมที่ 90 A มีปริมาณของธาตุซิลิคอน 0.38 % โครเมียม 4.43 % และแมงกานีส 1.18 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณสูงเมื่อเทียบกับกระแสไฟเชื่อมที่ 100 - 130 A สอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Winarto- and P. Priadi ที่ได้กล่าวไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณของธาตุ เกิดจากการเจือจางของส่วนผสมทางเคมีขณะทำการเชื่อม ซึ่งเมื่อธาตุเหล่านี้มีปริมาณสูงจะส่งผลต่อค่าความแข็งที่สูงขึ้นของแนวเชื่อม [13]

3.3 ผลการทดสอบความแข็ง

การทดสอบหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) โดยทดสอบบริเวณใกล้ผิวด้านบนโลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าบริเวณโลหะชิ้นงาน (BM) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันทุกกระแสไฟเชื่อม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 263 HV ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมพอกแข็งเฉลี่ยที่ 229 HV ส่วนบริเวณกระเปาะร้อน (HAZ) ค่าความแข็งบริเวณนี้ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 354 HV เนื่องจาก

การลดลงของขนาดเกรนหรืออาจเกิดจากความร้อนในการเชื่อมส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวในเนื้อเชื่อม สอดคล้องกับงานวิจัยของ G. Magudeeswaran et al. [14] ที่กล่าวไว้ว่าความร้อนในการเชื่อมและอัตราการเย็นตัวจะมีผลกระทบต่อสัณฐานวิทยา (Morphology) ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของเฟิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ จะมีขนาดเกรนละเอียดเมื่อพลังงานในการเชื่อมเพิ่มและอัตราการเย็นตัวลดลงส่งผลทำให้ค่าความแข็งสูง [15-16] และค่าความแข็งได้เพิ่มสูงขึ้นทันใดเมื่อถึงชั้นแนวเชื่อมพอกแข็ง ซึ่งการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่ 90 A มีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ยที่ 634 HV ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งของลวดเชื่อม 10 HV อันเป็นผลมาจากอัตราการเจือจางของเนื้อโลหะเชื่อมต่ำ และมีปริมาณเฟสมาเทนไซต์ที่สูงทำให้ค่าความแข็งสูง ในขณะที่การเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 100 - 130 A ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง โดยกระแสไฟเชื่อมที่ 130 A ให้ค่าความแข็งต่ำสุดเฉลี่ย 587 HV ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแข็งแตกต่างเฉลี่ยที่ 8 %

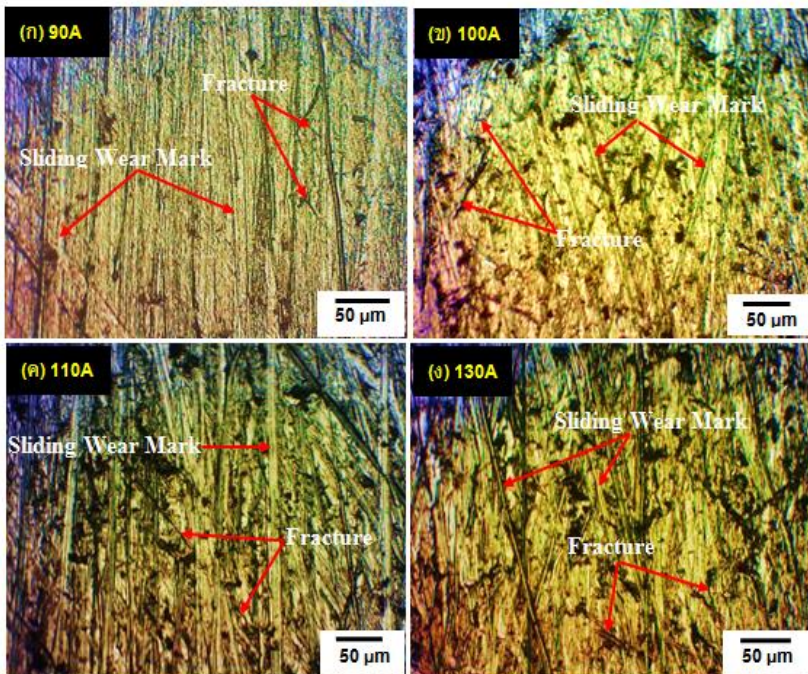


รูปที่ 11 ความแข็งชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง

3.4 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

รูปที่ 12 แสดงลักษณะเนื้อเชื่อมพอกแข็งที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู ที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมต่างกัน โดยพบว่าลักษณะการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกแข็งที่เกิดจากกลไกการทดสอบส่วนใหญ่มีลักษณะเกิดรอยลื่นไถล (Sliding Wear Mark) และเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Fracture) บนเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็งมีเฟสมาเทนไซต์ที่มีความแข็งสูงและเฟสออสเทนไนต์ที่มีความเหนียวทำให้เกิดการแตกน้อย ซึ่งการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมสูง การทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูสร้างความเสียหายให้กับโลหะพอกแข็งมากกว่าการ

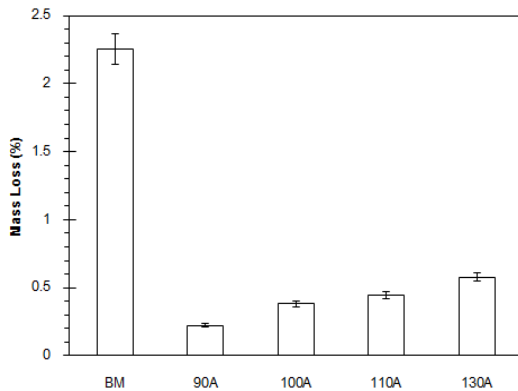
เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมต่ำดังแสดงในรูปที่ 13 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูบริเวณ ผิวด้านบนแนวเชื่อมพอกแข็งพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่ต่ำมีการสูญเสียปริมาณมวลของเนื้อโลหะพอกแข็งน้อยกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่สูง เนื่องจากการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมต่ำ มีการเจือจางน้อยกว่า ทำให้ค่าความแข็งสูงกว่า โดยค่าความแข็งมีผลโดยตรงต่อความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งถ้าวัสดุมีความแข็งที่ผิวสูงจะมีความต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุที่ผิวมีความแข็งต่ำ [17] นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของปริมาณธาตุโครเมียม ซิลิคอน และแมงกานีสในชั้นพอกแข็งซึ่งมีผล



รูปที่ 12 ลักษณะเนื้อเชื่อมพอกแข็งที่เกิดการสึกหรอ



บทความวิจัย



รูปที่ 13 มวลที่หายไปของโลหะฐานและโลหะพอกแข็งต่อการสึกหรอของแนวเชื่อม [18] และการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมสูงพบปริมาณเฟสออสเทนไนต์มากกว่า ซึ่งเฟสออสเทนไนต์เป็นเฟสที่มีค่าความแข็งต่ำจึงมีความสามารถต้านทานการสึกหรอได้น้อยกว่าเฟสมาเทนไซต์ที่มีความแข็งสูงกว่า [19] ซึ่งการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 A มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายน้อยสุดที่ 0.268 % ขณะที่กระแสไฟเชื่อม 130 A มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายมากที่สุดที่ 0.584 %

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของการเพิ่มกระแสไฟเชื่อมพอกผิวแข็งแบบอาร์กด้วยลวดเชื่อมต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีสำหรับอุปกรณ์เตรียมดินในงานเกษตรสามารถสรุปได้ดังนี้ บริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งพบโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ การเชื่อมด้วยกระแสไฟสูงทำให้เกิดความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงเกิดการเจือจางของโลหะเชื่อมสูงค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นและอัตรา

การสึกหรอที่ลดลง เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุในโลหะพอกแข็งสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม คือ กระแสไฟเชื่อม 90A ให้ค่าความแข็งแนวเชื่อมสูงสุดเฉลี่ย 634 HV มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายต่ำสุด 0.268% เหมาะกับการนำไปใช้ในงานเชื่อมพอกแข็งอุปกรณ์เตรียมดินเพื่อให้สามารถทนต่อการสึกหรอ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Balasubramanian, R. Varahamoorthy, C.S. Ramachandran and C. Muralidharan, Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40, 887-897.
- [2] J.J. Coronado, H.F. Caicedo and A.L. Gomez, The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits, *Tribology International*, 2009, 42(5), 745-749.
- [3] M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. Leon and A. Toro, The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, 2005, 259, 52-61.



- [4] S. Chatterjee and T.K. Pal, Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron, *Wear*, 2003, 255, 417-425.
- [5] M. Kirchgabner, E. Badisch and F. Franek, Behaviour of iron based hardfacing alloys under abrasion and impact, *Wear*, 2008, 265 (5-6), 772-779.
- [6] G.R.C. Pradeep, A. Ramesh and B.D. Prasad, A review paper on hardfacing processes and materials, *International Journal of Engineering Science Technology*, 2010, 2(11), 6507-6510.
- [7] S.D. Borle, I. Le Gall and P.F. Mendez, Primary chromium carbide fraction control with variable polarity SAW, *Welding Journal*, 2015, 94(1), 1-7.
- [8] K. Yang, Y. Shengfu, L. Yingbin and L. Chenglin, Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy, *Applied Surface Science*, 2008, 254(16), 5023-5027.
- [9] S. Prasomthong and S. Namkaew, The influence of adding aluminum welding wire on mechanical properties and chemical composition of the welding hardfacing welded low carbon steel by gas tungsten arc welding process, *The Journal of Industrial Technology*, 2019, 15(1), 27-36. (in Thai)
- [10] P.B. Srinivasan, V. Muthupandi, W. Dietzel and V. Sivan, An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels, *Materials and Design*, 2006, 27(3), 182-191.
- [11] D. Liu, R. Liu, Y. Wei, Y. Ma and K. Zhu, Microstructure and wear properties of Fe-15-Cr-2.5Ti-2C- xB wt% hardfacing alloys, *Applied Surface Science*, 2013, 253-259.
- [12] R. Hossain, F. Pahlevani, and V. Sahajwalla, Effect of small addition of Cr on stability of retained austenite in high carbon steel, *Materials Characterization*, 2017, 114-122.
- [13] W. Winarto and D. Priadi, Effect of preheating and buttering on cracking susceptibility and wear resistance of hardfaced HSLA steel deposit, *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, 2013, 31(4), 202-205.
- [14] G. Magudeeswaran, V. Balasubramanian and G.M. Reddy, Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength quenched and tempered steel joints, *Materials and Design*, 2008, 29(9), 1821-1827.



- [15] D.G. Morris, The origins of strengthening in nanostructured metals and alloys, *Revista de Metalurgia*, 2010, 46(2), 173-186.
- [16] A. Inoue, Bulk glassy and nonequilibrium crystalline alloys by stabilization of supercooled liquid fabrication functional properties and applications, *Proceedings of the Japan Academy Series B*, 2005, 81(6), 172-188
- [17] A. Bain, R. Keerthi, S. Jagadeesan, A.I. Akkireddy, N. Sateesh, S. Singh and R. Subbiah, Wear and microstructure analysis on AISI420 stainless steel by annealing & tempering process under dry sliding conditions, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2021, 8(2), 1-11.
- [18] X. Jin, B. Chen and K. Feng, Effect of chromium on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys, *Materials Science Forum*, 2020, 1001, 41-46.
- [19] J.J. Coronado, H.F. Caicedo and A.L. Gómez, The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits, *Tribology International*, 2009, 42(5), 745-749.



การศึกษาสภาวะอากาศและผลกระทบต่อด้านพลังงานในระบบปรับอากาศจากการระบายอากาศในหอผู้ป่วยติดเชื่อโควิด-19

ภาวิณี ตักดีสุนทรศิริ¹ อธิภัทร์ เทศฤทธิ์¹ และ วสันต์ เจริญสุวรรณ^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: wasan.t@mail.rmutk.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 เมษายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 15 กรกฎาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 10 กันยายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: การระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงพื้นที่ในโรงพยาบาลทั้งห้องความดันบวกหรือลบนั้นจะมีภาวะความร้อนเพิ่มขึ้นจากการนำอากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีสูงเข้ามาสู่พื้นที่ภายในอาคารส่งผลต่อความสิ้นเปลืองในการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ และสภาวะอากาศภายใน การศึกษานี้ทำการศึกษาสภาวะอากาศภายในหอผู้ป่วยติดเชื่อโควิด-19 ที่ได้รับการออกแบบและปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานทั้งในกรณีที่เปิดระบบเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อของโควิด-19 ที่เติมอากาศสะอาด 6 ACH เข้าสู่พื้นที่ห้องความดันบวก และดึงอากาศออกจากห้องความดันลบ 12 ACH ติดตั้งอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เพื่อติดตามค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องต่าง ๆ ในหอผู้ป่วยที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในสภาวะอากาศภายนอกจริง และทำการวัดค่ากำลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศแบบต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อแบบ 100% กับกรณีที่ปิดระบบระบายอากาศใช้งานในหอผู้ป่วยเพื่อทำการรักษาคนไข้ ในกรณีที่ไม่มีมีการแพร่ระบาดผลการศึกษาพบว่า ในการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการแพร่เชื่อนั้นส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องมาจากภาวะความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการนำอากาศภายนอกมาใช้ในการเติมอากาศให้ห้องความดันบวก การรั่วเข้าของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องคนไข้ความดันลบและได้รับผลกระทบจากกิจกรรมที่จำเป็นในการดูแลรักษาคนไข้ที่ต้องใช้น้ำมาเพิ่มความชื้นในห้องคนไข้ สภาวะอากาศในห้องความดันบวกอยู่ในสภาวะที่สุขสบาย สภาวะอากาศในห้องคนไข้อยู่นอกช่วงมาตรฐานเนื่องจากหอผู้ป่วยมิได้ติดตั้งระบบควบคุมความชื้นของอากาศ

คำสำคัญ: ภาวะความร้อน; การระบายอากาศ; ห้องคนไข้ติดเชื่อ; พลังงาน; ระบบปรับอากาศ



Study of Air Conditions and Energy Impact in Air Conditioning Systems from Ventilation in COVID-19 Patient Wards

Pawinee Suksuntornsiri¹, Teerapat Teadrit¹ and Wasan Theansuwan^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Krungthep, Bangkok

* Corresponding Author, E-mail: wasan.t@mail.rmutk.ac.th

Received: 29 April 2024; Revised: 15 July 2024; Accepted: 10 September 2567

Online Published: 19 December 2024

Abstract: Enhanced ventilation from modified spaces in hospitals, including both positive and negative pressure rooms, leads to an increased thermal load due to the introduction of outside air with higher enthalpy into the building's interior, affecting the energy consumption of air conditioning systems. Additionally, the introduced outside air impacts the adjustment of indoor air conditions. This study investigates the indoor air conditions of COVID-19 patient wards that have been designed and modified to prevent the spread of infection within the treatment area. Continuous measurements of energy consumption in the air conditioning system, dry bulb temperature, and relative humidity of various rooms in the patient wards were conducted under real outdoor air conditions, introducing clean air at 6 air changes per hour (ACH) into positive pressure rooms and extracting air from negative pressure rooms at 12 ACH. Comparisons were made between scenarios of disease outbreaks necessitating 100% ventilation to prevent infection spread and scenarios where the ventilation system is turned off in patient wards for treatment in non-outbreak conditions. The study found that turning on the ventilation system to prevent infection transmission significantly increases the energy consumption of the air conditioning system. This is due to the increased thermal load from using outside air to pressurize positive pressure rooms, the infiltration of outside air into negative pressure patient rooms, and the impact of necessary patient care activities that add moisture to patient rooms. The air conditions in the positive pressure rooms were comfortable. However, the air conditions in the patient rooms were outside the standard range because the ward was not equipped with an air humidity control system.

Keywords: Thermal Load; Ventilation; Infectious Patient Rooms; Energy; Air Conditioning System



1. บทนำ

โควิด-19 หรือโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และโรคติดเชื้ออื่นๆ ที่สามารถแพร่กระจายผ่านทางอากาศ เช่น วัณโรค สามารถแพร่ผ่านฝอยละอองขนาดเล็ก (Infected Airborne) ที่ลอยได้ไกลและอยู่ในอากาศได้นาน ในขณะที่การแพร่กระจายผ่านละอองฝอยขนาดใหญ่ (Droplets) เช่น จากการไอหรือจาม มักจะเดินทางได้ไม่ไกลและอยู่ในอากาศได้ชั่วครู่เท่านั้น [1] ดังนั้นการระบายอากาศในสถานพยาบาลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดการติดเชื้อทางอากาศ การเพิ่มปริมาณการระบายอากาศสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการแพร่เชื้อได้

ระบบระบายอากาศมีจุดประสงค์เพื่อรักษาคุณภาพของอากาศภายในอาคารโดยการเปลี่ยนอากาศภายในอาคาร นำเอาอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกเข้ามา (Fresh air) และขับอากาศเสียออกไป (Exhaust Air) ระบบระบายอากาศมีสองวิธี คือ การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Ventilation) และการระบายอากาศแบบเชิงกล (Mechanical Ventilation) ปริมาณการระบายอากาศที่เหมาะสมอาจพิจารณาคำแนะนำจากองค์กรต่างๆ เช่น The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Centers for Disease Control and Prevention (CDC) และองค์การอนามัยโลก (WHO)

องค์การอนามัยโลก [2] ได้ให้แนวทางในการใช้ระบบการระบายอากาศในสถานพยาบาลเพื่อควบคุมการแพร่กระจายของ โควิด-19 การประเมินอัตราการระบายอากาศ การจัดการทิศทางไหลของอากาศจากบริเวณสะอาดไปยังบริเวณที่สกปรก (Clean-To-Dirty) การใช้ระบบระบายอากาศทั้งแบบเชิงกลและแบบ

ธรรมชาติตามข้อกำหนดขั้นต่ำขององค์การอนามัยโลก การจัดการอากาศที่ระบายออกจากห้องให้ถูกต้อง การจัดวางตำแหน่งช่องดูดอากาศติดเชื้อที่ปลอดภัยต่อบุคลากรทางการแพทย์ [3] การกำจัดเชื้อในอากาศ [4] รวมถึงการใช้งานระบบระบายอากาศ การตรวจสอบบำรุงรักษา และทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ นอกเหนือจากการระบายอากาศแล้วยังต้องใช้มาตรการป้องกันและควบคุมการติดเชื้อที่ครอบคลุมอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย

การระบายอากาศในโรงพยาบาลมีความสำคัญต่อการควบคุมการติดเชื้อแต่ส่งผลต่อการเพิ่มการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญในการศึกษาของ Halloran [5] เกี่ยวกับต้นทุนพลังงานที่ใช้ในระบบระบายอากาศและปรับอากาศ (HVAC) ในการควบคุมฝอยละอองเชื้อโรคในอาคารสาธารณะ โดยการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศภายนอก การใช้เครื่องฟอกอากาศในห้องและการปรับปรุงระบบ HVAC พบว่าการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศภายนอกมีค่าใช้จ่ายพลังงานสูงที่สุด

ในการศึกษาของ Zheng et al. [6] ในประเทศจีน พบว่าการนำอากาศภายนอกมาใช้มีประโยชน์ในการลดการแพร่เชื้อ โดยอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศควรอย่างน้อย 3 ACH สามารถลดความเข้มข้นของฝอยละอองขนาดเล็กติดเชื้อได้ถึง 95% รูปแบบการไหลของอากาศช่องจ่ายอากาศ และช่องระบายอากาศ ควรห่างกันด้วยระยะที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของอากาศ สภาวะอากาศที่เหมาะสมมีความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 40-60 % อุณหภูมิที่ 18-26 °C แต่จากการระบาดใหญ่ที่ผ่านมาส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบปรับอากาศและระบายอากาศเพิ่มมากขึ้นถึง 128%



Squire et al. [7] ได้ประเมินความต้องการพลังงาน และต้นทุนทางเศรษฐกิจที่เกี่ยวข้องกับมาตรการควบคุมการติดเชื้อ โควิด-19 ในโรงพยาบาลในรัฐแมริแลนด์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในฤดูหนาวอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ -3°C ถึง 8°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70% ในฤดูร้อนอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 19°C ถึง 31°C และความชื้นสัมพัทธ์ 70-80% โดยใช้แบบจำลองการจัดการพลังงานในโรงพยาบาลเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ห้องความดันลบและอุปกรณ์ฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตพัลส์ซีนอนพบว่าโรงพยาบาลขนาดเล็ก กลาง และใหญ่มีการใช้พลังงานจากการใช้ห้องความดันลบ เพิ่มขึ้น 2.99% ถึง 7.10% ซึ่งการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้สัมพันธ์กับสภาวะอากาศในพื้นที่ศึกษาที่ระบบปรับอากาศและระบายอากาศต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงพยาบาล

การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นของระบบปรับอากาศในพื้นที่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศภายนอกของอาคาร [5] ซึ่งมีผลต่อภาระความร้อนจากการระบายอากาศและการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร สำหรับในประเทศไทยการนำอากาศภายนอกที่มีพลังงานสูงเข้ามาในการระบายอากาศ ส่งผลให้ภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้นมาก บทความนี้ศึกษาผลจากการปรับปรุงระบบระบายอากาศเพื่อลดการแพร่เชื้อและผลกระทบต่อการใช้พลังงานในหอผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศ โดยใช้เครื่องมือวัดเพื่อคำนวณการใช้พลังงานและภาระทำความเย็น การศึกษานี้มีประโยชน์ต่อการจัดการพลังงานของโรงพยาบาล โดยเฉพาะโรงพยาบาลของรัฐที่มีงบประมาณจำกัด และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมสภาวะ

อากาศในอนาคตเพื่อสภาวะในการรักษาผู้ป่วยทั้งในช่วงที่มีการแพร่ระบาดของโรคแพร่ทางอากาศและในช่วงปกติ

หอผู้ป่วย (Cohort Ward) หมายถึงห้องรักษาผู้ป่วยที่รับเข้าไว้รักษาในโรงพยาบาล ประกอบด้วยเตียงคนไข้มากกว่า 1 เตียง เพื่อให้สามารถบริหารจัดการจำนวนทรัพยากรบุคลากรทางการแพทย์ให้เพียงพอต่อการรักษาผู้ป่วยจำนวนมาก ในช่วงการระบาดของโรคแพร่ทางอากาศที่มีผู้ติดเชื้อจำนวนมาก จำนวนบุคลากรทางการแพทย์ไม่เพียงพอต่อการจัดห้องพักแบบแยกโรคแบบห้องเดียว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดการรักษาแบบหอผู้ป่วย หนึ่งการปรับหอผู้ป่วยมาเป็นหอผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศ (Airborne Infected Cohort Ward) ซึ่งจะต้องมีความยืดหยุ่นต่อการปรับกลับไปใช้ในการรักษาในกรณีที่มีจำนวนผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศลดลง เพื่อให้สามารถทำการรักษาตามปกติของโรงพยาบาลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ หอผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศแบบปรับได้อย่างยืดหยุ่น (Flexible Cohort-Ward) จึงถูกออกแบบติดตั้งขึ้น โดยใช้หลักการระบายอากาศเพื่อลดการปนเปื้อน องค์ประกอบหลักประกอบไปด้วย ห้องความดันลบ และห้องความดันบวก

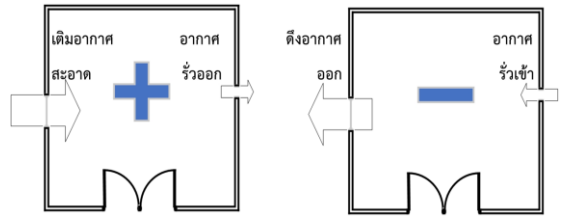
ห้องความดันบวก (Positive Pressure Room) (รูปที่ 1 ก.) เป็นห้องที่มีอากาศสะอาดที่ใช้สำหรับการรักษาผู้ป่วยที่ต้องดูแลป้องกันการติดเชื้อหรือรักษาความสะอาด เช่น ห้องคนไข้ที่ไวต่อการติดเชื้อห้องผ่าตัด ห้องเก็บเครื่องมือทางการแพทย์ ห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ โดยความดันในห้องความดันบวกจะต้องมีความดันสูงกว่าความดันพื้นที่โดยรอบห้องและมีอากาศที่สะอาดเพื่อป้องกันมิให้เชื้อจากภายนอกเข้ามาในห้อง โดยการเติมอากาศสะอาด (Fresh Air)



เข้ามา โดยนำอากาศภายนอกมาทำการกรองด้วยแผ่นกรองละเอียดป้อนเข้าสู่ห้อง เมื่อห้องความดันบวกมีช่องเปิดหรือมีการเปิดประตูหรือหน้าต่าง อากาศภายในห้องที่มีความดันสูงจะรั่วออกไปยังพื้นที่ที่มีความดันต่ำกว่า (Exfiltration)

ห้องความดันลบ (Negative Pressure Room) เป็นห้องที่ปรับความดันภายในห้องให้ต่ำกว่าความดันภายนอกเพื่อป้องกันมิให้อากาศติดเชื้อภายในห้องที่เกิดจากผู้ป่วยที่ติดเชื้อทางเดินอากาศ เช่น โควิด-19 วัณโรค หรือเชื้ออื่นๆ ที่เป็นละอองฝอยในอากาศ รั่วไหลแพร่เชื้อไปยังพื้นที่ข้างเคียง หลักการคือการดึงอากาศออกจากห้องให้มากกว่าอากาศไหลเข้าสู่ห้องตามที่แสดงในรูปที่ 1 ข. เนื่องจากอากาศภายในห้องเป็นอากาศที่ติดเชื้อ หากไม่สามารถนำอากาศไปทิ้งยังที่ปลอดภัยได้ ก่อนดึงอากาศเสียออกไปปล่อยทิ้งภายนอกห้องจะต้องกรองทำความสะอาดให้เป็นไปตามมาตรฐาน สำหรับอากาศภายนอกรั่วเข้าสู่ห้อง (Infiltration) ที่เข้ามาทางรูรั่วของห้องนั้นส่วนใหญ่เป็นอากาศที่ไม่สะอาด หรืออาจเติมอากาศเข้าไปโดยใช้พัดลมเติมอากาศที่ติดตั้งแผ่นกรองละเอียดเพื่อกรองทำความสะอาดอากาศก่อนเติมเข้าสู่ห้องได้

อัตราการระบายอากาศในหอผู้ป่วย นิยมใช้หน่วยอัตราการเปลี่ยนปริมาตรอากาศของห้องต่อชั่วโมง (Air Change Per Hour: ACH) ในการกำหนดอัตราการระบายอากาศเพื่อป้องกันและควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อโรคในสถานพยาบาลและเพื่อความสบายของผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์ คำแนะนำตาม ANSI/ASHRAE Standard 170-2021 [8] ให้จัดให้ห้องแยกโรคคนไข้ที่ติดเชื้อ (Airborne Infection Isolation Room: AIIR) เป็นห้องความดันลบ เติมอากาศภายนอก



ก. ห้องความดันบวก

ข. ห้องความดันลบ

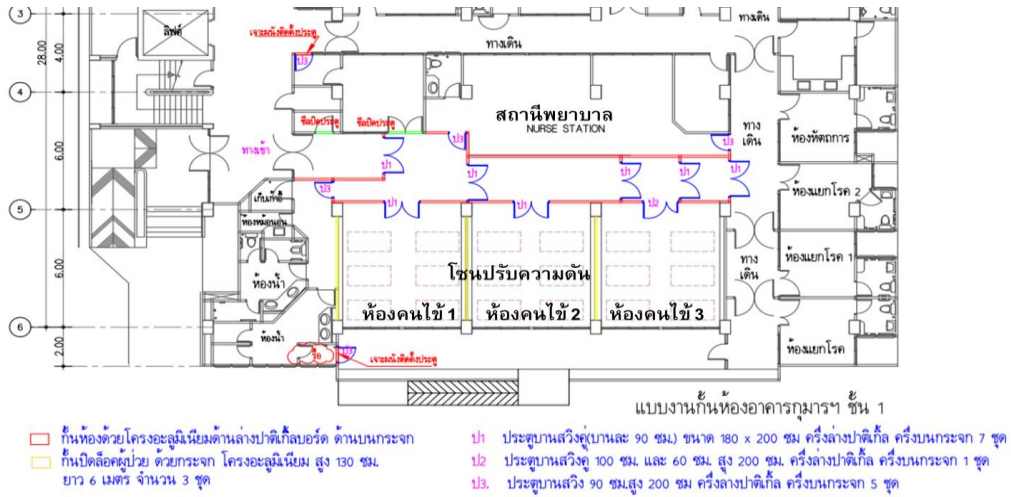
รูปที่ 1 การไหลของอากาศห้องความดันบวกและห้องความดันลบ

ไม่ต่ำกว่า 2 ACH มีการระบายอากาศทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 12 ACH อุณหภูมิ 21-24 °C ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60% สำหรับห้องปรับความดันหน้าห้องคนไข้ติดเชื้อ (Ante Room) มีการระบายอากาศทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 10 ACH ไม่ระบุสภาวะอากาศและการเติมอากาศสำหรับห้องน้ำและห้องเบดแพน (Bed Pan Room) เป็นความดันลบ ให้นำอากาศออกไปทั้งหมด ไม่มีการหมุนวนอากาศ มีการระบายอากาศทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 10 ACH ไม่ระบุความชื้นสัมพัทธ์และการเติมอากาศภายนอก ระบุแต่เพียงอุณหภูมิห้องน้ำเท่านั้นคือ 22-26 °C ส่วนพื้นที่บริการที่เป็นพื้นที่สะอาดในโรงพยาบาล เป็นห้องความดันบวก เติมอากาศภายนอกไม่น้อยกว่า 2 ACH มีการระบายอากาศรวมไม่น้อยกว่า 4 ACH ไม่ระบุสภาวะอากาศภายในห้อง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 หอผู้ป่วยติดเชื้อ

หอผู้ป่วยที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 2 เป็นหอผู้ป่วยที่เดิมเป็นหอผู้ป่วยสามัญสำหรับเด็ก ในช่วงของการแพร่ระบาดโควิด-19 ในเด็กที่กลับไปเรียนในที่ซึ่งได้รับการปรับปรุงพื้นที่เพื่อรองรับการรักษาผู้ป่วยเด็กติดเชื้อทางอากาศ โดยการกั้นโซนพื้นที่เพื่อปรับความดันอากาศของโซนต่างๆ เพื่อป้องกันการแพร่เชื้อ



รูปที่ 2 การปรับปรุงพื้นที่ห้องผู้ป่วยที่ทำการศึกษ

ประกอบด้วย

- 1) โซนห้องความดันบวก เป็นพื้นที่สะอาดสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ เช่น สถานีพยาบาล (Nurse Station) เพื่อสังเกตอาการของผู้ป่วยและเป็นห้องปฏิบัติการทางการบริหารการรักษานในห้องผู้ป่วย ห้องเก็บอุปกรณ์สะอาดและห้องสวมชุดสะอาด
- 2) โซนห้องความดันลบ เป็นพื้นที่ที่เป็นแหล่ง (Source) ของเชื้อทางอากาศ (Infected Airborne) เช่น ห้องคนไข้ติดเชื้อแพร่ทางอากาศ ห้องสุขาผู้ป่วยติดเชื้อห้องเทเบตแพน ห้องขยะติดเชื้อในการศึกษานี้ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใน สถานีพยาบาล (Nurse Station) ห้องคนไข้ 1 (Patient 1) ห้องคนไข้ 2 (Patient 2) และห้องคนไข้ 3 (Patient 3)

2.2 ระบบระบายอากาศ

ห้องผู้ป่วยที่ทำการศึกษามีการเติมอากาศสะอาดเข้าสู่สถานีพยาบาลในอัตรา 6 ACH และดึงอากาศติดเชื้อ

ออกจากห้องอากาศติดเชื้อจากห้องคนไข้ 3 ห้องห้องนำคนไข้และห้องขยะในอัตรา 12 ACH มีการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบระบายอากาศและเครื่องปรับอากาศตามแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเครื่องระบายอากาศ

อุปกรณ์	ข้อกำหนดเฉพาะของอุปกรณ์
เครื่องเติมอากาศสะอาด สถานีพยาบาล	Camfill Air Cleaner CC410 Concealed-M AK-E2227 200-240 VAC 50/60Hz 1.45 A effect<170W max. HEPA H13
เครื่องดูดกรองอากาศติดเชื้อ ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 ห้องคนไข้ 3	fan filter unit with UV-C อนุสิทธิบัตร เลขที่ 18282 เครื่องดูดกรองอากาศติดเชื้อชนิดส่งลมออกสู่ภายนอกอาคาร โดยตรง [9] In-line centrifugal blower 0.14 kW max. HEPA H14
เครื่องปรับอากาศ สถานีพยาบาล ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 ห้องคนไข้ 3	48,000 BTU/h + 18,000 BTU/h 60,000 BTU/h 60,000 BTU/h 60,000 BTU/h



2.3 ภาวะความร้อนจากการระบายอากาศ

ภาวะความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการระบายอากาศ เพื่อลดการแพร่เชื้อ

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_a (h_o - h_i) \quad (1)$$

โดย \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องเพิ่มขึ้นจากการระบายอากาศเพื่อลดการแพร่เชื้อ (kg/s)

h_o คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายนอกห้อง (kJ/kg_{da})

h_i คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายในห้อง (kJ/kg_{da})

h_o และ h_i ในสมการที่ (1) ประเมินได้จาก

$$h = h_{da} + w \cdot h_g \quad (\text{kJ/kg}_{da}) \quad (2)$$

โดย h คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศชื้นภายนอก (h_o) หรือเอนทัลปีจำเพาะของอากาศชื้นภายในห้อง (h_i) ทั้งนี้

$$h_g \approx 2501 + 1.86 \cdot t$$

$$h_{da} \approx 1.006 \cdot t$$

t คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°C)

w คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg/kg_{da}) ซึ่งประเมินได้จากสมการที่ (3)

$$w = 0.621945 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (3)$$

โดย p คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

p_w คือ ความดันอากาศชื้น (kPa)

p_w สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$p_w = \phi \cdot p_{ws} \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

โดย p_{ws} คือ ความดันอิ่มตัว ในหน่วย kPa

ทั้งนี้ p_{ws} หาได้จาก [10]

ทั้งนี้การสร้างแผนภูมิไซโครเมตรีในการศึกษานี้เพื่อ นำผลการติดตามสภาวะอากาศภายในห้องมาทำการ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้สมการที่ (2) ถึงสมการที่ (5) อากาศภายนอกใช้ความดันบรรยากาศมาตรฐาน เท่ากับ 101.325 kPa สำหรับอากาศภายใน หอผู้ป่วย ใช้ความดันสมบูรณ์จริงของแต่ละห้อง ในกรณีปกติ ความดันในหอผู้ป่วยเท่ากับความดันภายนอก

$$\ln p_{ws} = \frac{c_1}{T} + c_2 + c_3 T + c_4 T^2 + c_5 T^3 + c_6 \ln T \quad (5)$$

โดย p_{ws} คือ ความดันอิ่มตัว สมการที่ (5) มีหน่วย Pa

T คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งสัมบูรณ์ (K)

$$c_1 = -5.800 \ 220 \ 6 \ E+3$$

$$c_2 = 1.391 \ 499 \ 3 \ E+00$$

$$c_3 = -4.864 \ 023 \ 9 \ E-02$$

$$c_4 = 4.176 \ 476 \ 8 \ E-05$$

$$c_5 = -1.445 \ 209 \ 3 \ E-08$$

$$c_6 = 6.545 \ 967 \ 3 \ E+00$$

สำหรับในกรณีที่มีการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อ ป้องกันการแพร่เชื้อ ความดันห้องสถานีพยาบาลจะมี ความดันสูงกว่าอากาศภายนอก 10 Pa และความดันใน ห้องคนไข้จะมีความดันต่ำกว่าอากาศภายนอก 30 Pa ดังนั้นความดันสมบูรณ์ของห้องความดันลบเท่ากับ 101.295 kPa และความดันสมบูรณ์ของห้องความดัน บวกเท่ากับ 101.335 kPa

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องใน สมการที่(1) คำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ วัดค่าได้หารด้วยปริมาตรจำเพาะของอากาศ

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}}{v_a} \quad (\text{kg/s}) \quad (6)$$



บทความวิจัย

โดย V คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s) ได้จากการวัดค่าอัตราการเติมอากาศเข้าสู่ห้องความดันบวกด้วยเครื่องมือวัดในตารางที่ 2 v_a คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg_{da}) ประเมินได้จากสมบัติของอากาศที่เติมเข้าสู่ห้องความดันบวกจากสมการที่ (7) [7] ดังนี้

$$v_a = \frac{0.287042(t + 273.15)(1 + 1.607858w)}{P} \quad (7)$$

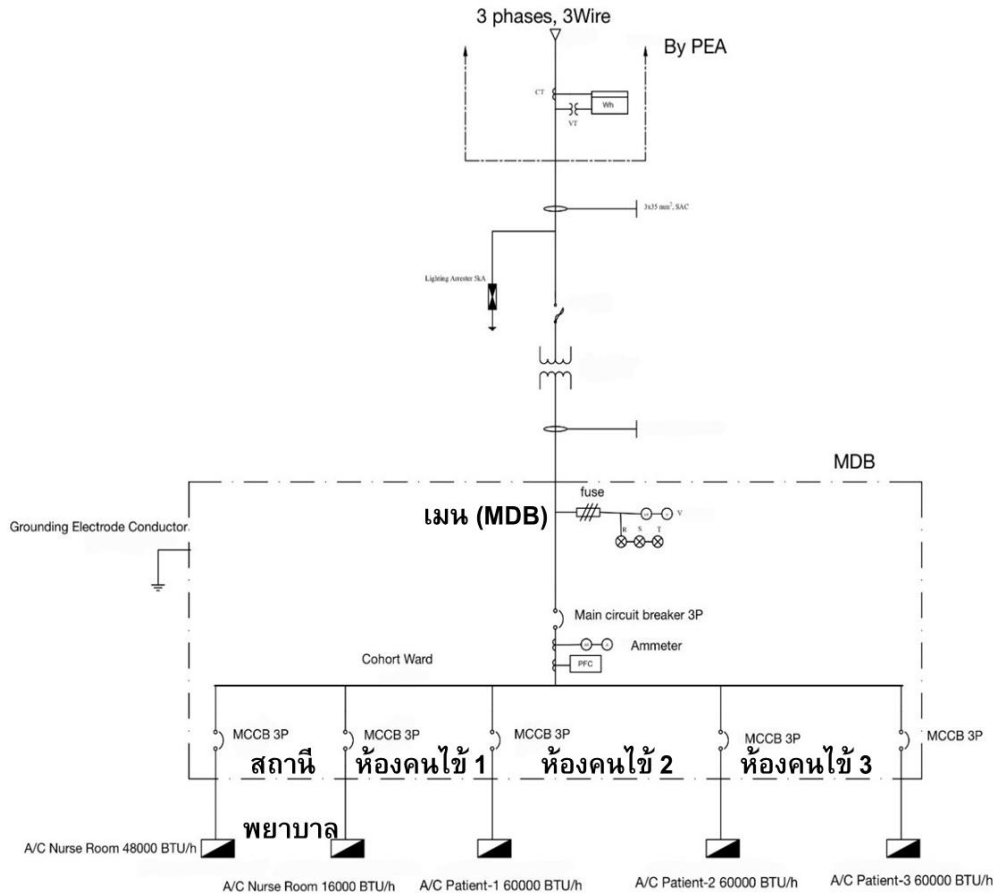
2.4 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ในการติดตามค่าสภาวะอากาศ

ในการเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาด้านสภาวะอากาศและการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก

การเพิ่มการระบายอากาศจะต้องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์เพื่อพลอตแผนภูมิไซโครเมตรีของสภาวะอากาศในและนอกหอผู้ป่วย รวมทั้งวัดค่าอัตราการไหลของอากาศเพื่อทำการคำนวณภาวะความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มการระบายอากาศตามที่อธิบายในหัวข้อ 3.3 รวมทั้งติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศที่เกิดขึ้นจริง โดยตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า อัตราการไหลของอากาศ และอุปกรณ์ในการติดตามค่าสภาวะอากาศ การวัดค่ากำลังไฟฟ้าทำการวัดที่เมนไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบปรับอากาศของหอผู้ป่วยตามที่แสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ในการติดตามค่าสภาวะอากาศ

อุปกรณ์วัด	รายละเอียดข้อกำหนดของอุปกรณ์	ตำแหน่งที่ใช้วัดค่า
อุปกรณ์ IoT วัดค่าอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง และ ความชื้นสัมพัทธ์	Sensor DHT22, 0-100% RH, -40-80 °C, Acc. +/- 2%RH +/-0.5 °C Arduino IDE Node MCU ESP32, w/ WIFI 802.11 b/g/n and Bluetooth 4.2 Base for ESP32, LCD I2C 16*2AIS home WIFI Firebase MIT App Inventor	อากาศภายนอกหอผู้ป่วย สถานีพยาบาล ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 ห้องคนไข้ 3
เครื่องมือวัดค่า กำลังไฟฟ้าแบบ ต่อเนื่อง	ELITE PRO XC Power Meter & Recorder 0.25 – 3,000 A, 4 Channel Voltage 3 เฟส 0-600 V AC/DC Acc.<1% Ro Coil CT USB port	เมน (MDB) กำลังไฟฟ้า ของเครื่องปรับอากาศใน หอผู้ป่วย
เครื่องวัดค่าอัตราการ ไหลของอากาศ	Testo 420 40-4000 m ³ /h Acc.+/-3% +12m ³ /h @22°C,1013 hPa	อัตราการไหลของเครื่อง ระบายอากาศ



รูปที่ 3 Single Line Diagram ระบบปรับอากาศ

ในการติดตามค่าสภาวะอากาศอย่างต่อเนื่องภายในห้องสถานียพยาบาล ภายในห้องคนไข้ และสภาวะอากาศภายนอกหอผู้ป่วย ได้จากการเก็บข้อมูลของแต่ละพื้นที่ด้วยอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t) และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH, ϕ) เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (w) จากสมการที่ (3) สมการที่ (4) และสมการที่ (5) ทั้งนำไปคำนวณเอนทัลปีจำเพาะของอากาศในสมการที่ (2) ปริมาตรจำเพาะในสมการที่ (7) คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบอุปกรณ์

IoT เพื่อติดตั้งจุดตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จากหอผู้ป่วย ใช้ Firebase ร่วมกับอุปกรณ์ IoT และให้แสดงข้อมูลไปยัง MIT App Inventor

MIT App Inventor [9] เป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างแอปพลิเคชันที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) โดย MIT App Inventor ใช้หลักการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงคอมโพเนนต์ (Component-Based Software Development) ทำให้ผู้ใช้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันได้ง่ายโดยไม่ต้องเขียนรหัสคำสั่ง



บทความวิจัย

(Source Code) ภาษาจาวาสคริปต์ ซึ่งผู้วิจัยได้สร้างหน้าแอปพลิเคชันเพื่อแสดงข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นของห้องต่างๆในหอผู้ป่วยและอากาศภายนอกหอผู้ป่วย โดยใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์ IoT, Firebase [11] และ MIT App Inventor [12] ตามที่แสดงในรูปที่ 4 Inventor จัดทำแผนภูมิไซโครเมตรีโดยทำการพลอตแผนภูมิให้แกน x เป็นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แกน y เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศทั้งภายในและภายนอกแล้วความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นเส้นโค้งที่บ่งชี้เส้นประที่ลดหลั่นลงมาเป็นความชื้นสัมพัทธ์ 90% 80% 70% 60% 50% 40% 30% 20% และ 10% ตามลำดับ

จากนั้นนำข้อมูลสถานะอากาศที่ได้จาก MIT App Inventor ของอากาศภายนอกและห้องต่างๆ ภายในหอผู้ป่วยมาคำนวณแล้วพลอตตำแหน่งลงบนแผนภูมิไซโครเมตรี

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ใช้ Power meter ELITE PRO XC Power Meter & Recorder และ Ro Coil CT วัดที่เมนจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบปรับอากาศทั้งหมดของหอผู้ป่วยโดยตั้งเครื่องมิ้วัดให้ทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าทุกๆ 1 นาทีต่อเนื่องตลอดการศึกษา เพื่อนำไปพล็อตกำลังไฟฟ้ากับระยะเวลามาตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศของหอผู้ป่วย

สำหรับการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่เติมเข้าสู่หอผู้ป่วยนั้น เนื่องจากเครื่องเติมอากาศสะอาดเป็นเครื่องที่เติมอากาศด้วยอัตราการไหลคงที่ในการศึกษานี้ใช้ Testo 420 ซึ่งย่านการวัดตรงกับค่าที่ทำการวัดสมมติฐานในการใช้งานระบบระบายอากาศในการทดสอบสถานะอากาศและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพื่อการเปรียบเทียบผล



รูปที่ 4 อุปกรณ์ IoT + Firebase + MIT App Inventor

2.5 วิธีการทดสอบ

สมมติฐานในการใช้งานระบบระบายอากาศ ในการทดสอบสถานะอากาศและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพื่อการเปรียบเทียบผลแบ่งเป็น 2 รูปแบบ

1) ปิดระบบระบายอากาศ (OFF ventilation mode): กรณีปกติที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรคติดต่อทางอากาศ ปิดระบบระบายอากาศทั้งเครื่องเติมอากาศสะอาดแก่ห้องสถานีพยาบาลและปิดเครื่องดึงอากาศออกจากห้องคนไข้ ประตูของโซนต่างๆ จะถูกเปิดทั้งหมด

2) เปิดระบบระบายอากาศ (ON ventilation mode): เปิดระบบระบายอากาศ 100% ทั้งเครื่องเติมอากาศสะอาดแก่ห้องสถานีพยาบาลและเครื่องดึงอากาศออกจากห้องคนไข้ทุกห้อง เป็นการใช้งานระบบระบายอากาศของหอผู้ป่วยในกรณีที่มีในสถานการณ์การระบาดของโรคแพร่เชื้อทางอากาศ การใช้งานของประตูโซนต่างๆจะปิด และจะเปิดเฉพาะในกรณีที่ใช้เส้นทางในกรณีที่มีการป้องกันการแพร่เชื้อในหอผู้ป่วย

การทดสอบระบบทั้ง 2 รูปแบบข้างต้น เป็นการเดินระบบปรับอากาศและระบายอากาศในสถานะอากาศจริง โดยทำการทดสอบ กรณีที่ 1) และ กรณีที่ 2) จากการทำงานในหอผู้ป่วยเดียวกัน ในช่วงเวลาคนละวันกัน จึงตั้งสมมติฐานโดยทดสอบระบบต่อเนื่อง โดยทดสอบ



กรณีที่ 1) เป็นเวลา 2 วัน และทดสอบกรณีที่ 2) เป็นเวลา 7 วัน ในช่วงเดือนมกราคม 2566 เพื่อให้มีจำนวนชุดข้อมูลจำนวนมากพอในการคัดเลือกคู่เทียบ ในภาวะอากาศภายนอกที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากหอผู้ป่วยมีการใช้งาน

3. ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงผลความดันอากาศ สภาวะอากาศเฉลี่ยของห้องต่าง ๆ ภายในหอผู้ป่วย และอากาศภายนอกหอผู้ป่วย กรณีที่ 1) ปิดระบบระบายอากาศ และกรณีที่ 2) เปิดระบบระบายอากาศ

กรณีที่ 1) ปิดระบบระบายอากาศนั้นความดันของทุกห้องในหอผู้ป่วยเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก เนื่องจากไม่มีการเปิดระบบระบายอากาศเชิงกล ในห้องคนไข้ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 25.18 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 64.85% ห้องคนไข้ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 24.78 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 63.15% ห้องคนไข้ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 24.54 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 68.44% ห้องสถานีพยาบาลมีอุณหภูมิเฉลี่ย 24.76 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 53.29% โดยสภาวะอากาศภายนอกมีอุณหภูมิเฉลี่ย 26.21 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 56.47% อัตราส่วนความชื้นภายในห้องคนไข้สูงกว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายนอก

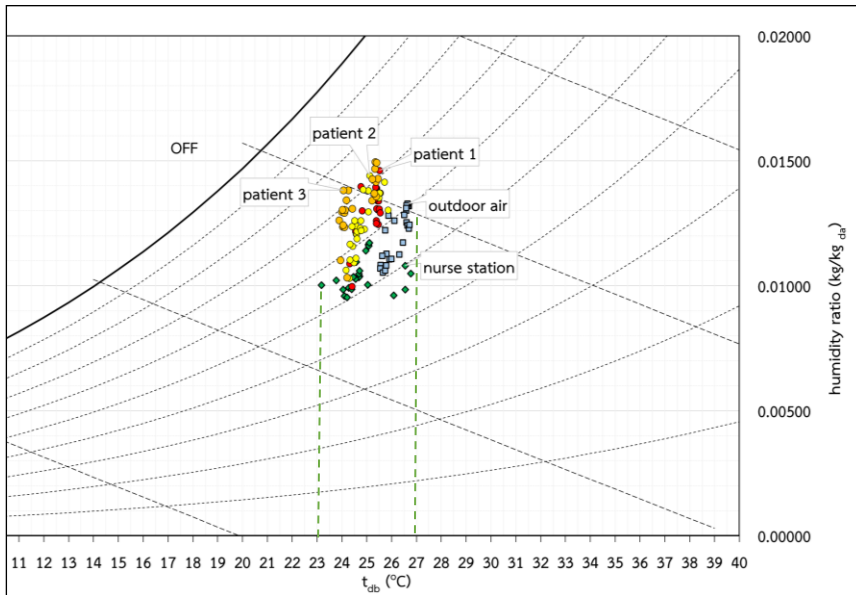
กรณีที่ 2) เมื่อเปิดระบบระบายอากาศความดันห้องสถานีพยาบาลเป็นบวกคือสูงกว่าความดันภายนอก 10 Pa หรือมีความดันสมบูรณ์เท่ากับ 101.325 kPa ห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 และห้องคนไข้ 3 มีความดันเป็นลบเท่ากับ -30 Pa หรือมีความดันสมบูรณ์เท่ากับ

101.295 kPa ในห้องคนไข้ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 25.20 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 61.44% ห้องคนไข้ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 24.78 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 62.47% ห้องคนไข้ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 24.37 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 65.67% ห้องสถานีพยาบาลมีอุณหภูมิเฉลี่ย 24.17 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 55.81% โดยอากาศภายนอกมีอุณหภูมิเฉลี่ย 28.45 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 56.20% อัตราส่วนความชื้นภายในห้องคนไข้ต่ำกว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายนอก สภาวะอากาศรายชั่วโมงภายในและภายนอกหอผู้ป่วยในกรณีที่ 1) ปิดระบบระบายอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงในรูปที่ 5 สำหรับสภาวะอากาศรายชั่วโมงภายในและภายนอกหอผู้ป่วยในกรณีที่ 2) ที่มีการเปิดระบบระบายอากาศ 100% บนแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงในรูปที่ 6 ช่วงระหว่างเส้นประในรูปที่ 5 และในรูปที่ 6 เป็นช่วงอุณหภูมิ 21-24 °C ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60% สภาวะอากาศของห้องคนไข้ติดตามคำแนะนำของ ANSI/ASHRAE Standard 170-2021 [3] ซึ่งพบว่าห้องคนไข้ทั้ง 2 กรณี มีสภาวะอากาศโดยเฉลี่ยสูงกว่าช่วงดังกล่าวทั้ง 2 กรณีกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทุก ๆ 1 นาที ของระบบปรับอากาศในการใช้งานระบบกรณีที่ 1) ตลอด 24 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 7 พบว่าระบบปรับอากาศมีการตัดต่อระบบเป็นระยะตลอดทั้งวันและกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องของระบบปรับอากาศในการใช้งานระบบกรณีที่ 2) ตลอด 24 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่ากรณีที่ 1) ระบบปรับอากาศมีการตัดระบบน้อยกว่ากรณีที่ 2

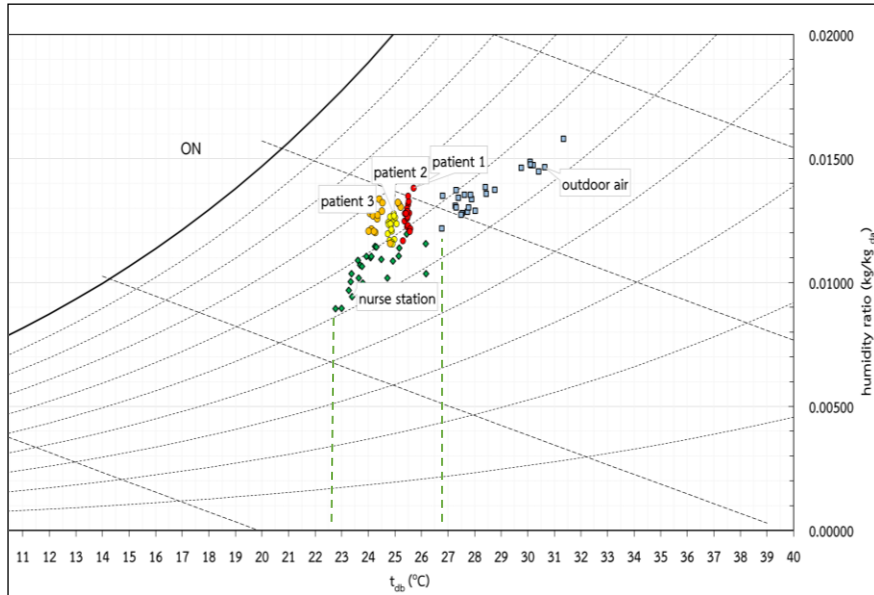


ตารางที่ 3 สภาวะอากาศเฉลี่ยภายนอกและภายในหอผู้ป่วย

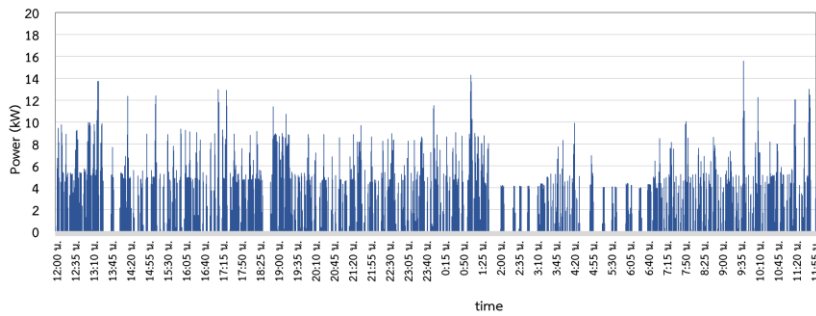
ห้อง	1) ปิดระบบระบายอากาศ (OFF)				2) เปิดระบบระบายอากาศ (ON)			
	ความดันอากาศ (kPa)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อัตราส่วนความชื้น (kg/kg _{da})	ความดันอากาศ (kPa)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อัตราส่วนความชื้น (kg/kg _{da})
อากาศภายนอก	101.325	26.21	56.47	0.01205	101.325	28.45	56.20	0.01370
สถานีพยาบาล	101.325	24.76	53.29	0.01038	101.335	24.17	55.81	0.01052
ห้องคนไข้ 1	101.325	25.18	64.85	0.01304	101.295	25.20	61.44	0.01236
ห้องคนไข้ 2	101.325	24.78	63.15	0.01239	101.295	24.76	62.47	0.01222
ห้องคนไข้ 3	101.325	24.54	68.44	0.01325	101.295	24.37	65.67	0.01255



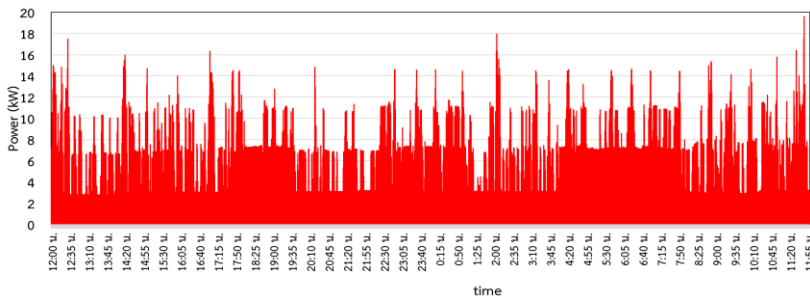
รูปที่ 5 สภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วยรายชั่วโมง กรณีที่ 1)



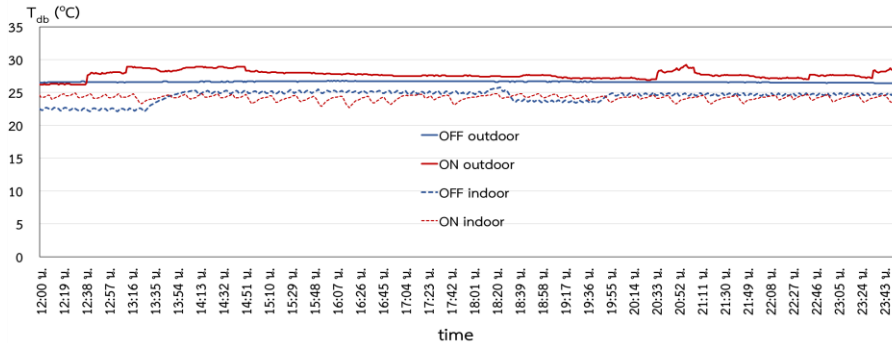
รูปที่ 6 สภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วย รายชั่วโมงกรณีที่ 2)



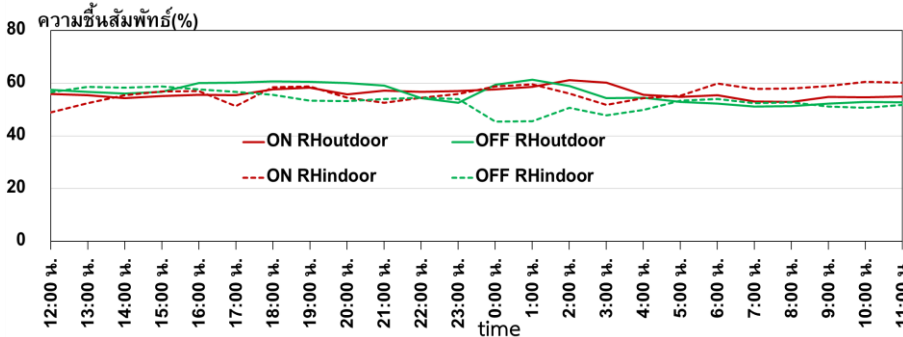
รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ กรณีที่ 1)



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศกรณีที่ 2)



รูปที่ 9 อุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศภายนอกและภายในสถานีพยาบาลรายชั่วโมงกรณี (ที่ 1) และกรณี (ที่ 2)



รูปที่ 10 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกและภายในสถานีพยาบาลรายชั่วโมงกรณี (ที่ 1) และกรณี (ที่ 2)

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศภายนอกและภายในตลอด 24 ชั่วโมงทั้งกรณี (ที่ 1) และ กรณี (ที่ 2) ตามที่แสดงในรูปที่ 9 จะเห็นว่ารูปแบบ (Profile) ของอุณหภูมิมีความแตกต่างกัน โดยในวันที่ทำการทดสอบแบบเปิดระบบระบายอากาศมีอุณหภูมิภายนอกโดยเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในห้องสถานีพยาบาลซึ่งได้รับการเติมอากาศสะอาดจากภายนอกมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดวันทั้ง 2 กรณี

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกและภายในสถานีพยาบาล ตลอด 24 ชั่วโมงทั้งกรณี (ที่ 1) และกรณี (ที่ 2) แสดงในรูปที่ 10 จะเห็นว่าโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์ในวันที่ทำการทดสอบทั้งภายในและภายนอก

อยู่ในช่วง 45%-60% ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจะในการทำความเย็นในส่วนของการความร้อนสัมผัสของระบบปรับอากาศที่สำคัญคืออุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายนอก ส่วนปัจจัยที่ส่งผลในส่วนของการความร้อนแฝงของระบบปรับอากาศ คือ อัตราส่วนความชื้น (w) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นจากสภาวะอากาศทั้งกรณี (ที่ 1) และกรณี (ที่ 2) อัตราส่วนความชื้นในห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 และห้องคนไข้ 3 เปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นในห้องสถานีพยาบาล พบว่าห้องคนไข้ทั้ง 3 ห้องมีปริมาณน้ำในอากาศเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าห้องสถานีพยาบาล ซึ่งสันนิษฐานว่ามีการเติมน้ำให้อากาศมาจากแหล่งอื่น

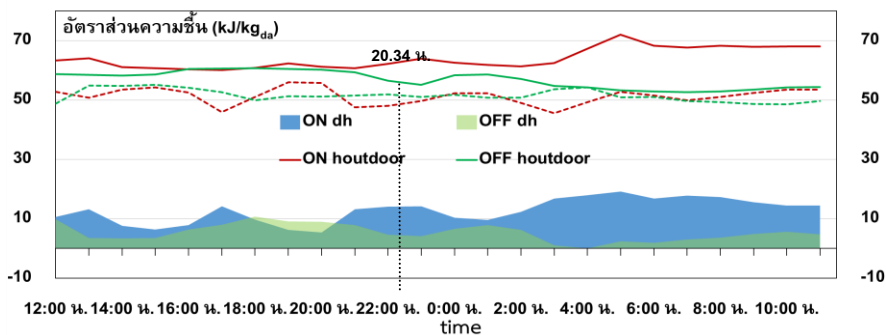


บทความวิจัย

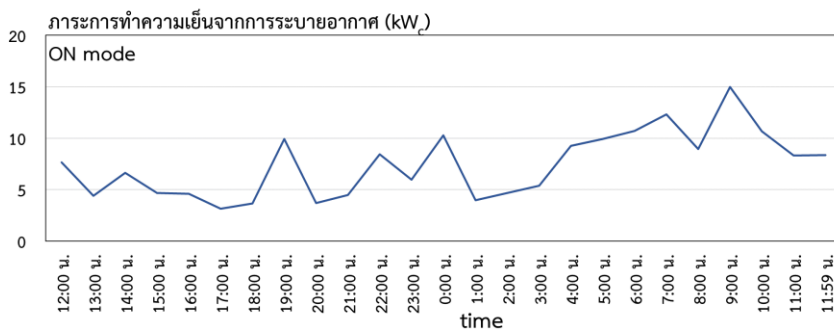
สำหรับในกรณีที่ 2) เมื่อมีการเปิดระบบระบายอากาศจะเป็นการบังคับไฟมีการไหลของอากาศจากห้องสถานีพยาบาลไปยังห้องปรับความดันและไหลเข้าสู่ห้องคนไข้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความแตกต่างของความดันอากาศของห้องต่าง ๆ ในหอผู้ป่วยซึ่งรูปแบบการจัดวางห้องพบว่าผนังห้องคนไข้ติดกับผนังภายนอกและห้องน้ำ ความดันของห้องคนไข้ที่ต่ำกว่าความดันภายนอก เป็นหนึ่งในปัจจัยให้มีอากาศภายนอกซึ่งมีความชื้นรั่วไหลเข้าสู่ห้องคนไข้

เอนทัลปีจำเพาะรายชั่วโมงของอากาศภายนอกและอากาศภายในสถานีพยาบาล แสดงในรูปที่ 11 พื้นที่ในส่วนล่างของรูปแสดงถึงความแตกต่างระหว่างเอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายนอกและอากาศ

ภายในสถานีพยาบาล ซึ่งมีผลต่อภาระในการทำความเย็นในส่วนของคุณสมบัติของระบบปรับอากาศที่สำคัญ หากมีการเปิดระบบระบายอากาศหรือมีการรั่วเข้าของอากาศจากภายนอก รูปที่ 12 แสดงผลการคำนวณภาระการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้นจากการนำอากาศภายนอกเติมเข้าสู่ห้องสะอาดในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอด 24 ชั่วโมง ในกรณีที่มีการเปิดระบบระบายอากาศโดยใช้อัตราการไหลของอากาศที่เติมเข้าสู่ห้องสถานีพยาบาลกับความแตกต่างของเอนทัลปีจำเพาะของอากาศพบว่าส่วนเพิ่มของพลังงานที่ต้องใช้ในการทำความเย็นเพิ่มในส่วนของการระบายอากาศเท่ากับ 176.865 kWh_c



รูปที่ 11 เอนทัลปีจำเพาะของอากาศภายนอกและภายในรายชั่วโมง



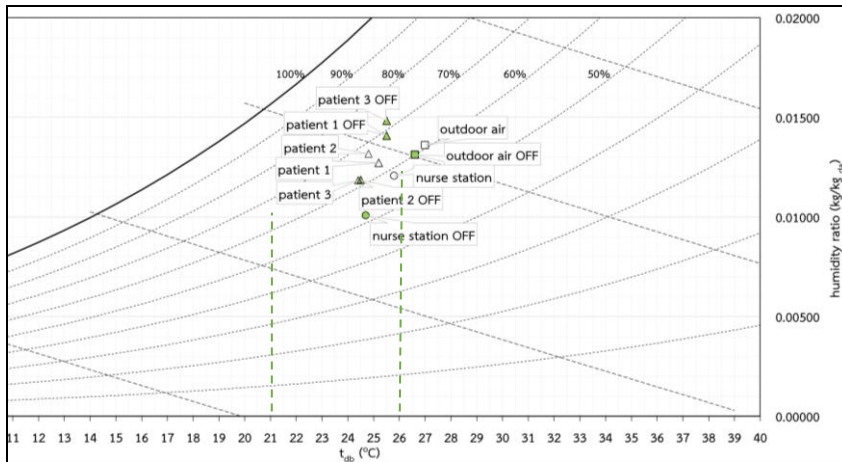
รูปที่ 12 ภาระการทำความเย็นส่วนเพิ่มจากการระบายอากาศ



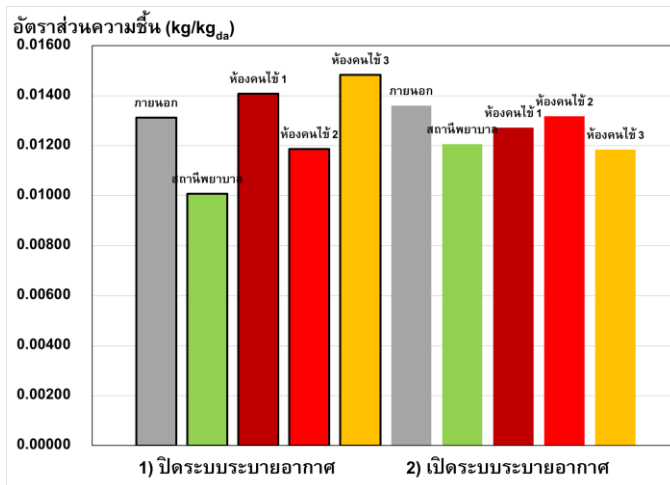
บทความวิจัย

จากรูปที่ 11 พบว่าสภาวะอากาศที่มีความใกล้เคียงกันคือในเวลา 20.34 น. มาพิจารณาดำแหน่งสภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วย กรณีที่ 1) และกรณีที่ 2) ณ เวลา 20.34 น. ตามที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าสภาวะอากาศในห้องผู้ป่วยทุกห้องอยู่นอกช่วงอุณหภูมิ 21-24 °C ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60%

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นของห้องต่าง ๆ ในรูปที่ 14 พบว่าในห้องคนไข้ 1 ห้องคนไข้ 2 และห้องคนไข้ 3 ทั้งกรณีที่เปิดระบบระบายอากาศและกรณีที่ปิดระบบระบายอากาศมีอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าในห้องสถานีพยาบาล



รูปที่ 13 สภาวะอากาศภายนอกและภายในหอผู้ป่วย



รูปที่ 14 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของหอผู้ป่วย กรณีที่ 1) และกรณีที่ 2) เวลา 20.34 น.



ในกรณีที่ไม่มีเปิดระบบระบายอากาศซึ่งความดันเท่ากับความดันอากาศภายนอกพบว่าเมื่ออัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นในห้องคนไข้ทั้ง 3 ห้อง สันนิษฐานได้จากกิจกรรมการใช้น้ำภายในห้องคนไข้ที่มีอ่างล้างมือมีการเช็ดตัวและให้นมให้อาหารคนไข้ตลอดวัน

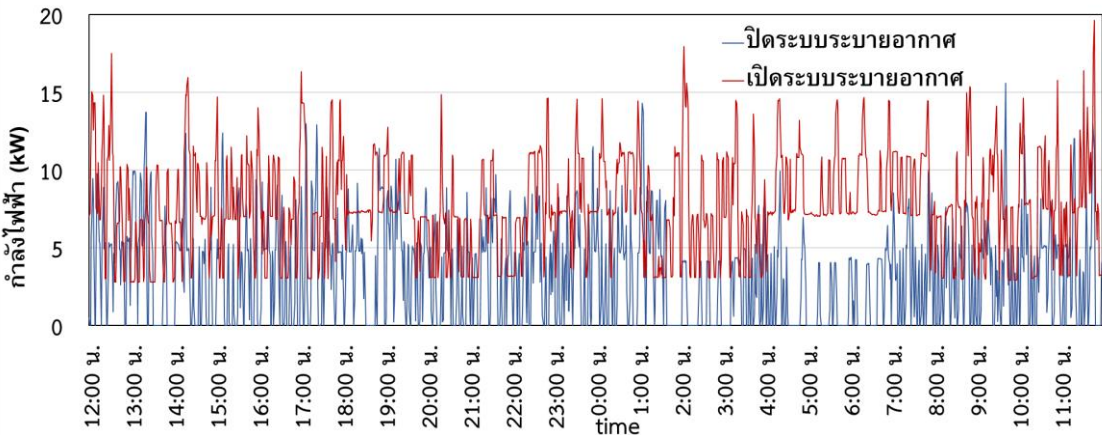
รูปที่ 15 แสดงพื้นที่แตกต่างได้กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของระบบปรับอากาศจากการเปิดระบบระบายอากาศจากการคำนวณพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศกรณีที่เปิดระบบระบายอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง เท่ากับ 76.778 kWh พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศกรณีที่เปิดระบบระบายอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง เท่ากับ 184.823 kWh มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น 108.045 kWh คิดเป็น 140.72%

4. การอภิปรายผลและสรุปผล

จากการศึกษาสภาวะอากาศและวิเคราะห์การใช้พลังงานส่วนเพิ่มจากการระบายอากาศของหอผู้ป่วย

ที่สามารถปรับการใช้งานได้ทั้งในสถานการณ์มีการระบาดของการแพร่โรคติดเชื้อทางอากาศและในการใช้งานกรณีปกติ พบว่าในการเปิดระบบระบายอากาศเพื่อใช้งานในสถานการณ์การระบาดของการแพร่โรคติดเชื้อทางอากาศของหอผู้ป่วยที่ทำการศึกษานี้มีภาระการทำความเย็นเพิ่มขึ้นในส่วนของการเติมอากาศสะอาดเข้าสู่สถานีพยาบาลเพื่อสร้างความดันบวกประมาณ 32% ซึ่งจากการวัดติดตามค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นประมาณ 140%

เมื่อเปิดระบบระบายอากาศ ห้องสถานีพยาบาลได้รับการเติมอากาศและกรองอากาศสะอาดจากภายนอกให้เป็นห้องความดันบวก อัตราส่วนความชื้นจะสูงกว่ากรณีเปิดระบบระบายอากาศ แต่ยังมีสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สุขสบาย สภาวะอากาศในห้องคนไข้ทุกห้องอยู่นอกช่วงที่ ANSI/ASHARE170-2021 แนะนำ



รูปที่ 15 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศจากการเปิด/ปิดระบบระบายอากาศรายชั่วโมง



เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นของห้องคนไข้ นอกเหนือมวลงน้ำในอากาศที่เติมเข้าด้วยเครื่องเติมอากาศส่งอากาศต่อจากห้องความดันบวกผ่านห้องปรับความดันไปยังห้องคนไข้ และมวลงน้ำในอากาศรั่วเข้าห้องความดันลบ พบว่ามีมวลงน้ำถูกเติมเข้าสู่ห้องคนไข้จากสาเหตุอื่นด้วย ซึ่งจากการสังเกตกิจกรรมในพื้นที่พบว่าในห้องคนไข้มีแหล่งน้ำจากอ่างล้างมือที่ใช้ในการเช็ดตัวอาบน้ำคนไข้ ซึ่งหากจำเป็นต้องควบคุมความชื้นในห้องคนไข้ให้อยู่ในเกณฑ์ควรทำการวิเคราะห์หัตสมดุลน้ำในหอผู้ป่วยเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความชื้นในอากาศอย่างละเอียดต่อไป

การศึกษานี้มีข้อจำกัดการทดสอบในหอผู้ป่วยที่มีสภาวะอากาศภายนอกจริง และการเข้าติดตั้งอุปกรณ์ได้ในเวลาที่จำกัดเนื่องจากความจำเป็นในการใช้พื้นที่ของโรงพยาบาล การเปิดระบบระบายอากาศเป็นระบบที่ใช้คนเปิดสวิตช์แยกเครื่อง หากหอผู้ป่วยมีการติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศ และการควบคุมความชื้นของอากาศจะสามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ได้มากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทอีซีเอสเอ็นเนอร์ยีโซลูชัน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดบางรายการและขอขอบคุณโรงพยาบาลชลบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตามข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Burkett, Defining viruses and droplet release: virus transmission modes and mitigation strategies (Part 1), *ASHRAE Journal*, 2021, 63(3), 24-29.

- [2] World Health Organization, Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19, Geneva: World Health Organization, 2021.
- [3] J. Cho, Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: Effect of supply and exhaust air diffuser configurations, *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148, 208-218.
- [4] S. Srivastava, X. Zhao, A. Manay and Q. Chen, Effective ventilation and air disinfection system for reducing coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection risk in office buildings, *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75, 103408.
- [5] M.P. Halloran, Cost-effectiveness of various ASHRAE standard 241-2023 compliance methods, *ASHRAE Journal*, 2024, 16-20.
- [6] W. Zheng, J. Hu, Z. Wang, J. Li, Z. Fu, H. Li, J. Jurasz, S.K. Chou and J. Yan, COVID-19 Impact on operation and energy consumption of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems, *Advances in Applied Energy*, 2021, 3, 100040.
- [7] M.M. Squire, M. Munsamy, G. Lin, A. Telukdarie and T. Igusa, Modeling hospital energy and economic costs for COVID-19 infection control interventions, *Energy and Buildings*, 2021, 242, 110948.



- [8] ASHARE, Ventilation of Health Care Facilities, ASHRAE and American nation Standards Institute and American Society for Health Care Engineers, 2021.
- [9] Patent No.18282, Airborne filtration suction unit: A direct wall installation type, 2021. (in Thai)
- [10] H.E. Kennedy, ASHRAE fundamentals handbook SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook, 2021.
- [11] <https://firebase.google.com/>. (Accessed on 14 November 2022)
- [12] <http://www.appinventor.mit.edu/>. (Accessed on 14 November 2022)



ลักษณะเฉพาะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของสารทำความเย็น R134a ขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดง

ธนชล ช่อมะม่วง ภาณุรุจ ฤกษ์ไอรส และ กิตติ นิลผึ่ง*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 30 กรกฎาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 16 กันยายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 19 กันยายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: บทความนี้ศึกษาผลกระทบของฟลักซ์มวลและคุณภาพไอของสารทำความเย็นและการแทรกโฟมทองแดงภายในช่องทางการไหลที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของสารทำความเย็น R134a ขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดง โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิอิ่มตัว $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ฟลักซ์ความร้อน 20 kW/m^2 คุณภาพไอเฉลี่ยระหว่าง 0.25–0.87 และฟลักซ์มวล 10.8–32.5 $\text{kg/m}^2\text{s}$ โฟมทองแดงที่ใช้มีความหนาแน่นรูพรุน 40 PPI และความพรุน 0.932 ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของคุณภาพไอเฉลี่ยและฟลักซ์มวลส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้น การแทรกโฟมทองแดงมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 21.7 % และ 22.0% ตามลำดับ การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนพบว่าการแทรกโฟมทองแดงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเพิ่มขึ้น 13.7 % (ที่ฟลักซ์มวล = $16.2\text{ kg/m}^2\text{ s}$) เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ไม่มีการแทรกโฟมทองแดง งานวิจัยนี้ช่วยให้มีความรู้ ความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นโดยการใช้โฟมทองแดง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคต

คำสำคัญ: โฟมโลหะ; สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน; ความดันลด; สมรรถนะเชิงความร้อน



Heat Transfer and Flow Characteristics of Refrigerant R134a during Boiling Inside a Plate Heat Exchanger with a Copper Foam Insert

Tanachon Chomamuang, Phanurut Roek-orot and Kittii Nilpueng*

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

* Corresponding author, E-mail: kitti.n@cit.kmutnb.ac.th

Received: 30 July 2024; Revised: 16 September 2024; Accepted: 19 September 2024

Online Published: 19 December 2024

Abstract: This article studies the effects of mass flux, vapor quality of the refrigerant, and the insertion of copper foam inside the flow channel on the heat transfer and pressure drop of refrigerant R134a during boiling in a plate heat exchanger with a copper foam insert. The tests were conducted under conditions of a saturation temperature of 15 °C, a heat flux of 20 kW/m², an average vapor quality between 0.25 and 0.87, and a mass flux between 10.8 and 32.5 kg/m²s. Copper foam with a pore density of 40 PPI and a porosity of 0.932 was used. The experimental results revealed that an increase in average vapor quality and mass flux led to an increase in the heat transfer coefficient and pressure drop. The insertion of copper foam had a significant effect on the heat transfer coefficient and pressure drop, with average increases of 21.7% and 22.0%, respectively. The thermal performance evaluation indicated that the insertion of copper foam (at mass flux = 16.2 kg/m² s) resulted in a 13.7 % increase in the thermal performance of the plate heat exchanger compared to the plate heat exchanger without the copper foam insert. This research provides a better understanding of improving the performance of the plate heat exchangers using copper foam, which can be applied to the design of high-efficiency compact plate heat exchangers in the future.

Keywords: Metal foam; Heat transfer coefficient; Pressure drop; Thermal performance



1. บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทหนึ่งที่มีนิยมนำใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมเครื่องจักร เนื่องจากมีข้อดีเหนือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่น ๆ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง และมีขนาดกะทัดรัด อย่างไรก็ตาม ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเป็นที่ต้องการอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม สอดคล้องกับแนวคิดใหม่ของการออกแบบอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก เช่น วงจรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก (Mini Organic Rankine Cycles) วงจรทำความเย็นขนาดเล็ก และการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในอดีตที่ผ่านมาจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เช่น พื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความขรุขระ [1] หรือออกแบบคลื่นลอนของแผ่นแลกเปลี่ยนมีขนาดเล็ก [2] โดยพบว่าเทคนิคหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจคือการแทรกโฟมโลหะในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากโฟมโลหะมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรสูง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมีสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น ตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเช่น Zhu et al. [3] ศึกษารูปแบบการไหลสองสถานะของ R410A ในท่อแนวนอนที่เติมเต็มด้วยโฟมทองแดงภายในท่อแนวนอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.9 mm โดยใช้โฟมทองแดงที่มีความพรุน 5 หรือ 10 PPI (Pore per inch) ผลการทดลองพบว่าโฟมทองแดง

ช่วยส่งเสริมการเกิดการไหลวงแหวน และผลกระทบนี้เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของรูพรุนของโฟมโลหะเพิ่มขึ้น Abadi et al. [4] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการไหลสถานะเดียวของ R245fa ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมโลหะ โดยศึกษาการใช้โฟมโลหะที่มีความหนาแน่นของรูพรุน 20, 30 และ 60 PPI พวกเขารายงานว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้โฟมโลหะมีความหนาแน่นรูพรุน 20 PPI, 30 PPI และ 60 PPI ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 3.5 เท่า, 4 เท่า และ 5.1 เท่า ตามลำดับ Koudiri and Madani [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความดันตกภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กที่มีโฟมโลหะ โดยใช้ความเร็วที่ทางเข้าตั้งแต่ 0.02 - 0.06 m/s และ ฟลักซ์ความร้อนในการเดือดตั้งแต่ 30 - 70 kW/m² ผลการวิจัยพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เติมโฟมทองแดงช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนขึ้นประมาณ 130 ถึง 300% Nilpueng et al. [6] ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันตกของการไหลของน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกด้วยโฟมทองแดง การทดลองดำเนินการที่ตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1200 - 2000 และความหนาแน่นของรูพรุนของโฟมทองแดงระหว่าง 30 - 50 PPI ผลการวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 20.23 %, 29.37 %, และ 40.28 % สำหรับความหนาแน่นของรูพรุนที่ 30 PPI, 40 PPI, และ 50 PPI เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ไม่มีโฟมทองแดง Nilpueng et al. [7] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่มีการแทรกโฟมโลหะร่องลายตาราง



ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของร่องโพมทองแดงลดลง และพบว่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อโพมโลหะมีอัตราการแทรกระหว่าง 50 – 75 % Chandora et al. [8] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่มีการเติมโพมทองแดงบนพื้นผิวผลการทดลองพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เติมโพมทองแดงมีค่าตัวเลขนัสเซลสูงกว่า 1.97 เท่า แต่มีความดันลดสูงขึ้น 1.89 เท่า เมื่อเทียบกับเครื่องที่ไม่มีโพมทองแดง Mohammadi et al. [9] ศึกษาผลกระทบของการแทรกโพมทองแดงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดของสารทำความเย็น R134a ภายในท่อ ผลการวิจัยพบว่าการแทรกโพมทองแดงเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 200%

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าได้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เช่น พื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความขรุขระ หรือออกแบบคลื่นลอนของแผ่นแลกเปลี่ยนขนาดเล็ก โดยเทคนิคหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจคือการแทรกโพมโลหะในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยงานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ได้ประยุกต์นำโพมทองแดงมาใช้สำหรับการไหลสถานะเดียวภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น และสำหรับการไหลสองสถานะจะพบการศึกษาภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ อย่างไรก็ตาม พบว่าการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโพมโลหะระหว่าง

การเดือดยังมีการศึกษาอยู่น้อยมาก จึงทำให้ขาดความรู้ความเข้าใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิอิ่มตัว คุณภาพไอ ฟลักซ์ความร้อน ฟลักซ์มวล และการแทรกโพมโลหะที่มีต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ทำการศึกษาผลกระทบของคุณภาพไอและฟลักซ์มวลของการไหลขณะเดือดของสารทำความเย็น R134a ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโพมทองแดง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่แทรกและไม่แทรกโพมทองแดง

2. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการดำเนินงานวิจัย

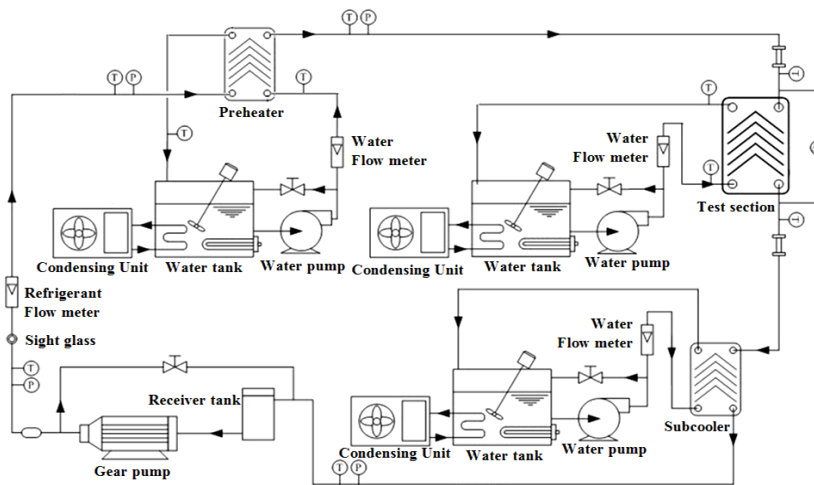
2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นตามแผนภาพ (รูปที่ 1) เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลของสารทำความเย็นขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่แทรกด้วยโพมทองแดง อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยวงจรรให้ความร้อนล่วงหน้า (Preheater), ชุดทดสอบ (Test Section), และวงจรรทำความเย็น (Subcooler) โดยสารทำความเย็นจะไหลเวียนภายในวงจรรด้วยปั๊มฟันเฟือง (Gear Pump) ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลของสารทำความเย็นตามที่กำหนด สารทำความเย็นที่ออกจากปั๊มฟันเฟืองจะไหลผ่านตัวกรองและลดความชื้น (Filter/Drier), เครื่องมีวัดอัตราการไหลของสารทำความเย็น, ชุดให้ความร้อนล่วงหน้า เข้าสู่ชุดทดสอบ

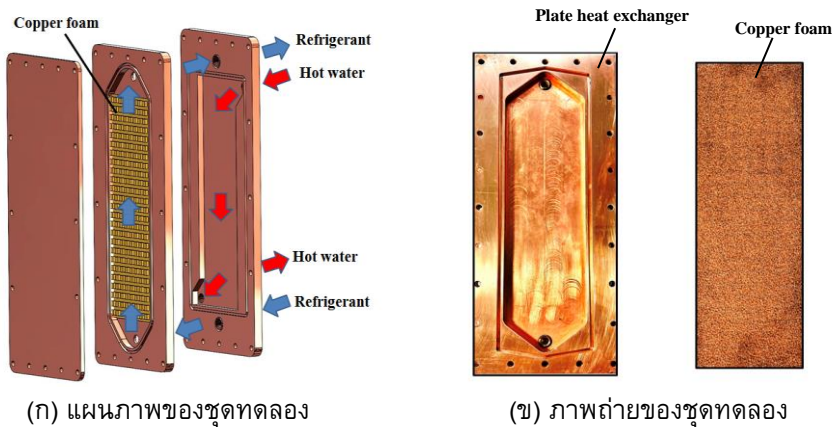


ชุดทำความเย็น (Subcooler) ก่อนที่จะไหลไปยังถึงฟักสารทำความเย็นเหลว และไหลวนกลับไปยังปั๊มพั่นเฟือง สารทำความเย็นที่ไหลเข้าสู่ชุดทำความร้อนล่วงหน้าจะถูกควบคุมคุณภาพไอของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบโดยการปรับอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ไหลเข้าวงจรให้ความร้อนล่วงหน้า อุณหภูมิมีอิทธิพลของสารทำความเย็นภายในชุด

ทดสอบจะถูกควบคุมโดยการปรับอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบ การปรับค่าความร้อนต่อพื้นที่ (Heat Flux) ของชุดทดสอบทำได้โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำร้อนที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบ หลังจากนั้นไอสารทำความเย็นออกจากชุดทดสอบจะถูกควบแน่นเป็นสารทำความเย็นเหลวภายในชุดทำความเย็น ก่อนที่จะไหลไปยังถึงฟักสารทำความเย็นเหลว



รูปที่ 1 แผนภาพชุดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 ชุดทดสอบ



ในการศึกษานี้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นทำจากวัสดุทองแดงที่มีการจัดเรียงการไหลสวนกัน (Counter Flow) และเป็นการไหลแบบครั้งเดียว (Single Pass) ถูกใช้เป็นชุดทดสอบ (รูปที่ 2) โดยสายของไหลเย็นคือสารทำความเย็น R134a ในขณะที่สายของไหลร้อนคือน้ำร้อน แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้มีจำนวน 3 แผ่น โดยมีขนาดความกว้าง 150 mm ยาว 360 mm และหนา 8 mm โฟมทองแดงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 80 mm ความยาว 260 mm และความหนา 5 mm ถูกแทรกภายในช่องทางการไหลของสายของไหลเย็น โฟมทองแดงที่ใช้มีความหนาแน่นของรูพรุน 40 PPI (Pore per inch) และความพรุน (Porosity) 0.932 และความซึมผ่าน (Permeability) $6.62 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ โดยมีค่าการนำความร้อน (Effective Thermal Conductivity) และความร้อนจำเพาะเท่ากับ 10.1 W/m K และ 0.385 kJ/kg K ตามลำดับ เพื่อคำนวณการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของการไหลของสารทำความเย็นขณะเดือดได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ กล่าวคือเทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T-type thermocouple) ถูกติดตั้งที่ทางเข้าและทางออกของสายของไหลเย็นและร้อน เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำ และสารทำความเย็น ความแม่นยำ (Accuracy) ของเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับ $\pm 0.4\%$ ค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็นอ่านค่าจากเกจวัดความดัน (Pressure Gauge) ซึ่งมีความแม่นยำ $\pm 1.6\%$ ส่วนความดันลดของสารทำความเย็นภายในชุดทดสอบวัดค่าโดยใช้เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ซึ่งมีความแม่นยำเท่ากับ $\pm 0.195 \text{ kPa}$ การวัดอัตราการไหลของน้ำและสารทำความเย็นทำได้โดยเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ

(Water Flow Meter) และเครื่องมือวัดอัตราการไหลสารทำความเย็น (Refrigerant Flow Meter) ที่มีค่าความแม่นยำเท่ากับ $\pm 4\%$ และ $\pm 1.5\%$ ตามลำดับ ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และความดันลดถูกคำนวณโดยอิงตามวิธีผลรวมรากกำลังสอง (Root Sum Square Method) ซึ่งมีเฉลี่ยค่าเท่ากับ $\pm 12.35\%$ และ $\pm 3.85\%$ ตามลำดับ ในการศึกษานี้ทำการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิอิ่มตัวเท่ากับ 15°C ฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 20 kW/m^2 ฟลักซ์มวลระหว่าง $10.8 - 32.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ และคุณภาพไอเฉลี่ยระหว่าง 0.25 - 0.87 โดยจะเก็บผลการทดลองเมื่อสารทำความเย็นและน้ำอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady Conditions)

2.2 การคำนวณวิเคราะห์ผล

ข้อมูลพื้นฐานที่กักได้จากการทดลอง กล่าวคืออุณหภูมิอัตราการไหลของน้ำและสารทำความเย็น และความดันลดได้ถูกนำมาคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องตามสมการต่อไปนี้

1) คุณภาพไอเฉลี่ย

คุณภาพไอเฉลี่ย (x_m) ของสารทำความเย็นถูกคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$x_m = (x_{ts,in} + x_{ts,out}) / 2 \quad (1)$$

เมื่อ $x_{ts,in}$ และ $x_{ts,out}$ คือคุณภาพไอของสารทำความเย็นที่ทางเข้าและออกจากชุดทดสอบ

- คุณภาพไอของสารทำความเย็นที่ทางเข้าชุดทดสอบ ($x_{ts,in}$) คำนวณได้จากสมการ

$$x_{ts,in} = (i_{ts,in} - i_{l@ts,in}) / i_{lv@ts,in} \quad (2)$$



บทความวิจัย

เมื่อ $i_{ts,in}$ คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ทางเข้าชุดทดสอบ, $i_{@ts,in}$ และ $i_{lv@ts,in}$ คือเอนทัลปีของสารทำความเย็นเหลวอิ่มตัวและเอนทัลปีของการระเหยตัวสารทำความเย็นภายในชุดทดสอบ ตามลำดับ

- เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ทางเข้าชุดทดสอบ ($i_{ts,in}$) คำนวณได้จาก

$$i_{ts,in} = i_{ph,in} + (Q_{ph} / \dot{m}_r) \quad (3)$$

- อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จ่ายให้กับชุดให้ความร้อนล่วงหน้า (Q_{ph}) ถูกคำนวณจาก

$$Q_{ph} = \dot{m}_{w,ph} c_{p,w} (T_{w,in} - T_{w,out})_{ph} \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{m}_{w,ph}$ คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าสู่ชุดให้ความร้อนล่วงหน้า $c_{p,w}$ คือความร้อนจำเพาะของน้ำและ $(T_{w,in} - T_{w,out})_{ph}$ คือผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของชุดให้ความร้อนล่วงหน้า

- คุณภาพไของสารทำความเย็นที่ทางออกชุดทดสอบ ($x_{ts,out}$) คำนวณได้จากสมการ

$$x_{ts,out} = (i_{ts,out} - i_{@ts,out}) / i_{lv@ts,out} \quad (5)$$

เมื่อ $i_{ts,out}$ คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ทางออกชุดทดสอบ, $i_{@ts,out}$ และ $i_{lv@ts,out}$ คือเอนทัลปีของสารทำความเย็นเหลวอิ่มตัวและเอนทัลปีของการระเหยตัวสารทำความเย็นภายในชุดทดสอบตามลำดับ

- เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ทางออกชุดทดสอบ ($i_{ts,out}$) คำนวณได้จาก

$$i_{ts,out} = i_{ts,in} + (Q_{ts} / \dot{m}_r) \quad (6)$$

- อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่ชุดทดสอบ (Q_{ts}) หาได้ตามสมการ

$$Q_{ts} = \dot{m}_{w,ts} c_{p,w} (T_{w,in} - T_{w,out})_{ts} \quad (7)$$

เมื่อ $\dot{m}_{w,ts}$ คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบ $c_{p,w}$ คือความร้อนจำเพาะของน้ำ และ $(T_{w,in} - T_{w,out})_{ts}$ คือผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของชุดทดสอบ

2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ภายในชุดทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U = Q_{ts} / A \Delta T_{ln} \quad (8)$$

และ

$$\Delta T_{ln} = \frac{[(T_{w,in} - T_{r,out}) - (T_{w,out} - T_{r,in})]}{\ln((T_{w,in} - T_{r,out}) / (T_{w,out} - T_{r,in}))} \quad (9)$$

เมื่อ $T_{r,in}$ และ $T_{r,out}$ คืออุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางเข้าและทางออก โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทำความเย็นระหว่างการเปลี่ยนสถานะมีผลมาจากความดันลดภายในชุดทดสอบ

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น (h_r) คำนวณได้ตามสมการ

$$h_r = \left(\frac{1}{U} - \frac{\Delta x}{k_s} - \frac{1}{h_w} \right)^{-1} \quad (10)$$

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองและเก็บผลการทดลองในกรณีการไหลสถานะเดียวระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นภายในชุดทดสอบและใช้เทคนิคของวิลสัน (Wilson Plot Techniques) เพื่อสร้างสหสัมพันธ์ของตัวเลขนัสเซลสำหรับการไหลของน้ำ สำหรับใช้คำนวณ



ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำ (h_w) ดังสมการต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h_w D_h}{k} = 0.218 Re^{0.662} Pr^{0.33} \quad (11)$$

3) ความดันลดเนื่องจากความเสียดทาน

ความดันลดเนื่องจากความเสียดทานภายในชุดทดสอบสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$\Delta P_F = \Delta P_T - \Delta P_G - \Delta P_M - \Delta P_A \quad (12)$$

โดยที่ ΔP_T คือความดันลดรวมซึ่งได้จากการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดความดันลด ΔP_M คือความดันลดที่ทางเข้าและออก ΔP_G คือความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ΔP_A คือความดันลดเนื่องจากแรง

- ความดันลดที่ทางเข้าและออก ΔP_M คำนวณได้โดยใช้สมการของ Shah and Focke [10] คือ

$$\Delta P_M \cong 1.5 \left(G^2 / 2\rho_m \right) \quad (13)$$

- ความหนาแน่นของสารทำความเย็นเฉลี่ยหาค่าได้จากสมการ

$$\rho_m = \left[\frac{x_m}{\rho_v} + \frac{1-x_m}{\rho_l} \right]^{-1} \quad (14)$$

ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและความดันลดเนื่องจากแรง [11] คำนวณได้จาก

$$\Delta P_G = \rho_m g L \quad (15)$$

$$\Delta P_A = G^2 \Delta x \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (16)$$

เมื่อ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง L คือระยะห่างในแนวตั้งของทางเข้าและทางออก

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในเนื้อหาส่วนนี้ได้นำเสนอผลการทดลองของผลกระทบของตัวแปรต่างๆ กล่าวคือคุณภาพไอเฉลี่ย ฟลักซ์มวลและ การแทรกโฟมทองแดง ที่มีต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และการไหลของสารทำความเย็นขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (PHE) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดง (PHE_CF) ดังอธิบายต่อไปนี้

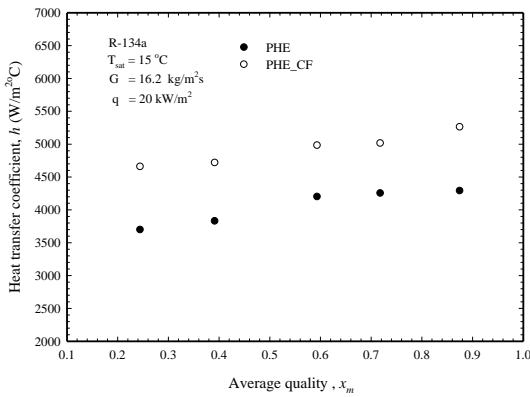
ผลการทดลองในรูปแบบที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของคุณภาพไอเฉลี่ยมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าปริมาณจำเพาะของสารทำความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของคุณภาพไอ จึงส่งผลให้ความเร็วของสารทำความเย็นภายในช่องทางการไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลกระทบนี้ทำให้ความปั่นป่วนของการไหลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาภายใต้สภาวะทดสอบใกล้เคียงกัน พบว่าการแทรกโฟมทองแดงภายในช่องทางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 2.17 และ 22.0 % ตามลำดับ นั่นเป็นเพราะว่าโฟม ทองแดงมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และยังพบว่าโครงสร้างของวัสดุพอรุนที่มีความคดเคี้ยวก่อให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลภายในช่องทางการไหลสูงขึ้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



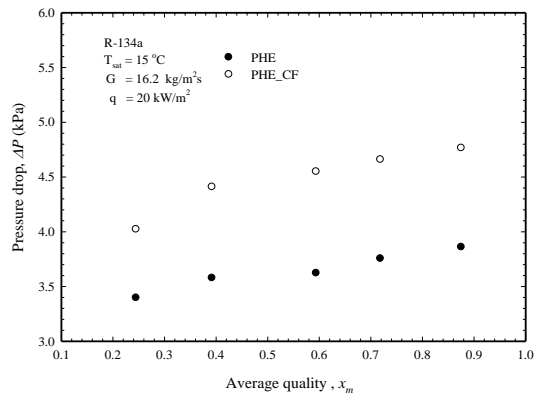
บทความวิจัย

ในรูปที่ 4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์มวลของสารทำความเย็นที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนของค่าฟลักซ์มวล โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 9.1 และ 52.9 % ตามลำดับ เมื่อฟลักซ์มวลของสารทำความเย็นเพิ่มขึ้นระหว่าง 10.8-32.5 kg/m²s และเมื่อพิจารณาผลของการ

แทรกโฟมทองแดงภายในช่องทางการไหลพบว่า มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้น 9.8 และ 14.8 % ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเร็วของสารทำความเย็นและความปั่นป่วนในการไหลภายในช่องทางเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปรับเพิ่มค่าของฟลักซ์มวลและการแทรกโฟมทองแดงทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันก่อให้เกิด

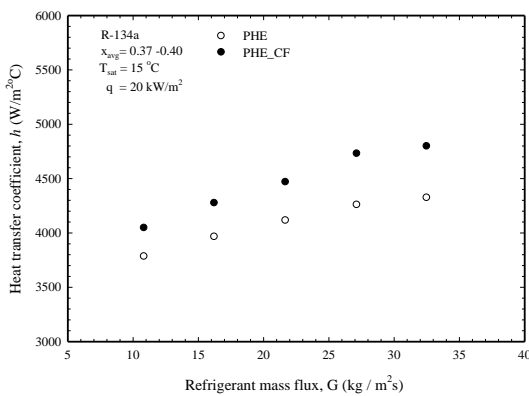


(ก)

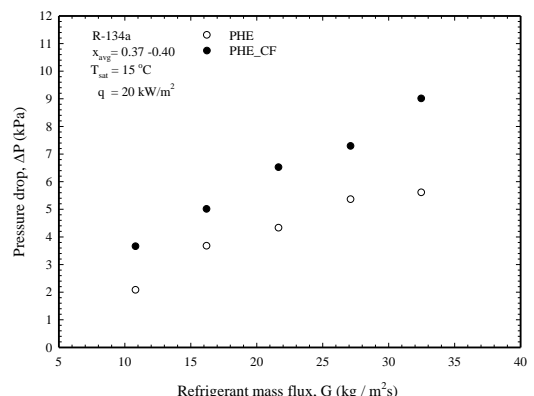


(ข)

รูปที่ 3 ผลกระทบของคุณภาพไอเฉลี่ยที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ผลกระทบของฟลักซ์มวลที่มีต่อสัมประสิทธิ์



บทความวิจัย

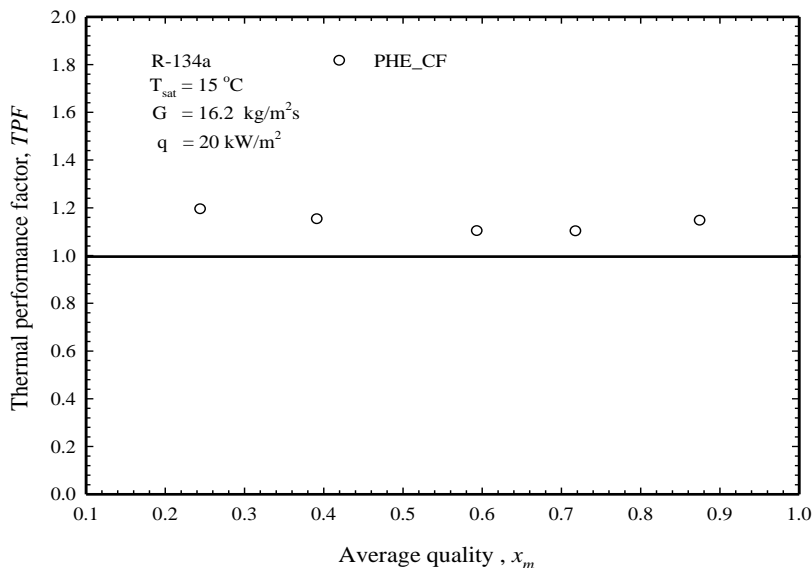
ความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น ผลกระทบดังกล่าวมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนและความดันลดในการศึกษาได้ทำการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดงเทียบกับที่ไม่แทรกโฟมทองแดงโดยใช้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Performance Factor, TPF)

$$TPF = (Nu / Nu_0) / (\Delta P_F / \Delta P_{F,0})^{1/3}$$

เมื่อ Nu คือตัวเลขนัสเซล, ΔP_F คือความดันลดเนื่องจากความเสียดทาน โดยตัวห้อย 0 คือค่าที่ได้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ไม่แทรกโฟมทองแดง

ผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงไปของคุณภาพไอมีผลให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิง

ความร้อน (TPF) มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดงมีค่าสูงกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ไม่แทรกโฟมทองแดงโดยพบว่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 13.7% ซึ่งอธิบายได้ว่าแม้ว่าทั้งการแทรกโฟมทองแดงทำให้การเพิ่มขึ้นของตัวเลขนัสเซลและความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของตัวเลขนัสเซลมีค่าสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลดจึงทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดงมีค่าสูงกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ไม่แทรกโฟมทองแดงซึ่งพบว่าผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาสำหรับการไหลของน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่แทรกโฟมทองแดง [7]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพไอเฉลี่ย และ ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน



4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนำเสนอผลการทดลองของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดของสารทำความเย็น R134a ขณะเดือดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดง โดยทำการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิอิ่มตัวเท่ากับ 15 °C ฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 20 kW/m² ฟลักซ์มวลระหว่าง 10.8 – 32.5 kg/m²s และคุณภาพไอเฉลี่ยระหว่าง 0.25 -0.87 ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของคุณภาพไอเฉลี่ย และฟลักซ์มวลมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อพิจารณาภายใต้สภาวะทดสอบใกล้เคียงกัน พบว่าการแทรกโฟมทองแดงภายในช่องทางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 21.7 และ 22.0 % ตามลำดับ ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.137 (ที่ฟลักซ์มวล = 16.2 kg/m² s) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทรกโฟมทองแดงมีผลทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแทรกโฟมทองแดงเพิ่มขึ้น 13.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ไม่แทรกโฟมทองแดง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทางการเงินสำหรับการวิจัยครั้งนี้ (ทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม, สัญญาเลขที่ N41A640148)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Soontarapiromsook, L.G. Asirvatham, A.S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises and H.S. Ahn, Experimental investigation on two-phase heat transfer of R-134a during vaporization in a plate heat exchanger with rough surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160, 120221.
- [2] W-C. Lao, Y-D. Fang, Q-H. Chen, L-J. Xu, H-N. Yang and Y-Q. Huang, Experimental investigation on the flow boiling of R134a in a plate heat exchanger with mini-wavy corrugations, *International Journal of Refrigeration*, 2024, 162, 53-63.
- [3] Y. Zhu, H. Hu, S. Sun and G. Ding, Flow boiling of refrigerant in horizontal metal-foam filled tubes: Part 1 – Two-phase flow pattern visualization, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 91, 446–453.
- [4] G.B. Abadi, C. Moon and K.C. Kim, Experimental study on single-phase heat transfer and pressure drop of refrigerants in a plate heat exchanger with metal-foam-filled channels, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102, 423–431.
- [5] A. Koudiri and B. Madani, Thermal and Hydrodynamic Performance of Flow Boiling Through a Heat Exchanger Filled with Various Metallic Foam Samples, *Chemical Engineering and Processing*, 2017, 121, 162-169.



- [6] K. Nilpueng, L.G. Asirvatham, A.S. Dalkılıç, O. Mahian, H.S. Ahn and S. Wongwises, Heat transfer and fluid flow characteristics in a plate heat exchanger filled with copper foam, *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56, 3261–3271.
- [7] K. Nilpueng, T. Chomamuang, M. Mesgarpour, O. Mahian and S. Wongwises, Thermal-hydraulic performance of a plate heat exchanger with grooved copper foam, *Case Studied in Thermal Engineering*, 2023, 51, 103525.
- [8] N. Chandora, A. Mani, S. Advait, Investigation of heat transfer and pressure drop characteristics in metal-foam filled channels in a plate heat exchanger: A comparative experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 2024, 241, 122368.
- [9] R. Mohammadi, M.A. Akhavan-Behabadi, B. Sajadi, A. Nosrati, Effect of using gradient metal foam inserts on heat transfer and pressure drop during R134a flow boiling: An empirical investigation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024, 109, 109500.
- [10] R.K. Shah and W.W. Focke, Plate heat exchangers and their design theory, in: R.K. Shah et al. (Eds.), *Heat Transfer Equipment Design*, Hemisphere, Washington, DC, 1988.
- [11] J.G. Collier and J.R. Thome, *Convective Boiling and Condensation*, 3rd ed., Clarendon Press, 1994.



การออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย

ขวัญชัย เสวีพันธ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 1 กรกฎาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 23 กันยายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 10 ตุลาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย และเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายสำหรับกลุ่มผ้าทอในอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี เพื่อแก้ไขปัญหาการคัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุ๋ยฝ้ายให้ใช้ระยะเวลาในการคัดแยกน้อยลง รวมถึงสามารถคัดแยกฝ้ายได้ในปริมาณตามความต้องการ โดยเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ออกแบบมีขนาดโดยรวม ความกว้าง x ความยาว x ความสูง ประมาณ 500 x 280 x 410 มิลลิเมตร ซึ่งมีเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา ได้แก่ ชุดโครงเครื่อง ชุดรองเมล็ด ชุดใบเลื่อย ชุดแปรงบิดฝ้าย ชุดช่วยเพิ่มการหมุนฝ้าย ชุดรองรับฝ้าย ชุดส่งกำลัง ชุดต้นกำลัง ชุดควบคุมการทำงาน เป็นต้น ผลการทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย พบว่า จากการทดสอบและใช้งานจริงของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายทั้ง 2 สายพันธุ์ออกจากปุ๋ยฝ้ายได้จำนวน 25 กรัม ภายในเวลา 1 นาที โดยที่ไม่มีเมล็ดแตกปะปนไปกับปุ๋ยฝ้าย และผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่สร้างขึ้น มีความคุ้มค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่มีจำหน่ายทั่วไป และรวมถึงการจ้างเหมาและการใช้การอ้วฝ้ายแบบเดิมอีกด้วย โดยมีระยะคืนทุนประมาณ 5 เดือน 1 วัน และจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1,816 กิโลกรัม / ปี มีค่าใช้จ่ายในการทำงานอยู่ที่ 33.4 บาท / กิโลกรัม

คำสำคัญ: เครื่องคัดแยก; เมล็ดฝ้าย; การออกแบบและการพัฒนา; ประสิทธิภาพ



Design and Development of Cotton Seed Sorting Machine

Kwanchai Saeweenan*

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

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

Received: 1 July 2024; Revised: 23 September 2024; Accepted: 10 October 2024

Online Published: 19 December 2024

Abstract: This research was conducted with the objective of designing and developing a cotton seed sorting machine and assess its efficiency for a weaving group in Ban Rai District, Uthai Thani Province. The aim was to solve the problem of separating cotton seeds from cotton fibers more quickly while meeting the required quantity. The designed cotton seed sorting machine has overall dimensions of approximately 500 x 280 x 410 millimeters, and the tools used in its development include the machine frame set, seed filter set, saw blade set, cotton brush set, cotton rotation aid set, cotton holder set, power transmission set, power source set, and control system set. The test results on the performance and efficiency of the cotton seed sorting showed that the machine was able to separate 25 grams of cotton seeds from cotton fibers of two different varieties within 1 minute, with no broken seeds mixed in with the cotton fibers. In comparison with other commercially available cotton seed sorting machines, as well as traditional methods like hiring cotton ginning or manual separation, this machine proved to be the most cost-effective. The payback period is approximately 5 months and 1 day, and the breakeven point is 1,816 kilograms per year, with an operating cost of 33.4 baht per kilogram.

Keywords: Sorting Machine; Cotton Seed; Design and Development; Efficiency



1. บทนำ

ผ้าทอพื้นเมืองของกลุ่มชุมชน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี [1] ถือเป็นแหล่งราชินีผ้าทอที่ถูกถักทอด้วยมือที่สืบทอดกันมาอย่างยาวนาน ซึ่งผ้าทอที่ทรงคุณค่าทุกผืนล้วนมาจากวัตถุดิบที่เรียกว่า “ฝ้าย” ฝ้ายจึงเป็นพืชเส้นใยที่มีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตผ้าทอ เนื่องจากผ้าทอพื้นเมืองของกลุ่มชุมชน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี มีเอกลักษณ์ที่โดดเด่น สวยงาม และยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกจำหน่ายโดยกลุ่มทอผ้าพื้นเมือง ทำให้ผ้าทอพื้นเมืองได้รับรางวัลมากมายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งมีผู้สนใจและชื่นชอบเป็นจำนวนมาก จนกลายเป็นตลาดผ้าทอที่มีความโตงตึงและขยายตัวอย่างก้าวกระโดดส่งผลให้เกิดการขยายตัวของตลาดผ้าทออย่างต่อเนื่อง ทำให้กลุ่มทอผ้าพื้นเมืองนี้ส่งผลิตภัณฑ์ผ้าทอเพื่อออกจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด เนื่องจากกระบวนการเตรียมเส้นใยฝ้ายโดยเฉพาะกระบวนการคัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุยฝ้ายเป็นไปอย่างล่าช้า เพราะกลุ่มทอผ้าพื้นเมืองยังขาดเทคโนโลยีที่จะช่วยสนับสนุนให้มีกำลังการผลิตมากขึ้นตามความต้องการของตลาด ซึ่งเดิมกลุ่มชุมชนยังคงใช้เครื่องมือคัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุยฝ้ายที่เป็นภูมิปัญญาชาวบ้าน เรียกกันว่า “อ้าวฝ้าย” หรือ “หีบฝ้าย” และเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปนั้น [2] เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จึงมีราคาสูงและเกินกำลังการผลิตของกลุ่มทอผ้าพื้นเมืองมากเกินไป รวมถึงยังมีโอกาสที่เมล็ดฝ้ายจะแตกปะปนไปกับเส้นใยฝ้าย ส่งผลให้คุณภาพเส้นใยต่ำลงอีกด้วย ทำให้กลุ่มทอผ้าพื้นเมือง

ไม่สามารถนำเครื่องจักรเหล่านี้มาทดแทนกระบวนการคัดแยกเมล็ดฝ้ายแบบเดิมได้

จากการทบทวนงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่า มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดอยู่มากมาย ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีการออกแบบและการพัฒนาตามฟังก์ชันการทำงานของเครื่อง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาแตกต่างกันไป เช่น A. Obidov และคณะ [3] ได้ทำการวิจัยเพื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยที่ผลิตในองค์กรโดยการสร้างอุปกรณ์คัดแยกเมล็ดฝ้ายปั่นซึ่งจะแยกเมล็ดฝ้ายออกเป็นส่วนตัวต่างๆ ตามขนาดเชิงเรขาคณิต และโดยการผ่านการปั่นซ้ำ เพื่อแยกเมล็ดที่มีเส้นใยยาวกว่าออกจากเมล็ดอื่นๆ ได้มีการพัฒนารูปแบบใหม่สำหรับการคัดแยกเมล็ดฝ้ายเชิงเรขาคณิตในช่วงเก็บเกี่ยว และการทดลองได้กำหนดประสิทธิภาพและค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ โดยใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการศึกษา ได้มีการสร้างกราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ การปรับปรุงอุปกรณ์คัดแยกเมล็ดฝ้าย เพื่อเพิ่มผลผลิตเส้นใยธรรมชาติในโรงงานปั่นฝ้าย ซึ่งปัญหาที่ส่งผลเสียต่อผลผลิตเส้นใย คือ การปรับปรุงกระบวนการคัดเลือกเมล็ดที่ยังไม่ได้ปั่น R. Muradov และคณะ [4] ได้ทำการหาสาเหตุของการเคลื่อนย้ายมวลเมล็ดฝ้ายและการเกิดการหยุดชะงักในสกรูลำเลียง โดยพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูลำเลียง ระยะพิทช์ ความเร็วในการหมุน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเมล็ดกับเปลือกของลำเลียง ทำให้สามารถหาความแตกต่างของความเร็วนี้นำไปสู่การอัดมวลเมล็ด



ในการลำเลียงที่แตกต่างกัน และเป็นผลให้ลดโอกาสการอุดตันลง และงานวิจัยของ W. Chansrakoo และคณะ [5] ได้ทำการพัฒนาเครื่องหีบฝ้ายสำหรับการคัดแยกเมล็ดและทำความสะอาดปุ๋ยฝ้ายระดับชุมชน ดำเนินการออกแบบและสร้างต้นแบบขนาดเล็ก ใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า 220 โวลต์ ถ่ายทอดกำลังด้วยพูลเลย์และสายพาน ตัวเครื่องหีบมีน้ำหนักประมาณ 80 กิโลกรัม ประกอบด้วยส่วนโครงสร้างทำจากเหล็ก ลูกกลิ้งแบบยางอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ใบมีดแยกเมล็ดฝ้าย และแผ่นเหล็กกันเมล็ดฝ้าย ผลการทดสอบหีบฝ้ายเพื่อคัดแยกเมล็ดกับพันธุ์ตากฟ้า 84-4 พบว่า เครื่องต้นแบบมีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 50.6 กิโลกรัม/ชั่วโมง โดยมีราคาเครื่องประมาณ 50,000 บาท จุดคุ้มทุนในการใช้เครื่องอยู่ที่ 199.86 กก./ปี

จากงานวิจัยที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาหาข้อมูลกระบวนการคัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุ๋ยฝ้ายอย่างจริงจัง และตระหนักถึงปัญหาที่พบดังกล่าวจึงได้นำความรู้ที่ได้ศึกษามาแล้วทั้งวิชาทางด้านทฤษฎีและวิชาทางด้านปฏิบัติ นำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายโดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมา มีขนาดที่เล็กกว่าเครื่องที่มีขายอยู่ทั่วไป เหมาะกับอุตสาหกรรมในครัวเรือนและราคาเครื่องถูกกว่า เหมาะสมกับความต้องการของกลุ่มทอผ้าพื้นเมืองของกลุ่มชุมชน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

เริ่มต้นจากการศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่จะพัฒนาขึ้นมา จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำมาออกแบบและพัฒนาเครื่องให้สามารถทำงานได้ โดยเริ่มจากการเปิด

เครื่อง จากนั้นเปิดการทำงานชุดคัดแยกเมล็ดฝ้าย ใส่ฝ้ายลงไปเครื่อง คัดแยกเมล็ดฝ้าย จนได้ ฝ้ายที่ผ่านการคัดแยก ซึ่งวิธีการดำเนินการวิจัยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 การออกแบบ (Design)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย [6] ให้สามารถใช้งานได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในเรื่องต้นดังนี้

2.2.1 เป็นเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่มีขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความสูง ประมาณ 500 x 280 x 410 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ ชุดโครงเครื่อง ชุดกรองเมล็ด ชุดใบเลื่อย ชุดแปรงมัดฝ้าย ชุดส่งกำลัง ชุดต้นกำลัง ชุดควบคุมการทำงาน เป็นต้น

2.2.2 ชุดโครงเครื่อง มีขนาดที่เหมาะสมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน

2.2.3 ชุดกรองเมล็ด มีขนาดที่เหมาะสมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง อยู่ตำแหน่งที่เหมาะสม

2.2.4 ชุดใบเลื่อย มีขนาดที่เหมาะสมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายได้อย่างต่อเนื่อง

2.2.5 ชุดแปรงมัดฝ้าย มีขนาดที่เหมาะสมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง สามารถมัดฝ้ายออกจากชุดใบเลื่อยได้อย่างต่อเนื่อง

2.2.6 ชุดรองรับฝ้ายมีขนาดที่เหมาะสมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

2.2.7 ชุดส่งกำลัง มีขนาดที่เหมาะสมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง สามารถรับและส่งผ่านแรงจากต้นกำลังได้อย่างเหมาะสม

2.2.8 ชุดต้นกำลัง สามารถส่งกำลังได้พอเพียงพอการใช้งาน มีความต่อเนื่องในการส่งกำลัง



2.2.9 ชุดควบคุมการทำงาน อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถควบคุมการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้งานง่ายและมีความปลอดภัยสูง

2.2.10 สามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายได้ 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์สีขาว (พันธุ์ตากฟ้า) และ พันธุ์สีน้ำตาล (พันธุ์อู่ตุง)

2.2.11 สามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ผ่าน การทำความสะอาดมาแล้ว

2.2.12 สามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ผ่านการตากแดดมาแล้ว 2-3 แดด

2.2.13 ตัดแยกเมล็ดฝ้ายจำนวน 25 กรัม / 1 นาที ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย โดยแบ่งออกเป็น 2 แนวคิด ดังนี้

แนวคิดที่ 1 ใช้หลักการทำงาน โดยเริ่มจากการเปิดการทำงานของชุดต้นกำลัง และส่งผ่านกำลังเข้าสู่ชุดใบเลื่อย และชุดแปรงขัดฝ้ายทำให้เกิดการหมุน ส่วนอีกด้านหนึ่งของชุดแปรงขัดฝ้ายจะมีพูเลย์ติดอยู่เพื่อรับกำลังและส่งต่อกำลังให้กับชุดช่วยหมุนฝ้าย เมื่อใส่ฝ้ายลงไปในช่วงบรรจุฝ้ายที่ด้านบน ฝ้ายจะถูกตัดแยกด้วยชุดกลไกใบเลื่อยโดยหมุนเกี่ยวเอาปุ๋ยฝ้ายออกผ่านช่องของชุดกรองเมล็ดที่มีขนาดของช่องเล็กกว่าเมล็ด ซึ่งเมล็ดไม่สามารถผ่านได้ ปุ๋ยฝ้ายที่ถูกตัดแยกแล้วจะติดอยู่บนใบเลื่อย และจะถูกแปรงขัดฝ้ายขัดออกจากใบเลื่อยให้เคลื่อนที่ไปยังถังบรรจุบริเวณด้านหลังเครื่อง โดยที่ชุดใบเลื่อยจะหมุนสวนทางกับชุดแปรงขัดฝ้าย ในขณะที่ตัวช่วยหมุนฝ้ายจะคอยหมุนเพื่อให้ฝ้ายเกิดการหมุนตัวอยู่ตลอดเวลา ทำให้ง่ายต่อการเกี่ยวปุ๋ยฝ้าย ส่วนเมล็ดฝ้ายที่ตัดแยกแล้วจะไหลผ่านชุดกรองเมล็ดออกสู่ด้านหน้าเครื่อง

แนวคิดที่ 2 ใช้หลักการทำงาน โดยเริ่มจากการเปิดการทำงานของชุดต้นกำลัง และส่งผ่านกำลังเข้าสู่ชุดใบเลื่อย และอีกด้านหนึ่งของชุดใบเลื่อยจะมีชุดพูเลย์สำหรับกลับทางหมุนชุดแปรงขัดฝ้ายให้หมุนสวนทางกับกลับชุดใบเลื่อยเมื่อใส่ฝ้ายลงไปในช่วงบรรจุฝ้ายฝ้ายจะถูกตัดแยกด้วยชุดกลไกใบเลื่อยโดยหมุนเกี่ยวเอาปุ๋ยฝ้ายออกผ่านช่องของชุดกรองเมล็ดที่มีขนาดของช่องเล็กกว่าเมล็ดซึ่งเมล็ดไม่สามารถผ่านได้ ซึ่งมีชุดกรองเมล็ดนี้ยึดออกมาด้านหน้า เพื่อง่ายต่อการเทฝ้ายลงช่องบรรจุฝ้ายปุ๋ยฝ้ายที่ถูกตัดแยกแล้วจะติดอยู่บนใบเลื่อยและจะถูกแปรงขัดฝ้ายขัดออกจากใบเลื่อยให้เคลื่อนที่ไปยังถังบรรจุบริเวณด้านหลังเครื่อง ส่วนเมล็ดฝ้ายที่ตัดแยกแล้วจะไหลผ่านชุดกรองเมล็ดออกสู่ด้านหน้าเครื่อง

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบทั้ง 2 แนวคิด ดังตารางที่ 1 ได้ข้อสรุปว่าจะดำเนินการออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้ายตามกรอบแนวคิดที่ 2 เพราะเครื่องมีขนาดที่เหมาะสม ในการตัดแยกที่เร็ว มีโอกาสที่ฝ้ายเกิดการขจัดตัวน้อยกว่าและการจัดวางอุปกรณ์ที่เหมาะสมภายในเครื่องตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ผู้วิจัยได้พิจารณาและกำหนดขอบเขตสำหรับการคำนวณหาขนาดของวัสดุที่ใช้ทำชุดอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ที่จะนำไปใช้ในการสร้างเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย ดังนี้

สูตรคำนวณหาความเร็วรอบชุดใบเลื่อย

$$P = \frac{2\pi Tn}{60} \quad (1)$$

$$T = \frac{60P}{2\pi n} \quad (2)$$



$$T = F \times r$$

(3) โดยที่ MP : อัตราทด

โดยที่ P : กำลังของมอเตอร์ (w)

T : ค่าทอร์ค (N.m)

n : ความเร็วรอบ (rpm)

F : แรง (N)

r : รัศมี (mm)

สูตรคำนวณหาขนาดของพูลเลย์

$$MP = \frac{d_1}{d_2}$$

(4)

 d_1 : ขนาดพูลเลย์ของล้อขับ (mm) d_2 : ขนาดพูลเลย์ของล้อตาม (mm)

สูตรคำนวณหาระยะห่างระหว่างศูนย์กลางพูลเลย์

$$C_{max} = 2 (d_p + D_p) \quad (5)$$

โดยที่ C : ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางล้อขับ (mm)

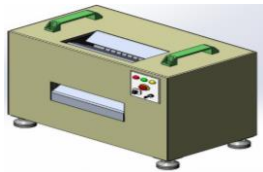
 d_p : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อขับ (mm) D_p : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อตาม (mm)

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบแนวคิดที่ 1 และ 2

เครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย

ข้อดี

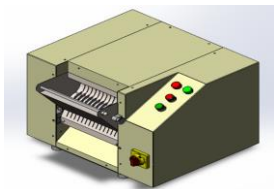
ข้อเสีย



แนวคิดที่ 1

- โครงสร้างประกอบไม่ยุ่งยาก
- ใช้พื้นที่ในการวางน้อยกว่า
- จัดเก็บปุ๋ยฝ้ายที่ผ่านการตัดแยกแล้วด้วยถุงซึ่งสะดวกกว่า

- กลไกมีความซับซ้อน
- การตัดแยกทำได้ไม่ค่อยต่อเนื่อง
- มีโอกาสที่ฝ้ายจะหมุนขัดตัวกัน
- ตัดแยกได้ช้ากว่า



แนวคิดที่ 2

- กลไกไม่ค่อยซับซ้อน
- การตัดแยกทำได้ต่อเนื่อง
- มีโอกาสที่ฝ้ายจะขัดตัวน้อยกว่า
- ตัดแยกได้เร็วกว่า

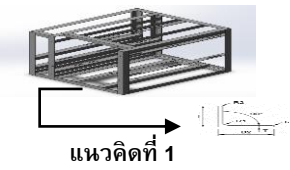
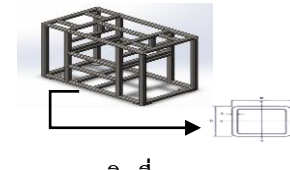
- โครงสร้างประกอบค่อนข้างยุ่งยาก
- ใช้พื้นที่ในการวางมากกว่า
- จัดเก็บปุ๋ยฝ้ายที่ผ่านการตัดแยกแล้วด้วยลิ้นชักซึ่งยากต่อการจัดเก็บ



ตารางที่ 2 สรุปคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องเพื่อใช้ในการออกแบบ

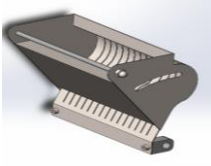
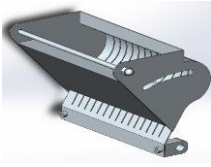
การเปรียบเทียบความจำเป็นในการทำโครงการ		ความจำเป็น	
สิ่งที่ควรคำนึง	คุณลักษณะ	สิ่งที่ต้องมี	สิ่งที่ควรมี
1. หน้าที	- คัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุ๋ยฝ้าย	✓	
2. ความสามารถ	- สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้าย ได้ทั้งพันธุ์ สี ขาว (พันธุ์ตากฟ้า) และสีน้ำตาล(พันธุ์อู่ต๋ย)	✓	
	- สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ผ่านการทำความสะอาดมาแล้ว	✓	
	- สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ผ่านการตากแดดมาแล้ว 2-3 แดด	✓	
	- สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายได้ปริมาณที่กำหนดมากที่สุดคือ 25 กรัม ภายใน เวลา 1 นาที	✓	
3. คุณสมบัติของเครื่อง	- มีขนาดของเครื่องที่เหมาะสม		✓
	- การใช้งานของเครื่องไม่ยุ่งยาก	✓	
	- ดูแลและถอดทำความสะอาดได้ง่าย		✓
	- มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน	✓	
4. กระบวนการทำงาน	- ใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนชุดโบริ่งและชุดแปรงขัดฝ้าย	✓	
5. การเคลื่อนย้าย	- สามารถเคลื่อนย้ายนอกสถานที่ได้		✓
6. รูปร่างของเครื่อง	- มีขนาด 500 x 280 x 410 มม.		✓

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุชุดโครงเครื่อง


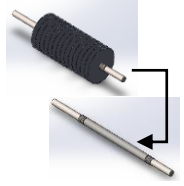
ชุดโครงเครื่อง	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1</p>	<ul style="list-style-type: none"> • เหมาะสำหรับนำมาทำเป็นโครงสร้างต่างๆ ได้ดี • รับน้ำหนักได้ดี • รับแรงสั่นสะเทือนได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถเกิดสนิมได้ • มีลักษณะที่บาง • กระบวนการเชื่อมประกอบ ยากกว่า
 <p>แนวคิดที่ 2</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ตัดเฉือนขึ้นรูปได้ง่าย • กระบวนการเชื่อมประกอบง่ายกว่า • รูปทรงสมส่วนมีความสวยงาม 	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถเกิดสนิมภายใน โครงสร้างเหล็กได้ • เกิดการเสียรูปทรงได้ง่าย



ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้ชุดกรองเมล็ด

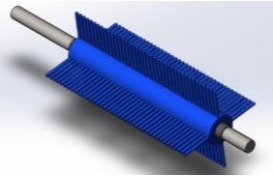
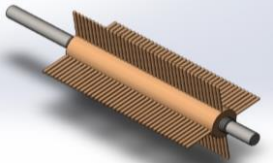
ชุดกรองเมล็ด	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 Stainless Sheet</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ด้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม • มีความยืดตัวสูง • สามารถใช้งานเย็นจัดและร้อนจัดที่อุณหภูมิต่างๆได้ • มีผิวที่เรียบลื่นกว่า • เหมาะกับงานพับ ตัด 	<ul style="list-style-type: none"> • มีราคาสูง
 <p>แนวคิดที่ 2 Steel Sheet Painting</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย • มีคุณสมบัติในการเชื่อมที่ดี • มีความแข็งแรงสูง เหมาะกับงานโครงสร้าง • เหมาะกับงานพับ ตัด 	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถเกิดสนิมภายใน โครงสร้างเหล็กได้ • ผิวไม่ค่อยลื่น

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุชุดใบเลื่อย



ชุดใบเลื่อย	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 Cast Iron</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ทนทานต่อการเสียดสีและการกระทบ • มีความสามารถสูงในการดูดซับพลังงาน • ราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> • กระบวนการขึ้นรูปผลิตยาก • เปราะ แตกง่าย หากหล่น กระแทบ
 <p>แนวคิดที่ 2 Steel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ตัดเฉือนขึ้นรูปได้ง่าย • กระบวนการเชื่อมประกอบ ง่ายกว่า • รูปทรงสมส่วนมีความสวยงาม 	<ul style="list-style-type: none"> • หากผ่านการปรับสภาพทางความร้อน จะทำให้มีความแข็งแรง และความแข็งแรงที่สูงมาก • กระบวนการขึ้นรูปผลิตทำได้ ง่ายกว่า



ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุชุดแปรงขัดผ้าฝ้าย

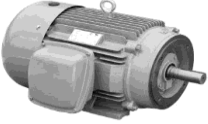

ชุดแปรงขัดผ้าฝ้าย	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 แปรงลูกกลิ้งขนสัตว์สังเคราะห์</p>	<ul style="list-style-type: none"> • หาซื้อได้ง่าย • ราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> • คุณภาพเส้นใยต่ำกว่า
 <p>แนวคิดที่ 2 แปรงลูกกลิ้งขนสัตว์</p>	<ul style="list-style-type: none"> • มีความอ่อนโยนต่อเส้นใย • คุณภาพของเส้นใยสูงกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> • หาซื้อได้ยาก • ราคาสูงกว่า

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุชุดส่งกำลัง

ชุดส่งกำลัง	ข้อดี	ข้อเสีย
 <p>แนวคิดที่ 1 Aluminum</p>	<ul style="list-style-type: none"> • มีน้ำหนักเบา ทำให้ลดภาระโหลดและมีความเร็วมากขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> • หากถูกแรงกระทำค่าหนึ่งจนเสียรูปไปทำให้เกิดการร้าวและการพังเสียหายก็จะเกิดขึ้นในเนื้ออลูมิเนียมได้ง่าย • มีราคาสูงกว่า
 <p>แนวคิดที่ 2 Cast Iron</p>	<ul style="list-style-type: none"> • หาซื้อได้ง่าย • ทนทานต่อการเสียดสี • ราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> • เปราะ แตกง่าย หากหล่น กระแทบ



ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกต้นกำลังการเคลื่อนที่

ต้นกำลังการเคลื่อนที่	ข้อดี	ข้อเสีย
 แนวคิดที่ 1 มอเตอร์ 3 เฟส	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาถูกกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> • ให้กำลังที่ไม่มากพอหรือน้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณงาน
 แนวคิดที่ 2 มอเตอร์ 1 เฟส	<ul style="list-style-type: none"> • ให้กำลังมากเพียงพอกับปริมาณงาน 	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาแพงกว่าเล็กน้อย

2.2 คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องตัดแยก เมล็ดฝ้าย

ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาและกำหนดคุณลักษณะที่เป็นส่วนหลักของเครื่อง เพื่อใช้สำหรับการออกแบบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย ว่าสิ่งใดจำเป็นต้องมีและสิ่งใดควรมี โดยสรุปไว้ในตารางที่ 3 หลังจากกำหนดกรอบคุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้ายแล้ว ผู้วิจัยยังได้มีการกำหนดรูปร่างหรือรูปทรงของชิ้นส่วนที่เลือกใช้เป็นวัสดุสำหรับทำชิ้นส่วน รวมไปถึงการเลือกใช้ระบบหรือกลไกและอุปกรณ์ที่สำคัญเพื่อใช้สำหรับการออกแบบเขียนแบบ และพัฒนาเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย โดยสรุปไว้ในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 8 หลังจากพิจารณาข้อดีและข้อเสียของการเลือกใช้ระบบหรือกลไกและอุปกรณ์ที่สำคัญ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าควรเลือกใช้ชุดโครงเครื่องเป็นแบบเหล็กรูปพรรณเหล็กฉาก เนื่องจากมีความสมดุลและหาซื้อได้ง่ายทั่วไปตามท้องตลาด และมีความแข็งแรง

มากกว่า รับโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดได้ดีกว่าชุดโครงเมล็ดเป็น Stainless Steel เนื่องจากมีความเหมาะสมกับลักษณะงาน เนื่องจากเหมาะกับงานพับดัด และมีผิวลื่น ส่งผลให้การตัดแยกมีความลื่นไหลมากขึ้น ชุดแปรงขัดฝ้ายเป็นแปรงลูกกลิ้งขนสังเคราะห์เนื่องจากมีความเหมาะสมกับลักษณะงานเนื่องจากหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าหากเทียบกับแปรงลูกกลิ้งขนสัตว์ตามกรอบแนวคิดที่ 1 และชุดใบเลื่อย เป็น Steel เนื่องจากมีความเหมาะสมกับลักษณะงาน เนื่องจากมีกระบวนการขึ้นรูปที่ทำได้ง่าย และสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้หากผ่านกระบวนการทางความร้อน ชุดส่งกำลัง เป็นพู่เลย์วัสดุ Cast Iron เนื่องจากมีความเหมาะสมกับลักษณะงาน หาซื้อราคาถูกกว่าหากเทียบกับพู่เลย์วัสดุ Aluminum ต้นกำลังการเคลื่อนที่ตามกรอบแนวคิดที่ 2 คือมอเตอร์ 1 เฟส



2.3 การประเมินสมรรถนะแบบทางเลือก

การประเมินสมรรถนะแบบทางเลือกและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสำคัญสำหรับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ CAD/CAM [7] เพื่อค้นหาจุดในการปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงของแต่ละชิ้นส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมเพื่อตรวจสอบจุดอ่อนของโครงเครื่องชุดกัดแยกเมิลิตฝ้าย คานรองรับมอเตอร์ คานรองรับชุดกัดแยกเมิลิต และเพลาชุดไบเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 4 ซึ่งจากผลการประเมินพบว่า เครื่องกัดแยกเมิลิตฝ้ายที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมามีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง โดยไม่ทำให้ชิ้นส่วนใดของเครื่องเกิดความเสียหายได้

- ลักษณะโครงสร้างที่ปลอดภัยมากที่สุด
- ลักษณะโครงสร้างที่ปลอดภัยมาก
- ลักษณะโครงสร้างที่ปลอดภัยปานกลาง
- ลักษณะโครงสร้างที่ปลอดภัยน้อยที่สุด

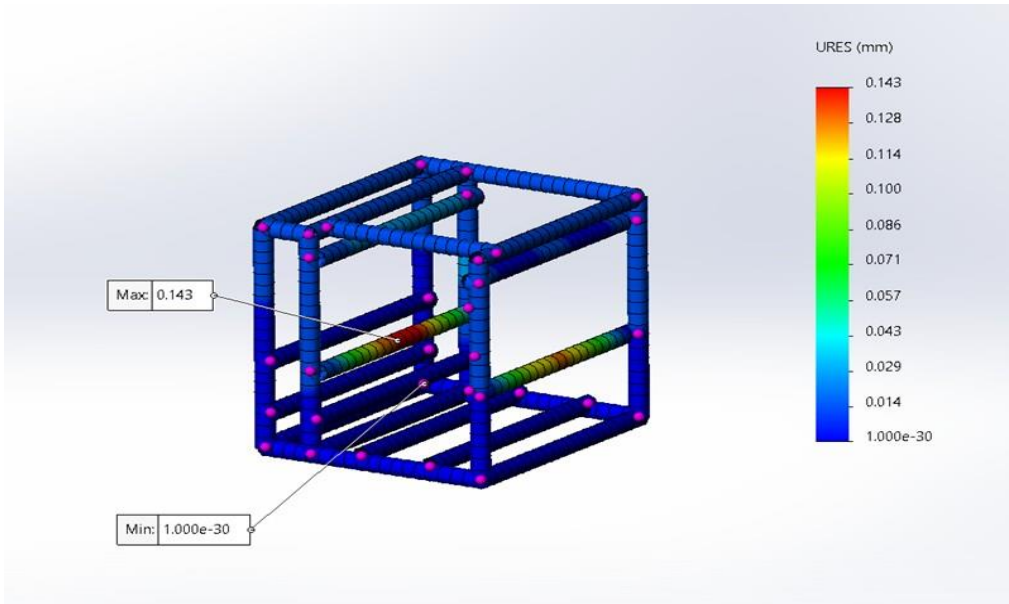
สูตรการหาหน่วยแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength)

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A} \quad (6)$$

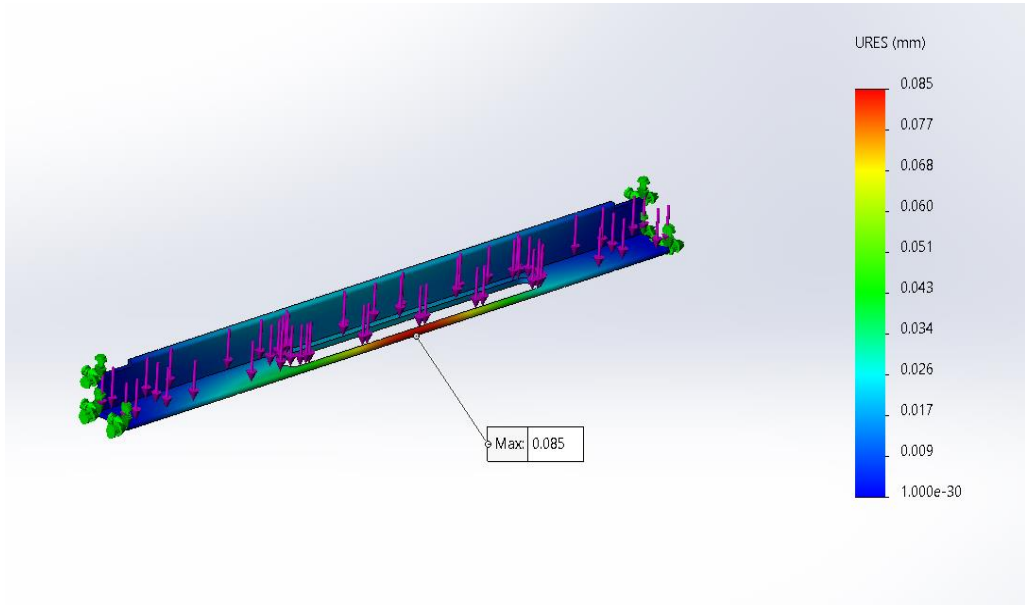
โดยที่ σ_y : หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (ksc)

P_y : แรงดึงที่จุดคราก (kg)

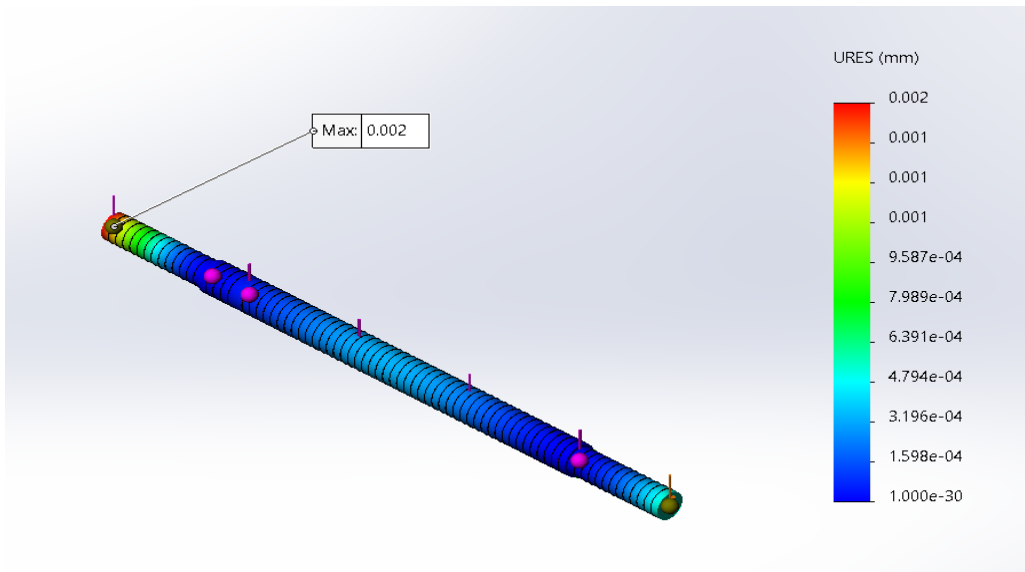
A : พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ (mm²)



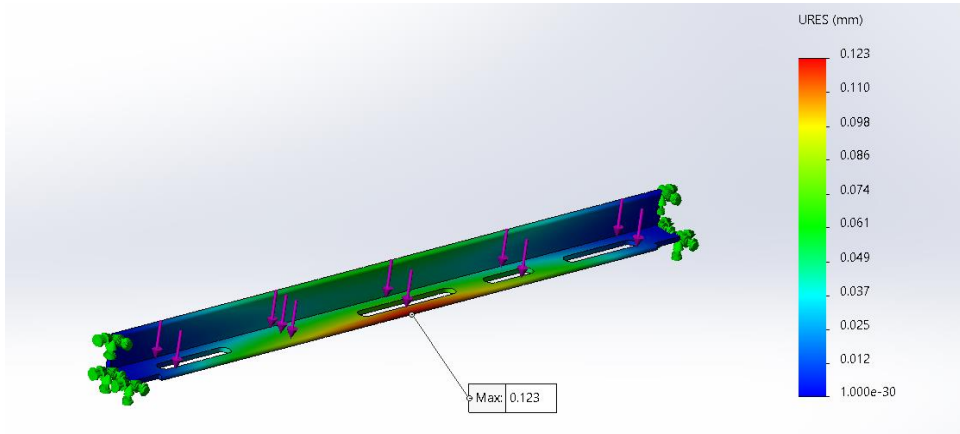
รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์โครงเครื่อง



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์คานรองรับมอเตอร์



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์เพลาชุดใบเลื่อย



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์คานรองรับชุดตัดแยกเมล็ด

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

หลังจากที่ได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้ายเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 5 จะต้องนำเครื่องมาทำการทดสอบการทำงานตามวัตถุประสงค์และขอบเขตงานที่ได้กำหนดไว้ เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ได้พัฒนาขึ้น โดยสามารถอธิบายมีขั้นตอนในการทดสอบและผลการทดสอบได้ดังนี้

3.1 วิธีการทดสอบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย

วิธีการในการทดสอบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้ายต้องทดสอบตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

3.1.1 ทดสอบว่าเครื่องสามารถใช้งานได้จริงและมีความคุ้มค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้ายที่มีขายอยู่ทั่วไป

3.1.2 ทดสอบว่าสามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายได้ 25 กรัม ภายใน 1 นาที

3.1.3 ทดสอบว่าสามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายได้โดยที่เมล็ดไม่แตก

3.1.4 วิเคราะห์หาสาเหตุความบกพร่องต่างๆ และนำไปปรับปรุงแก้ไข



รูปที่ 5 เครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย



3.2 เงื่อนไขการทดสอบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย

ในการทดสอบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย จะมีเงื่อนไขของสิ่งที่ต้องใช้ในการทดสอบมีดังนี้

3.1.2 ฝ้ายพันธุ์ที่จะนำมาตัดแยก ต้องเป็นตามสายพันธุ์ที่กำหนดได้แก่ พันธุ์สีขาว (พันธุ์ตากฟ้า) และพันธุ์สีน้ำตาล (พันธุ์อู่ตู่)

3.2.2 ฝ้ายที่จะนำมาตัดแยกต้องผ่านการตากแดดมาแล้ว 2-3 แดด

3.2.3 ฝ้ายที่จะนำมาตัดแยกต้องผ่านการทำความสะอาดมาแล้ว

3.3 ผลการทดสอบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย

ผลการทดสอบเครื่องตัดแยกเมล็ดฝ้าย โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง ได้ผลการทดสอบดังนี้

3.3.1 การทดสอบครั้งที่ 1 ปัญหาที่พบ คือฝ้ายไม่หมุนตัวทำให้ตัดแยกฝ้ายไม่ได้ และฝ้ายเข้าไปติดบริเวณโค้งของชุดกรองเมล็ด เนื่องจากรูปทรงของชุดกรองยังไม่โค้งรับกับรูปทรงของใบเลื่อยมากพอทำให้มุมในการโค้งของชุดกรองยังน้อยเกินไป

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขปัญหโดยการเปลี่ยนชุดกรองเมล็ดให้มีรูปทรงโค้งรับกับรูปทรงของใบเลื่อยมากขึ้น เพราะจะทำให้ฝ้ายมีพื้นที่ที่เป็นส่วนโค้งในการหมุนตัวมากขึ้น และเพิ่มชุดแปรงหมุนฝ้ายเพื่อทำให้ฝ้ายกระจายตัวได้ดีขึ้น และถูกตัดแยกอย่างทั่วถึงตลอดหน้าสัมผัสของชุดใบเลื่อยวงเดือน

3.3.2 การทดสอบครั้งที่ 2 ปัญหาที่พบ คือ ฝ้ายกระเด็นออกจากชุดกรองเมล็ดไปข้างนอกเครื่อง เพราะแรงบิดของของแปรงช่วยหมุนฝ้าย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขปัญหโดยการเพิ่มฝาปิดเพื่อป้องกันฝ้ายกระเด็นออกนอกเครื่องโดย

ใช้อะคริลิกใสแบบแผ่นเพื่อให้มองเห็นปริมาณฝ้ายที่อยู่ภายในชุดกรองเมล็ด

3.3.3 การทดสอบครั้งที่ 3 ปัญหาที่พบ คือ แผ่นอะคริลิกใสเป็นแบบสไลด์ เพื่อป้อนฝ้ายลงในชุดกรองเมล็ด เมื่อต้องใส่ฝ้ายเข้าไปในชุดกรองเมล็ดขณะเครื่องกำลังตัดแยกอยู่ จะเห็นว่าฝ้ายกระเด็นออกนอกเครื่องจำนวนมาก ต้องนำฝ้ายนอกเครื่องกลับมาใส่ใหม่อีก ทำให้เสียเวลา

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขปัญหา โดยการเปลี่ยนฝาปิดเพื่อป้องกันฝ้ายกระเด็นออกนอกเครื่องโดยจากเดิมเป็นอะคริลิกใสแบบแผ่นแบนเป็นอะคริลิกใสแบบแผ่นโค้งโดยออกแบบให้ส่วนโค้งนี้มีรัศมีโค้งเกือบปิดบริเวณของปากชุดกรองเมล็ด เพื่อไม่ให้ฝ้ายเกิดการกระเด็นขณะหยิบฝ้ายใส่และเพิ่มช่องป้อนฝ้าย เพื่อให้มีช่องในการใส่ฝ้ายโดยช่องนี้มีลักษณะลาดเอียงลงไปทำให้ง่ายต่อการหยิบใส่และไหลไปยังชุดกรองเมล็ด

3.3.4 การทดสอบครั้งที่ 4 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการตัดแยกเมล็ดฝ้ายพันธุ์สีขาว(พันธุ์ตากฟ้า) โดยทำการทดสอบทั้งหมด 15 ครั้ง ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการตัดแยกเมล็ดฝ้าย สามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุยฝ้ายได้ค่าเฉลี่ย จำนวน 26.30 กรัม ภายในเวลา 1 นาที ทำได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้

3.3.5 การทดสอบครั้งที่ 5 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการตัดแยกเมล็ดฝ้ายพันธุ์สีน้ำตาล (พันธุ์อู่ตู่) โดยทำการทดสอบทั้งหมด 15 ครั้ง ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการตัดแยกเมล็ดฝ้าย สามารถตัดแยกเมล็ดฝ้ายออกจากปุยฝ้ายได้ค่าเฉลี่ย จำนวน 25.19 กรัม ภายในเวลา 1 นาที ทำได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้



3.3.6 การทดสอบครั้งที่ 6 และ 7 เป็นการทดสอบการแตกปะปนของฝ้ายพันธุ์สีขาว (พันธุ์ตากฟ้า) และพันธุ์สีน้ำตาล (พันธุ์อีดุ่ย) ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยก สามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายทั้ง 2 สายพันธุ์ได้ตามที่กำหนด และไม่มีเมล็ดแตกปะปนไปกับปุ๋ยฝ้ายที่คัดแยกแล้ว

3.4 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม [8] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย ระยะเวลาคืนทุน และจุดคุ้มทุนในการที่จะนำเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายมาใช้ทดแทนแรงงานคน ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 13

กำหนดให้ DP : ค่าเสื่อมราคา (บาท)

P: ราคาซื้อของเครื่องจักร (บาท)

S: ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ (บาท)

L: อายุการใช้งานของเครื่องจักร (ปี)

I: ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (บาท / ปี)

F_C: ต้นทุนคงที่ต่อปี (บาท / ปี)

V_C: ต้นทุนผันแปรต่อปี (บาท / ปี)

R & M: ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา (บาท / ปี)

E: ค่าไฟฟ้า (บาท / ปี)

N: ค่าจ้างแรงงาน (บาท / ชั่วโมง)

A_C: ต้นทุนการหีบฝ้ายเมื่อใช้แรงงานคน (บาท / กิโลกรัม)

C_i: ความสามารถในการทำงานของเครื่อง (กิโลกรัม / ชั่วโมง)

A : ปริมาณการใช้งานในหนึ่งปี (กิโลกรัม / ปี)

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปร ต่างๆ	หน่วยของ ตัวแปร ต่างๆ	เครื่องคัด แยกที่ พัฒนา	เครื่องคัด แยกที่ขาย
DP	บาท	7,200	14,400
P	บาท	40,000	80,000
S	บาท	4,000	8,000
L	ปี	5	5
I	บาท / ปี	2,200	4,400
F _C	บาท / ปี	9,400	18,800
V _C	บาท / ปี	110,640	117,040
R & M	บาท / ปี	9,600	9,600
E	บาท / ปี	11,040	7,440
N	บาท/ ชั่วโมง	33.4	18.9
A _C	บาท/ กิโลกรัม	250	250
C _i	กิโลกรัม / ชั่วโมง	1.5	3
F _C + V _C	บาท / ปี	120,240	135,840
จุดคุ้มทุน	กิโลกรัม / ปี	1,816	2,604
ระยะเวลา คืนทุน	เดือนวัน	5 เดือน 1 วัน	7 เดือน 7 วัน
จ้างหีบ	บาท / ปี	158,400	
คนอ้วฝ้าย	บาท / ปี	540,000	

การทดสอบด้วยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายพบว่าเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย มีความคุ้มค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่มีจำหน่ายทั่วไป และรวมถึงการจ้างหีบและการใช้การอ้วฝ้ายแบบเดิมอีกด้วย โดยมีระยะคืนทุนประมาณ 5 เดือน 1 วัน และจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1,816 กิโลกรัม / ปี มีค่าใช้จ่ายในการทำงานอยู่ที่ 33.4 บาท / กิโลกรัม



4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้าย ซึ่งสามารถคัดแยกเมล็ดฝ้ายทั้ง 2 สายพันธุ์ตามที่กำหนด และมีความสามารถในการคัดแยกได้ 25 กรัมภายในเวลา 1 นาที มีความผิดพลาดของการคัดแยกที่ไม่ต่ำกว่า 24 กรัม / นาที และไม่มีเมล็ดแตกปะปนไปกับปุยฝ้ายที่ผ่านการคัดแยกแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบกับเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าเครื่องคัดแยกเมล็ดฝ้ายที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมีความคุ้มค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องที่จำหน่ายทั่วไป การจ้างหีบ หรือการใช้วิธีอ้อมฝ้ายแบบเดิม โดยมีระยะคืนทุนประมาณ 5 เดือน 1 วัน และจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1,816 กิโลกรัม / ปี มีค่าใช้จ่ายในการทำงานอยู่ที่ 33.4 บาท / กิโลกรัม ซึ่งตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้น แสดงให้เห็นผลที่ได้ว่าเป็นไปตามที่ต้องการ สามารถใช้งานได้จริง เป็นที่ยอมรับ และทำให้เกิดความพึงพอใจของกลุ่มผ้าทอในอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Yimprasert and T. Suntawan, Project Management guidelines for woman weaving groups, Ban rai district, Uthai Thani Province, The Journal of Graduate Studies Northern Rajabhat University, 2011, 1(1), 59-67. (in Thai)
- [2] S. Tuanthet, A study of Thai local wisdom in native fabrics focused on the ethnic Lao-Khrang in Suphanburi Chainard and Uthaihani, Master Degree, Srinakharinwirot University, 2012. (in Thai)
- [3] A. Obidov, M. Vokhidov and J. Abdurahmonov, Exploring the efficiency of experimental construction of sorting ginned cotton seed machine, Engineering, 2021, 13, 18-29.
- [4] R. Muradov, A. Sarimsakov and S. Rejabboev, Improving the seed sorting device to increase natural fiber yield at cotton ginning enterprises, E3S Web of Conferences, 2024, 486, 02032.
- [5] W. Chansrakoo, Research and development on ginning machine for cotton fiber, Department of Agriculture, Thailand, 2017, 1-34. (in Thai)
- [6] K. Saeweenan, N. Siriwan and W. Laotaweesub, Design and development of the Pallet Shot Machine, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(1), 186-200. (in Thai)
- [7] K. Prasad and S. Chakraborty, A QFD-based decision making model for computer - aided design software selection, Management Science Letters, 2016, 6, 213-224.
- [8] K. Chaiwanthum, Machine replacement analysis: A case study of mold manufacturing, Master Degree, Thammasat University, 2018, 1-81.



การพัฒนาอิฐมอดูลดซับโดยการใช้ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

บุญสิน นาดอนตู¹ ธงชัย เครือผือ^{1*} เสริมศักดิ์ ทิพย์วงศ์² ปริญญาวัตร ทินบุตร³ และ ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมขนาดจาต⁴

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต, คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

² สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

³ สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการเชื่อม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Thongchai.k@pcru.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 มิถุนายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 18 กรกฎาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 15 ตุลาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งทำการพัฒนาอิฐมอดูลดซับจากส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียเพื่อศึกษาอัตราส่วนผสม ดินเหนียว ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย และแกลบละเอียดร้อยละ 95-0-5, 90-5-5, 80-15-5, 70-25-5, 60-35-5 และ 50-45-5 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิจัย พบว่า การดูดซับกลิ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มากขึ้น ซึ่งมีค่า 28.5-44.3 มิลลิลิตรต่อลูกบาศก์เมตร การดูดซึมน้ำในตัวอย่างที่ 2-4 มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 11.0-16.1% และตัวอย่างที่ 5 และ 6 มีค่าการดูดซึมน้ำเกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งมีค่า 22.3 และ 27.7% ตามลำดับ การดูดซับความชื้นจะมีค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้นตามลำดับของอัตราส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มากขึ้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.42-1.53% การทดสอบความต้านแรงอัดในตัวอย่างที่ 3 และ 4 มีค่าความต้านแรงอัดตามมาตรฐานซึ่งมีค่า 30.6 และ 33.1 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าจะสามารถเพิ่มกำไรจากเดิมได้ประมาณ 12,700-37,700 บาท/ ครั้ง และความพึงพอใจในการถ่ายทอดองค์ความรู้ โดยทำการประเมินทั้งหมด 9 ด้าน มีระดับความพึงพอใจของในภาพรวมมีค่าเฉลี่ย 4.45 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.39 มีค่าคะแนนความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ: อิฐมอดูลดซับ; ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย; การดูดซับความชื้น; การดูดซับกลิ่น



Development of Absorbing Brick using Macadamia Shell Charcoal Powder

Boonsin Nadondu¹, Thongchai Khruueaphue^{1*}, Sermsak Thipwong²,
Parinyawatr Dhinnabutra³ and Saksit Chuenchomnakjad⁴

¹ Program in Production Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,
Phetchabun Rajabhat University

² Program in Industrial Electrical Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,
Phetchabun Rajabhat University

³ Program of Welding Engineering, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen

³ Program in Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok

* Corresponding author, E-mail: Thongchai.k@pcru.ac.th

Received: 12 June 2024; Revised 18 July 2024; Accepted: 15 October 2024

Online Published: 19 December 2024

Abstract: The objective of this research is to create bricks that are composed of a blend of macadamia shell charcoal powder. The focus of the investigation is the ratio of fine rice husk, macadamia shell charcoal powder, and clay at 95-0-5, 90-5-5, 80-15-5, 70-25-5, 60-35-5, and 50-45-5, respectively. The research results suggest that the absorption of odors increases as the ratio of macadamia shell charcoal powder increases, with a range of 28.5 to 44.3 Milliliters per cubic meter. Variables 2–4 water absorption falls within the standard range of 11.0–16.1%, while variables 5 and 6 surpass the standard with values of 22.3 and 27.7%, respectively. The moisture absorption increases as the macadamia shell charcoal powder ratio increases, with a range of 0.42% to 1.53%. The standard is met by the compressive strength test results in variables 3 and 4, which are 30.6 and 33.1 kilograms/square centimeter, respectively. When analyzing the worthiness, it will be possible to increase the profit from the original approximately 12,700-37,700 baht/time. The satisfaction with knowledge transmission was assessed in nine different areas, resulting in an average satisfaction level of 4.45, a standard deviation of 0.39, and a high level of satisfaction.

Keywords: Absorbing brick; Macadamia shell charcoal powder; Moisture absorption; Odor absorption



1. บทนำ

จังหวัดเพชรบูรณ์อยู่ในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง มีประชากรอาศัยอยู่ทั้งชาวไทยและชาวไทยภูเขา สภาพดินมีความอุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การเพาะปลูก โดยเฉพาะพื้นที่อำเภอเขาค้อซึ่งมีความโดดเด่นด้านการท่องเที่ยวและการเกษตร พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าและเนินเขา จากการลงพื้นที่เพื่อสำรวจปัญหาและความต้องการ พบว่า ปัจจุบันชาวไทยภูเขาทำการเกษตรเป็นอาชีพหลัก และนอกจากนี้ยังมีผลิตผลอีกหนึ่งชนิดที่มีความสำคัญกับชาวไทยภูเขา คือ ถั่วแมคคาเดเมียซึ่งนิยมปลูกในพื้นที่เชิงเขาเป็นพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ให้กับชาวไทยภูเขาอำเภอเขาค้อเป็นอย่างมาก ซึ่งปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้ผลิตและแปรรูปแมคคาเดเมียเขาค้อ ทำการรับซื้อเพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ประมาณ 55-70 ตันต่อปี มีผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นชื่อ คือ แมคคาเดเมียเขาค้อ ตรา แมค พี.วาย ซึ่งจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ ทำให้ผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียได้รับความนิยมและเป็นที่ต้องการของตลาดผู้บริโภคอย่างกว้างขวาง ส่งผลให้มีการกระตุ้นกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือมีวัสดุเหลือทิ้งมากมายจากกระบวนการผลิต เช่น เศษกะลาแมคคาเดเมีย ดังรูปที่ 1 (ก) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ กะลาแมคคาเดเมียมีลักษณะแข็ง มันวาว [1-3] และที่สำคัญเมื่อนำไปเผาให้อยู่ในรูปของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะของความพรุนหรือรูพรุนในกะลาเป็นจำนวนมาก เหมาะแก่การนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ดูดซับกลิ่น ความชื้น และวัสดุตกแต่งต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้ผลิตและแปรรูปแมคคาเดเมียเขาค้อได้นำไปทิ้งหรือใส่โคนต้นไม้เพื่อเป็นวัสดุคลุมหน้าดินหรือคลุมวัชพืช และทำการเผาทิ้งตั้งนั้นผู้วิจัยจึงได้สังเกตเห็น

ความสำคัญของการนำเอาเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์และสร้างมูลค่าให้มากที่สุด ซึ่งเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้จากการกะเทาะออกจากเมล็ดนั้น มีปริมาณ 30-40 ตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 70 [1, 4] ถือได้ว่ามีปริมาณของเศษกะลาเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งไปทำการเผาให้อยู่ในรูปแบบของถ่านกัมมันต์ ดังรูปที่ 1 (ข) แล้วนำไปทำการบดละเอียด หลังจากนั้นนำไปเป็นส่วนผสมหลักในการพัฒนาเป็นอิฐมอดูดูดซับกลิ่น ที่สามารถนำไปเป็นวัสดุตกแต่งภายในบ้าน ห้องครัว ห้องน้ำ หรือบริเวณที่มีความชื้นและกลิ่นอับ เพื่อดูดซับกลิ่น ดูดซับความชื้น โดยคุณสมบัติเด่นของถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีการจัดเรียงตัวของธาตุคาร์บอนระหว่างกระบวนการเผาทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบ โครงสร้างเป็นลักษณะหกเหลี่ยมและมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ที่ผิวโมเลกุล มีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมาก โดยถ่านแมคคาเดเมียจำนวน 1 กรัม ประกอบด้วยรูพรุนประมาณ 250 ตารางเมตร อีกทั้งยังมีความแข็งแรง สามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย ไม่เป็นเชื้อราในสภาพอากาศชื้น [1, 5, 6] จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำวัสดุเหลือทิ้งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียไปทำการพัฒนาเป็นอิฐมอดูดูดซับกลิ่น และศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการผลิตอิฐมอดูจากผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย วิเคราะห์ความคุ้มค่าเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตอิฐมอดูแบบเดิม รวมไปถึงถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีให้กับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้ผลิตและแปรรูปแมคคาเดเมีย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์



บทความวิจัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 วัสดุกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง (ก)
ถ่านกะลาแมคคาเดเมีย (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ลักษณะการแตกหัก (ก) และการผิดรูปของอิฐ
มอญดูดซับ (ข) ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 การเตรียมวัสดุในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุในการทดลองขึ้นรูปอิฐมอญดูดซับ 3 ชนิด คือ ดินเหนียวผสมกับผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย และแกลบบดละเอียด ซึ่งดินเหนียวจะได้ออกจากดินร่วนปนทราย (ทรายจะช่วยป้องกันการหดตัว การแตกร้าว และเสริมความแข็งแรงให้กับก้อนอิฐ) ที่มีเนื้อละเอียดโดยการกรองเศษเจือปนออกด้วยตะแกรงผ้าแล้วทำการผสมกับน้ำทำให้มีความชื้นประมาณ 33-35% ซึ่งค่าที่ได้เกิดจากการทดลองเบื้องต้น โดยจากการทดลองพบว่า หากดินเหนียวมีความชื้นน้อยกว่า 33% จะทำให้อิฐเกิดการแตกหักระหว่างการอัดเป็นก้อน ดังรูปที่ 2(ก) และหากดินเหนียวมีความชื้นมากกว่า 35% จะทำให้อิฐเกิดการอ่อนตัวทำให้เกิดการหักและผิดรูป ดังรูปที่ 2(ข) และวัสดุผสมหลักเป็นผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย โดยการนำเศษกะลาแมคคาเดเมียไปเผาในเตาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงให้กะลาแมคคาเดเมียอยู่ในรูปของไนถ่านกัมมันต์ ซึ่งความรู้ที่สูงถ่านจะถูกกระตุ้นทางกายภาพมีรูพรุนเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเป็นจำนวนมาก ซึ่งรูพรุนนี้ช่วยในการดูดซับความชื้นและดูดซับกลิ่นได้เป็นอย่างดี [2, 3, 5]

หลังจากทำการเผาถ่านกะลาแมคคาเดเมียเสร็จจึงนำไปทำการบดย่อยให้ละเอียดด้วยเครื่องบดถ่านกะลาแมคคาเดเมียให้มีขนาดผงอยู่ที่ 0.5 ไมครอนถึง 2 มิลลิเมตร ทำการวัดขนาดผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียด้วยตะแกรงเมช และแกลบละเอียดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประสานของเนื้อวัสดุ และงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมการทดลองทั้งสิ้น 6 ตัวแปร โดยที่ตัวแปรที่ 1 เป็นสูตรดั้งเดิมของโรงอัดก้อนอิฐ คุณเสริมศักดิ์ ทัพยวงค์ ตำบลบ้านดิว อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบูรณ์ และตัวแปรที่ 2- 6 เป็นสูตรที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของอิฐมอญดูดซับ

ตัวแปร	ดินเหนียว (%)	ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย (%)	แกลบละเอียด (%)
1	95	0	5
2	90	5	5
3	80	15	5
4	70	25	5
5	50	35	5
6	50	45	5



2.2 ขั้นตอนการทดลองอัดก้อนอิฐมอญ

ขั้นตอนที่ 1 นำดินเหนียวกับผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียและเกลบผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นทำการเติมน้ำและคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยทำการวัดความชื้นของดินด้วยเครื่องวัดความชื้นให้อยู่ระหว่าง 33-35% [7] ดังรูปที่ 3 (ก) โดยทำการผสมตัวแปรละ 30 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 2 นำวัสดุที่ทำการผสมเสร็จใส่ในชุดเบ้าอัดก้อนอิฐ ดังรูปที่ 3(ข) ซึ่งชุดเบ้าอัดก้อนอิฐจะทำหน้าที่บดอัดและผลักดินให้ไหลไปสู่ชุดบีบอัดก้อนอิฐด้านล่างเครื่อง ซึ่งเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบ่งเป็น 4 ช่อง และบริเวณตรงกลางเป็นเต็ยสำหรับทำให้อัดก้อนอิฐมอญเป็นรูจำนวนช่องละ 2 รู ตามมาตรฐาน มอก.153-2540 ดังรูปที่ 3 (ค)

ขั้นตอนที่ 3 ทำการตัดก้อนอิฐมอญดูดซับที่ไหลออกมาจากชุดบีบอัดก้อนอิฐผ่านชุดรางเลื่อน ดังรูปที่ 3(ง) โดยใช้เส้นลวดตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 65 ยาว 145 และสูง 35 มิลลิเมตร (เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดก้อนอิฐแดงตาม มอก. 77-2565 มีค่า ± 2)

ขั้นตอนที่ 4 นำก้อนอิฐมอญที่ผ่านการตัดไปตากแดดไว้ประมาณ 1-2 วัน กับวัสดุแผ่นรองเพื่อทำการไล่ความชื้น ดังรูปที่ 3(จ) เพื่อให้อิฐแข็งตัวและนำไปจัดเรียงในเตาอบทิ้งไว้ประมาณ 3-5 วัน หลังจากนั้นจึงทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน [5] ดังรูปที่ 3 (ฉ)

2.3 ขั้นตอนการทดสอบอิฐมอญดูดซับ

1. การทดสอบการดูดซับกลืน ซึ่งทำการเตรียมกล่องแก้วขนาดกว้าง 10 ยาว 18 สูง 5 เซนติเมตร ใส่อิฐมอญดูดซับลงไปในห้อง หลังจกนั้นทำการเตรียมก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จากควันบู่หรือครั้งละ 1 มวล โดยการจุดไฟแล้วใส่ลงในกล่องทิ้งไว้ จนบู่หรือดับรอจน



(ก)



(ข)



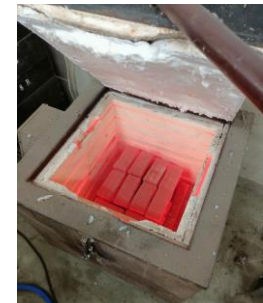
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง

เกิดสภาวะสมดุลและบันทึกความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 120 นาที [6, 8]

2. การทดสอบการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (1) (มาตรฐาน มอก.77-2565 ชั้นคุณภาพ ข เฉลี่ย 5 ก้อนไม่ควรเกิน 22% และอิฐมอญที่ดีจะต้องดูดซึมน้ำ



ประมาณ 10-17% ของน้ำหนักของอิฐ) [9-11] โดยการนำไปซังน้ำหนักก่อนทำการแช่น้ำ และหลังจากนั้นนำอิฐมอญไปทำการแช่น้ำอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [12] ดังภาพที่ 4 (ก) เมื่อครบกำหนดเวลาจึงนำมาเช็ดให้แห้งด้วยผ้าแล้วทำการซังน้ำหนักและบันทึกค่านำไปแทนค่าในสมการ

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_{sat} คือ น้ำหนักอิ่มตัวด้วยน้ำซังในอากาศ

W_{dry} คือ น้ำหนักอบแห้งซังในอากาศ

3. การทดสอบการดูดซึมน้ำ ดึงสมการที่ (1) ตามมาตรฐาน มอก. 153-2565 (อิฐกลวงก่อแห้งไม่รับน้ำหนัก) โดยการนำไปซังน้ำหนักก่อนการอบ และหลังจากนั้นนำไปทำการอบด้วยเตาอบควบคุมอุณหภูมิได้ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [12, 13] ดังภาพที่ 4(ข) แล้วทำการซังน้ำหนักหลังการอบ

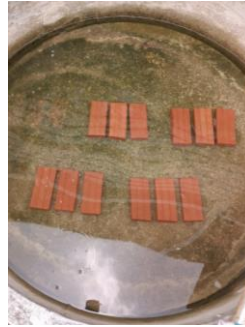
4. การทดสอบความต้านแรงอัด ดึงสมการที่ (2) ใช้เกณฑ์มาตรฐานของ ASTM C 62-10 ซึ่งค่าการรับแรงอัดไม่ควรต่ำกว่า 30-35 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร [14, 16, 17] ซึ่งทำการกำหนดค่า P จากแรงที่ใช้ในการอัดขณะทำการทดสอบที่ทำให้ก้อนอิฐมอญแตก และค่า A จากขนาดของพื้นที่หน้าตัดของก้อนอิฐมอญขนาดความกว้าง 65 ยาว 145 และสูง 35 มิลลิเมตร

$$\text{ความต้านแรงอัด (Fa)} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

เมื่อ Fa แทน ความต้านแรงอัด (kg/cm²)

P แทน การรับแรงอัด (kg)

A แทน พื้นที่รับแรงอัด (cm²)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ขั้นตอนการทดลองการดูดซึมน้ำ (ก) และการดูดซึมน้ำความชื้น (ข)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลของลักษณะทางกายภาพอิฐมอญดูดซึมน้ำ

ลักษณะทางกายภาพของอิฐมอญที่ผ่านกระบวนการซังรูป ดังตารางที่ 2 พบว่า ทั้ง 6 ตัวแปร มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ ± 2 ตามมาตรฐาน มอก. 77-2565 ซึ่งมีรูปร่างไม่บิดตัว สุกสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อน และพบว่าลักษณะผิวของอิฐมอญมีความละเอียดที่อัตราส่วนผสมตัวแปรที่ 1 และจะมีลักษณะผิวหยาบมากขึ้นจนถึงอัตราส่วนผสมตัวแปรที่ 6 ซึ่งจะมีลักษณะผิวหยาบมากที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนผสมของดินเหนียวกับผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มีปริมาณใกล้เคียงกัน และเป็นผลมาจากขนาดของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีลักษณะใหญ่กว่าเนื้อดินเหนียว

3.2 ผลการทดสอบอิฐมอญดูดซึมน้ำ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบอิฐมอญดังตารางที่ 3 พบว่า ตัวแปรที่ 3 เป็นการทดสอบหาค่าอิฐมอญสูตรดั้งเดิม ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำ 21.2 มิลลิลิตรต่อลูกบาศก์เมตร การดูดซึมน้ำ 9.4% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน การดูดซึมน้ำความชื้น 0.42% และ ค่าความ-



ตารางที่ 2 ผลลักษณะทางกายภาพอิฐมอญดูดซับ

ตัวแปรที่	ลักษณะทางกายภาพของอิฐมอญ	ตัวแปรที่	ลักษณะทางกายภาพของอิฐมอญ
1		4	
2		5	
3		6	

ต้านแรงอัด 37.8 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้เล็กน้อยการดูดซับกลิ่นของอิฐมอญจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มากขึ้น ซึ่งมีค่า 28.5-44.3 มิลลิลิตรต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากรูพรุนที่อยู่ภายในผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียสามารถดูดซับกลิ่นได้ดี [5, 6] แต่ข้อเสียของการมีรูพรุนในอิฐมอญมากเกินไปอาจส่งผลต่อการรับแรงเมื่อนำไปใช้งาน [11] การดูดซึมน้ำของอิฐมอญ พบว่า ตัวแปรที่ 5 และ 6 มีค่าการดูดซึมน้ำเกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งมีค่า 22.3 และ 27.7 % ตามลำดับ เนื่องจากขนาดความโตและขนาดของรูพรุนจากผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียทำให้

อิฐมอญมีหลุมฟองอากาศหรือมีความพรุนเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุมากตามไปด้วย [13] และตัวแปรที่ 2-4 มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอยู่ที่ 11.0-16.1 % การดูดซับความชื้นของอิฐมอญมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นตามลำดับของอัตราส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มากขึ้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.42-1.53% เนื่องจาก

ปริมาณของส่วนผสมจากผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีผลต่อการดูดซับความชื้นของอิฐมอญและยังส่งผลต่อความพรุนของเนื้ออิฐมอญ ซึ่งอิฐมอญที่มีค่าความชื้นน้อยจะแสดงให้เห็นว่าอิฐมอญนั้นมีค่าความหนาแน่นมากกว่าอิฐมอญที่มีค่าความชื้นในระดับมาก [18] การทดสอบความต้านแรงอัด พบว่า ตัวแปรที่ 3 และ 4 มีค่าความต้านแรงอัดตามมาตรฐาน ซึ่งมีค่า 30.6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 33.1 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และตัวแปรที่ 5 และ 6 มีค่าความต้านแรงอัดที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งมีค่า 25.6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 27.7 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

อันเนื่องมาจากส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีผลต่อการประสานเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเนื้อดินเหนียวกับผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียไม่สมบูรณ์ [18] ทำให้ค่าความต้านแรงอัดของอิฐมอญลดลงตามอัตราส่วนผสมที่มากขึ้น [19]



ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอิฐมอดูดูดซับ

ตัวแปร	การดูดซับกลีน (มิลลิลิตร/ลูกบาศก์เมตร)	การดูดซึมน้ำ (%)	การดูดซับความชื้น (%)	ความต้านแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
1	21.2	9.3	0.42	37.8
2	28.5	11.0	0.65	35.5
3	30.4	13.7	0.78	33.1
4	34.6	16.1	0.94	30.6
5	39.7	22.3	1.21	27.7
6	44.3	27.7	1.53	25.6

จากตารางที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการทดลองระหว่างตัวแปรที่ 1 ซึ่งเป็นสูตรดั้งเดิม กับตัวแปรที่ 2-6 ซึ่งเป็นสูตรจากการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยหลังจากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่ 1 มีค่าการดูดซับกลีนและค่าการดูดซับความชื้นน้อยกว่าตัวแปรที่ 2-6 มาก เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ช่วยในการดูดซับกลีนและความชื้นในเนื้ออิฐมอดู และจากการเปรียบเทียบตัวแปรที่ 2-6 พบว่า ตัวแปรที่มีค่าการดูดซับน้ำและค่าความต้านแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ ตัวแปรที่ 3 และ 4 ซึ่งมีความเหมาะสมทั้งสองตัวแปรขึ้นอยู่กับทางเลือกไปใช้งาน โดยหากนำไปใช้งานในลักษณะที่มีภาระรับน้ำหนักหรือมีภาระงานที่มากก็สามารถเลือกนำตัวแปรที่ 3 ไปใช้งานได้ ซึ่งจะมีค่าความต้านแรงอัดที่สูงกว่าตัวแปรที่ 4 และ

หากเลือกไปใช้งานในลักษณะงานที่มีภาระการรับน้ำหนักไม่มากนัก ใช้ทำเป็นวัสดุตกแต่งในบ้าน วัสดุดูดซับกลิ่นหรือดูดซับความชื้นในห้องครัว ห้องน้ำ และวัสดุในการดูดซึมน้ำ ก็สามารถเลือกตัวแปรที่ 4 ไปใช้งานได้ตามความเหมาะสม

3.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่า

จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของงานวิจัยในการขึ้นรูปอัดก้อนอิฐมอดูดูดซับ จากตารางที่ 4 เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างการอัดก้อนอิฐมอดูแบบดั้งเดิมกับการอัดก้อนอิฐมอดูที่ได้รับการพัฒนาโดยค่าที่ได้ทำการอ้างอิงข้อมูลจากกระบวนการอัดก้อนอิฐมอดูแบบดั้งเดิมของ คุณเสริมศักดิ์ ทิพย์วงศ์ ปัจจุบันทำการจำหน่ายก้อนละ 1 บาท ในกำลังการผลิตต่อครั้งประมาณ 50,000 ก้อน จะมีกำไรประมาณ 23,640 บาท/ครั้ง

อย่างไรก็ตามจากการประยุกต์งานวิจัยตัวแปรที่ 4 มาทำการวิเคราะห์หาความคุ้มค่า ซึ่งเป็นตัวเลือกไปใช้งานในลักษณะงานวัสดุตกแต่ง งานดูดซับกลิ่น งานดูดซับความชื้น และงานดูดซึมน้ำ ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของดินเหนียว ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย และแกลบละเอียด ในปริมาณ 70:25:5 ตามลำดับ เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบและพิจารณาจากคุณสมบัติเด่นเฉพาะงานที่เพิ่มเข้ามาจากอิฐมอดูแบบดั้งเดิม จะสามารถขายได้ในราคา 1.5-2 บาท/ก้อน ในกำลังการผลิตต่อครั้งประมาณ 50,000 ก้อน จะมีกำไรประมาณ 36,340-61,340 บาท/ครั้ง



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่า

ที่	รายละเอียด	อิฐมอญดั้งเดิม		อิฐมอญดูดซับตัวแปรที่ 4	
		จำนวน	ราคา (บาท)	จำนวน	ราคา (บาท)
1	ดินเหนียว (ราคาเหมาโดยประมาณ)	9,500 กก.	750	7,000 กก.	550
2	ค่าจ้างเผาและบดผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย	-	-	2,500 กก.	12,500
3	แกลบบดละเอียด	500 กก.	2,500	500 กก.	2,500
4	ค่าไฟฟ้าเครื่องอัดก้อนอิฐ มอเตอร์ 5 แรงม้า	80 ชม.	2,310	80 ชม.	2,310
5	ค่าน้ำเฉลี่ย	10 วัน	300	10 วัน	300
6	ค่าแรงขึ้นรูปก้อนอิฐและนำเข้าเตาเผา 2 คน	10 วัน	8,000	10 วัน	8,000
7	แกลบเผา 100 กิโลกรัม	5,500 กก.	11,000	5,500 กก.	11,000
8	ค่าแรงเผาและนำออกจากเตาเผา 1 คน	5 วัน	1,500	5 วัน	1,500
	รวมต้นทุน	-	26,360	-	38,660
	การขาย (ผลิตครั้งละ 50,000 ก้อน)	1 บาท/ก้อน	50,000	1.5-2 บาท/ ก้อน	75,000- 100,000
	รวมกำไร	-	23,640	-	36,340- 61,340

3.4 ผลการประเมินความพึงพอใจ

ผลการประเมินความพึงพอใจในการถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน จำนวน 20 คน เป็นเพศชาย 10 คน และเพศหญิง 10 คน โดยทำการประเมินทั้งหมด 9 ด้าน คือ ด้านกระบวนการถ่ายทอดองค์ความรู้ ด้านความรู้-ความเข้าใจ ด้านการนำไปใช้ประโยชน์ ด้านความพึงพอใจ ด้านเนื้อหา ด้านวิทยากร ด้านบริหารจัดการ ด้านประโยชน์และผลที่ได้รับจากการเข้าร่วม และด้านการนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ภายหลังการอบรม พบว่า มีระดับความพึงพอใจในภาพรวมมีค่าเฉลี่ย 4.45 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.39 มีค่าคะแนนความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก และเมื่อพิจารณารายด้านพบว่าด้านประโยชน์และผลที่

ได้รับจากการเข้าร่วม มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.48 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.41 และด้านที่มีระดับความพึงพอใจน้อยที่สุดคือ ด้านการนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ภายหลังการอบรม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.23 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.45 เนื่องจากทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนยังไม่มีเครื่องอัดก้อนอิฐมอญ อีกทั้งราคาของเครื่องในท้องตลาดมีราคาแพง วิสาหกิจชุมชนจึงไม่สามารถนำไปต่อยอดเองได้ทั้งหมด ซึ่งปัจจุบันต้องนำไปจ้างขึ้นรูปก้อนอิฐมอญ อย่างไรก็ตามผลโดยภาพรวมของการประเมินความพึงพอใจในการพัฒนาอิฐมอญจากผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ไม่มีข้อที่ต่ำกว่าเกณฑ์จากตัวชี้วัดของโครงการ (Key Results: KR) ที่กำหนดไว้ [1]



4. สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการพัฒนาอิฐมอญดูดซับกลิ่น ซึ่งผลจากการดูดซับกลิ่นจะมีค่าการดูดซับได้มากขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มากขึ้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 28.5-44.3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลจากการดูดซับน้ำในตัวแปรที่ 2-4 มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอยู่ที่ 11.0-16.1% ผลจากการดูดซับความชื้นจะเห็นได้ว่าค่าความชื้นมีปริมาตรการดูดซับได้เพิ่มมากขึ้นตามลำดับของอัตราส่วนผสมของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มากขึ้นซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.42-1.53% ผลจากการทดสอบความต้านแรงอัดในตัวแปรที่ 3 และ 4 มีค่าการรับกำลังอัดตามมาตรฐานซึ่งมีค่า 30.6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 33.1 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรตามลำดับ และผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวแปรที่ 1 ซึ่งเป็นสูตรดั้งเดิม มีค่าการดูดซับกลิ่นและค่าการดูดซับความชื้นน้อยกว่าตัวแปรที่ 2-6 ซึ่งเป็นสูตรจากการวิจัย และจากการเปรียบเทียบตัวแปรที่ 2-6 ตัวแปรที่มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าความต้านแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ ตัวแปรที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสมที่สุดในการเลือกไปใช้งาน โดยตัวแปรที่ 3 เหมาะสำหรับนำไปใช้งานที่มีความต้านแรงอัดหรือการรับแรง และตัวแปรที่ 4 เหมาะสำหรับนำไปใช้ในลักษณะงานตกแต่ง งานดูดซับกลิ่น ดูดซับความชื้น ดูดซึมน้ำ และใช้งานในลักษณะที่ไม่ต้องรับแรงมากเมื่อทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้วยคุณสมบัติเด่นหลายประการจะสามารถเพิ่มกำไรจากเดิมได้ประมาณ 12,700-37,700 บาท/ ครั้ง

อย่างไรก็ตามจากการถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยทำการประเมินทั้งหมด 9 ด้านพบว่ามึระดับความพึงพอใจในภาพรวมมีค่าเฉลี่ย 4.45 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.39 มีค่าคะแนนความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก เมื่อสรุปโดยภาพรวมไม่มีข้อที่ต่ำกว่าเกณฑ์จากตัวชี้วัดของโครงการที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้ในการพัฒนาอิฐมอญดูดซับกลิ่นสามารถตอบสนองความต้องการของกลุ่มเป้าหมายได้อย่างมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ครั้งนี้ และขอขอบคุณโรงอัดก้อนอิฐของคุณเสริมศักดิ์ ทิพย์วงศ์ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนใช้เครื่องอัดก้อนอิฐพร้อมสูตรการผลิตอิฐมอญ รวมไปถึงคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏมณฑลอิสาน ขอนแก่น และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมณฑลฉันทนา พิษณุโลก ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบอิฐมอญ และขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้ผลิตและแปรรูปแมคคาเดเมียเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ให้ข้อมูลประกอบการวิจัยเพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี และได้นำองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาอิฐมอญจากผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Khrueaphue, A. Chanpahol, S. Srisawad, S. Thiakthum and P. Rienglard, Development of exfoliating products from macadamia shell scraps for the community enterprise of khao kho macadamia producer and processing group Phetchabun province, Science and Technology Journal, 2021, 5(2), 57-69. (In Thai)
- [2] L.G. Mereles, E.A. Ferro, N.L. Alvarenga, S.B. Caballero, L.N. Wiszovaty, P.A. Piris and B.J. Michajluk, Chemical composition of macadamia integrifolia (Maiden and Betcher) nuts from Paraguay, International Food Research Journal, 2017, 24(6), 2599-2608.
- [3] A. Wechsler M. Zaharia, A. Crosky and V. Sahajwalla, Macadamia (Macadamia integrifolia) shell and castor (Ricinus communis) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard, Materials and Design, 2013, 50, 117-123.
- [4] P. Thanpattranon and N. Lekrungronggid, Agricultural waste recycling by using para-wood Ash as composite material for interlocking block, Thai Society of Agricultural Engineering Journal, 2020, 26(2), 47-52. (In Thai)
- [5] J. Sakdapipanich, P. Rodgerd and S. Nijpanich, A pressure-sensitive adhesive made from macca carbon for medical use, Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 2023, 39(1), 26-39.
- [6] K. Khiaomang, Activated carbon from cassava rhizomes for the design of odor-absorbing products, Fine and Applied Arts, Burapha University, 2020.
- [7] N. Chanpetch and W. Kokkumhang, Testing the ability to bear fruit the strength of the Thailand coordination block, Thai Science and Technology Journal, 2016, 4(2), 196-206. (In Thai)
- [8] J. Phansuwan, J. Aunwong and P. Intharaphat, A study of factors affecting on the efficiency of An odor absorbing rubber, The 6th Academic conference Ubon Ratchathani University Research, Proceeding, Thailand, 2012, 36-45.
- [9] S. Chanbuala, Product development of clay brick products in Phra Nakhon Si Ayutthaya and Angthong provinces, SDU Research Journal of Sciences and Technology, 2012, 5(1), 12-22.
- [10] N. Tatujiangkul and K. Jitchaiyapoom, Physical properties of lightweight fired clay made from diatomite Earth mixed with foam, 25th National Convention on Civil Engineering, Chonburi Thailand, 2020, 1-8.



- [11] K. Nokkaew, S. Phaikaew, K. Harnchai, M. Meetham and N.Suksin, Quality evaluation of mon brick produced in SanukGroup province, Twenty-seventh National Convention on Civil Engineering, Chiang Rai, Thailand. 2022, 1-7.
- [12] N. Phonphuak, Development of clay brick process with glass cullet additions, Science and Technology Journal of Sisaket Rajabhat University, 2021, 1(2), 1-11.
- [13] S. Maneewan, S. Prachakiew and P. Amorsakchai, The effect of air bubbles on absorb moisture In construction materials of building, The 21th Thailand Mechanical Engineering Conference, visit Chonburi, 2007, 1-6.
- [14] N. Chanpetch, Improvement the quality of bricks without burn with straw fiber in central region for sustainable commercial use, Annual Report, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand, 2019, 1-63. (In Thai)
- [15] A. Pornprasert and P. Pornprasert, An appropriate raw materials ratio study affect to strength properties of the clay brick : A case study in mun riverside communities, warin chamrap district, Ubon Ratchathani Province, Journal of Srivanalai Vijai, 2019, 9(2), 81-91.
- [16] S. Janbuala and T. Wasanapiampong, The development of lightweight clay brick with added bagasse ash, Research Journal Science and Technology, 2017, 10(1), 14-30. (In Thai)
- [17] P. Chuchaisong and S. Wongthong, Study of the properties of clay bricks produced in Chon Buri province, Annual Report, Burapha University, Thailand, 2009.
- [18] K. Pimraksa and P. Chindaprasirt, Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum, Ceramics International, 2009, 35(1), 471-78.
- [19] A. Just and B. Middendorf, Microstructure of high-strength foam concrete, Materials Characterization, 2009, 60(7), 741-748.



การออกแบบบอร์ดแปลงสัญญาณระหว่าง CAN bus และ Modbus สำหรับรถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

ก่อเกียรติ อ้อดทรัพย์¹ และ สุรัชชัย วงษ์ฟูเกียรติ^{2*}

¹ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), surachai.w@nrru.ac.th

วันที่รับบทความ: 19 มิถุนายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 22 กันยายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 24 ตุลาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: รถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover หรือ APM) เป็นระบบขนส่งมวลชนอัตโนมัติเต็มรูปแบบที่นิยมในการขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารผู้โดยสารและอาคารเทียบเครื่องบินระบบนี้สามารถควบคุมได้ทั้งจากภายในตัวรถและจากสถานีควบคุม โดยสถานีจะต้องสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของรถได้อย่างต่อเนื่อง การวิจัยด้านการออกแบบและพัฒนาบอร์ดแปลงสัญญาณอัตโนมัติในประเทศไทย รวมถึงการพัฒนาชุดฝึกเพื่อจำลองการทำงานของรถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ นิยมใช้โครงสร้างพื้นฐานจากระบบไฟฟ้าซึ่งใช้โปรโตคอลการสื่อสารแบบแคนบัส (CAN bus) ขณะที่การสื่อสารภายในสถานีใช้โปรโตคอลมอดบัส (Modbus) ซึ่งเป็นมาตรฐานในอุตสาหกรรมอัตโนมัติเพื่อเชื่อมโยงการทำงานระหว่างโปรโตคอลทั้งสองจึงจำเป็นต้องมีตัวกลางเชื่อมต่อนานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาบอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณการสื่อสารระหว่างมอดบัสอาร์ทียู (Modbus RTU) และแคนบัส (CAN bus) โดยใช้โปรโตคอล SAE J1939 ซึ่งบอร์ดนี้มีชื่อว่า CAN2RS485 ผู้ใช้งานสามารถกำหนดแคนไอดี (CAN ID) ได้ตามความต้องการ และสามารถกำหนดให้ข้อมูลจากแคนไอดีส่งไปยังรีจิสเตอร์ของมอดบัสได้ตามความต้องการเพื่อแสดงผลการทำงานของรถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่สถานี นอกจากนี้ยังสามารถรับข้อมูลจากรีจิสเตอร์ของมอดบัสและส่งไปยังแคนบัสเพื่อควบคุมการทำงานของรถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติได้ ในส่วนของมอดบัส บอร์ดยังสามารถกำหนดให้ทำงานในโหมดมาสเตอร์หรือสลาฟได้ตามความต้องการ

คำสำคัญ: แคนบัส; มอดบัส; รถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ; แปลงสัญญาณ

Designing a Signal Conversion Circuit Board between CAN bus and Modbus for Automated People Mover

Kokiat Aodsup¹ and Surachai Wongfookeat^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

² Electric Vehicle Engineering Program, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: surachai.w@nrru.ac.th

Received: 19 June 2024; Revised: 22 September 2024; Accepted: 24 October 2024

Online Published: 19 December 2024

Abstract: The Automated People Mover (APM) is a fully automated mass transit system commonly used for transporting passengers between terminal buildings and boarding gates. This system can be controlled both from within the vehicle and from a control station, with the station being required to continuously monitor the vehicle's operational status. Research on the design and development of automated people movers in Thailand, including the development of training kits to simulate the operation of APMs, often utilizes infrastructure based on electric buses, which use the CAN bus communication protocol. Meanwhile, station communications typically use the Modbus protocol, a standard in industrial automation. To link the operations between these two protocols, an intermediary connector is necessary. This research focuses on the development of a board for converting communication signals between Modbus RTU and CAN bus using the SAE J1939 protocol. This board, called CAN2RS485, allows users to set the CAN ID as desired, and to configure data from a selected CAN ID to be sent to the Modbus registers for displaying the APM's operational status at the station. Additionally, it can receive data from Modbus registers and send it to CAN bus to control the operation of the APM. In the Modbus section, the board can also be configured to operate in either master or slave mode as needed.

Keywords: CAN bus; Modbus; APM; Converter



1. บทนำ

รถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ หรือ เอพีเอ็ม (Automated People Mover, APM) เป็นระบบขนส่งมวลชนที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ นิยมใช้ในพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น สนามบิน เพื่อขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารผู้โดยสาร (Terminal) และอาคารเทียบเครื่องบิน ในประเทศไทย เอพีเอ็มถูกใช้งานในสนามบินสุวรรณภูมิและโครงการรถไฟฟ้าสายสีทอง ปัจจุบันมีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการทำงานของเอพีเอ็มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ รวมถึงงานวิจัยเกี่ยวกับความปลอดภัยและการสร้างมาตรฐานสำหรับระบบเอพีเอ็ม นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่นำมาตราฐาน IEC 61850 ซึ่งเป็นโปรโตคอลการสื่อสารสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย มาประยุกต์ใช้กับเอพีเอ็มอีกด้วย [1-4]

ในประเทศไทยมีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งเน้นการพัฒนาเอพีเอ็ม โดยเฉพาะด้านการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถเอพีเอ็ม [5] รวมถึงการออกแบบและสร้างต้นแบบ เอพีเอ็มของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และการพัฒนาต้นแบบชุดฝึกเอพีเอ็ม ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานจากรถบัสไฟฟ้า สำหรับการสื่อสารภายในตัวรถเอพีเอ็ม จะใช้โปรโตคอลแคนบัส (Controller Area Network, CAN bus) ในการสื่อสาร ส่วนการสื่อสารระหว่างตัวรถกับสถานีควบคุมการเดินรถจะใช้โปรโตคอลมอดบัส (Modbus) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการเชื่อมต่อระหว่างสองโปรโตคอลนี้ งานวิจัยหนึ่ง [6] ได้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณจากแคนบัส เป็น RS-485 แต่ยังไม่มีการนำไปใช้งานจริง ขณะที่ในท้องตลาดมีโมดูลสำหรับ

แปลงสัญญาณระหว่างแคนบัส และ RS-485 จำหน่าย แต่ส่วนใหญ่จะเป็นแบบมอดบัสอาร์ทียูสลาฟ (Modbus RTU slave) และใช้กับแคนโอเพ่น (CANopen) ซึ่งออกแบบมาใช้ในระบบอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรม สำหรับการใช้งานแคนบัสในอุตสาหกรรมยานยนต์หรือยานพาหนะ มักนิยมใช้โปรโตคอล SAE J1939

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาบอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณการสื่อสารระหว่างมอดบัสอาร์ทียู ซึ่งสามารถตั้งค่าให้ทำงานในโหมดมาสเตอร์หรือสลาฟได้ กับแคนบัส โดยใช้โปรโตคอล SAE J1939 เพื่อเชื่อมต่อการสื่อสารระหว่างระบบตัวรถเอพีเอ็ม กับสถานีควบคุม

2. โปรโตคอลการสื่อสารของเอพีเอ็ม

2.1 โปรโตคอลแคนบัส

แคนบัส เป็นมาตรฐานการสื่อสารผ่านสายที่ออกแบบมาให้อุปกรณ์ต่างๆ ใช้สื่อสารกัน โดยเฉพาะในรถยนต์ ซึ่งนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นการสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถทำงานแบบเรียลไทม์ ระบบการสื่อสารนี้จะสื่อสารด้วยสาย 2 เส้น โดยที่ปลายทั้งสองด้านจะต้องต่อตัวต้านทาน 120Ω (Terminating Resistor) และมีอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) มีค่าอยู่ระหว่าง 12.5 กิโลบิต/วินาที (kbit/s) ถึง 1 เมกะบิต/วินาที (Mbit/s) ในการส่งข้อมูลสามารถทำงานพร้อมกันได้ โดยที่ทุกอุปกรณ์จะได้รับข้อมูลเหมือนกัน แต่สามารถเลือกรับเฉพาะข้อมูลที่ต้องการได้ และหากมีอุปกรณ์ใดๆ เกิดการชำรุดเสียหาย อุปกรณ์อื่นๆ ระบบยังคงสามารถสื่อสารกันได้ กรณีที่มีการส่งข้อมูลพร้อมกัน ข้อมูลที่มีความสำคัญมากกว่าจะได้รับสิทธิในการส่งก่อน ส่วนข้อมูลที่มีความสำคัญน้อยกว่าจะได้โอกาสส่งใหม่ภายหลัง โดยจะมีตัวนับเรียกว่า ทีอีซี (Transmit Error Counter, TEC) และอาร์อีซี



(Receive Error Counter, REC) ทำหน้าที่นับจำนวนความผิดพลาดที่เกิดจากการรับ-ส่งข้อมูล โดยสถานะความผิดพลาด (Error States) แบ่งเป็น

- ความผิดพลาดแบบแอคทีฟ (Error Active) หมายถึง ทีอีซี และ อาร์อีซี นับได้น้อยกว่า 128 การรับ-ส่งข้อมูลยังปกติ แต่จะส่งเฟรมความผิดพลาด (Error frame) ทุกครั้งที่ตรวจพบความผิดพลาด
- ความผิดพลาดแบบพาสซีฟ (Error Passive) หมายถึง ทีอีซี และ อาร์อีซี นับได้มากกว่าหรือเท่ากับ 128 การรับ-ส่งข้อมูลยังปกติ แต่จะส่งเฟรมความผิดพลาด (Error frame) ทุกครั้งที่ตรวจพบความผิดพลาด
- ตัดการเชื่อมต่อ (Bus-Off) หมายถึง ทีอีซี นับได้มากกว่าหรือเท่ากับ 256 ในสถานะนี้ แคนคอนโทรลเลอร์ (CAN controller) จะไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลบนบัสอีกต่อไปจนกว่าจะได้รับการแก้ไข

การรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบแคน จะใช้แคนเฟรม (CAN frame) ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชนิดดังนี้

1. เฟรมข้อมูล (Data Frame) จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่นๆ
2. เฟรมรีโมท (Remote Frame) จะทำหน้าที่ร้องขอข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ
3. เฟรมความผิดพลาด (Error Frame) จะทำหน้าที่แจ้งทุกอุปกรณ์ในระบบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น
4. เฟรมโอเวอร์โหลด (Overload Frame) จะทำหน้าที่เมื่ออุปกรณ์ใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการประมวลผลข้อมูล หรือเมื่อเกิดข้อผิดพลาด

โครงสร้างของเฟรมข้อมูลจะแบ่งเป็น

1. เฟรมเริ่มต้น (Start of Frame, SOF) จำนวน 1 บิต จะเป็นตัวบอกให้อุปกรณ์รู้ว่ากำลังจะมีการส่งข้อมูล
2. ไอดี (Identifier, ID) จำนวน 11 บิต เป็นหมายเลขเฉพาะของข้อมูลและเป็นตัวกำหนดความสำคัญของข้อมูล
3. อาร์ทีอาร์ (Remote Transmission Request, RTR) จำนวน 1 บิต จะเป็นตัวกำหนดว่าเป็นข้อมูล หรือเฟรมรีโมท
4. ตัวควบคุม (Control) จำนวน 6 บิต ประกอบด้วย ส่วนขยายไอดี (Identifier Extension Bit, IDE), สำรอง (Reserved) และ ความยาวรหัสข้อมูล (Data Length Code, DLC)
5. ข้อมูลที่ต้องการส่ง (Data) จำนวนตั้งแต่ 0 ถึง 64 บิต
6. ซีอาร์ซี (Cyclic Redundancy Check, CRC) จำนวน 16 บิต สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล
7. ยืนยันการรับข้อมูล (Acknowledge, ACK) จำนวน 2 บิต
8. สิ้นสุดแคนเฟรม (End of Frame, EOF) จำนวน 7 บิต

2.2 โพรโตคอล SAE J1939 [8]

แคนบัสมีประสิทธิภาพสูงในรถยนต์ แต่ไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการข้อมูลมากกว่า 8 ไบต์ (byte) SAE J1939 เป็นโพรโตคอลเลเยอร์สูง (High Layer) ที่ใช้แคนบัสเป็นชั้นกายภาพสำหรับการสื่อสาร โดยใช้สายคู่บิดเกลียวหุ้มฉนวน ความยาวสูงสุด 40 เมตร และมีอัตราการส่งข้อมูลมาตรฐาน 250 กิโลบิต/วินาที



รองรับจำนวนโหนด (Node) สูงสุดจำนวน 30 โหนด และรองรับแอปพลิเคชัน (Application) สูงสุด 253 แอปพลิเคชัน รองรับการสื่อสารแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-peer) และบรอดแคสต์ (Broadcast) ความยาวข้อความสูงสุด 1785 ไบต์ โดยมีหมายเลขกลุ่มพารามิเตอร์ (Parameter Group Numbers, PGNs) สำหรับยานพาหนะที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และรองรับการจัดการเครือข่าย

2.2.1 หมายเลขกลุ่มพารามิเตอร์ (PGN)

SAE J1939 เป็นโปรโตคอลที่ออกแบบอย่างชาญฉลาดโดยจะใช้ประโยชน์จากไอดีข้อความจำนวน 29 บิต ของแคนบัส จากตารางพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อให้โปรโตคอลเข้าใจง่าย กลุ่มพารามิเตอร์ เช่น อุณหภูมิเครื่องยนต์ ประกอบด้วย อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง และ อุณหภูมิน้ำมัน กลุ่มพารามิเตอร์และหมายเลขของกลุ่มพารามิเตอร์ จะถูกระบุใน SAE J1939 และ SAE J1939/71 ซึ่งประกอบด้วยคำจำกัดความของกลุ่มพารามิเตอร์และหมายเลขของพารามิเตอร์

2.2.2 เอส พี เอ็น (Suspect Parameter Numbers, SPN)

เอสพีเอ็น คือหมายเลขที่กำหนดโดย SAE ให้กับพารามิเตอร์เฉพาะ โดยจะอธิบายรายละเอียดพารามิเตอร์ เช่น ความยาวข้อมูล ชนิดข้อมูล รายละเอียด ออฟเซต (Offset) ช่วง และป้ายอ้างอิง (Label)

2.2.3 ช่วงของหมายเลขกลุ่มพารามิเตอร์

- 0x0000 – 0xEEFF: ข้อความแบบเพียร์ทูเพียร์จำนวน 239 ข้อความที่กำหนดโดย SAE
- 0xEF00 – 0xEFFF: ข้อความแบบเพียร์ทูเพียร์จำนวน 1 ข้อความสำหรับการใช้งานเฉพาะ
- 0xF000 – 0xFEFF: ข้อความบรอดแคสต์จำนวน 3840 ข้อความที่กำหนดโดย SAE
- 0xFF00 – 0xFFFF: ข้อความบรอดแคสต์จำนวน 256 ข้อความสำหรับการใช้งานเฉพาะ

2.3 โปรโตคอล RS-485

โปรโตคอล RS-485 เป็นมาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรมที่กำหนดลักษณะทางไฟฟ้าของตัวส่งและตัวรับ เพื่อใช้งานในระบบดิจิทัลแบบสมดุลหลายจุด มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมและการพาณิชย์ เนื่องจากความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูงและความสามารถในการสนับสนุนการสื่อสารระยะไกล ใช้การส่งสัญญาณแบบต่างระดับในการส่งข้อมูล ซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนและปรับปรุงความสมบูรณ์ของสัญญาณในระยะทางไกล นอกจากนี้ยังรองรับอุปกรณ์สูงสุดถึง 32 อุปกรณ์บนบัสเดียว สามารถสื่อสารได้ในระยะสูงสุด 4,000 ฟุต ที่ความเร็วต่ำ และรองรับอัตราข้อมูลสูงถึง 10 เมกะบิต/วินาที ในระยะทางสั้น รองรับทั้งการสื่อสารทางเดียวและสองทาง โดยโหมดการสื่อสารสองทางต้องใช้สายสองคู่



2.4 โพรโตคอลมอดบัส

มอดบัสเป็นโพรโตคอลการสื่อสารที่ออกแบบมาใช้กับ พีแอลซี (Programmable Logic Controller, PLC) และได้กลายเป็นมาตรฐานในระบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีความเรียบง่าย น่าเชื่อถือ และติดตั้งง่าย ทำงานบนสถาปัตยกรรมมาสเตอร์-สลาฟ โดยที่อุปกรณ์มาสเตอร์จะทำหน้าที่เริ่มการสื่อสารและอุปกรณ์สลาฟจะเป็นตัวทำหน้าที่ตอบสนองสามารถมีได้หลายตัว สนับสนุนการสื่อสารทั้งแบบอนุกรมและแบบเครือข่าย โดยการทำงานของมอดบัสจะมีการกำหนดรหัสฟังก์ชัน (Function Codes) เพื่อระบุการดำเนินการ เช่น การอ่านรีจิสเตอร์ (Read Registers) หรือการเขียนรีจิสเตอร์ (Write Registers) นอกจากนี้ยังมีกลไกการตรวจสอบข้อผิดพลาด (Error Checking) เช่น CRC (Cyclic Redundancy Check) เพื่อความสมบูรณ์และความถูกต้องของข้อมูลที่ส่งผ่านเครือข่าย ซึ่งช่วยให้การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์มีความน่าเชื่อถือและปลอดภัย

2.4.1 ประเภทของมอดบัส

- มอดบัส อาร์ทียู (Modbus RTU) การทำงานจะใช้การเข้ารหัสแบบไบนารี (Binary) และเป็นการสื่อสารแบบอนุกรม (RS232, RS485)
- มอดบัส แอสกี (Modbus ASCII) จะใช้อักขระแอสกี (ASCII) ในการเข้ารหัสเป็นการสื่อสารแบบอนุกรมเช่นเดียวกับ มอดบัส อาร์ทียู แต่มีประสิทธิภาพน้อยกว่า มอดบัส อาร์ทียู
- มอดบัส ทีซีพี/ไอพี (Modbus TCP/IP) จะใช้อีเทอร์เน็ต (Ethernet) ในการสื่อสารและอนุญาตให้มีการสื่อสารผ่านเครือข่าย ทีซีพี/ไอพี (TCP/IP)

2.4.2 การจัดระเบียบข้อมูลในมอดบัส

ข้อมูลในการสื่อสารแบบมอดบัส จะประกอบด้วยรีจิสเตอร์ (Register) ทั้งหมด 4 รูปแบบ ซึ่งสามารถใช้งานโดยเฉพาะ และแต่ละรูปแบบจะมีที่อยู่ของข้อมูล (data address) อยู่ระหว่าง 0000-270E โดยรีจิสเตอร์แต่ละรูปแบบจะทำหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

- เอาต์พุตคอล์ย (Coils) จะเป็นเอาต์พุตดิจิทัลที่สามารถอ่านหรือเขียนได้ ตำแหน่งที่อยู่จะเริ่มต้นที่ 0x
- อินพุตแบบดิสครีต (Discrete Inputs) จะเป็น อินพุตดิจิทัลที่สามารถอ่านได้เท่านั้น ตำแหน่งที่อยู่จะเริ่มต้นที่ 1x
- อินพุต รีจิสเตอร์ (Input Registers) จะเป็น อินพุตอนาล็อกที่สามารถอ่านได้เท่านั้น ตำแหน่งที่อยู่จะเริ่มต้นที่ 3x
- โฮลดิ้ง รีจิสเตอร์ Holding Registers จะเป็น เอาต์พุตอนาล็อกที่สามารถอ่านหรือเขียนได้ ตำแหน่งที่อยู่จะเริ่มต้นที่ 4x

3. การออกแบบบอร์ด CAN2RS485

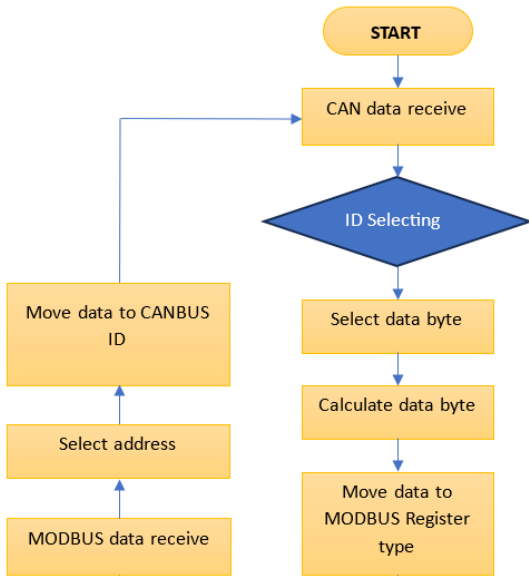
ในการออกแบบบอร์ดแปลงสัญญาณระหว่างแคนบัส กับมอดบัส โดยให้ชื่อว่า CAN2RS485 ซึ่งทำหน้าที่สื่อสารระหว่างตัวรถเอพีเอ็ม กับสถานี โดยการสื่อสารระหว่างตัวรถ กับบอร์ด จะเป็นการสื่อสารแบบแคนบัสภายใต้โพรโตคอล SAE J1939 ส่วนการสื่อสารระหว่างสถานีกับบอร์ด จะเป็นการสื่อสารผ่าน RS-485 ภายใต้โพรโตคอล มอดบัส อาร์ทียู

3.1 การออกแบบการทำงาน

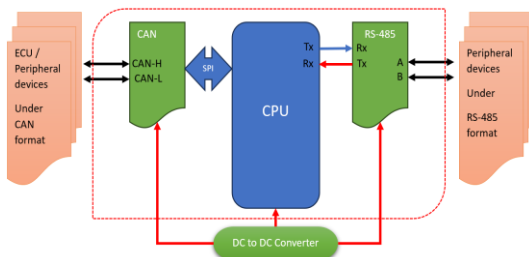
การทำงานของบอร์ด CAN2RS485 ในส่วนของการแปลงสัญญาณแคนบัสให้เป็นมอดบัส โดยจะ



แปลงค่า แคนไอดี และแคนเฟรม ให้อยู่ในรูปแบบ สลาฟ, ที่อยู่, รหัสฟังก์ชัน, ข้อมูล และ ซีอาร์ซี ของ มอดบัส ส่วนในกรณีการแปลงกลับก็จะทำในลักษณะ ตรงกันข้าม โดยแปลง สลาฟ, ที่อยู่, รหัสฟังก์ชัน, ข้อมูล และ ซีอาร์ซี ของมอดบัส ให้อยู่ในรูป แคนไอดี และแคนเฟรม การทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 แผนผังแสดงการทำงาน



รูปที่ 2 ไต่อะแกรมการทำงานของวงจร

3.2 การออกแบบภาคจ่ายไฟ

การออกแบบภาคจ่ายไฟจะเลือกใช้ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ เบอร์ LM2596S ซึ่งเป็นไอซีเรกูเลเตอร์ (Regulator) ที่สามารถรองรับอินพุตระหว่าง 12VDC ถึง 30VDC ให้เป็น 5VDC เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่าย ไฟฟ้าให้กับวงจรต่างๆ ภายในบอร์ด รายละเอียดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3

3.3 การออกแบบภาคการสื่อสารระหว่าง RS-485 กับ ซีพียู ของบอร์ด CAN2RS485

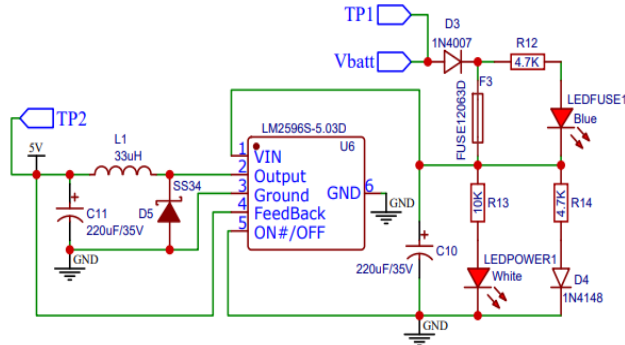
ภาคการสื่อสาร RS-485 ทำงานโดยรับสัญญาณ แบบอนุกรมยูอาร์ที(UART) จากซีพียู ผ่าน Rx และ Tx และใช้ TM74HC04 เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับ LED เพื่อแสดงการรับ-ส่งข้อมูล โดยมีตัวต้านทาน R8 ทำหน้าที่ปรับอิมพีแดนซ์ของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4

3.4 แคนบัส กับ ซีพียู ของบอร์ด CAN2RS485

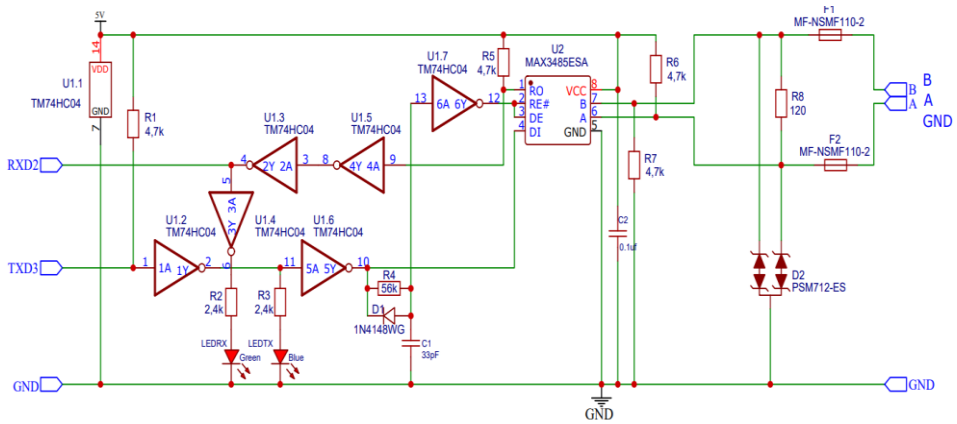
ภาคการสื่อสารแคนบัส ทำงานโดยรับสัญญาณเอส พีไอ (SPI) จากซีพียู ส่งมาที่ MCP2515 เพื่อแปลงเป็น สัญญาณแคนอนุกรม(CAN serial) จากนั้นส่งสัญญาณ ไปที่ MCP2551 เพื่อจัดการรับ/ส่ง โดยมี R11 ทำหน้าที่ ปรับอิมพีแดนซ์ของสายสื่อสาร ดังแสดงในรูปที่ 5

3.5 การออกแบบระบบสำหรับทดสอบการทำงาน

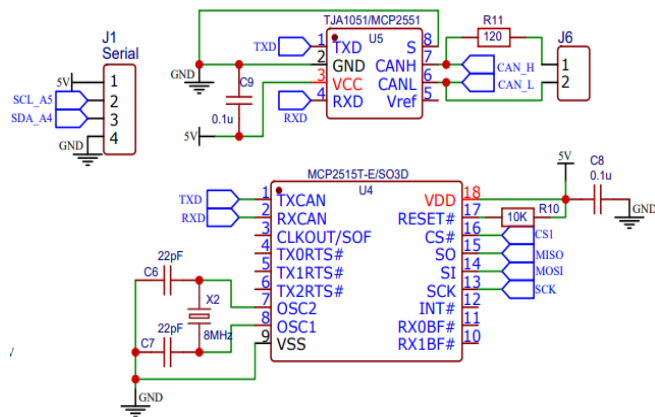
โดยออกแบบอินพุตสวิตช์ จำนวน 2 ตัว เชื่อมต่อกับขา D7 และ D8 ของ ซีพียู และเอาต์พุต แอลอีดี (LED) จำนวน 2 ตัว เชื่อมต่อกับขา D5 และ D6 ของ ซีพียู เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของบอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 6



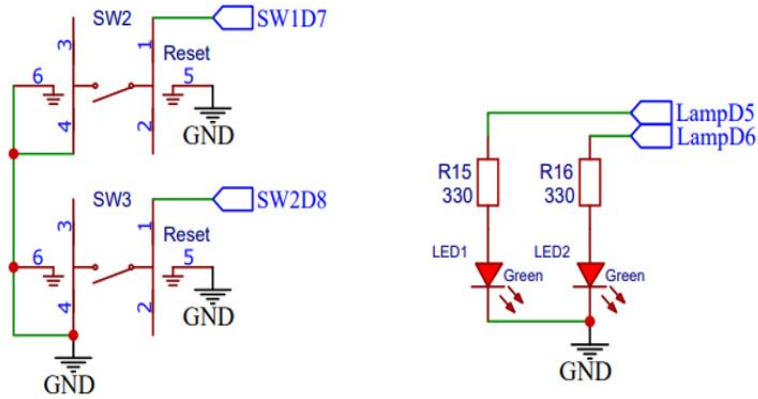
รูปที่ 3 วงจรภาคจ่ายไฟ



รูปที่ 4 วงจรการสื่อสารระหว่าง RS485 กับ ซีพียู



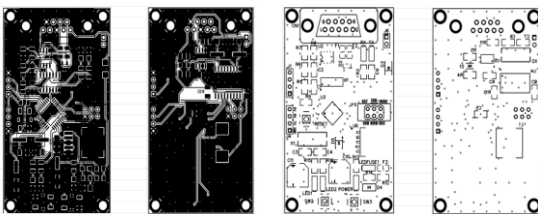
รูปที่ 5 วงจรการสื่อสารระหว่างแคนบัส กับซีพียู



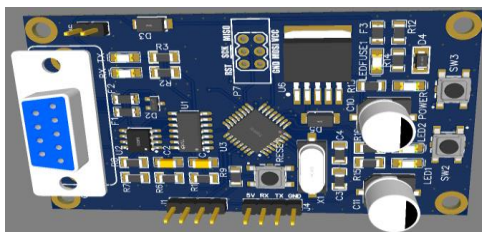
รูปที่ 6 วงจรสวิตช์อินพุต และ แอลอีดี เอาต์พุต สำหรับทดสอบการทำงาน

3.6 การออกแบบบอร์ด CAN2RS485

จากขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อที่ 3.2 ถึง 3.5 นำมาออกแบบ พีซีบี (PCB) และตำแหน่งการลงอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปภาพแสดงบอร์ด CAN2RS485 ดังแสดงรูปที่ 8



รูปที่ 7 วงจร พีซีบี และตำแหน่งอุปกรณ์

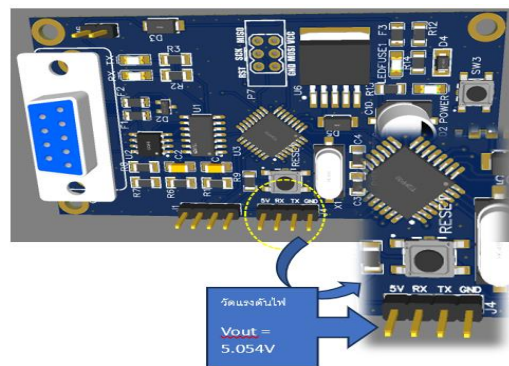


รูปที่ 8 บอร์ด CAN2RS485

4. การทดสอบการทำงาน

4.1 การทดสอบภาคจ่ายไฟ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบย่านการทำงานของ อินพุตภาคจ่ายไฟเพื่อให้สามารถรองรับการทำงานของ เอพีเอ็ม โดยจ่ายไฟให้กับวงจรระหว่าง 12 - 30 VDC จากนั้นวัดแรงดันเอาต์พุตที่จุดทดสอบได้ค่า 5.054 VDC ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการทดสอบภาคจ่ายไฟ

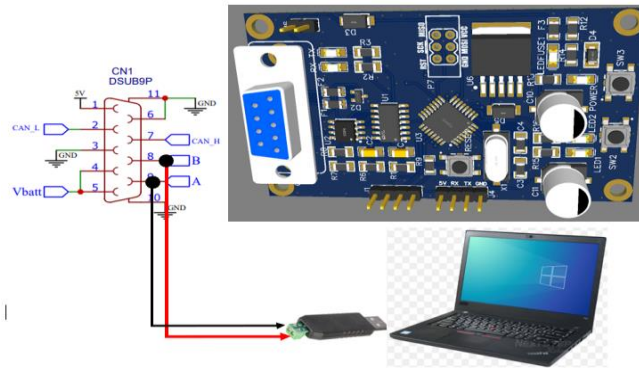


4.2 การทดสอบการสื่อสารด้วยโปรโตคอลมอดบัสอาร์ทียู

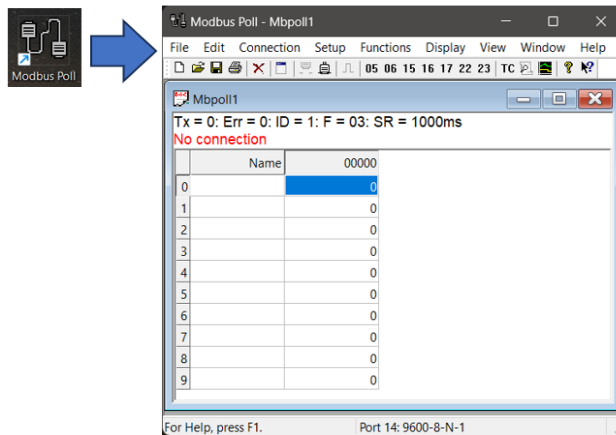
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบภาคการสื่อสารด้วยโปรโตคอลมอดบัส โดยจะใช้คอมพิวเตอร์เพื่อทำหน้าที่ในสื่อสารกับบอร์ด CAN2RS485 ภายใต้โปรโตคอลมอดบัสอาร์ทียู โดยจะกำหนดให้คอมพิวเตอร์เป็นมาสเตอร์ และ บอร์ด CAN2RS485 เป็น สล่าว วงจรการเชื่อมต่อเพื่อใช้ในการทดสอบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 10 โปรแกรมมอดบัสโพล เพื่อใช้ในการแสดงผลการรับ/ส่งข้อมูล(Modbus Poll) ดังแสดงในรูปที่ 11

4.3 การทดสอบการสื่อสารด้วยโปรโตคอล SAE J1939

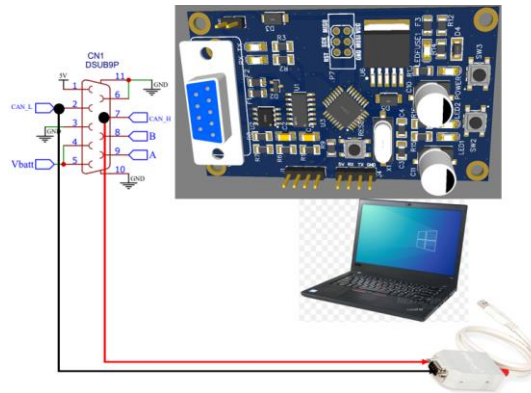
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบภาคการสื่อสารแคนบัส ด้วยโปรโตคอล SAE J1939 ซึ่งเป็นส่วนที่จะนำไปใช้ในการสื่อสารภายในตัวรถเอพีเอ็ม โดยในการทดสอบจะใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวกลางทำหน้าที่ในสื่อสารกับบอร์ด CAN2RS485 วงจรการเชื่อมต่อเพื่อใช้ในการทดสอบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 12 โปรแกรมพีแคนวิว(PCAN View) เพื่อใช้ในการแสดงผลการรับ/ส่งข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 13



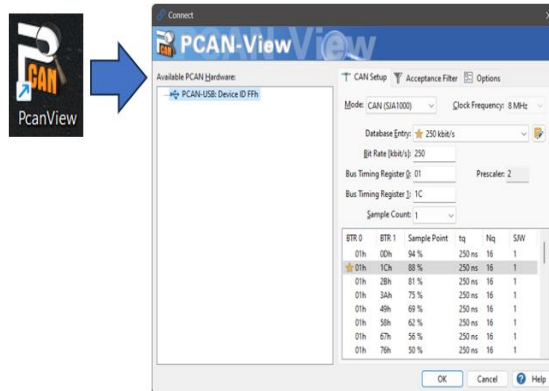
รูปที่ 10 วงจรการทดสอบ มอดบัส อาร์ทียู



รูปที่ 11 หน้าต่างโปรแกรม มอดบัสโพล



รูปที่ 12 วงจรการทดสอบ CAN BUS



รูปที่ 13 หน้าต่างโปรแกรม พีแคนวิว

5. ผลการทดสอบการสื่อสาร

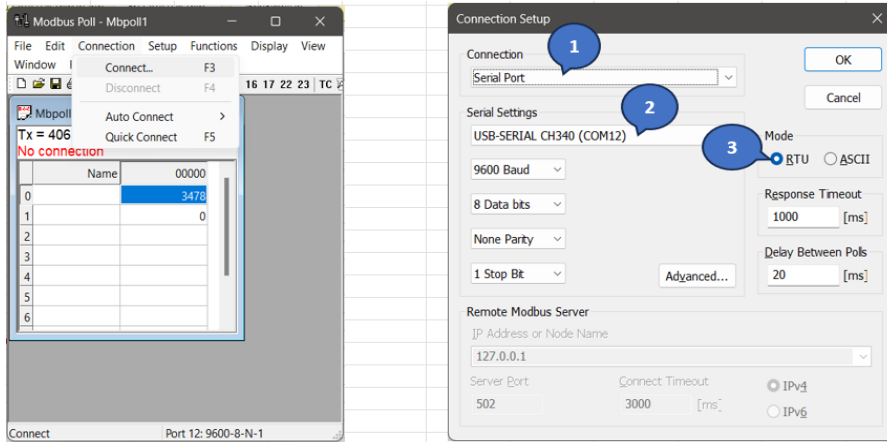
5.1 การทดสอบการสื่อสาร มอดบัส อาร์ทียู

เมื่อเปิดโปรแกรม มอดบัสโพล ตามรูปที่ 11 ซึ่งแสดงหน้าต่างโปรแกรมมอดบัสโพล จากนั้นเมื่อต้องการเชื่อมต่อการสื่อสารให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังรูปที่ 14

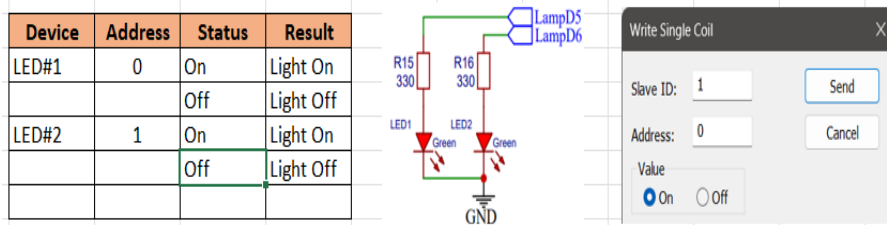
5.1.1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูล

การทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบการส่งข้อมูลจากโปรโตคอลมอดบัสเพื่อควบคุมการทำงานของหลอดแอลอีดี ที่อยู่ภายในบอร์ด CAN2RS485 โดยการ

ทดสอบจะเริ่มจากการต่อวงจรการเชื่อมต่อตามรูปที่ 10 และตั้งค่าการสื่อสารด้วยโปรแกรมมอดบัสโพล ตามรูปที่ 11 จากนั้นทดสอบการส่งข้อมูลผ่านรีจิสเตอร์คอยล์ (Coils : 0x) ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์แบบบิต เพื่อควบคุมการทำงานของหลอดแอลอีดี ผลการทดสอบพบว่าเมื่อข้อมูลบิตถูกส่งจากโปรแกรมมอดบัสโพล ไปยังบอร์ด CAN2RS485 โดยกำหนดให้ไอดี หมายเลข 1 ส่งสัญญาณสั่งงานหลอดแอลอีดี ทั้ง 2 หลอด พบว่า LED1 และ LED2 สามารถทำงานได้ตามข้อมูลที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 แสดงขั้นตอนการเชื่อมต่อระหว่าง
มอดบัสโพล กับคอมพิวเตอร์



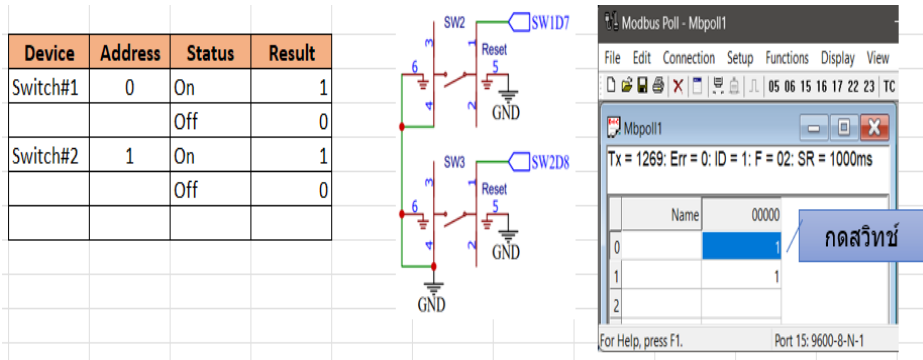
รูปที่ 15 แสดงผลการส่งข้อมูล

5.1.2 ผลการทดสอบการรับข้อมูลอินพุตแบบไม่ต่อเนื่อง

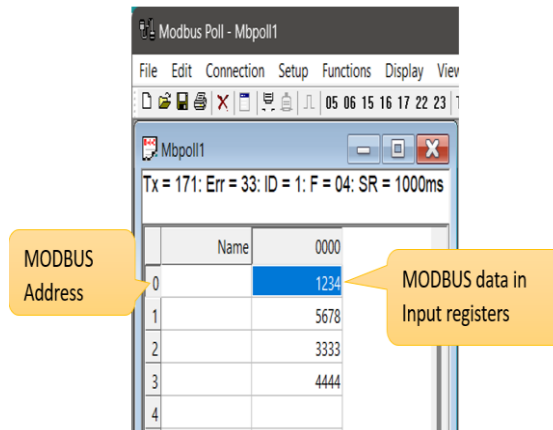
การทดสอบนี้เป็นการส่งค่าสถานะการกดคันสวิทช์ 2 ตัว ผ่านรีจิสเตอร์อ่านอินพุตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Inputs : 1x) โดยโปรแกรม มอดบัสโพล สามารถแสดงสถานะของสวิทช์ได้ตามเงื่อนไขการกด ดังแสดงในรูปที่ 16

5.1.3 ผลการทดสอบการรับข้อมูลอินพุตรีจิสเตอร์

การทดสอบการส่งข้อมูล 16 บิต เลขฐานฐานจำนวน 4 ข้อมูล ได้แก่ 04D2 162E 0D05 115C ผ่านบอร์ด CAN2RS485 โดยข้อมูลที่ส่งไปยัง มอดบัส ที่อินพุตรีจิสเตอร์ (Input Registers :3x) ที่อยู่ 0, 1, 2 และ 3 จากนั้นจะใช้โปรแกรม มอดบัสโพล อ่านข้อมูลพบว่าข้อมูลที่ส่งไปแสดงค่าเป็นเลขฐาน 10 ได้ตรงตามค่าที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 17



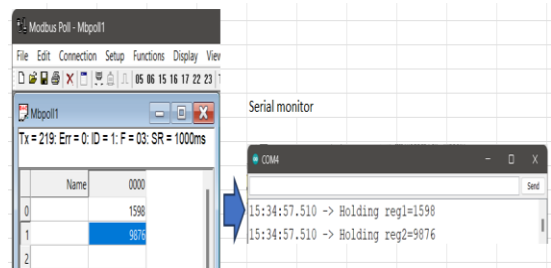
รูปที่ 16 แสดงผลการรับข้อมูลอินพุตแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 17 แสดงผลการรับข้อมูลอินพุตรีจิสเตอร์

5.1.4 ผลการทดสอบการรับข้อมูลโฮลดิ้งรีจิสเตอร์ (Holding Register)

ในการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบการส่งข้อมูลโฮลดิ้งรีจิสเตอร์ (Read Holding Registers: 4x) ขนาด 16 บิต จำนวน 2 ที่อยู่ โดยใช้โปรแกรมมอดบัลโพล ทำหน้าที่ส่งข้อมูลผ่านบอร์ด CAN2RS485 เพื่อนำข้อมูลไปแสดงผลที่ส่วนแสดงผลแบบอนุกรม (Serial Monitor) จากการทดสอบพบว่าข้อมูลที่ส่งจากโฮลดิ้งรีจิสเตอร์ มีค่าตรงกับข้อมูลที่ส่งไปยังส่วนแสดงผลแบบอนุกรม ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงผลการรับข้อมูลโฮลดิ้งรีจิสเตอร์



5.2 การทดสอบการสื่อสารแคนบัส

การทดสอบโดยต่อวงจรตามรูปที่ 12 และเลือกอัตราการส่งข้อมูล (bit rate) ที่ 250 Kbit/s

5.2.1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลแคนเฟรม (Data CAN Frame) ด้วยโปรแกรมพีแคนวี

การทดสอบกำหนดให้ แคนไอดี = 0x18A57F27 และ ข้อมูลแคนเฟรม = 11 22 33 44 55 66 77 88 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า แคนไอดี และ ข้อมูลแคนเฟรม สามารถส่งผ่านไปแสดงที่โปรแกรม พีแคนวี ได้ ตรงกับค่าของข้อมูลที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 19

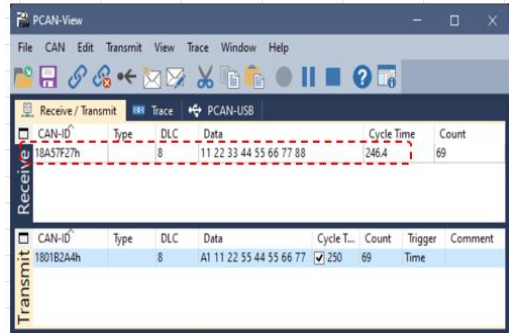
5.2.2 ผลการทดสอบการรับข้อมูลแคนเฟรม ด้วยโปรแกรม พีแคนวี

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการสื่อสารของระบบแคนบัส ของบอร์ด CAN2RS485 โดยกำหนดให้ แคนไอดีเป็น 0x08A57F28 และ ข้อมูลแคนเฟรม = 1A 2B 3C 4D 5E 6F A7 B8 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการทดสอบการสื่อสาร โดยผลการทดสอบพบว่า แคนไอดี และข้อมูลแคนเฟรม สามารถส่งผ่านบอร์ด CAN2RS485 ไปแสดงที่ส่วนแสดงผลแบบอนุกรมได้ถูกต้องตรงตามค่าที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 20

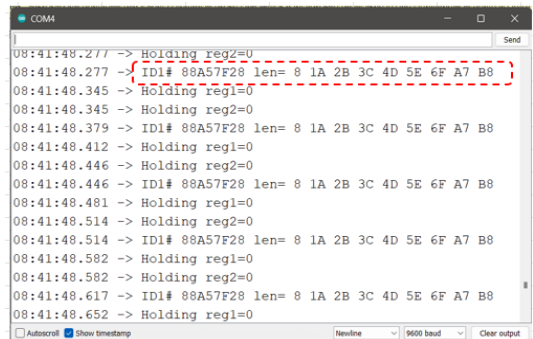
5.3 การทดสอบการสื่อสารระหว่าง แคนบัส และ มอดบัส

5.3.1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลแคนเฟรม ไปแสดงผลที่ โปรแกรม มอดบัสโพล

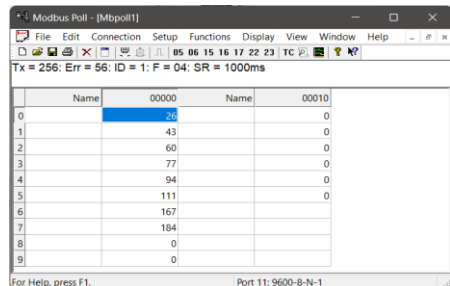
การทดสอบนี้จะทดสอบการนำข้อมูลจากแคนบัสไปแสดงผลที่มอดบัส โดยกำหนดให้ แคนไอดีเป็น 0x08A57F28 และข้อมูลแคนเฟรม = 1A 2B 3C 4D 5E 6F A7 B8 ตามลำดับ และส่งข้อมูลจำนวน 8 ไบต์ไปเก็บที่ อินพุตรีจิสเตอร์ ของมอดบัส โดยจะเริ่มต้นที่



รูปที่ 19 แสดงผลการส่งข้อมูลแคนเฟรม



รูปที่ 20 ผลทดสอบการรับข้อมูลแคนเฟรม



รูปที่ 21 ผลทดสอบการส่งข้อมูลแคนเฟรม ไปแสดงผลที่โปรแกรม มอดบัสโพล

300001 ผลการทดสอบพบว่า แคนไอดี และข้อมูลแคนเฟรม สามารถส่งผ่านไปแสดงที่อินพุตรีจิสเตอร์ ของมอดบัส ได้ตรงตามค่าที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 21



5.3.2 ทดสอบการส่งค่าโฮลดิ้งรีจิสเตอร์ไปแสดงผลที่โปรแกรม พีแคนวิว

การทดสอบกำหนดให้ โฮลดิ้งรีจิสเตอร์ = $0x1234_{10}$ อินพุตรีจิสเตอร์ของ มอดบัส จะเริ่มต้นที่ 400001 ผลการทดสอบพบว่าข้อมูลโฮลดิ้งรีจิสเตอร์ สามารถส่งผ่านบอร์ด CAN2RS485 ไปแสดงที่โปรแกรม พีแคนวิว ในรูปแบบเลขฐานสิบหก ซึ่งตรงกับข้อมูลที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 22

5.4 การทดสอบไปใช้งานกับ เอพีเอ็ม

5.4.1 ผลการทดสอบการควบคุมเอพีเอ็มด้วยตัวรถ

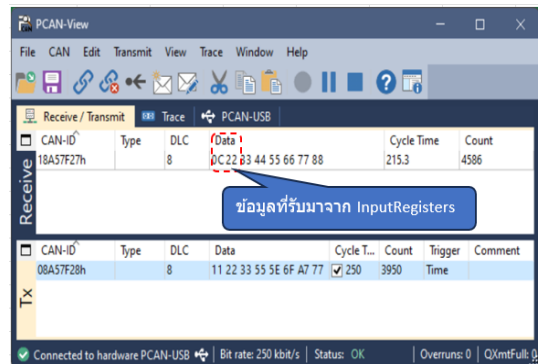
ในการทดสอบนี้จะทดสอบควบคุมการทำงานของเอพีเอ็มผ่านแคนบัส โดยกำหนดให้ แคนไอดีของตัวรถเป็น $0x18A72721$ โดยที่ 18 หมายถึงลำดับความสำคัญ (Priority : P) 3 บิต สำรอง (Reserved : RES) 1 บิต และหน้าของข้อมูล (Data Page : DP) 1 บิต A727 คือส่วนของหมายเลขกลุ่มพารามิเตอร์ โดยแบ่งเป็น A7 เป็นส่วนรูปแบบของหน่วยโปรโตคอลข้อมูล (Protocol Data Unit Format : PF) และ 27 เป็นส่วนของหน่วยโปรโตคอลข้อมูลเฉพาะ (Protocol Data Unit Specific : PS) 21 คือ ที่อยู่ต้นทาง (Source Address : SA) [11]

ในการทดสอบจะใช้สวิทช์สำหรับติดตั้งในตัวรถจำนวน 8 สวิทช์ ในการส่งข้อมูลแคนเฟรมจำนวน 2 ไบต์ โดยกำหนดให้ ไบต์ที่ 1 จะติดต่อกับสวิทช์ 1-4 และไบต์ที่ 2 จะติดต่อกับสวิทช์ 5-8 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของตัวรถ หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณมาที่ บอร์ด CAN2RS485 เพื่อแปลงสัญญาณเป็นมอดบัส ส่งไปที่อินพุตแบบดิสครีต (1X) เพื่อนำข้อมูลสถานะการทำงานไปแสดงผลที่สถานี ผลการ

ทดสอบพบว่า สามารถควบคุม เอพีเอ็มได้ และสามารถส่งสถานะไปแสดงผลที่สถานีได้ ดังแสดงในรูปที่ 23

5.4.2 ผลการทดสอบการควบคุมเอพีเอ็มด้วยสถานี

ในการทดสอบโดยควบคุมผ่านจอทัชสกรีนที่ติดตั้งในสถานี เพื่อควบคุมการทำงานของตัวรถ เอพีเอ็ม ผ่านบอร์ด CAN2RS485 ซึ่งจะแปลงสัญญาณมอดบัส รับมาจากเอาต์พุตคอล์ย (0X) ให้เป็นสัญญาณเป็น แคนบัส โดยจะกำหนด แคนไอดีของบอร์ด CAN2RS485 = $0x18A72717$ เพื่อส่งข้อมูลไปควบคุมการทำงานของตัวรถ ผลการทดสอบพบว่า สามารถควบคุมเอพีเอ็มจากสถานีได้ ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 22 ผลทดสอบการอ่านค่าโฮลดิ้งรีจิสเตอร์แสดงผลที่โปรแกรม พีแคนวิว



รูปที่ 23 ผลทดสอบการควบคุม เอพีเอ็ม ด้วยตัวรถ



รูปที่ 24 ผลทดสอบการควบคุมเอพีเอ็มด้วยสถานี

6. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาบอร์ดแปลงสัญญาณ CAN2RS485 สำหรับใช้ในระบบรถขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ หรือ เอพีเอ็ม ซึ่งเป็นระบบขนส่งอัตโนมัติที่นิยมใช้ในพื้นที่ขนาดเล็ก การสื่อสารภายในตัวรถเอพีเอ็มใช้โปรโตคอลแคนบัส ขณะที่สถานีควบคุมใช้โปรโตคอลมอดบัส ซึ่งจำเป็นต้องมีบอร์ดเชื่อมต่อเพื่อแปลงสัญญาณระหว่างสองโปรโตคอลนี้ บอร์ดที่พัฒนาขึ้นนี้รองรับการสื่อสารตามมาตรฐาน SAE J1939 และมอดบัสอาร์ทียู โดยสามารถกำหนดแคนไอดี และการตั้งค่ารีจิสเตอร์ของมอดบัสได้ตามต้องการ นอกจากนี้ บอร์ด CAN2RS485 ยังสามารถทำงานในโหมดมาสเตอร์หรือสลาฟได้ ผลการทดสอบพบว่า บอร์ดสามารถแปลงสัญญาณจากแคนบัสเป็นมอดบัส โดยสามารถแสดงผลการทำงานของเอพีเอ็มที่สถานีควบคุมได้ และสามารถรับข้อมูลจากมอดบัสแปลงกลับเป็นแคนบัส เพื่อควบคุมการทำงานของเอพีเอ็มได้ โดยการสื่อสารระหว่างตัวรถเอพีเอ็มและสถานีควบคุมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

6.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาบอร์ดนี้มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งอื่น ๆ เช่น ระบบรถไฟฟ้าหรือระบบขนส่งมวลชนที่ต้องการการเชื่อมต่อระหว่างโปรโตคอลที่แตกต่างกัน โดยสามารถปรับแต่งเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงานได้ แม้ว่าบอร์ดนี้จะทำงานได้ดีในการทดสอบ แต่หากนำไปใช้ในระบบเอพีเอ็มขนาดใหญ่ หรือระบบที่มีปริมาณข้อมูลการสื่อสารมาก จำเป็นต้องพิจารณาเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล รวมถึงการจัดลำดับความสำคัญของแคนไอดี เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานด้วย นอกจากนี้ ควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเข้ากันได้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เชื่อมต่อกับระบบ เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างราบรื่น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.D. Srivastava and R. Agrawal, Automated people movers: A futuristic approach to modern transportation planning, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2014, 11(3), 01-11.
- [2] M. van Doorne, G. Lodewijks, and W. Beelaerts van Blokland, Adapting automated people mover capacity on airports to real time demand, in M. Dressner, Ed., *Proc. 23rd World Conf. Air Transport Research Society (ATRS 2019)*, Proceeding, 2019, 45-52.
- [3] American Society of Civil Engineers, *Automated people mover standards*, ASCE Standard, Virginia, USA, 2024.



- [4] E.A. Perondi, J.R.F. Bertoldo, and V.H.C. de Albuquerque, Modeling and simulating the controller behavior of an automated people mover using IEC 61850 communication requirements, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 70(1), 123-130.
- [5] B. Khemkladmuk, T. Kulworawanichpong, and S. Wongfookeat, Design and prototype development of traffic control systems for automated passenger transport, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2022, 32(3), 1-17. (in Thai)
- [6] Q. Yuan, B. Zhang, and Q. Yuan, Design of a CAN-485 conversion circuit, 10th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2021), Proceeding, 2021, 120-125.
- [7] SAE J1939-21: Data link layer, SAE International, Warrendale, PA, USA, 2013.
- [8] <https://www.csselectronics.com/pages/j1939-explained-simple-intro-tutorial> (Accessed on 1 September 2024).



การประเมินเทคโนโลยีและต้นทุนระหว่างเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม และแบบเพิ่มขึ้นด้วยเทคโนโลยีฉีดเส้นวัสดุ

ชนิภา นิวาสานนท์¹ พรเทพ ออนุสรนิตินสาร¹ และ กสิณ รังสิกรรพุม^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kasinphd@gmail.com, kasin.r@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 21 พฤษภาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 9 กันยายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 18 ตุลาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: ในปัจจุบันการผลิตแบบเพิ่มขึ้นหรือการพิมพ์ 3 มิติ (3DP) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการผลิตและการออกแบบผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการพิมพ์ 3 มิติช่วยลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม และสามารถใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและต้นทุนการผลิตของการพิมพ์ 3 มิติ ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีและต้นทุนการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ กรณีศึกษา เมื่อกันนิ้วมือ ด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม และเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ โดยพิจารณาต้นทุนการผลิตด้านการจัดการต้นทุน ได้แก่ ต้นทุนเครื่องจักร ต้นทุนวัสดุ และต้นทุนแรงงาน ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิมจากการฉีดขึ้นรูปสำหรับการผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้น จะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานสูง เนื่องจากต้นทุนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ (Mold) โดยจะมีต้นทุนการผลิตลดลงเมื่อมีปริมาณการผลิตมากขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ โดยทำการออกแบบการวางแผนการผลิตด้วยโปรแกรม Cura และแสดงผลการทดลองจากการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์แบบเพิ่มขึ้นด้วยเทคโนโลยีฉีดเส้นวัสดุ สำหรับจำนวนชิ้นงานการผลิต 1 และ 5 ชิ้นต่อครั้ง พบว่าจุดคุ้มทุนของการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติ เทียบได้กับการผลิตชิ้นงานแบบดั้งเดิมที่ 2,264 ชิ้น และ 17,123 ชิ้น ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนการผลิตในงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนเชิงนโยบายในการเลือกเทคโนโลยีการผลิตต่าง ๆ และการวางแผนงานการผลิตที่เกี่ยวข้องกับทั้งการผลิตแบบดั้งเดิมและแบบเพิ่มขึ้นได้ต่อไป

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ต้นทุน; เทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม; เทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มขึ้น; เทคโนโลยีฉีดเส้นวัสดุ; ชิ้นงานทางการแพทย์



Techno-Economic Assessment between Traditional and Fused Deposition Modeling- based Additive Manufacturing Technology

Chanipa Nivasanon¹, Pornthep Anussornnitisarn¹, and Kasin Ransikarbum^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

* Corresponding author, E-mail: kasinphd@gmail.com, kasin.r@ubu.ac.th

Received: 21 May 2024; Revised: 9 September 2024; Accepted: 18 October 2024

Online Published: 20 December 2024

Abstract: Additive manufacturing (AM) or 3D printing (3DP) is widely used in production processes and product design nowadays as 3DP can not only reduce waste generated by traditional manufacturing methods but also allow for more efficient use of materials. Accordingly, analyzing the cost-effectiveness and techno-economic assessment of 3DP in various contexts is crucial for enhancing competitiveness. In this research, we aim to study and compare the technology and production costs of medical products, specifically finger splints, produced by traditional methods and 3DP technology by assessing the machine cost, material cost, and labor cost, respectively. The traditional manufacturing based on the injection method is found to have high manufacturing costs due mainly to the mold design and fabrication, in which economies of scale are needed with the increase in manufacturing quantity. In addition, production using AM technology is analyzed following the designed experiment and the aid of the Cura platform to assess the technical and manufacturing cost for the FDM method with one and five healthcare workpieces each time. Finally, the cost analysis and breakeven point are investigated, where manufacturing one and five workpieces using FDM-based AM technology is found to be comparable to producing 2,264 and 17,123 pieces using traditional, injection manufacturing, respectively. The results from the analysis in this study are expected to be practically used as a guideline for selecting diverse production technologies and production scheduling involving traditional and AM technologies.

Keywords: Cost Analysis; Traditional Manufacturing Technology; Additive Manufacturing Technology; Fused Deposition Modeling; Healthcare Component



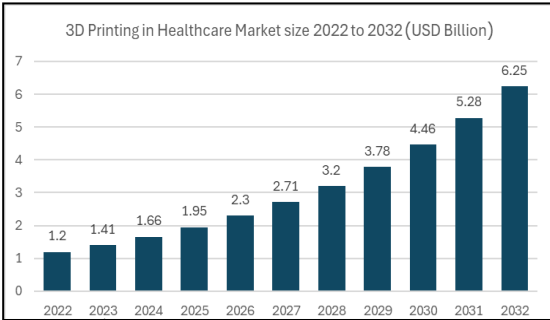
1. บทนำ

การประเมินเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบัน จำเป็นต้องคำนึงถึงแหล่งวัตถุดิบที่มีความหลากหลาย ความยืดหยุ่นของการผลิต มาตรฐานในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองต่อความพึงพอใจของลูกค้าที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงตัวชี้วัดทางการผลิตและการส่งมอบ เช่น ด้านต้นทุน ด้านคุณภาพ ด้านประสิทธิภาพ ด้านความน่าเชื่อถือ ด้านการตอบสนองอย่างรวดเร็วรวมถึงแนวคิดในการใช้วัสดุกรรมดิจิทัล เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ทั้งนี้ในการเลือกใช้การผลิตแบบดั้งเดิม (Traditional Manufacturing) เช่น เทคโนโลยีการตัดออก หรือการขึ้นรูปชิ้นงาน พบว่ามีจุดเด่นในด้านความแข็งแรงของชิ้นงานทางเทคนิค (Mechanical Property) ในการใช้งานในด้านต่าง ๆ แต่มีข้อจำกัด เช่น ข้อจำกัดด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Design Limitation) และการสูญเสีย (Waste and Scrap) ต่าง ๆ ในการผลิตที่ค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและกระทบกับแนวคิดในการผลิตแบบยั่งยืน ทำให้ส่งผลต่อความท้าทายทั้งในมิติของประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการผลิต และการขาดความสามารถในการแข่งขัน

ในขณะเดียวกันได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีดิจิทัล (Digital Technology) ในการผลิตแบบเพิ่มขึ้น (Additive Manufacturing (AM)) หรือที่รู้จักกันในชื่อ 3D Printing (3DP) มาใช้ในการผลิตเพื่อเพิ่มศักยภาพและความสามารถในการแข่งขัน ทั้งในการผลิตต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping) การผลิตเครื่องมือแบบรวดเร็ว (Rapid Tooling) และการผลิต

ชิ้นงานที่ต้องการแบบรวดเร็ว (Rapid Manufacturing) ซึ่งการผลิตชิ้นงานแบบ AM เป็นการเพิ่มวัสดุทีละชั้น (Layer) เพื่อสร้างรูปร่างและผลิตชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยสามารถออกแบบชิ้นงานโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design (CAD)) ชิ้นส่วนให้เป็นชิ้นงานสามมิติ ทำให้มีจุดเด่นในการสร้างชิ้นงานที่มีความละเอียดซับซ้อน (Design Freedom) และลดความจำเป็นในการเตรียมแม่พิมพ์ เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตแบบดั้งเดิม นอกจากนี้การผลิตแบบ AM สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการออกแบบของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยพิจารณาตามความต้องการของผู้ใช้งานร่วมในการวางแผนการผลิต เนื่องจากการใช้ระบบดิจิทัลเข้ามาช่วย รวมถึงจุดเด่นในการลดความสูญเสียของวัสดุเมื่อเทียบกับการผลิตแบบดั้งเดิม โดยมีการกล่าวถึงประโยชน์ของการผลิตแบบ AM ในหลาย ๆ งานวิจัย ที่เน้นการผลิตเพื่อความยั่งยืน (Sustainability) การลดค่าใช้จ่ายในห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) และอื่น ๆ [1]

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้การผลิตแบบ AM ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การบินและอวกาศ (Aerospace) ยานยนต์ (Automotive) ศิลปะและการออกแบบ (Art and Design) สถาปัตยกรรม (Architecture) อาหาร (Food) รวมถึง การแพทย์ (Medical) เป็นต้น ทั้งนี้ ในส่วนของอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ได้มีการรายงานการนำเทคโนโลยีการผลิตแบบ AM มาประยุกต์ใช้ในการวางแผนการเรียนการสอน การวางแผนการผ่าตัด รวมถึงการสร้างอุปกรณ์ทางการแพทย์ (Medical Device) ต่าง ๆ รวมถึงอุปกรณ์เทียมสำหรับผู้พิการ และการทำเฝือก ซึ่งเป็นการวางแผนการผลิตตามความต้องการแต่ละบุคคล



รูปที่ 1 แนวโน้มคาดการณ์เทคโนโลยี AM ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ทั่วโลก

โดยรูปที่ 1 แสดงข้อมูลคาดการณ์แนวโน้มมูลค่าการเติบโตของตลาดการผลิตแบบ AM [2] ในกลุ่มทางการแพทย์ อยู่ที่ประมาณ 6.25 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2575 โดยในช่วงปี 2566 ถึง 2575 มีอัตราการเติบโตอยู่ที่ 18% ซึ่งในประเทศไทยเองพบว่าแนวโน้มของผู้ผลิตเครื่องมือแพทย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน เนื่องจากอัตราการขยายโรงพยาบาลที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับความต้องการของผู้บริโภคที่มากขึ้น ซึ่งเป็นโอกาสในการนำเทคโนโลยีด้าน AM มาใช้

ทั้งนี้ การผลิตแบบ AM มีศักยภาพที่สามารถเปลี่ยนแปลงวิธีการผลิตรวมถึงการออกแบบในอนาคด โดยการพัฒนาเทคโนโลยีและกระบวนการใหม่ ๆ จะช่วยให้ การพิมพ์ 3 มิติ เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามยังคงมีความท้าทายในหลายมิติ ทั้งในมุมมองของการวางแผนการผลิต การวิเคราะห์เชิงเทคนิค ต้นทุนของการผลิต รวมถึงการประเมินปัจจัยความเสี่ยงในการเลือกใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ [3-6] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา

และวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยเชิงเทคนิคและต้นทุนระหว่างการผลิตแบบดั้งเดิมด้วยการฉีดขึ้นรูป และการผลิตแบบเพิ่มขึ้น (AM) ด้วยเทคโนโลยีฉีดเส้นวัสดุ (Fused Deposition Modeling (FDM)) โดย ใช้กรณีศึกษาชิ้นงานทางการแพทย์ สำหรับกรณีศึกษาชิ้นงานเฝือกนิ้วมือ ด้วยการออกแบบวางแผนการผลิต

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 เทคโนโลยีการผลิต

การผลิตแบบดั้งเดิม (Traditional Manufacturing) เป็นการผลิตที่เน้นการใช้เครื่องจักรและกระบวนการที่ทำให้สามารถผลิตสินค้าอย่างต่อเนื่อง ที่ออกแบบมาเพื่อผลิตสินค้าในปริมาณมาก โดยมีการใช้เทคโนโลยีที่เน้นประสิทธิภาพสูง เช่น เครื่องจักรอัตโนมัติ การหล่อขึ้นงาน การตัดกลึง กระบวนการทำความร้อน และการฉีดขึ้นรูป ซึ่งในการผลิตในลักษณะนี้มีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง และจำเป็นต้องมีจำนวนการผลิตที่มากพอ เพื่อให้เกิดการประหยัดจากขนาด หรือ Economies of Scale โดยเฉพาะในการผลิตแบบดั้งเดิมที่จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ (Mold) ในการผลิตชิ้นงาน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่สูง ดังนั้น การผลิตโดยใช้แม่พิมพ์จึงมีความเหมาะสมกับการผลิตที่ต้องการสินค้าปริมาณมาก (Mass Production) ที่มีลักษณะแบบเดียวกัน

สำหรับการผลิตแบบ AM เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีโดยการสร้างวัตถุ 3 มิติโดยการเพิ่มวัสดุทีละชั้น (Layer) โดยเป็นกระบวนการผลิตผ่านดิจิทัลแพลตฟอร์ม (Digital Platform) ทำให้เอื้อต่อการออกแบบชิ้นงานที่ซับซ้อนและตรงตามความต้องการ



ส่วนบุคคล (Mass Customization) สืบเนื่องจากจุดเด่นในด้านความยืดหยุ่นในการออกแบบและการผลิต โดยในปัจจุบันเทคโนโลยี AM สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย และมีบทบาทมากขึ้นในการวางแผนและออกแบบการจัดการห่วงโซ่อุปทานต่าง ๆ (Supply Chain Network Design) เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างแบบรวมศูนย์ (Centralized Supply Chain) และแบบกระจาย (Decentralized Supply Chain) รวมถึงประโยชน์ในการพัฒนาชิ้นส่วนอุปกรณ์และการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ในหลาย ๆ กรณีศึกษา [6]

ทั้งนี้ American Society of Testing and Material (ASTM) ได้มีการแบ่งประเภทเทคโนโลยี AM ออกเป็น 7 ประเภท [7] ดังนี้

1. Photopolymer Vat (Stereolithography: SLA) เป็นเทคโนโลยีแรกของ 3DP โดยอาศัยแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสียูวี (UV) ฉายไปยังเรซิน (Resin) ทำให้เกิดการแข็งตัวทีละชั้น โดยมีจุดเด่นด้านความละเอียดของชิ้นงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของแหล่งกำเนิดแสง และขึ้นกับความสามารถของเครื่อง โดยหลังจากขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วจะมีกระบวนการหลังการผลิต (Post Processing) เพื่อให้เรซินแข็งตัวและพร้อมใช้งาน

2. Material Extrusion (Fused Deposition Modeling: FDM) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้วัสดุเป็นเส้น (3D Filament) มาให้ความร้อนจนหลอมละลายและอัดรีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นชั้น ๆ จนสมบูรณ์ โดยมีการรายงานว่า เป็นเทคโนโลยีที่นิยมและแพร่หลายมากที่สุด ตั้งแต่เครื่องระดับทั่วไป (Desktop Printer) จนถึงระดับอุตสาหกรรม (Industrial Printer)

เนื่องจากต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ราคาถูกกว่าเทคโนโลยี AM ประเภทอื่น ๆ และมีความหลากหลาย อย่างไรก็ตามยังคงมีความท้าทายในเรื่องความละเอียดในการพิมพ์

3. Powder bed fusion (Selective Laser Sintering: SLS) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูง ฉายเพื่อให้วัสดุในจุดที่ฉายเกิดการหลอมละลายติดกันในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (Sintering) โดยสามารถใช้ได้กับวัสดุผง (Powder) วัสดุประเภทพลาสติก โลหะ และเซรามิกส์ โดยมีจุดเด่นด้านความละเอียดในการพิมพ์ที่สูงและรวดเร็ว และสามารถนำวัตถุดิบผงกลับมาใช้งานใหม่ได้

4. Material jetting (Poly Jet) เป็นเทคโนโลยี AM ที่นำระบบการพิมพ์ในลักษณะของ 2D Printer มาใช้งาน โดยเริ่มจากพ่นพลาสติกออกจากหัวพิมพ์ที่มีขนาดเล็กมาก เหมือนเข็มไปยังฐานพิมพ์ และให้แสง UV เพื่อคงรูปพร้อมกับทำการพิมพ์ โดยเทคโนโลยีนี้มีข้อดี คือ ให้ความละเอียดและความเร็วในการพิมพ์ที่สูงมาก และสามารถสร้างชิ้นงานที่มีหลายคุณสมบัติภายในชิ้นเดียว โดยอาศัยหัวพิมพ์หลายหัวที่บรรจุวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

5. Laminated Object Manufacturing: LOM เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการคล้ายกับการนำวัตถุดิบมา กัดหรือกลึงให้เป็นรูปร่างตามต้องการ โดยเทคโนโลยีนี้ใช้แสงหรือมีด ในการตัดวัสดุให้เป็นรูปร่างทีละชั้น และพ่นกาว (Adhesive) เพื่อให้แต่ละชั้นติดกัน โดยความละเอียดขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุที่ใช้

6. Directed energy deposition (DED) ใช้รูปแบบเทคโนโลยีการเพิ่มวัสดุด้วยการฉายพลังงาน หรือเรียกว่าเป็นการสร้างชิ้นงานด้วยแสงเลเซอร์และวัสดุผง (Laser Powder Forming) โดยผงโลหะจะถูกพ่นเข้าไป



ในลำแสงเลเซอร์กำลังสูงในช่วงอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting) เพื่อให้สะสมบนชิ้นงาน ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับวัสดุที่หลากหลาย เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง อลูมิเนียม ไทเทเนียม เป็นต้น

7. Binder jetting เป็นเครื่องพิมพ์ระบบพ่นกาวบนวัสดุผง โดยการพ่นกาวเป็นเทคโนโลยีกลุ่มที่ใช้กาวยึดวัสดุที่เป็นผงเข้าหากัน กระบวนการนี้ทำงานด้วยการเกลี่ยผงวัสดุให้เป็นชั้นบนแท่นสร้างชิ้นงาน จากนั้นหัวพิมพ์จะเคลื่อนผ่านผิวหน้าผงไป และเลือกฉีดพ่นกาวลงไปเพื่อสร้างเป็นชิ้นงาน โดยกาวจะจับยึดผงวัสดุให้เป็นรูปร่างที่ต้องการเป็นชั้นแรก และจะทำไปเป็นชั้น ๆ จนได้ชิ้นงานที่ต้องการ

ทั้งนี้ ขอบเขตกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นกรณีศึกษาในส่วนของเทคโนโลยี AM แบบ Material Extrusion (FDM) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความแพร่หลายอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยี AM ประเภทอื่น ๆ

2.2 การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยี AM

ในปัจจุบัน ได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาการวางแผนการผลิตใน AM ในมิติต่างๆ รวมถึงการออกแบบและผลิตชิ้นงาน รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทูนต่าง ๆ [8-10] เช่น Osama Abdulhameed และคณะ [8] พบว่าแบบจำลองต้นทูนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ เครื่องจักร แรงงาน ของการผลิตแบบ AM สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 30% เมื่อเทียบกับการผลิตแบบดั้งเดิม Bram Westerweel และคณะ [9] ได้วิเคราะห์ต้นทุนของการออกแบบชิ้นส่วนการผลิตด้วยการผลิตแบบเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกวิธีการผลิตที่สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ Tanisha Pereira และคณะ [10] ศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการผลิตแบบดั้งเดิมกับการผลิตแบบเติมเนื้อ

ผลิตแบบดั้งเดิมกับการผลิตแบบเติมเนื้อ รวมถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละการผลิตโดยคำนึงถึงสถานะทางเศรษฐกิจและการจัดการคุณภาพของอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

นอกจากนี้ ในส่วนของแนวคิดในการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ในส่วนของฝือกนิ้วด้วย AM ซึ่งเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เอง พบว่ามีรายงานการศึกษาต่างๆ เช่น Swetha Arulmozhi และคณะ [11] ได้ทำการออกแบบการสร้างแบบจำลองสามมิติและเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ สำหรับฝือกนิ้วโดยใช้ Solidworks ร่วมกับการวัดมาตรฐานที่นำมาจากผู้ป่วยที่มีความผิดปกติเนื่องจากโรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ โดยใช้ FDM และวัสดุประเภท ABS และ PLA ซึ่งเป็นการเน้นการผลิตฝือกนิ้วที่มีน้ำหนักเบา ดูแลรักษาและทำความสะอาดได้ง่ายด้วยการออกแบบที่คำนึงถึงความผิดปกติของนิ้ว และความสะดวกในการใช้งานให้สามารถสวมง่าย และมีอากาศถ่ายเทได้ดี

นอกจากนี้ Shi Lei Teng และคณะ [12] ได้ออกแบบและพัฒนาฝือกนิ้วแบบปรับแต่งได้โดยการพิมพ์ 3 มิติเพื่อลดสาเหตุของการตามนิ้วที่ไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากจากการเข้าฝือกที่ไม่ดี และภาวะแทรกซ้อนทางผิวหนัง โดยพบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่พอใจกับความสะดวกในการสวมใส่และถอดฝือกนิ้วที่พิมพ์ด้วย 3 มิติ ซึ่งพบว่าฝือกที่ใช้การผลิตแบบ AM มีข้อดีในด้านการออกแบบที่มีความเหมาะสมกับแต่ละบุคคล มีน้ำหนักเบา และสามารถเคลื่อนไหวได้สะดวก รวมถึงสามารถลดต้นทุนเนื่องจากการเลือกใช้วัสดุ และผลิตภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลได้ร่วมด้วย

ทั้งนี้ เป็นที่ชัดเจนว่ามีการนำเทคโนโลยีการผลิตด้วย AM มาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับการใช้



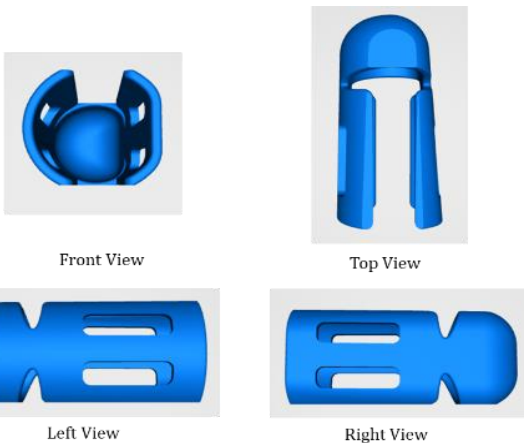
บทความวิจัย

งานด้านการแพทย์ รวมถึงกรณีศึกษาของเฟืองนิ้วมือ
อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบ
ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิม และการผลิตแบบ AM เป็น
ส่วนสำคัญและเป็นปัจจัยหลักในการพิจารณานโยบายที่
เหมาะสมในการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการ
วางแผน ซึ่งเป็นส่วนที่ยังไม่มีการศึกษาที่มากนัก และ
งานวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นกรณีศึกษาทั่ว ๆ
ไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอกรณีศึกษา
เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคและต้นทุนระหว่างการผลิต
แบบดั้งเดิม และการผลิตแบบ AM โดยใช้
กรณีศึกษาเฟืองนิ้วมือ ที่เน้นการประยุกต์ใช้งาน
ทางการแพทย์ต่อไป

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยี AM

ในงานวิจัยนี้ ใช้กรณีศึกษาสำหรับเฟืองนิ้วมือ
ที่มีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 19.34 x 40.60 x
17.87 มม. [13] ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชิ้นงานกรณีศึกษาเฟืองนิ้วมือ

3.2 รายละเอียดข้อมูลต้นทุน

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิม
(Traditional Manufacturing) แบบการฉีดขึ้นรูป
(Injection Molding) ในกรณีศึกษา นี้ ใช้การ
สัมภาษณ์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญของบริษัทที่รับ
ออกแบบและผลิตชิ้นงานฉีดขึ้นรูป ประกอบด้วย
ข้อมูลหลัก คือ ต้นทุนเครื่องจักรและค่าใช้จ่ายในการ
ผลิตแม่พิมพ์ (Mold) ในการฉีดขึ้นรูปเฟืองนิ้วมือ
โดยประมาณการต้นทุนโดยรวมที่ 600,000 บาท
และต้นทุนวัสดุ ที่ราคากิโลกรัมละ 590 บาท
ตามลำดับ นอกจากนี้ ในส่วนของกรณีศึกษา
เปรียบเทียบการผลิตแบบ AM โดยใช้เทคโนโลยี
Material Extrusion หรือ FDM ในการวางแผนการผลิต
ใช้การพิจารณาเครื่องพิมพ์ AM ซึ่งมีคุณสมบัติ
และรายละเอียดวัสดุ รวมถึงราคาของเครื่องพิมพ์
และราคาวัสดุ ดังแสดงรายละเอียดเครื่องพิมพ์ AM
ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1



รูปที่ 3 เครื่องพิมพ์ FDM ในกรณีศึกษา



ตารางที่ 1 รายละเอียดเครื่องพิมพ์ FDM

เทคโนโลยี AM	FDM
ราคา (Printer Cost)	65,000 บาท
ขนาดการผลิต (Capacity)	210 x 200 x 195 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (Nozzle Size)	0.4 mm
วัสดุที่ผลิตได้ (Material Availability)	PLA, ABS; Open Source Filament: PLA, ABS, ASA, PETG, etc.
น้ำหนัก (Weight)	15 kg
ประเภทไฟล์ (File Types)	stl, ply, obj, G-Code (RepRap), amf

3.3 การวิเคราะห์ต้นทุน

3.3.1 สมมติฐานการคำนวณเวลาและต้นทุน

- ต้นทุนเครื่องจักร ใช้การคำนวณต้นทุนเครื่องจักรจากการคิดมูลค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง โดยมูลค่าซากคิดเป็น 10% ของราคาเครื่องจักร ภายในระยะเวลา 5 ปี และประมาณการค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรคิดเป็น 10% ต่อปี
- ต้นทุนแรงงานอิงข้อมูลค่าจ้างแรงงานจากรายงาน Salary Guide 2023 [14] โดยประมาณการค่าแรงการผลิตแบบดั้งเดิมที่อัตรา 24,500 บาทต่อเดือน ใน 1 เดือนทำงาน 25 วัน และคิดที่ 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งสามารถประมาณค่าแรงทางตรงรายชั่วโมงที่ 122.50 บาทต่อชั่วโมง และในส่วนของ AM ใช้การประมาณการที่สี่เท่าจากค่าแรงปกติ ตามทักษะการผลิตแบบดิจิทัลที่ 490 บาทต่อชั่วโมง นอกจากนี้ เวลาในการผลิต ประมาณการจากเวลาที่พนักงานใช้ในการทำงานจริง โดยการ

- ผลิตแบบดั้งเดิม คิดจากเวลาทำงาน (Processing Time) ทั้งหมด ส่วนการผลิตแบบ AM คิดเฉพาะเวลาที่พนักงานปรับตั้งเครื่อง (Setup) และหลังการผลิตเสร็จ (Post-Processing Time) เนื่องจากช่วงเวลากการผลิตโดยเครื่อง AM เป็นการผลิตแบบอัตโนมัติ
- ต้นทุนวัสดุใช้การประมาณการจากข้อมูลบริษัทเครื่องจักร ร่วมกับการสอบถามข้อมูลบริษัทที่ให้บริการในการผลิตและออกแบบชิ้นงานทั้งจากการผลิตแบบดั้งเดิมและการผลิตโดยใช้ AM

3.3.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิม

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิมในกรณีศึกษา นี้ ประกอบด้วยข้อมูลหลัก คือ ต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ (Mold) ในการฉีดขึ้นรูปเปลือกนี้ว่ามีต้นทุนวัสดุ และค่าจ้างแรงงาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิม

ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิม	
ต้นทุนเครื่องจักรและแม่พิมพ์	600,000 บาท
มูลค่าซากของเครื่องจักร(Salvage Value)	60,000 บาท
อายุการใช้งาน	5 ปี
ค่าเสื่อมราคาต่อปี (Depreciation)	108,000 บาท
ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรต่อปี (Maintenance Cost)	60,000 บาท
ต้นทุนเครื่องจักรต่อปี (Annual Total Machine Cost)	168,000 บาท
ต้นทุนวัสดุ (Material Cost)	590.00 บาท
วัสดุที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้น (Material Amount per unit)	7.5 กรัม
ต้นทุนวัสดุต่อชิ้น (Material Cost per Unit)	4.43 บาท
ค่าจ้างแรงงานต่อเดือน (Labor Cost per Month)	24,500 บาท
ค่าจ้างแรงงานต่อวัน (Labor Cost per Day)	980 บาท
ค่าจ้างแรงงานต่อชั่วโมง (Labor Cost per Hour)	122.50 บาท
เวลาผลิต (นาที) (Production Time)	50 นาที
ต้นทุนแรงงานต่อชิ้น (Labor Cost per Unit)	102.08 บาท

จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าค่าใช้จ่ายสำหรับต้นทุนเครื่องจักรในการออกแบบและผลิต Mold อยู่ที่ 600,000 บาท โดยหลังจากหักมูลค่าซาก คิดค่าเสื่อมราคาในระยะเวลา 5 ปี เท่ากับ 108,000 บาท และประมาณการค่าบำรุงรักษา (Maintenance) คิดเป็น 10% ของราคาแม่พิมพ์ต่อปี ที่ 60,000 บาท ดังนั้นมีต้นทุนเครื่องจักรต่อปี เท่ากับ $(108,000 + 60,000) = 168,000$ บาท มีต้นทุนวัสดุ ขนาด 1,000 กรัม ราคา 590 บาท ใช้วัสดุในการผลิตต่อชิ้น 7.5 กรัม ดังนั้นมีต้นทุนวัสดุต่อชิ้น $(7.5 \times 590) / 1,000 = 4.43$ บาท และมีต้นทุนแรงงาน 122.50 บาทต่อชั่วโมง โดยข้อมูลจากการสัมภาษณ์ ประมาณการเวลาการผลิตชิ้นงานจากแม่พิมพ์และเวลาหลังการผลิตรวม 50 นาที ดังนั้นต้นทุนแรงงานต่อชิ้น เท่ากับ $(122.50 \times 50) / 60 = 102.08$ บาท ตามลำดับ

ดังนั้น สามารถสรุปประมาณการค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Cost) จากต้นทุนเครื่องจักรต่อปี ได้ที่ 168,000 บาท และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) จากต้นทุนวัสดุและต้นทุนแรงงานต่อชิ้น ได้ที่ 4.43 บาท และ 102.08 บาท ตามลำดับ

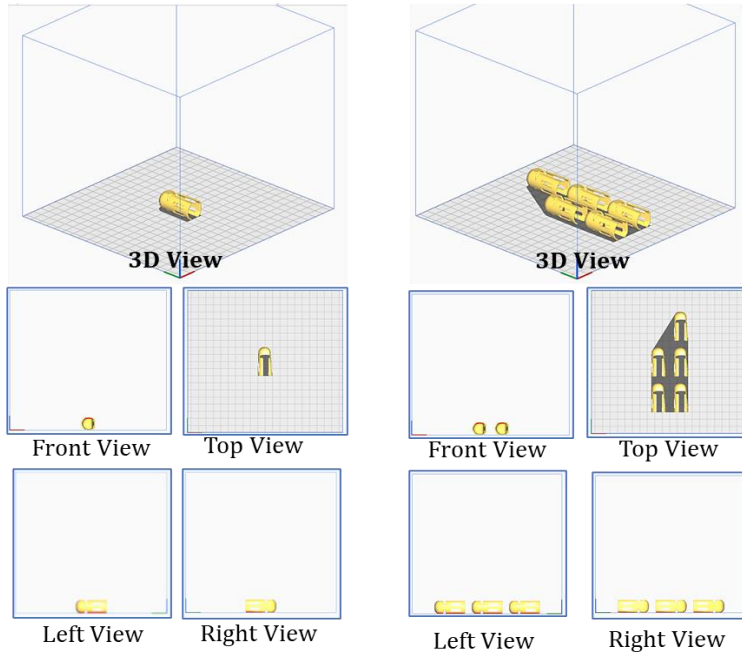
3.3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบ AM

นอกจากนี้ ได้ทำการวางแผนการพิมพ์ด้วยวิธี AM สำหรับชิ้นงาน 3 มิติ โดยทำการออกแบบวางแผนทิศทางการวางชิ้นงานบนเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [5-6] โดยทำการทดลองเปรียบเทียบการผลิตชิ้นงานเป็นสองระดับ (Levels) คือ 1 และ 5 ชั้น โดยแสดงการจำลองการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ เมื่อผลิต 1 ชั้น และ 5 ชั้น ในทิศทางต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต AM ในกรณีศึกษา ประกอบด้วยข้อมูลต้นทุน



เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ต้นทุนวัสดุ และต้นทุน
แรงงาน โดยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ต้นทุนการ

ผลิตด้วยเทคโนโลยี AM ในกรณีการผลิตแบบเต็มกำลัง
การผลิต (Full Capacity) ได้ดังแสดงในตารางที่ 3



ก. รูปแบบการวางแผนการผลิต กรณี 1 ชั้น ข. รูปแบบการวางแผนการผลิต กรณี 5 ชั้น

รูปที่ 4 รูปแบบการวางแผนการผลิต AM

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องพิมพ์ AM

ค่าใช้จ่ายการผลิตแบบ AM	จำนวนการผลิตชิ้นงาน	
	1	5
เวลาการผลิต (ชั่วโมง) (Production Time)	0.88	4.73
ชั่วโมงการทำงานต่อปี (Total Annual Hour)	2,400	2,400
ปริมาณการผลิตต่อปี (Annual Quantity)	2,727	2,537
ต้นทุนเครื่องพิมพ์ (Printer Cost)	65,000 บาท	65,000 บาท



ตารางที่ 3 ต่อ

ค่าใช้จ่ายการผลิตแบบ AM	จำนวนการผลิตชิ้นงาน	
	1	5
มูลค่าซากของเครื่องจักร (Salvage Value)	6,500 บาท	6,500 บาท
ค่าเสื่อมราคาต่อปี (Depreciation)	11,700 บาท	11,700 บาท
ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรต่อปี (Maintenance Cost)	6,500 บาท	6,500 บาท
ต้นทุนเครื่องจักรต่อปี (Printer Cost per year)	18,200 บาท	18,200 บาท
ต้นทุนเครื่องจักรต่อชิ้น (Printer Cost per Unit)	6.67 บาท	7.17 บาท
ต้นทุนวัสดุ (Material Cost)	1,500 บาท	1,500 บาท
วัสดุที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้น (Material Amount per Unit)	5 กรัม	5.2 กรัม
ต้นทุนการใช้วัสดุในการผลิต (Material Cost per Batch)	10.71 บาท	55.71 บาท
ต้นทุนวัสดุต่อชิ้น (Material Cost per Unit)	10.71 บาท	11.14 บาท
ค่าจ้างแรงงานต่อชั่วโมง (Labor Cost per Hour)	490.00 บาท	490.00 บาท
เวลาดังค่าเครื่องจักร (Setup Time)	10 นาที	10 นาที
เวลาตรวจสอบหลังการผลิต (Post-processing Time)	10 นาที	50 นาที
ค่าจ้างแรงงานในการผลิต (Labor Cost per Batch)	163.33 บาท	490.00 บาท
ต้นทุนแรงงานต่อชิ้น (Labor Cost per Unit)	163.33 บาท	98.00 บาท
ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Production Cost per Unit)	180.71 บาท	116.31 บาท



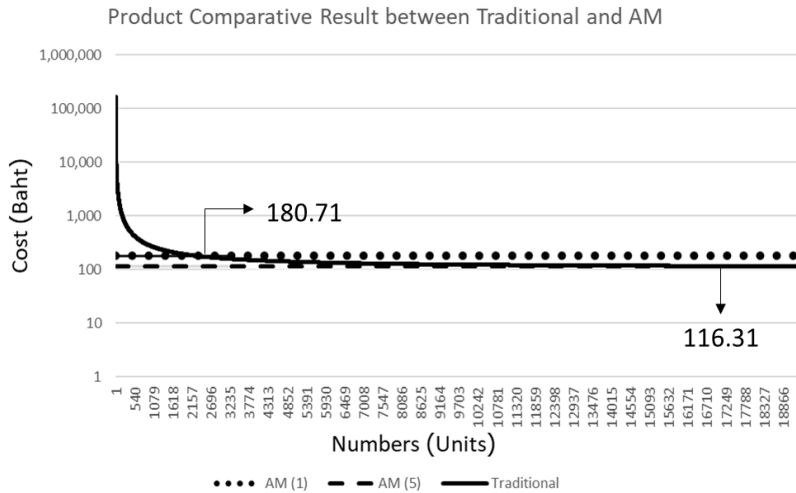
ดังแสดงในตารางที่ 3 ข้อมูลการจำลองจากโปรแกรม Cura แสดงว่าเมื่อผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้นในเครื่องพิมพ์ (Build Chamber) จะใช้เวลาในการผลิต 0.88 ชั่วโมง ในขณะที่การผลิต 5 ชิ้น จะใช้เวลา 4.73 ชั่วโมง ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตแบบ AM มีลักษณะเป็นการผลิตทีละชั้น (Layer) ของแต่ละชิ้นงาน (X-Y Directions) จากนั้นจึงผลิตตามแนวระดับแกน Z (Z-Direction) ทำให้เวลาในการผลิตแบบหลายชิ้นงาน ใช้เวลาเคลื่อนที่ของหัวฉีด Nozzle ระหว่างชิ้นงานด้วย โดยใน 1 ปี มีชั่วโมงการทำงาน 2,400 ชั่วโมง ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ 2,727 ชิ้นต่อปี และ 2,537 ชิ้นต่อปี สำหรับแผนการผลิตแบบ 1 และ 5 ชิ้นงาน ตามลำดับ นอกจากนี้ คิดต้นทุนเครื่องพิมพ์ 3 มิติ 65,000 บาท โดยคำนวณค่าต้นทุนเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ต่อปี ได้ในลักษณะเดียวกันที่ 18,200 บาท นอกจากนี้ เมื่อผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้นสามารถคำนวณต้นทุนเครื่องจักรต่อชิ้นได้ $(18,200/2,727) = 6.67$ บาท มีต้นทุนวัสดุ ขนาด 700 กรัม ราคา 1,500 บาท ในการผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้นจะได้จำนวนการใช้วัสดุ 5 กรัม สามารถคำนวณต้นทุนวัสดุต่อชิ้นได้ $(5 \times 1,500) / 700 = 10.71$ บาท และมีต้นทุนแรงงาน 490 บาทต่อชั่วโมง เมื่อผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้น มีเวลาที่ใช้ตั้งค่าเครื่องจักร 10 นาที และเวลาตรวจสอบหลังการผลิต 10 นาที สามารถคำนวณต้นทุนแรงงานต่อชิ้นได้ $(490 \times 20) / 60 = 163.33$ บาท ดังนั้น สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิต 1 ชิ้น เท่ากับ 180.71 บาท นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มการผลิตชิ้นงาน 5 ชิ้นต่อครั้ง สามารถคำนวณได้ใน

ลักษณะเดียวกัน ทั้งนี้คิดจากเวลาการปรับตั้งเครื่องเท่าเดิม ในขณะที่ประมาณการเวลาในการตรวจสอบหลังการผลิตทั้ง 5 ชิ้นตามสัดส่วนที่ 50 นาที ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อชิ้นรวมคิดเป็น 116.31 บาทตามลำดับ

4 การอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างต้นทุนต่อหน่วย

การวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วย (Unit Cost) สำหรับการผลิตเฟืองนิ้วมือ ด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม ใช้การพิจารณาต้นทุนจากทั้งต้นทุนคงที่จากการผลิต Mold และต้นทุนผันแปรจากค่าวัสดุและค่าแรงงาน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผลิตแบบ AM ซึ่งคำนวณเป็นต้นทุนต่อชิ้นงาน สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย ทั้ง 2 กรณี ได้ดังรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิมพบว่าต้นทุนการผลิตจะลดลงเมื่อมีปริมาณการผลิตที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นตามหลักของการผลิตแบบดั้งเดิมที่มีค่าใช้จ่าย Mold ที่สูง โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พบว่าสามารถวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Breakeven Point) จากการคำนวณต้นทุนต่อหน่วย โดยในการผลิตแบบ AM จำนวน 1 ชิ้น เทียบเท่ากับการผลิตชิ้นงานแบบดั้งเดิมจำนวน 2,264 ชิ้น และค่าใช้จ่ายด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 5 ชิ้น เทียบเท่ากับการผลิตชิ้นงานแบบดั้งเดิมจำนวน 17,123 ชิ้น โดยมีค่าใช้จ่ายในการผลิต 180.71 และ 116.31 บาทต่อชิ้นตามลำดับ ทั้งนี้ สามารถสรุปค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานในกรณีศึกษาที่ 4 ได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 5 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการการผลิตแบบดั้งเดิม และการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ AM

ปริมาณการผลิต	ค่าใช้จ่ายการผลิต (บาท)		
	การผลิตแบบดั้งเดิม	การผลิตแบบเพิ่มขึ้น (AM)	
		1 ชั้น	5 ชั้น
1	168,106.51	180.71	116.31
2	84,106.51	180.71	116.31
3	56,106.51	180.71	116.31
4	42,106.51	180.71	116.31
...
2264	180.71	180.71	116.31
...
17123	116.31	180.71	116.31

ทั้งนี้ โดยภาพรวม กรณีผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม มีการประมาณการต้นทุนในการผลิตเครื่องจักร และแม่พิมพ์ (Mold) ที่ราคาค่อนข้างสูง และกรณีผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ประมาณปริมาณการผลิต 1 และ 5 ชั้น/ครั้ง และประมาณการค่าเสื่อมราคา ภายในระยะเวลา 5 ปี และค่าบำรุงรักษา (Maintenance) คิดเป็น 10% ของราคาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องพิมพ์แต่ละประเภทมีความแตกต่างกันในแง่ของคุณสมบัติความสามารถของเครื่องพิมพ์และคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งอาจมีการประมาณการค่าเสื่อมราคาและค่าบำรุงรักษาที่แตกต่างกันได้ในความเป็นจริง นอกจากนี้ ในมิติของต้นทุนวัสดุ (Material Cost) ในกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้พิจารณาจากต้นทุนวัสดุที่ใช้สำหรับที่ใช้ในการฉีดแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปวัสดุ ทั้งนี้ นอกจากต้นทุนทางตรงของวัสดุ (Direct Material Cost) ยังมีต้นทุนทางอ้อมของวัสดุ (Indirect Material



Cost) เช่นวัสดุสิ้นเปลืองต่าง ๆ ในการผลิต ซึ่งอาจจะนำมาพิจารณาร่วมด้วยในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ในส่วนของต้นทุนแรงงานในการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตนี้ กำหนดต้นทุนแรงงานสำหรับวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมที่ 122.50 บาท/ชั่วโมง และสำหรับวิธีการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ 490 บาท/ชั่วโมง ทั้งนี้ อาจมีการพิจารณาทั้งในมิติของต้นทุนแรงงานทางตรง (Direct Labor Cost) ร่วมกับต้นทุนแรงงานทางอ้อม (Indirect Labor Cost) ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ อาจพิจารณาต้นทุนแรงงานโดยประมาณการความน่าจะเป็นจากค่าแรงในพื้นที่ ๆ ต่างต่างกัน รวมถึงในส่วนอื่น ๆ ที่เป็นค่าบริหารจัดการการผลิต (Overhead Cost) ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตต่อหน่วยด้วยเช่นกัน

4.2 การวิเคราะห์เทคโนโลยี AM ในการผลิต

นอกจากนี้ในส่วนของการผลิตเฟืองนิ้วมือด้วยเครื่องพิมพ์ AM ด้วยเทคโนโลยี FDM พบว่ามีกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นว่า FDM เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบัน รวมถึงมีข้อดีและข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ ร่วมด้วย ที่ต้องนำมาพิจารณา รวมถึงเรื่องของสมบัติทางกลต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยี AM ต่อเนื่อง ถือว่ามีจุดเด่นที่น่าสนใจในการสร้างอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีความเฉพาะเจาะจงและเหมาะสมกับผู้ใช้แต่ละคนได้อย่างรวดเร็วและมีต้นทุนที่เหมาะสม [3-6], [15]

นอกจากนี้ ยังมีการรายงานผลการใช้งานที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาและเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ใช้สำหรับการผลิตเฟืองที่มีความพอดีกับนิ้วมือ

ของผู้ใช้แต่ละคน มีน้ำหนักเบา และสามารถออกแบบให้มีช่องระบายอากาศ ช่วยลดการอักเสบและเพิ่มความสบายในการสวมใส่ เป็นต้น รวมถึงการผลิตที่รวดเร็วทำให้สามารถสร้างเฟืองนิ้วมือได้ภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงหรือน้อยกว่านั้น ซึ่งช่วยลดระยะเวลาที่ผู้ป่วยต้องรอคอยเมื่อเทียบกับการผลิตแบบดั้งเดิม และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต และลดการสูญเสียวัสดุในกระบวนการผลิต [34] อีกทั้งยังสามารถใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในสถานการณ์ฉุกเฉินหรือในพื้นที่ที่ขาดแคลนทรัพยากรได้

ทั้งนี้ ในกรณีศึกษานี้ เน้นที่การขยายผลการศึกษาด้านเทคโนโลยี AM สำหรับการผลิตชิ้นงานประเภทเฟืองนิ้วที่มีอยู่ (Technology) โดยพิจารณาเรื่องของเศรษฐศาสตร์และต้นทุนร่วมด้วย (Economic) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการวางแผนการจัดการและการผลิตในเบื้องต้น สำหรับการพิมพ์ 3 มิติยังคงมีข้อจำกัดบางประการ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ โดยใช้กรณีศึกษาของเฟืองนิ้วมือ ด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประเภท Material Extrusion หรือ FDM โดยวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนจาก 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ต้นทุนเครื่องจักร ต้นทุนแม่พิมพ์ (Mold) และต้นทุนเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ต้นทุนวัสดุ และ ต้นทุนแรงงาน โดยผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิมพบว่า เมื่อผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้น จะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงาน 168,106.51 บาท และจะมีต้นทุนในการผลิตลดลงเมื่อมีปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



ปริมาณ 1 และ 5 ชิ้น จะเทียบได้กับการผลิตชิ้นงานแบบดั้งเดิมที่ 2,264 ชิ้น และ 17,123 ชิ้น เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 180.71 และ 116.31 บาท ตามลำดับ

ทั้งนี้แนวคิดในการคำนวณจุดคุ้มทุนในงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแบบดั้งเดิมโดยใช้ต้นทุนแบบคงที่ร่วมกับต้นทุนผันแปร เนื่องจากความจำเป็นในการผลิต Mold สำหรับการผลิตแบบดั้งเดิมซึ่งเหมาะกับการผลิตแบบจำนวนมาก (Mass Production) และเปรียบเทียบกับการผลิตแบบเทคโนโลยี AM ซึ่งวิเคราะห์เป็นต้นทุนต่อหน่วย เนื่องจากเหมาะกับการผลิตแบบรายชิ้น (Mass Customization) โดยผลการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตเฟืองนี้พบว่าการผลิตแบบดั้งเดิมจะมีความคุ้มค่าเมื่อมีปริมาณการผลิตจำนวนมาก ซึ่งในความเป็นจริงการผลิตเฟืองนี้ด้วยมือ หรือการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ อาจไม่เหมาะสมกับการผลิตแบบจำนวนมาก เนื่องจากมีลักษณะของชิ้นงานที่เฉพาะบุคคล ดังนั้นการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จึงมีความเหมาะสม นอกจากนี้ ความน่าสนใจในการผลิตชิ้นงานทางการแพทย์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ อาจขยายผลสำหรับการวิเคราะห์ในเชิงนโยบาย เช่น การวางแผนการผลิต การออกแบบระบบการผลิตแบบ AM ในศูนย์เครื่องมือการแพทย์ หรือโรงพยาบาล เป็นต้น

นอกจากนี้ แนวทางการวิจัยในอนาคตมีหลากหลายทิศทาง เช่น ในมิติของเทคโนโลยี ควรมีการศึกษาด้านสมบัติทางกล (Mechanical Property) ระหว่างชิ้นงานที่ผลิตโดย AM ด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบชิ้นงานกับความต้องการในเชิงการแพทย์ นอกจากนี้ ในส่วนของโครงสร้างต้นทุนการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ อาจใช้รูปแบบของการผลิตฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing) หรือการวิเคราะห์

ต้นทุนในมุมมองของห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Cost) ด้านต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของแผนการวิจัยของทีมวิจัยในอนาคต โดยเป็นการศึกษาการออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการเลือกเทคโนโลยีการผลิต และการออกแบบระบบ AM Supply Chain ที่เน้นการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Khaira, From 3D to 4D: The evolution of additive manufacturing and Its Implications for Industry 5.0, *Emerging Technologies in Digital Manufacturing and Smart Factories*, IGI Global, PA, USA, 2024, 39-53.
- [2] <https://www.precedenceresearch.com/3d-printing-in-healthcare-market>. (Accessed on 5 January 2024)
- [3] K. Ransikarbum, R. Pitakaso, N. Kim and J. Ma, Multicriteria decision analysis framework for part orientation analysis in additive manufacturing, *Journal of Computational Design and Engineering*, 2021, 8(4), 1141-1157.
- [4] K. Ransikarbum and R. Leksomboon, Analytic hierarchy process approach for healthcare educational media selection: Additive manufacturing inspired study, 8th IEEE International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), *Proceeding*, 2021, 154-158.



- [5] K. Ransikarbum, R. Pitakaso and N. Kim, A decision-support model for additive manufacturing scheduling using an integrative analytic hierarchy process and multi-objective optimization, *Applied Sciences*, 2020, 10(15), 5159.
- [6] K. Ransikarbum, S. Ha, J. Ma and N. Kim, Multi-objective optimization analysis for part-to-Printer assignment in a network of 3D fused deposition modeling, *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 43, 35-46.
- [7] M. D. Monzon, Z. Ortega, A. Martínez and F. Ortega, Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 76(5-8), 1111-1121.
- [8] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications, *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(2), 1-27.
- [9] B. Westerweel, R.J.I. Basten and G.-J. van Houtum, Traditional or additive manufacturing? Assessing component design options through lifecycle cost analysis, *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(2), 570-585.
- [10] T. Pereira, J. V. Kennedy and J. Potgieter, A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, *Procedia Manufacturing*, 2019, 30, 11-18.
- [11] R.S. Arulmozhi, M. Vaidya, M.G. Poojalakshmi, D.A. Kumar, and K. Anuraag, 3D Design and printing of custom-fit finger splint, *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, 2018, 30(05). 1850032.
- [12] S.L. Teng, Y.R. Wong, P.P.H. Lim, and D.A. McGrouther, An adjustable and customised finger splint to improve mallet finger treatment compliance and outcomes, *Annals of 3D Printed Medicine*, 2024, 13, 100142.
- [13] <https://www.crealitycloud.com/model-detail/6528f436657358aaf3f3dc7e?source=20&isFree=false&objId=111> (Accessed on 15 March 2024)
- [14] <https://adecco.co.th/salary-guide> (Accessed on 15 March 2024)
- [15] H.S. Nam, C.H. Seo, S.Y. Joo, D.H. Kim, and D.S. Park, The Application of three-dimensional printed finger splints for post hand burn patients: A Case Series Investigation, *Annals of Rehabilitation Medicine*, 42(4), 2018, 634-638.



การพัฒนาและศึกษาสมรรถนะรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} นุชจิเรศ แก้วสกุล² สุภาวดี มากอห์น³ และ ชาตรี หอมเขียว¹

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² สาขาวิชาไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: worapong.b@mutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 19 มิถุนายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 15 ตุลาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 18 ตุลาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาสมรรถนะรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ หรือใช้ในการขนย้ายผู้ป่วย หรือผู้พิการ รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ ด้านมิติ มีขนาดความกว้าง 690 มิลลิเมตร ความยาว 1,250 มิลลิเมตร และความสูง 1,050 มิลลิเมตร ด้านการส่งกำลัง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ความเร็วรอบสูงสุด 120 รอบต่อนาที ขับเคลื่อนล้อเลื่อนหลัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว มีล้อบังคับเลี้ยว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว ด้านการควบคุม ควบคุมด้วยแอปพลิเคชันหรือด้วยการควบคุมบังคับ Joystick สามารถปรับความเร็วรอบได้ 5 ระดับ การทดสอบ ประกอบด้วย การทดสอบหาความเร็วสูงสุดต่อน้ำหนักทดสอบ การทดสอบระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ และการทดสอบการวิ่งบนทางลาดชันของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยการทดสอบจะแบ่งระดับความเร็ว 5 ระดับ และ น้ำหนักทดสอบ 3 ระดับ ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มน้ำหนักทดสอบและระดับความเร็วส่งผลให้อัตราการใช้แบตเตอรี่ลดลง และระดับความเร็วร่วมกับน้ำหนักทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระยะหยุดนิ่งมากขึ้น นอกจากนี้ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุเฉลี่ย 4.36 อยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ: รถเข็นไฟฟ้า; ผู้สูงอายุ; สมรรถนะ; แอปพลิเคชัน

Development and Performance Study of Electric Wheelchair for the Elderly

Worapong Boonchouytan^{1*}, Nutjired Kheowsakul², Supawadee Makon³ and Chatree Homkhiew¹

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

² Department of Electrical, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³ Department of Computer Engineering, Rattaphum College, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author, E-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th

Received: 19 June 2024; Revised: 15 October 2024; Accepted: 18 October 2024

Online Published: 20 December 2024

Abstract: The objective of this research is to develop and study the performance of an electric wheelchair for the elderly, or for use in transporting patients or individuals with disabilities. The dimensions of the electric wheelchair for the elderly are as follows: a width of 690 millimeters, a length of 1,250 millimeters, and a height of 1,050 millimeters. In terms of power transmission, it uses a 250-watt, 24-volt DC motor with a maximum rotational speed of 120 rpm, driving the main caster wheels with a diameter of 18 inches. It is equipped with steering wheels with a diameter of 7 inches. For control, the wheelchair can be operated via an application or by joystick control, with 5 adjustable speed levels. The tests include determining the maximum speed relative to the test weight, the braking distance of the electric wheelchair for the elderly, and the performance of the electric wheelchair on inclined surfaces. The tests were conducted at 5 speed levels and 3 weight levels. The results showed that an increase in test weight and speed levels resulted in reduced battery life, and that the combined increase in speed and weight resulted in a longer braking distance. Furthermore, the average satisfaction score from the user evaluation of the electric wheelchair for the elderly was 4.36, indicating a high level of satisfaction.

Keywords: Electric wheelchair; Elderly people; Performance; Application



1. บทนำ

สังคมผู้สูงอายุ กำลังจะเป็นประชากรส่วนใหญ่ของโลกและของประเทศไทย โดยมีรายงานสถานการณ์จำนวนผู้สูงอายุในประเทศไทยซึ่งจะเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ในปี 2565 โดยจำนวนผู้สูงอายุจะอยู่ราวร้อยละ 20 - 30 ภายในปี 2574 [1] ในขณะที่ผู้สูงอายุในประเทศไทยมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น แต่กลับกันอัตราการเกิดลดลงสังคมไทย โดยในปี 2565 ที่ผ่านม้อัตราการเกิดลดลงเหลือ 500,000 คน และอัตราการเกิดที่ลดลงต่อเนื่องนำไปสู่ปรากฏการณ์ เกิดน้อยกว่าตายครั้งแรกในปี 2564 ที่ประเทศไทยมีการตายมากกว่าเกิด 19,080 คน [2] ซึ่งกำลังเผชิญอยู่ในภาวะสังคมผู้สูงอายุที่มีสัดส่วนโครงสร้างประชากรวัยสูงอายุเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะทำให้เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ถึงเวลานั้นประชากรวัยสูงอายุจะเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว [3]

ขณะเดียวกันเทคโนโลยีทางการแพทย์มีความก้าวหน้าในการรักษาพยาบาลเป็นอย่างมาก ซึ่งผู้สูงอายุส่วนใหญ่ก็ยังมีประสบปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพ โดยเฉพาะสุขภาพด้านการเคลื่อนไหวของร่างกาย เช่น ขา ข้อเข่าอ่อนแรง ข้อพับ เป็นต้น รวมทั้งผู้ป่วยที่มีสุขภาพที่ไม่แข็งแรงเกี่ยวกับการเดิน หรือผ่าตัดขาหรือช่วงล่าง ซึ่งไม่สามารถที่จะเคลื่อนไหวได้ไม่สะดวก เมื่อการพัฒนาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สิ่งสำหรับผู้สูงอายุต้องการคือ สิ่งสนับสนุนที่เข้ามาช่วยเหลือในการดูแลตนเองจากสังคมสูงอายุ ส่งผลให้ผู้สูงอายุต้องดูแลตัวเองเพิ่มมากขึ้น และปัญหาที่พบมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง คือ ผู้สูงอายุที่พบปัญหาสุขภาพทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวหรือเดินทางด้วยการเดินได้ตามปกติ เนื่องจากในปัจจุบันมีผู้สูงอายุมีปัญหาสุขภาพที่เกี่ยวข้องเรื่องการเดิน การเคลื่อนไหว จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะทำเก้าอี้

รถเข็นไฟฟ้า (Electric wheelchair) เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้สูงอายุ และลดภาระการดูแลของลูกหลานหรือคนรอบข้าง รถเข็นไฟฟ้านี้เป็นการใช้มอเตอร์ในการเคลื่อนที่และบังคับทิศทางของรถผู้สูงอายุในปัจจุบันมีปัญหาเกี่ยวกับกระดุกส่งผลให้มีปัญหาเกี่ยวกับการเดินและการเคลื่อนไหวของร่างกายซึ่งเกิดจากการทำงาน หรือปัญหาสุขภาพร่างกายที่ไม่แข็งแรงครบครันได้มีผู้สูงอายุอาศัยอยู่ด้วยจะเพิ่มความยากลำบากในการเดินทางมากขึ้น เนื่องจากผู้สูงอายุจะไปไหนมาไหนได้ลำบาก จึงต้องมีตัวช่วยการเดินทางของผู้สูงอายุให้ง่ายขึ้น แก้อิ้อรถเข็นไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกให้ลูกหลานหรือผู้ดูแลได้พาผู้ใช้งานเดินทางได้ง่ายขึ้น ในอดีตมีผลงานวิจัยที่พัฒนานวัตกรรมเกี่ยวกับแก้อิ้อรถเข็นไฟฟ้า เช่น แก้อิ้อรถเข็นไฟฟ้าหลักการทำงานโดยใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนแก้อิ้อไฟฟ้า ล้อทั้งสองข้างใช้ในการเคลื่อนที่ เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา เดินหน้า และถอยหลัง โดยการใช้จอยสติ๊ก (Joystick) เป็นการบังคับในการเคลื่อนที่สามารถรับน้ำหนักของผู้ป่วยหรือผู้ใช้งานได้สูงสุด 110 กิโลกรัม โดยใช้พลังงานแบตเตอรี่ 12 V 12 Ah / 20 Hr ระบบควบคุมด้วย Arduino การควบคุมทิศทาง การเคลื่อน [4] รถเข็นสำหรับคนพิการควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ Joystick ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนที่ทิศทางของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนที่หน้า-หลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และคำสั่งหยุดรถเข็น และระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการขับเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในการส่งคำสั่งสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน [5] วิสเซอร์ไฟฟ้าที่มีระบบควบคุม



แบบไร้สาย เป็นการออกแบบและสร้างขึ้นส่วนของรถวีลแชร์ที่สามารถนำไปประกอบกับรถวีลแชร์ทั่วไปได้ รวมถึงการทดสอบสมรรถนะของรถวีลแชร์ไฟฟ้าแบบมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ล้อ ซึ่งรถวีลแชร์ที่ใช้ในการทำรถวีลแชร์ไฟฟ้าจะใช้วีลแชร์ที่มีอยู่แล้วเพิ่มขึ้นส่วนที่ติดตั้งกับรถวีลแชร์เพื่อให้สามารถทำรถวีลแชร์ธรรมดาให้เปลี่ยนเป็นรถวีลแชร์ไฟฟ้า โดยตัวรถจะมีขนาด กว้าง 27 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร สูง 82 เซนติเมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC หรือ BLDC) ขนาด 150 วัตต์ 36 โวลต์ แบตเตอรี่ลิเธียม แบบชาร์จได้ขนาด 3.7 โวลต์ 3500 แอมป์ต่อชั่วโมง จำนวน 20 ลูก มีน้ำหนักรวมของตัวรถ 20 กิโลกรัม จุดสำคัญที่เน้น ในการสร้างรถวีลแชร์ไฟฟ้า คือ ความปลอดภัยในการใช้งานของผู้ที่ใช้งานรถวีลแชร์ไฟฟ้า [6] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการพัฒนาการรถเข็นสำหรับผู้พิการมีอย่างมากและหลากหลาย แต่การพัฒนาการรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุยังมีไม่มากนัก ดังนั้นการดำเนินชีวิตของผู้สูงอายุก็ต้องมีการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการช่วยเหลือมากขึ้นการอำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตประจำวัน และสนองตอบต่อความต้องการของผู้สูงอายุที่มีหลากหลายกลุ่ม [7] ด้วยเหตุนี้รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุซึ่งพัฒนาขึ้นมาจากรถเข็นผู้พิการที่จำเป็นต้องมีผู้เข็นให้แก่ผู้สูงอายุ ผู้ป่วย หรือผู้พิการที่โดยสารด้วยรถเข็นให้เข็นที่ที่มีการควบคุมด้วย Joystick และผ่านระบบแอปพลิเคชัน (Application) สำหรับสั่งการให้รถเข็นเคลื่อนที่ด้วยการสั่งการผ่านสมาร์ทโฟน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับผู้สูงอายุและผู้มีปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพ ขอเช่าเสื่อม ใช้งานหรือสนับสนุนทางการแพทย์ในการขนย้ายผู้สูงอายุ

ผู้ป่วย หรือผู้พิการที่พอจะช่วยเหลือตัวเองได้ในการเคลื่อนที่อีกทั้งเป็นการสนับสนุนเจ้าหน้าที่พยาบาลในการขนย้ายผู้ป่วย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบ

การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุได้ดำเนินการผ่านกระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) จากนั้นคณะผู้วิจัยดำเนินการพัฒนานวัตกรรมต้นแบบ เพื่อระดมความคิดในการแก้ปัญหาด้วยวิธีทางที่ดี และทดสอบประสิทธิภาพนวัตกรรมต้นแบบดังกล่าวด้วย บนพื้นฐานของความต้องการของผู้ใช้ประโยชน์ และการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยมีกระบวนการ 5 ขั้นตอน [8] ดังนี้

1) เข้าถึงคนและพื้นที่เพื่อทำความเข้าใจปัญหา (Empathize) ตลอดจนเข้าใจกลุ่มเป้าหมายหรือเข้าใจสิ่งที่ต้องการแก้ไขในงานวิจัยนี้เป็นผู้สูงอายุในชุมชนในสถานบริบาลผู้สูงอายุจังหวัดสงขลา

2) ระบุปัญหา (Define) เมื่อทราบข้อมูลปัญหาที่ชัดเจน ตลอดจนวิเคราะห์อย่างรอบด้านแล้วนำเอาข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อที่จะคัดกรองให้เป็นปัญหาที่แท้จริง

3) ระดมความคิดเพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหา (Ideate) โดยไม่จำเป็นต้องเกิดจากความคิดเดี่ยวแต่เป็นการผสมผสานหลากหลายความคิดเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างรอบด้าน

4) พัฒนานวัตกรรมต้นแบบ (Prototype) ด้วยกระบวนการ ADDIE Model ประกอบด้วย (1) รวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพัฒนานวัตกรรมต้นแบบ (A: Analyze) (2) ออกแบบนวัตกรรมต้นแบบ (D: Design) (3) พัฒนานวัตกรรมต้นแบบ (D:



Development, I: Implement) (4) ทดสอบและปรับปรุงนวัตกรรมต้นแบบ (E: Evaluate) และ (5) ทดสอบต้นแบบ (Test) เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพ จากห้องปฏิบัติการก่อนนำไปใช้จริง [9]

2.2 การทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถวีลแชร์ไฟฟ้า โดยการทดสอบจะแบ่งระดับความเร็วไว้ที่ 5 ระดับ และ น้ำหนักทดสอบ 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 กิโลกรัม ประกอบด้วย การทดลองหากระแสไฟฟ้าสูงสุดและความเร็วสูงสุดต่อน้ำหนักผู้ใช้งาน การทดสอบใช้ผิวถนนเป็นคอนกรีตเรียบและระนาบตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลก การทดสอบระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยให้รถเข็นวิ่งด้วยความเร็วตามระดับที่กำหนดจนถึงระดับความเร็วคงที่ แล้วลดระดับความเร็วของรถเข็นลงให้อยู่ในระดับปกติ จากนั้นปล่อยให้รถเคลื่อนที่จนหยุดด้วยน้ำหนักของรถเข็นเอง จากนั้นวัดระยะตั้งแต่รถเข็นลดความเร็วจนถึงระยะหยุดนิ่ง และการทดสอบการวิ่งบนทางลาดชันของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ การเคลื่อนที่ขึ้นในแนวลาดเอียง 15 องศา จากนั้นให้รถเข็นวิ่งด้วยความเร็วตามระดับที่กำหนด จับเวลาการเคลื่อนที่ของรถเข็นเป็นระยะทาง 20 เมตร ทั้งนี้เป็นการทดสอบใช้ผิวของทางลาดเอียงเป็นพื้นผิวคอนกรีตเรียบ

2.3 การประเมินความพึงพอใจการใช้งาน

การทดสอบประสิทธิภาพรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยการนำรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ ไปทดสอบการใช้งาน ณ ศูนย์รับบาลผู้สูงอายุ อำเภอเมือง

จังหวัดสงขลา จำนวน 30 คน โดยแบ่งคะแนนในแต่ละหัวข้อ ตามลำดับตั้งแต่ต่ำสุดไปถึงมากที่สุด (1-5) ซึ่งได้ ออกแบบการประเมินความพึงพอใจการใช้งาน ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้ การใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุที่ง่ายและไม่ซับซ้อน รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดที่เหมาะสม รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสวยงาม รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความปลอดภัยในการใช้งานเครื่อง รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถใช้งานได้หลากหลาย รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย และรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสะดวกสบายในการใช้งาน เป็นต้น

3. ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

ผลการวิจัยการพัฒนาและศึกษาสมรรถนะรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ผลการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

การใช้งานรถเข็นผู้สูงอายุ โดยการสัมภาษณ์การใช้งานรถเข็นผู้สูงอายุ โดยกลุ่มเป้าหมาย คือ กลุ่มผู้สูงอายุ ณ ศูนย์รับบาลผู้สูงอายุ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา เพื่อสอบถามและวิเคราะห์สภาพการใช้งานจริง (Empathize) ด้านการใช้งานรถเข็นผู้สูงอายุที่มีอยู่ในปัจจุบันมีการใช้งานที่ต่ำ เพราะไม่เอียงใช้แรงในการเข็นด้วยมือ และการยกตัวนั่งค่อนข้างลำบาก ทำให้เกิดอุบัติเหตุโดยการล้มจากการใช้รถเข็น (Define) ส่วนการหาแนวทางแก้ไขปัญหาโดยการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยรถเข็นออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับผู้สูงอายุ และผู้มีปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพข้อเข่าเสื่อมให้สามารถใช้งานได้ หรือสามารถสนับสนุน



ทางการแพทย์ในการขนย้ายผู้สูงอายุ ผู้ป่วย หรือผู้พิการ ที่พอจะช่วยเหลือตัวเองได้ในการเคลื่อนที่ อีกทั้งเป็นการสนับสนุนเจ้าหน้าที่พยาบาลในการขนย้ายผู้ป่วย (Ideate) [10] แสดงดังรูปที่ 1

จากการออกแบบตามแนวทางการพัฒนานวัตกรรมที่ได้จากรูปที่ 1 ได้ดำเนินการพัฒนาและสร้างนวัตกรรมต้นแบบ ต้นแบบรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ (Prototype) แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งได้กำหนดคุณลักษณะของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ ไว้ดังนี้ ด้านมิติ รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดความกว้าง 690 มิลลิเมตร ความยาว 1250 มิลลิเมตร และความสูง 1050 มิลลิเมตร (หมายเลข 1) ด้านการควบคุม สามารถควบคุมด้วยแอปพลิเคชัน (Application) หรือบังคับด้วยคันบังคับ Joystick (หมายเลข 4) โดยที่ Joystick สามารถปรับความเร็วรอบได้ 5 ระดับ ส่งสัญญาณเสียง และแจ้งเตือนสถานะแบตเตอรี่ ด้านระบบส่งกำลัง ควบคุมการหมุนของล้อเลื่อนหลักด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ (หมายเลข 5) สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด 120 รอบต่อนาที (หมายเลข 6) บังคับล้อเลื่อนหลักของรถเข็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว (หมายเลข 2) ผลิตจากวัสดุยางเคลือบผิวอย่างดี มีความนุ่ม และรองรับน้ำหนักได้ 200 กิโลกรัม มีล้อบังคับเลี้ยว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว (หมายเลข 3) ผลิตจากวัสดุยาง คงทน แข็งแรง

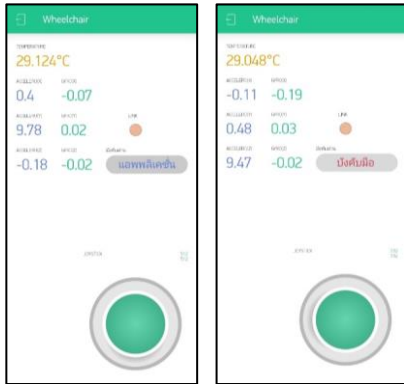
นอกจากนี้สามารถเลือกบังคับการเคลื่อนที่ของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุด้วยแอปพลิเคชัน แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 แบบรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ



รูปที่ 2 ต้นแบบรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ



รูปที่ 3 แอปพลิเคชันรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

จากนั้นได้ดำเนินการทดสอบต้นแบบ (Test) ด้วยแบบสอบถามประเมินคุณภาพต่อการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ผลแสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า ลำดับที่ 1 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสะดวกสบายในการใช้งาน ด้วยค่าเฉลี่ย 4.50 ลำดับที่ 2 การใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ด้วยค่าเฉลี่ย 4.42 ลำดับที่ 3 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ด้วยค่าเฉลี่ย 4.37 ลำดับที่ 4 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดที่เหมาะสม ด้วยค่าเฉลี่ย 4.31 ลำดับที่ 5 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความปลอดภัยในการใช้งาน ด้วยค่าเฉลี่ย 4.27 ลำดับที่ 6 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถใช้งานได้หลากหลาย ด้วยค่าเฉลี่ย 4.16 และ ลำดับที่ 7 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสวยงาม ด้วยค่าเฉลี่ย 4.18 ภาพรวมผลการประเมินคุณภาพต่อการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุจากผู้เชี่ยวชาญ เฉลี่ย 4.32 อยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 1 ผลการประเมินคุณภาพต่อการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุจากผู้เชี่ยวชาญ

หัวข้อประเมิน	ระดับคุณภาพ	ลำดับที่
การใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุที่ง่ายและไม่ซับซ้อน	4.42	2
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดที่เหมาะสม	4.31	4
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสวยงาม	4.18	7
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย	4.27	5
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.16	6
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถใช้งานได้หลากหลาย	4.37	3
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสะดวกสบายในการใช้งาน	4.50	1
ค่าเฉลี่ย	4.32	



3.3 ผลการทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถวีลแชร์ไฟฟ้า มีผลดังนี้

3.2.1 ผลการทดลองหากระแสไฟฟ้าสูงสุดและความเร็วสูงสุดต่อน้ำหนักผู้ใช้งาน

โดยการทดสอบจะแบ่งระดับความเร็วไว้ที่ 5 ระดับ และ น้ำหนักทดสอบ 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 กิโลกรัม การทดสอบใช้ผิวถนนเป็นคอนกรีตเรียบและระนาบตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนการทดสอบของแต่ละปัจจัยจำนวน 3 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 2

การทดสอบจะเป็นการทดสอบในสภาพอากาศปกติ มีผู้ควบคุมการทดลองประกอบด้วย คณะนักวิจัย บุคลากรที่สนใจในนวัตกรรม นักศึกษา และกลุ่มเป้าหมายในการทดสอบ ผลการทดสอบได้บันทึกลงในระบบปฏิบัติการเพื่อประมวลทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผล ซึ่งในการทดลองทั้ง 3 ชั้นนั้น ได้ออกแบบแนวทางเพื่อลดความแปรปรวนในสิ่งที่อาจจะควบคุมไม่ได้ เช่น สภาพอากาศ สภาพจิตใจของผู้ทดสอบ สภาพจิตใจของผู้ถูกทดสอบ รวมทั้งความพร้อมด้านสถานที่ พื้นที่ อุปกรณ์จำเป็นอื่น ๆ และที่สำคัญความพร้อมของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

ตารางที่ 2 ผลการทดลองหากระแสไฟฟ้าสูงสุดและความเร็วสูงสุดต่อน้ำหนักผู้ใช้งาน

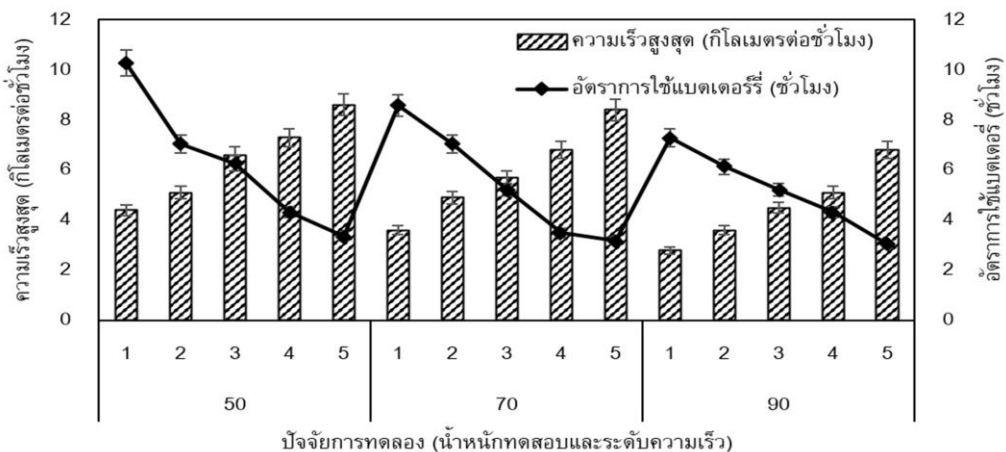
น้ำหนักทดสอบ (กิโลกรัม)	ระดับความเร็ว	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (แอมป์)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์)	ความเร็วสูงสุด (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	อัตราการใช้แบตเตอรี่ (ชั่วโมง)
50	1	2.11	50.64	4.40	10.27
	2	2.96	71.04	5.10	7.04
	3	3.55	85.20	6.60	6.27
	4	5.32	127.68	7.30	4.32
	5	7.06	169.44	8.60	3.35
70	1	2.43	58.32	3.60	8.57
	2	3.13	75.12	4.90	7.05
	3	3.99	95.76	5.70	5.22
	4	5.96	143.04	6.80	3.49
	5	7.50	180.00	8.40	3.18
90	1	2.42	58.08	2.80	7.28
	2	3.21	77.04	3.60	6.13
	3	4.32	103.68	4.50	5.22
	4	6.45	154.80	5.10	4.32
	5	7.91	189.84	6.80	3.03



จากผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มน้ำหนักและระดับความเร็วมากขึ้นส่งผลให้ใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย รวมทั้งอัตราการใช้แบตเตอรี่ก็เพิ่มมากขึ้นไปด้วย สอดคล้องกันกับ [11] พบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วมากขึ้นยิ่งส่งผลทำให้อัตราการใช้แบตเตอรี่ลดลงตามไปด้วย ข้อสังเกตอีกประการคือ อัตราการใช้แบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของการทดสอบ โดยที่ยิ่งน้ำหนักของการทดสอบมากขึ้น ยิ่งใช้พลังงานแบตเตอรี่มากขึ้น หรือ อัตราการใช้แบตเตอรี่ลดลงนั่นเอง

ทั้งนี้ผลการทดลองพบว่า ที่น้ำหนักทดสอบ 50 กิโลกรัม ระดับความเร็ว 1 จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.11 แอมป์ จะได้ความเร็วสูงสุด 4.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีอัตราการใช้แบตเตอรี่มากที่สุด 10.27 ชั่วโมง และที่น้ำหนักทดสอบ 90 กิโลกรัม ระดับความเร็ว 5 จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 7.91 แอมป์ จะได้ความเร็วสูงสุด 6.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีอัตราการใช้แบตเตอรี่น้อยที่สุด 3.03 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบกับความเร็วสูงสุด และอัตราการใช้แบตเตอรี่ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าน้ำหนักของการทดสอบมีผลโดยตรงต่ออัตราการใช้แบตเตอรี่และการเพิ่มระดับความเร็วส่งผลให้อัตราการใช้แบตเตอรี่ก็จะลดลงตามไปด้วยตามแนวโน้มของกราฟในรูปที่ 4 แนวโน้มของอัตราการใช้แบตเตอรี่ลดลงอย่างยิ่งยวดเมื่อน้ำหนักของการทดสอบมากขึ้น และเป็นที่น่าสนใจเมื่อพิจารณาในส่วนของน้ำหนักของการทดสอบที่ 50 กิโลกรัม มีอัตราความชันของการลดลงของอัตราการใช้แบตเตอรี่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความชันของการลดลงของน้ำหนักของการทดสอบที่ 70 และ 90 กิโลกรัม โดยเฉพาะที่ 90 กิโลกรัม ถ้าสังเกตจากกราฟจะมีความชันของการลดลงของอัตราการใช้แบตเตอรี่ที่น้อยที่สุด ที่เป็นลักษณะอย่างนี้เนื่องมาจากน้ำหนักการทดสอบที่น้อยส่งผลให้เกิดการกระชากของแรงกระตุ้นมอเตอร์มากกว่าน้ำหนักการทดสอบที่มากกว่า [12]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบกับความเร็วสูงสุด และอัตราการใช้แบตเตอรี่



3.2.2 ผลการการทดสอบระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

โดยการทดสอบแบ่งระดับความเร็วไว้ที่ 5 ระดับ และ น้ำหนักทดสอบ 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 กิโลกรัม จากนั้นให้รถเข็นวิ่งด้วยความเร็วตามระดับที่กำหนดจนถึงระดับความเร็วคงที่ แล้วลดระดับความเร็วของรถเข็นลงให้อยู่ในระดับปกติ จากนั้นปล่อยให้รถเคลื่อนที่จนหยุดด้วยน้ำหนักของรถเข็นเอง จากนั้นวัดระยะตั้งแต่รถเข็นลดความเร็วจนถึงระยะหยุดนิ่ง ทั้งนี้เป็นการทดสอบใช้ผิวถนนเป็นคอนกรีตเรียบและระนาบตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลก แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนการทดสอบของแต่ละปัจจัย จำนวน 3 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 3

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่า น้ำหนักการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมากขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อสังเกตจากค่าระยะหยุดนิ่งที่ระดับความเร็วที่ 1 ซึ่งระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุที่ทดสอบด้วยน้ำหนักทดสอบ 50 กิโลกรัมจะมีระยะหยุดนิ่งที่ 60.33 เซนติเมตร เทียบกับน้ำหนักทดสอบ 90 กิโลกรัมจะมีระยะหยุดนิ่งที่ 94.60 เซนติเมตร ซึ่งมีความยาวของระยะหยุดนิ่งมากกว่า 34.27 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 6 และเมื่อพิจารณาในระดับความเร็วร่วมกับน้ำหนักการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยเมื่อสังเกตจากน้ำหนักทดสอบ 70 กิโลกรัมระดับความเร็วที่ 1 มีค่าระยะหยุดนิ่งเท่ากับ 83.60 เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มระดับความเร็วเป็นระดับที่ 5 จะมีค่าระยะหยุดนิ่งเท่ากับ 177.60 เซนติเมตร ที่เป็นลักษณะเช่นนี้ก็เนื่องมาจาก



รูปที่ 5 การทดสอบระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

การเคลื่อนที่ของน้ำหนักทดสอบนั้นทำให้แรงบิดที่กระทำต่อล้อหลังของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุเปลี่ยนไปนั้น แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่น้ำหนักทดสอบสามารถทำให้การเคลื่อนที่ของล้อหน้าของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุไหลจากแนวราบขึ้นสู่แนวตั้งโดยที่ล้อหลังนั้นไม่จำเป็นต้องมีแรงขับมาเคลื่อนที่มากนัก ซึ่งอาศัยการปรับตำแหน่งของน้ำหนักทดสอบให้สัมพันธ์กับระดับความเร็วของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ [13]

3.2.3 ผลการทดสอบการวิ่งบนทางลาดชันของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

โดยการทดสอบแบ่งระดับความเร็วไว้ที่ 5 ระดับ และ น้ำหนักทดสอบ 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 กิโลกรัม การเคลื่อนที่ขึ้นในแนวลาดเอียง 15 องศา จากนั้นให้รถเข็นวิ่งด้วยความเร็วตามระดับที่กำหนดจนความเร็วคงที่ จากนั้นจับเวลาการเคลื่อนที่ของรถเข็นเป็นระยะทาง 20 เมตร ทั้งนี้เป็นการทดสอบใช้



ผิวของทางลาดเอียงในอาคารเรียนของคณะครุศาสตร์
อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี โดยเป็นพื้นผิวคอนกรีต
เรียบ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวน

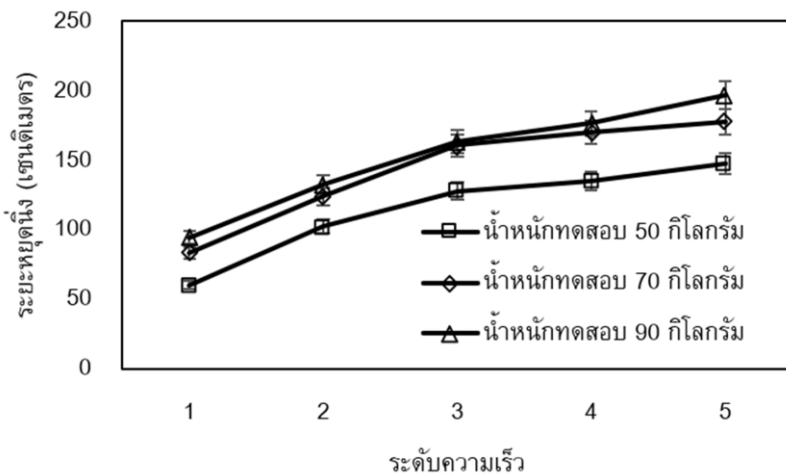
การทดสอบของแต่ละปัจจัยจำนวน 3 ซ้ำ แสดง
ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การทดสอบระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

น้ำหนัก ทดสอบ (กิโลกรัม)	ระดับ	ระดับ	ระดับ	ระดับ	ระดับ
	ความเร็ว 1	ความเร็ว 2	ความเร็ว 3	ความเร็ว 4	ความเร็ว 5
	ระยะหยุดนิ่ง (เซนติเมตร)				
50	60.33	102.30	128.00	135.30	147.60
70	83.60	124.00	160.60	170.00	177.60
90	94.60	132.30	163.30	176.60	196.60

ตารางที่ 4 การทดสอบความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวลาดเอียง 15 องศา

น้ำหนักทดสอบ (กิโลกรัม)	ระดับความเร็ว	ระดับความเร็ว	ระดับความเร็ว	ระดับความเร็ว	ระดับความเร็ว
	1	2	3	4	5
	ระยะเวลา (วินาที)				
50	72.90	64.90	42.40	29.60	15.80
70	92.80	75.90	58.90	36.60	18.40
90	134.60	109.90	84.50	54.30	27.90

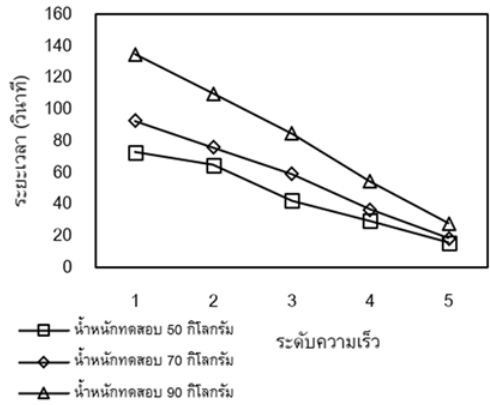


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์น้ำหนักการทดสอบกับระดับความเร็วของระยะหยุดนิ่ง



รูปที่ 7 การทดสอบการวิ่งบนทางลาดชันของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 พบว่า ระดับความเร็วของของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาของการวิ่งมากขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อสังเกตจากระยะเวลาที่ใช้ในการวิ่งที่ระดับความเร็วที่ 1 สำหรับผู้สูงอายุที่ทดสอบด้วยน้ำหนักทดสอบ 50 กิโลกรัมจะมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่ 72.90 วินาที เทียบกับน้ำหนักทดสอบ 90 กิโลกรัมจะมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่ 134.60 วินาที ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่มากกว่า 61.70 วินาที แสดงดังรูปที่ 8 และเมื่อพิจารณาในระดับความเร็วร่วมกับน้ำหนักการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุน้อยลงตามไปด้วยเช่นกัน โดยเมื่อสังเกตจากน้ำหนักทดสอบ 90 กิโลกรัม ระดับความเร็วที่ 1 มีระยะเวลาในการเคลื่อนที่เท่ากับ 134.60 วินาที และเมื่อเพิ่มระดับความเร็วเป็น ระดับที่ 5 จะมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่ลดลงเหลือแค่ 27.90 วินาที ที่เป็นลักษณะเช่นนี้ก็เนื่องมาจาก แรงบิดของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุส่งผลโดยตรงต่อการหมุนของ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์น้ำหนักการทดสอบกับระยะเวลาในการเคลื่อนที่ทางลาดชัน

มอเตอร์ส่งกำลัง ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นรับภาระโหลดที่มากขึ้น ประกอบกับพื้นมีความลาดเอียง ย่อมทำให้มีแรงเสียดทานมากกว่าพื้นระนาบทั่วไป ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงไปก็จะพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองใช้ไฟฟ้าก็มากขึ้นตามไปด้วย เช่นกันนั่นเอง การใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุในพื้นที่ลาดเอียงย่อมส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่มากขึ้น มีผลสอดคล้องกันกับ [5]

3.3 ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งาน

ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยการนำรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ ไปทดสอบการใช้งาน ณ ศูนย์บริการผู้สูงอายุอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา จำนวน 30 คน ประกอบด้วยเพศหญิง จำนวน 20 คน เพศชาย 10 คน มีอายุเฉลี่ย 67 ปี น้ำหนักเฉลี่ย 62 กิโลกรัม เคยมีประสบการณ์ในการใช้รถเข็น ร้อยละ 66.67 เคยมีประสบการณ์ในการขับรถจักรยาน ร้อยละ 96.67 และ



เคยมีประสบการณ์ในการขับรถจักรยานยนต์ ร้อยละ 83.33 ทั้งนี้ผู้อายุที่เข้ารับการทดสอบการใช้งานรถเข็นมีอาการปวดเข่าเกี่ยวกับการเดิน ร้อยละ 60.00 ซึ่งผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งาน แสดงดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า ลำดับที่ 1 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดที่เหมาะสม ด้วยค่าเฉลี่ย 4.60 ลำดับที่ 2 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสะดวกสบายในการใช้งาน ด้วยค่าเฉลี่ย 4.50 ลำดับที่ 3 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความ

ปลอดภัยในการใช้งาน ด้วยค่าเฉลี่ย 4.40 ลำดับที่ 4 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถใช้งานได้หลากหลาย ด้วยค่าเฉลี่ย 4.30 ลำดับที่ 5 การใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ด้วยค่าเฉลี่ย 4.20 ลำดับที่ 6 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ด้วยค่าเฉลี่ย 4.10 และ ลำดับที่ 7 รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสวยงาม ด้วยค่าเฉลี่ย 4.00 ภาพรวมผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุเฉลี่ย 4.36 อยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 5 ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ

หัวข้อประเมิน	ผลความพึงพอใจ	ลำดับที่
การใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุที่ง่ายและไม่ซับซ้อน	4.20	5
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดที่เหมาะสม	4.60	1
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสวยงาม	4.00	7
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.40	3
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.40	3
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถใช้งานได้หลากหลาย	4.30	4
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย	4.10	6
รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีความสะดวกสบายในการใช้งาน	4.50	2
ค่าเฉลี่ย	4.36	



4. สรุปผล

รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ (Prototype) คุณลักษณะของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ ดั้งเดิมด้านมิติ รถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมีขนาดความกว้าง 690 มิลลิเมตร ความยาว 1250 มิลลิเมตร และความสูง 1050 มิลลิเมตร ด้านการควบคุม สามารถควบคุมด้วยแอปพลิเคชัน (Application) หรือบังคับด้วย Joystick โดยที่ Joystick สามารถปรับความเร็วรอบได้ 5 ระดับ ส่งสัญญาณเสียง และแจ้งเตือนสถานะแบตเตอรี่ ด้านระบบส่งกำลัง ควบคุมการหมุนของล้อเลื่อนหลักด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด 120 รอบต่อนาที บังคับล้อเลื่อนหลักของรถเข็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว ผลิตจากวัสดุยางเคลือบผิวอย่างดี มีความนุ่ม และรองรับน้ำหนักได้ 200 กิโลกรัม มีล้อบังคับเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว ผลิตจากวัสดุยาง คงทน แข็งแรง

ผลการประเมินคุณภาพต่อการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ผลการประเมินคุณภาพต่อการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุจากผู้เชี่ยวชาญ เฉลี่ย 4.32 อยู่ในระดับมาก

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำหนักของการทดสอบมีผลโดยตรงต่ออัตราการใช้แบตเตอรี่และการเพิ่มระดับความเร็วส่งผลให้อัตราการใช้แบตเตอรี่ก็จะลดลงตามไปด้วย

ระดับความเร็วร่วมกับน้ำหนักการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระยะหยุดนิ่งของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยการนำรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ ไปทดสอบการใช้งาน ณ ศูนย์บริการผู้สูงอายุ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา จำนวน 30 คน ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุ เฉลี่ย 4.36 อยู่ในระดับมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2566 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนา นวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://resourcecenter.thaihealth.or.th/article/>. (Accessed on 3 September 2023)
- [2] <https://thaipublica.org/2023/03/chittisak31/>. (Accessed on 14 March 2023)
- [3] A. Srisuk, S. Mukviboonchai, U. Sirisukpoca and P. Simalaotao, Development of a wheelchair prototype system powered by an internet of things kit and voice control based on natural language processing concepts, The 15th NPRU National Academic Conference 2023, Proceeding, 2023, 473-484.
- [4] J. Bunmak, T. Thamprakob, F. Margakhet, T. Panich, A. Fangphet and S. Fueangnawakit, Electric wheelchair, Project, Electronics School, Thailand. 2021.



- [5] J. Timonrum, W. Gorkaew and W. Lumchanao, Wheelchairs for disabled control by microcontroller system, Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University, 1(2), 72-81. (in Thai)
- [6] T. Taesuwan, W. Danudom and W. Radtanu, Development and design of wireless electric wheelchairs, Thesis, Naresuan University, Thailand. 2019.
- [7] S. Tuamnee, H. Ketmaneechairat, C. Phetmaneeninsai and P. Phansodte, Smart cane for helping blind people. The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(2), 22-39. (in Thai)
- [8] https://dschool-old.stanford.edu/sandbox/groups/designresources/wiki/36873/attachments/74b3d/ModeGuideBOOTCAM_P2010L. (Accessed on 10 April 2023)
- [9] P. Sureeyaphan, S. Suksabai, P. Chungkrit and M. Sureeyaphan, Development of innovation for the elderly through a design thinking process, CSNP Journal, 2020, 7(2), 33-40. (in Thai)
- [10] W. Boonchouytan and C. Homkiew, Wheelchairs, Thailand Patent, 2402001384.
- [11] S. Promkhunthong, D. Tanyuchon and Amnaj Samervong, An electric tricycle for leg-impaired people, CSNP Journal, 2023, 8(1), 45-54. (in Thai)
- [12] N. Yuviler-Gavish, A. Weiss, U. Ben-Hanan and M. Madar, Wheelchair users' perceptions of a system enabling them to traverse rough terrain controlling their own wheelchair, Applied Ergonomics, 2023, 106, 103866.
- [13] K. D. Klinich, K. J. Boyle, M. A. Manary, N. R. Orton, Y. Wang and J. Hu. Optimizing frontal impact occupant protection systems for passengers seated in wheelchair, Accident Analysis and Prevention, 2023, 192, 1072.



กระแสลมภายในเตาอบไม้ย่างพาราและรูปแบบการจัดวางกองไม้ กรณีศึกษา ไม้ย่างพาราแปรรูปสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์

จิระเชษฐ์ ไชยเจริญ* กมลชนก กองร้อยอยู่ และ วงศธร ศรีสัมฤทธิ์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 30 พฤษภาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 6 สิงหาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 4 พฤศจิกายน 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: การควบคุมความเร็วลมเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการอบไม้ย่างพารา หากความเร็วลมเร็วเกินไปจะทำให้เสียความชื้นในเนื้อไม้เร็วส่งผลให้หน้าไม้แตก การจัดเรียงกองไม้ก็มีผลต่อการกระจายลมในเตาอบไม้เช่นกัน หากมีการจัดเรียงกองไม้ที่มีระห่างที่เหมาะสมยอมทำให้การหมุนเวียนของลมที่ผ่านกองไม้ในเตาอบมีการกระจายทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจำลองการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ย่างพารา และศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสลมกับรูปแบบรวมถึงตำแหน่งการวางไม้ย่างพาราภายในเตาอบไม้ โดยจำลองการไหลของกระแสอากาศในเตาอบไม้ขนาด $6 \times 7 \times 6$ ลูกบาศก์เมตร กำหนดตำแหน่งพัดลมด้านบนของเตาซึ่งเป็นเตาอบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอบไม้ย่างพารา ลักษณะการเรียงกองไม้ โดยขนาดกองละ $1.3 \times 1.3 \times 1.2$ ลูกบาศก์เมตร จำนวน 36 กอง แบบจำลองนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำลองการไหลในโปรแกรม Autodesk Simulation CFD ความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองการจำลองการไหลของการจัดเรียงกองไม้รูปแบบเดิม ผลของค่าสีที่ใช้แสดงความเร็วลมจัดอยู่ในช่วงความเร็วลมในกองไม้ต่ำมีลมหมุนอยู่กับที่อยู่มาก เมื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงกองไม้ใหม่ 2 รูปแบบ ผลการจำลองการไหลพบว่าการเพิ่มขนาดช่องว่างของระยะห่างระหว่างไม้กับผนังด้านที่ลมเข้าและการเพิ่มระยะห่างระหว่างกองไม้ ค่าของสีที่ใช้แสดงความเร็วลมกระจายตัวเข้าไปในกองไม้ได้อย่างทั่วถึงเกิดลมหมุนอยู่กับที่น้อยลง ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นแนวทางการจำลองเบื้องต้นในการจัดเรียงกองไม้ในเตาอบไม้ย่างพารา และจำเป็นต้องนำผลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ไปทำการทดสอบกับเตาอบไม้ย่างพาราที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมไม้ต่อไป

คำสำคัญ: การไหลของกระแสลม; เตาอบไม้; รูปแบบการวางไม้ภายในเตาอบ



Airflow and Wood stack Configuration in Rubber Wood Kiln Drying A Case Study of Processed Rubber Wood for Furniture

Girachat Chaijareon^{*}, Kamonchanok Kongroiyu and Wongsatorn Srisamrit

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

^{*} Corresponding author, E-mail: girachat.c@cit.kmutnb.ac.th

Received: 30 May 2024; Revised: 6 August 2024; Accepted: 4 November 2024

Online Published: 20 December 2024

Abstract: Controlling wind speed is crucial in the process of kiln-drying rubberwood, as excessive wind speed can lead to rapid moisture loss in the wood, resulting in surface cracks. Additionally, the arrangement of wood stacks also affects air distribution within the kiln. Proper stacking can ensure uniform airflow throughout the kiln, facilitating consistent drying. This research aims to study and simulate airflow patterns within rubberwood kilns and investigate the relationship between wind flow and stacking patterns. A simulation was conducted using Autodesk Simulation CFD software in a kiln measuring 6 x 7 x 6 cubic meters, a commonly used size in the rubberwood industry. The wood stacks, each measuring 1.3 x 1.3 x 1.2 cubic meters, were arranged in a configuration of 36 stacks. The simulation revealed that in the original stacking configuration, wind speeds were low within the wood stacks and higher near the walls where the air entered. When altering the stacking pattern to two new configurations, increasing the spacing between stacks and between the stacks and the walls resulted in more uniform airflow within the wood stacks and reduced rotational air movement. This study provides initial simulation-based insights into optimizing wood stacking within rubberwood kilns and underscores the necessity of validating these findings in real-world kiln operations.

Keywords: Airflow; Wood kiln drying; Wood stack Configuration



1. บทนำ

ปัจจุบันไม้ยางพารา นิยมใช้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ตั้งนั้น อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นที่นิยมทั้งในและต่างประเทศ [1] เนื่องจากลักษณะของไม้ยางพาราเป็นไม้เนื้ออ่อน มีความทนทานต่อธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ไม่สามารถเก็บไว้ได้ ในที่นี้ หมายถึง เมื่อทำการตัดไม้ ยางแล้วต้องนำไปแปรรูปทันทีเนื่องจากไม้ยางพาราที่ เพิ่งตัดใหม่ๆ จะมีความชื้นและน้ำหนักค่อนข้างมาก ส่วนใหญ่จะมีความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 80 – 100 ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์จึงต้องผ่านการอบไม้เพื่อให้ ไม้มีความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการอบไม้ด้วยการผสมผสานระหว่างการผึ่งแห้งด้วยกระแสอากาศ และอบแห้งด้วยเตาอบ เตาอบส่วนใหญ่ มักใช้ความร้อนจากไอน้ำ และพัดลมช่วยกระจายความร้อนแก่เตาอบ ภายใน เตาอบจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม การอบไม้ใช้อุณหภูมิของการอบที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับเทคนิคการอบไม้และคุณภาพของเตาอบไม้ ส่วนความเร็วลมต้องควบคุมให้เหมาะสม เพราะการไหลของกระแสอากาศ จะช่วยให้น้ำในเนื้อไม้มีการระเหยออกเร็วขึ้น นอกจากการควบคุมความเร็วลมแล้ว การจัดเรียงกองไม้ก็มีผลต่อการแห้งของไม้เช่นกัน ขนาดและลักษณะของการจัดเรียงกองไม้ขึ้นอยู่กับขนาดของเตาอบที่ใช้เป็นสำคัญ การจัดเรียงไม้ที่ดี ย่อมทำให้การหมุนเวียนของกระแสอากาศที่ผ่านกองไม้ ในเตาอบมีการกระจายที่ดีและทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอ [2] จากการเก็บรวบรวมข้อมูลสามารถ จำแนกประเภทของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป

กรณีศึกษาบริษัท AAA ในเดือน มิถุนายน – ธันวาคม 2559 ได้ข้อมูลว่า ไม้คอตตัว 2.99% ไม้ตกขนาด 4.55% ไม้ชิ้นรา 27.25% ไม้หัวแตก 3.27% และอื่น ๆ 0.23% ซึ่งเกิดมาจากกระบวนการอบไม้ [3] การลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการอบไม้จึงเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการลดของเสียในอุตสาหกรรมไม้ยางพารา ตั้งแต่ต้นกระบวนการผลิต จึงเป็นที่มาของงานวิจัย เรื่องการศึกษาและควบคุมความเร็วลมภายในเตาอบ ไม้ยางพารา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา และจำลองการไหลของกระแสลมภายในเตาอบไม้ ในการหาความสัมพันธ์ของกระแสลมกับรูปแบบ และตำแหน่งการวางไม้ยางพาราภายในเตาอบ

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบไม้

2.1.1 ระบบความร้อน

ความสำคัญของระบบความร้อนในการออกแบบเตาอบนั้นมีหลายแบบ แต่ยังคงอาศัยหลักที่จำเป็นอย่าง เดียวกัน[4] คือ ต้องการให้มีความร้อนสูง เพื่อให้ไม้แห้งเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ดี ความร้อนก็อาจทำให้เกิด ความเสียหายแก่ไม้ได้ เป็นต้นว่าความร้อนอาจจะทำให้ คุณสมบัติของไม้เปลี่ยนแปลงไป เช่น เมื่ออบไม้ในอุณหภูมิ สูงๆ จะทำให้สีของไม้เข้มขึ้น ความแข็งของไม้ที่ลดลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ทั้งนี้ อุณหภูมิยังเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้การระเหยของน้ำ ออกจากไม้ อัตราการซึมผ่านของความชื้นของไม้จะสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยความชื้นจะค่อย ๆ ซึม ออกจาก ผิวชั้นในสู่ผิวชั้นนอกนอกจากนี้ความร้อนยังช่วยทำลาย เชื้อรา หรือแมลงบางชนิดได้ และทำให้ไม่เกิดการอ่อนตัวระหว่างการอบ ในการอบไม้ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะไม้



ที่มีความหนาแน่นปานกลางและไม่เนื้อแข็ง การหดตัวและการผิวดรูปร่างของไม้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นไม้ที่บิดตัวได้ง่ายจะใช้อุณหภูมิในการอบที่อุณหภูมิต่ำๆ ไม้บางชนิดจะแตกหักหรือเป็นรูปพรุนเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงๆ ไม้หลายชนิดจะมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากเรซินในเนื้อไม้ไหลออกมาเคลือบผิวไว้ เนื่องจากการอบไม้ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความแข็งแรงของไม้ลดลงเล็กน้อย ดังนั้นควรจะอบไม้ไม่เกิน 60°C ทั้งนี้ภายในเตายังต้องควบคุมระบบความชื้น

2.1.2 ระบบความชื้น

ความสำคัญของความชื้นภายในเตา เพื่อป้องกันหรือลดตำหนิต่างๆ ในไม้ ป้องกันไม่ให้ไม้ที่อบเกิดการแข็งนอกในการแก้ตำหนิต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ความเค้น การแข็งนอก และการยุบตัว ทำให้อัตราการซึมของความชื้นในไม้ เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ไม่ทำให้ผิวของไม้แห้งเร็วจนเกินไป เป็นการควบคุมให้การแห้งของไม้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ตลอดระยะเวลาการอบ และเมื่ออากาศอุ่นปริมาณไอน้ำสูงสุด ไอน้ำจะออกแรงที่เราเรียกว่า แรงดันไอน้ำอิ่มตัว ถ้าปรากฏว่ามีไอน้ำปริมาณน้อยกว่าระดับไอน้ำสูงสุดนี้ อากาศสามารถดูดความชื้นได้มากกว่า อัตราส่วนของแรงดันไอน้ำและแรงดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิพอเหมาะสามารถแสดงออกในรูปเปอร์เซ็นต์ เรียกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity: RH) เมื่อเรานำไม้เปียกไปวางไว้ในสภาพอากาศที่ไม่อิ่มตัว คือ มีความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ การระเหยของน้ำในไม้จะเกิดขึ้นที่ผิวไม้ ณ อุณหภูมิที่กำหนด อัตราการระเหยของน้ำจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของแรงดันไอน้ำระหว่างอากาศที่ผิวไม้กับอากาศที่หมუნเวียน

ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของความชื้นในไม้ เมื่อน้ำระเหยจากผิวหน้าของไม้เปียก ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณด้านนอกจะต่ำกว่า และความชื้นจะย้ายออกไปอยู่ด้านนอก ซึ่งวิธีทำให้ไม้แห้งในอากาศกับการอบ ต้องอาศัยความชื้นในอากาศเป็นตัวระเหยความชื้น สำหรับไม้ที่อยู่ในอุณหภูมิที่กำหนดนี้ อัตราการเคลื่อนตัวของความชื้นจากเนื้อไม้ออกมายังผิวไม้จะเป็นการผกผันระหว่างความชื้นของอากาศกับความชื้นของไม้ ซึ่งความชำนาญในการทำให้ไม้แห้งผู้นั้นต้องมีความรู้ในความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของความชื้นที่ต้องสัมพันธ์กันโดยปราศจากการทำลายไม้

2.1.3 ระบบการหมუნเวียนของอากาศ

ความสำคัญของระบบหมუნเวียนของอากาศเพื่อนำความร้อนจากท่อให้ความร้อนผ่านไปยังกองไม้ ให้ความชื้นระเหยออกมาจากไม้ ให้ความร้อนและความชื้นแผ่กระจายไปทั่วกองไม้ และเตานำเอาความชื้นที่ระเหยออกมาจากไม้ ออกมาภายนอกกองไม้ ทำให้การระเหยของน้ำจากไม้ดำเนินไปได้เรื่อยๆ ถ้าหากระบบการหมუნเวียนของอากาศภายในเตาไม่ดีจะทำให้ไม้แห้งไม่สม่ำเสมอ นอกจากนั้นการระบายอากาศขึ้นออกจากไม้นั้นไม่มีทางระบายออกมาจากเตา จะทำให้สภาพในเตามีความชื้นสูง และจะไม่มีการระเหยของความชื้นจากไม้ และ ในทำนองเดียวกันควรจะมีท่อให้อากาศที่เย็นและแห้งเข้าไปในเตาด้วย ประสิทธิภาพของท่อให้ความร้อน จะขึ้นอยู่กับระบบการหมუნเวียนของอากาศ ถ้าการหมუნเวียนของอากาศไม่ดี ประสิทธิภาพการให้ความร้อนของท่อก็จะลดลงทันที



ทั้งนี้การทำให้เกิดระบบการหมุนเวียนของอากาศ มี 2 วิธี คือ 1) Thermal Circulation หรือ Natural Circulation ทำได้โดยอาศัยการติดตั้งท่อให้ความร้อนไว้ที่ฐานใต้กองไม้ อากาศที่อยู่ใกล้กับท่อจะร้อนมีน้ำหนักเบาและจะลอยตัวสูงขึ้นผ่านกองไม้แล้วอากาศเย็นที่มีน้ำหนักก็จะเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดระบบการหมุนเวียนของอากาศขึ้น อัตราความเร็วประมาณ 1/2 ฟุตต่อวินาที และ 2) Forced Circulation เป็นระบบที่นิยมใช้กันมาก การติดตั้งพัดลมอาจติดตั้งด้านบนล่าง ข้าง หรือด้านนอกของเตาอบก็ได้ โดยอัตราความเร็วของพัดลมที่จะใช้ขึ้นอยู่กับความกว้าง ความหนาของไม้คั้น และความหนาของไม้ที่จะอบ แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ ต้องมีระบบการหมุนเวียนของอากาศสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งเตา ดังนั้นจากข้อมูลหัวข้อปัจจัยหลักพื้นฐานที่มีผลต่อการอบไม้ในเตาอบมี 3 ปัจจัยหลัก ๆ คือ ระบบความร้อน ระบบความชื้น และระบบหมุนเวียนของกระแสอากาศ ความสำคัญของแต่ละระบบคือ ระบบความร้อนเป็นการให้อุณหภูมิภายในเตาอบสูงเป็นตัวการสำคัญในการทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากไม้ การให้ความร้อนเป็นการพา (Convection) เป็นวิธีที่เตาอบนิยมใช้ ระบบความชื้นเป็นการควบคุมให้การแห้งของไม้สม่ำเสมอ ไม้ไม่แห้งเร็วเกินไป ความชื้นในไม้จะเคลื่อนที่จากด้านในออกมาด้านนอกและจะอาศัยความชื้นในอากาศเป็นตัวระเหยความชื้น ระบบหมุนเวียนกระแสอากาศเป็นการนำความร้อนจากท่อให้ความร้อนผ่านไปยังกองไม้ จะทำให้ไม้ได้รับความร้อน น้ำในไม้ก็จะระเหยออกมา และทำให้ความร้อนและความชื้นแผ่กระจายไปทั่วกองไม้และเตานำความชื้นที่ระเหยออกมาจากไม้ออกมาภายนอกกองไม้ ทำให้การระเหยของไม้สามารถดำเนินไปได้เรื่อย ๆ ถ้าหากไม่มี

การหมุนเวียนของอากาศจะทำให้ความชื้นบริเวณกองไม้ไม่เปลี่ยนแปลงความชื้นในไม้ก็จะไม่สามารถระเหยออกมาได้ซึ่งนำไปสู่กระบวนการอบไม้ที่มีคุณภาพ

2.1.4 กระบวนการควบคุมการอบไม้ย่างพารา

กระบวนการอบไม้ย่างพารา เป็นกระบวนการที่ดึงน้ำออกจากไม้ซึ่งประกอบอยู่ในรูปของน้ำอิสระ (free water) ในช่องว่างของเซลล์และน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์เนื้อไม้ (bound water) ในระหว่างการอบแห้งน้ำอิสระจะออกไปได้ก่อน ส่วนน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์เนื้อไม้จะออกไปยากกว่าเนื่องจากจะติดอยู่ในผนังเซลล์ซึ่งเป็นโครงสร้างของเนื้อไม้ที่อยู่ในผนังเซลล์เนื้อไม้ก็เลยเกิดการหดตัวโดยที่จะมีการหดตัวตามแนวเกรนน้อยกว่าแนวสัมผัสกับวงปีมากกว่าแนวรัศมีถึงสองเท่า ดังนั้นการอบแห้งจึงควรทำด้วยความระวังเอาใจใส่เพื่อไม่ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการอบส่งผลกระทบต่อเสียหายของไม้ได้เพราะส่วนมากการอบแห้งจะต้องอบไม้เพื่อใช้งานให้มีความชื้น (MC) ต่ำกว่าจุดเหมาะสม (Fiber Saturation Point) เมื่อไม้มีความชื้นต่ำกว่าจุดเหมาะสม ความชื้นจะเคลื่อนที่ในรูปของการแพร่กระจาย (Diffusion) อันเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความดันไอจะมีค่าน้อยเมื่อไม้มีความชื้นสูงกว่าจุดเหมาะสมโดยการเคลื่อนที่ของความชื้นจะเป็นไปในรูปของ Capillary Action แต่การเปลี่ยนแปลงของความดันไอจะมีมากเมื่อไม้มีความชื้นต่ำกว่าจุดเหมาะสม การอบไม้ หมายถึงขบวนการหรือกรรมวิธีในการ ให้ความชื้นหรือน้ำระเหยออกจากเนื้อไม้ที่สุดหรือมีความชื้นมากเกินพอ โดยเหลือปริมาณความชื้นอยู่ในเนื้อไม้ได้ส่วนสมดุลกับบรรยากาศที่อยู่โดยรอบไม้ที่จะนำไปใช้ประโยชน์นั้นคือ ให้เหลือความชื้นอยู่ในไม้ประมาณ 1 ใน 10 ของ



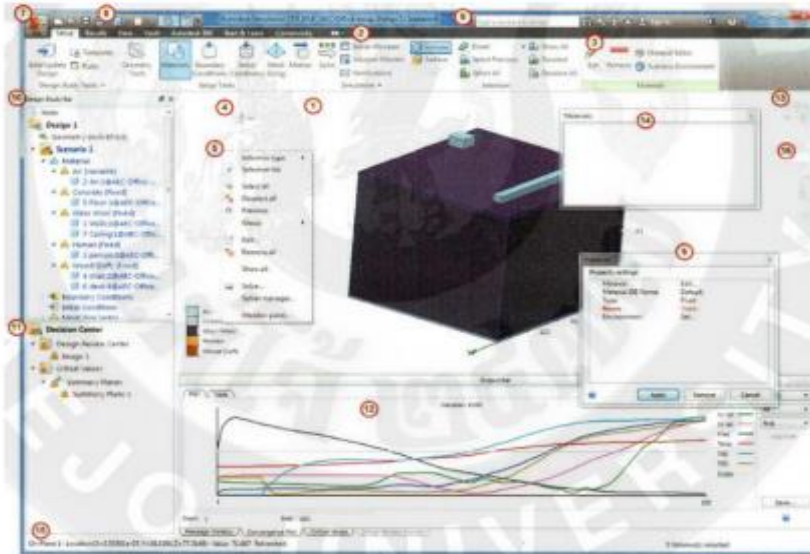
ความชื้นสด หรือประมาณ 8 - 16 % (12% โดยเฉลี่ย) สำหรับสภาวะอากาศของประเทศไทย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการอบไม้ เพื่อให้เสียเวลาน้อยที่สุด และต้องไม่ทำให้ไม้เมื่อผึ่งและอบแล้วให้มีตำหนิน้อยที่สุด [5] ทั้งนี้เตาอบแบบ Conventional Kiln สามารถแบ่งเป็นใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ Progressive หรือ Semi Continuous และ Compartment หรือ Batch เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียทั้ง 2 ประเภทแล้วเตาอบแบบ Compartment มีลักษณะที่เหมาะสมกับในกรณีการศึกษาการควบคุมความเร็วลมภายในเตาอบมากกว่า และเป็นเตาที่ใช้ในประเทศไทย และเป็นเตาอบที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการไหลของลมได้ ดังนั้นงานวิจัยการศึกษาและควบคุมความเร็วลมภายในเตาอบไม้ยางพารา จึงเลือกใช้เตาอบแห้งแบบห้อง (Compartment Kiln) และเป็นเตาอบที่มีการติดตั้งพัดลมเพื่อหมุนเวียนอากาศ ตำแหน่งการติดตั้งจะอยู่ด้านบนของเตาอบแกนพัดลมจะอยู่ตามยาวของเตาซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระแสลมภายในเตาและเป็นการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสลมในการทดลอง [6]

2.1.5 การเคลื่อนไหวของกระแสลมและของไหล
ลมสามารถพัดได้ด้วยแรงขับเคลื่อน 2 ประเภท ได้แก่ความแตกต่างของอากาศ (Pressure Differential) และความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Differential) [7] โดยลักษณะการไหลของลม เมื่อยังเคลื่อนตัวไม่ถึงวัตถุจะเป็นลักษณะการเคลื่อนแบบราบเรียบ มีความเร็วลมสม่ำเสมอ เมื่อเคลื่อนตัวถึงวัตถุมีความเร็วไม่สม่ำเสมอ เมื่อปะทะวัตถุหรือมีช่องว่างระหว่างชั้นที่ให้อากาศไหลผ่าน อากาศจะเบียดตัวผ่านพื้นที่ที่เล็กกว่า จนเกิดการไหลของลมลักษณะปั่นป่วน (เทอร์บิวเลนต์) และมีบางส่วนเป็นกระแสมวน และ

ความเร็วลมเพิ่มขึ้น[8] เมื่อลมปะทะกับวัตถุ จะมีโซนแรงดันสูงของความเร็วลมที่ เพิ่มขึ้นทางด้านเหนือลมของวัตถุ และโซนแรงดันต่ำของความเร็วลม ที่ต่ำกว่าด้านใต้ลมของวัตถุ ความเร็วจะเพิ่มขึ้นตามลมที่เคลื่อนผ่านรอบด้านข้างและด้านบนของวัตถุ ลมที่ปะทะลักษณะผืนผิว ลมจะถูกเบี่ยงเบน แต่ไม่หยุด และความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านทางคอด [9] รวมทั้งการไหลของของไหลภายในเตาอบไม้ ยางพาราของไหลภายในเตาอบไม้คืออากาศ การไหล ของอากาศ เวลาที่อากาศยังไม่ถึงกองไม้จะมีลักษณะ การไหลแบบสม่ำเสมอราบเรียบ และเส้นการไหลเป็นทิศทางเดียว เมื่ออากาศเคลื่อนที่มาถึงกองไม้จะเกิด การไหลที่ไม่สม่ำเสมอขึ้น เปลี่ยนการไหลแบบ ราบเรียบไปเป็นแบบการไหลแบบปั่นป่วน ทิศทางการไหลก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อเข้าไปใน ช่องว่างระหว่างชั้นกองไม้ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะแสดงให้เห็นการไหลของกระแสลมผ่านตำแหน่งต่างๆของกองไม้ภายในเตาอบ

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การศึกษาและการควบคุมความเร็วลมภายในเตาอบไม้ยางพาราได้ทำการเลือกใช้โปรแกรม Autodesk CFD เป็นโปรแกรมที่จำลองการไหล กระแสลม แสดงดังรูปที่ 1 เนื่องจากโปรแกรมสามารถที่จำลองการไหลกระแสลมได้หลายรูปแบบโดยมีการทำงานได้หลายฟังก์ชันทดสอบ และสามารถใช้ได้หลากหลายประเภทของงาน มีความแม่นยำสูง ซึ่งสามารถแสดงการไหลของกระแสลมในเตาอบไม้ยางพาราได้เริ่มจากการทำการศึกษารายละเอียดเตาอบไม้ ยางพาราโดยเก็บข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้ เตาอบแห้งแบบห้อง



รูปที่ 1 หน้าต่างของโปรแกรม Autodesk® Simulation CFD [10]

(Compartment Klin) ที่มี ขนาด 6x7x6 เมตร โดยมี ตำแหน่งการวางพัดลม วางไว้ด้านบนของเตา ที่ใช้ ความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที สลับทิศทางทุก ๆ 6 ชั่วโมง และมีก่องไม้ที่ใช้มีขนาด 1.3x1.3x1.2 เมตร (กว้างxยาวxสูง) ทำการนำข้อมูลของเตาอบไม้ยางพารา ที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองของเตาอบไม้ยางพารา ด้วยใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ AutoCAD ในการสร้าง แบบจำลองเตาอบไม้ยางพาราโดยจะสร้างตามขนาดที่ ทำการศึกษา มีพัดลมเป็นตัวกระจายลมโดยมี ตำแหน่ง การวางพัดลม จะอยู่ตรงกลางระหว่างเตา ด้านบน และมี แผงกันลม และสร้างรูปแบบการจัดเรียงก่องไม้จะมีการ เรียงก่องไม้รูปแบบ เดิม ตำแหน่งการวางพัดลม ความเร็วลม และรูปแบบการจัดเรียงก่องไม้ เพื่อนำมา สร้างแบบจำลองของเตาอบไม้ยางพาราด้วยคอมพิวเตอร์ และเริ่มทำการจำลองการไหล โดยใช้โปรแกรม Autodesk Simulation CFDโดยทำการศึกษาลักษณะการ ไหลของลมในการจัดเรียงก่องไม้รูปแบบเดิม และทำการ

ปรับรูปแบบใหม่โดยให้มีรายละเอียด (ตารางที่ 1) และ ทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของรูปแบบต่างๆ เพื่อ หาแบบที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 1 รายละเอียดขนาดการปรับเปลี่ยนรูปแบบ

หัวข้อ	ระยะเดิม	ระยะปรับปรุง รูปแบบที่ 1	ระยะปรับปรุง รูปแบบที่ 2
ระยะห่างระหว่าง ก่องไม้	10 ซม. เท่ากัน ทั้ง 2 ด้าน	50 ซม. เท่ากัน ทั้ง 2 ด้าน	ด้านความยาว 25 ซม. และด้านหัวไม้ 50 ซม.
ระยะห่างระหว่าง ก่องไม้กับผนัง ด้านที่ลมเข้า	25 ซม. เท่ากันทั้ง ซ้ายและขวา	ซ้าย 20 ซม ขวา 80 ซม.	80 ซม. เท่ากันทั้ง ซ้ายและขวา
ระยะห่างระหว่าง ก่องไม้กับผนัง ด้านหัวไม้	140 ซม. ทั้ง 2 ด้าน	20 ซม. ทั้ง 2 ด้าน	20 ซม. ทั้ง 2 ด้าน



4. ผลการวิจัย

จากการศึกษารายละเอียดของใบยางพาราการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ และการจัดเรียงกองไม้ เพื่อนำมาศึกษาการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ยางพารา และแสดงผลการจำลองการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ยางพาราที่มีการจัดวางกองไม้รูปแบบเดิม และปรับเปลี่ยนรูปแบบการวางใหม่ เพื่อให้ได้รูปแบบการจัดวางกองไม้ใหม่ที่การไหลของสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วและเหมาะสม โดยการใส่ค่าตัวแปรที่ได้ลงในพารามิเตอร์ของโปรแกรม (ตารางที่ 2)

4.1 จำลองการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ยางพาราในการเรียงกองไม้รูปแบบเดิม

จากการใช้โปรแกรมสรุปได้ว่า ผลการจำลองการไหลของกระแสอากาศในรูปแบบเดิมนั้น เนื่องจากมีการเปิดพัดลม 2 ด้านขนาดกองและระยะห่างระหว่างกองอยู่ที่ 10 ซม. เท่ากันทุกตำแหน่ง ผลการรันโปรแกรมจึงมีลักษณะเหมือนกันโดยมีค่าเฉลี่ยความเร็วลมที่หน้ากองไม้ใน Section 4 เท่ากับ 0.54 เมตรต่อวินาที และค่าเฉลี่ยความเร็วลมที่หลังกองใน Section 4 เท่ากับ 0.14 เมตรต่อวินาที ใน Section 5 มีความเร็วลมเฉลี่ยที่หน้ากอง 0.33 เมตรต่อวินาที หลังกองเฉลี่ยเท่ากับ 0.09 เมตรต่อวินาที ใน Section 6 มีค่าความเร็วเฉลี่ย 0.26 เมตรต่อวินาที และหลังกองเฉลี่ย 0.07 เมตรต่อวินาที สังเกตได้ว่าใน Section 6 มีค่าความเร็วลมที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นแพลนที่ต่ำที่สุดอยู่ในตำแหน่งกองไม้ชั้นแรก ลมลงไปถึงในปริมาณน้อยทำให้เกิด

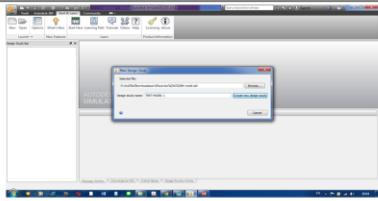
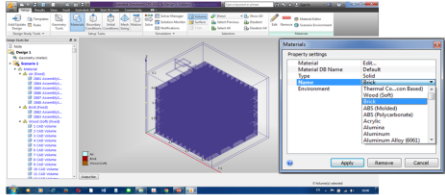
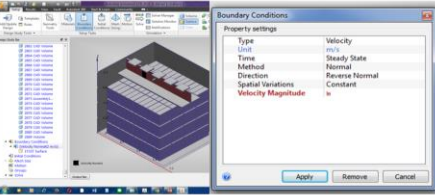
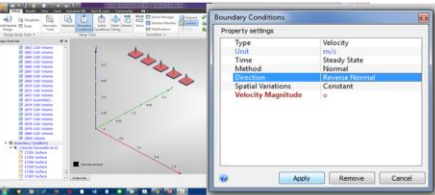
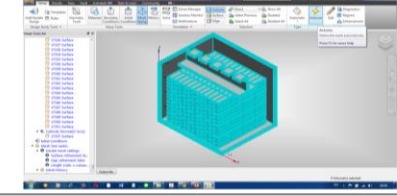
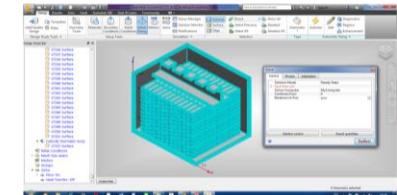
ลมหมุนอยู่กับที่มาก ใน 3 Section นี้จะเห็นได้ชัดว่าภายในกองไม้มีค่าความเร็วลมที่ต่างกันมาก จากผลการจำลองการไหลที่มีการจัดเรียงกองไม้ รูปแบบเดิมพบว่าการจัดเรียงกองไม้และความกว้าง ของช่องว่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านที่ลมเข้า ความกว้างระหว่างกองไม้มีผลต่อการกระจายตัวของลม จะสังเกตได้ว่าบริเวณกองไม้ชั้นล่างมีค่าความเร็วต่ำทำให้เกิดลมหมุนอยู่กับที่ในปริมาณมาก เนื่องจากกระห่างระหว่างกองไม้กับผนังของเตาอบมีระห่างไม่มาก กองไม้ในแต่ละ Section ที่มีความสูงลดลงส่งผลให้เกิดกระห่างจากพัดลมซึ่งเป็นจุดกำเนิดของกระแสลมภายในเตาอบ ลักษณะของลมที่โปรแกรมแสดงให้เห็นจึงกระจุกตัวอยู่ในบริเวณที่ต่ำลงมาในลักษณะที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3)

4.2 จำลองการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ยางพาราในการเรียงกองไม้รูปแบบที่ 1

จากการจัดเรียงกองไม้รูปแบบเดิมเห็นได้ชัดว่าเกิดจากระยะห่างระหว่างกองไม้ และระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านลมเข้า ผู้จัดทำจึงทำการเพิ่มขนาดช่องว่างระหว่างกองไม้เป็น 50 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างกองไม้กับผนัง 80 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านข้าง 20 เซนติเมตร ตามทฤษฎี โดยทำการจัดเรียงตามระยะนี้ แต่ด้านที่ลมเข้าอีกด้านหนึ่งจะมีระยะไม่ถึง 80 เซนติเมตรเพื่อศึกษาการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ยางพาราในการจัดเรียงกองไม้รูปแบบเดิม ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกศึกษาในระนาบ ดังนี้

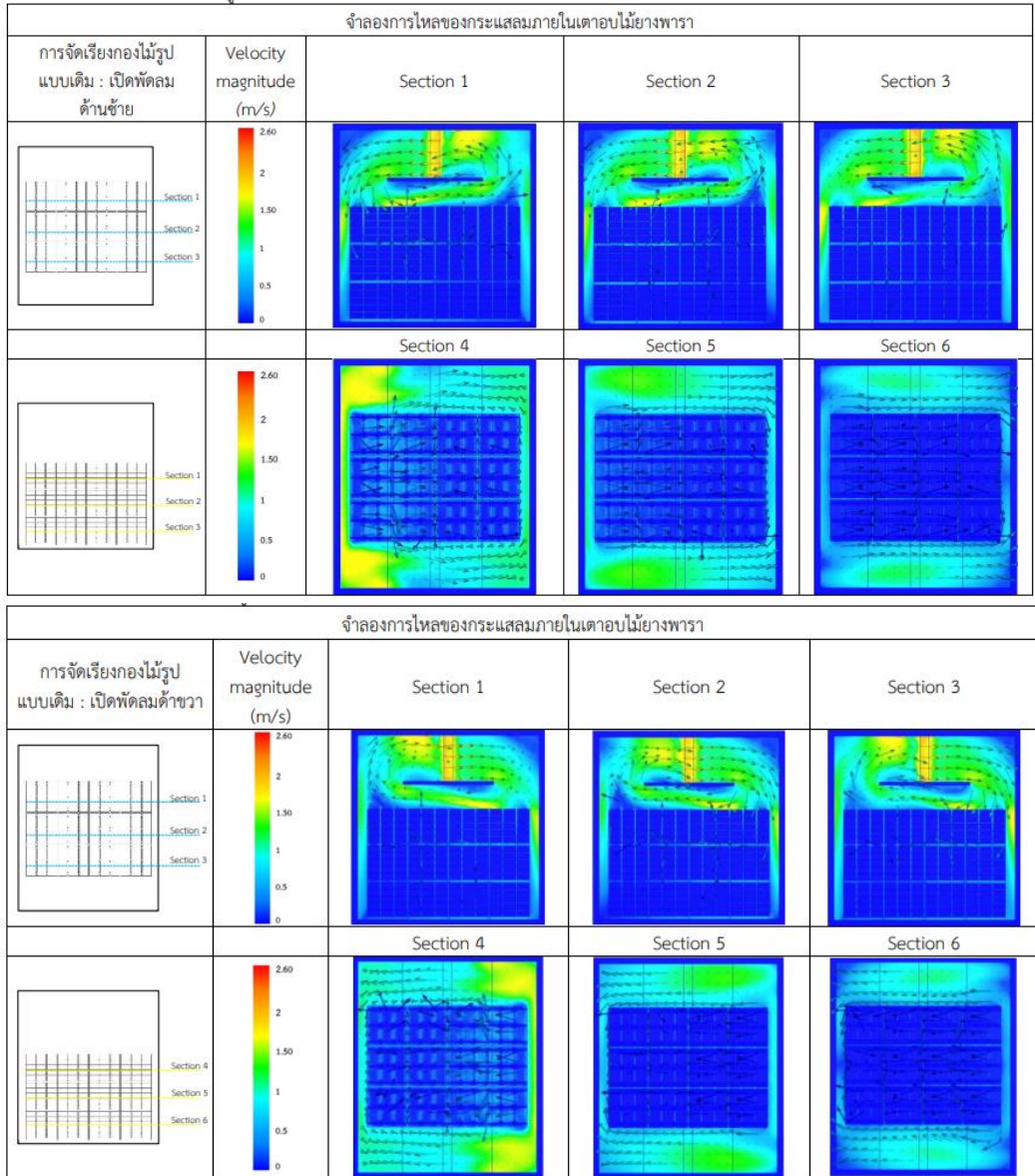


ตารางที่ 2 การใส่ค่าตัวแปรในโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงผล

ตารางการใส่ค่าตัวแปรในโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงผล		
ลำดับที่	ขั้นตอนการใส่ค่าตามพารามิเตอร์	คำอธิบาย
1		1.คลิกที่ไอคอน New มุมซ้ายบน 2.กดคำสั่ง Browse เพื่อนำเข้าไฟล์งานที่สร้างไว้สกุลไฟล์ .sat
2		3.เมื่อไฟล์เข้าสู่โปรแกรมให้แล้วตั้งค่าวัสดุตามตัวแปรที่ใช้ทดลองโดย กดที่โมเดลจำลองแล้วตั้งค่าวัสดุตามตัวแปรที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม
3		4.ไปที่ไอคอนBuonary Conditions - เลือกโมเดลที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้นของลม - โดยกำหนดหน่วยความเร็วลมเป็นเมตรต่อวินาที - การเคลื่อนที่แบบคงที่ ค่าความเร็วลมตามตัวแปร
4		5.ไอคอนBuonary Conditions - เลือกโมเดลที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดทางออกของลมเพื่อกำหนดหัวลูกศร - ไปที่คำสั่ง Direction แล้วกดเพื่อกำหนดหัวลูกศรเพื่อแสดงทิศทางของลมที่เคลื่อนที่ออก
5		6.ไปที่ไอคอน Mesh sizing - กดไอคอน Autosize เพื่อให้โปรแกรมรวมผลของค่าตัวแปรต่างๆที่ใส่ลงในโมเดลจำลอง
6		7.ไปที่ไอคอน Mesh sizing - เมื่อโปรแกรมรวมผลค่าตัวแปรที่ใส่ในโมเดลต่างๆเสร็จ ก็จะใช้พารามิเตอร์ Solveเพื่อประมวลผลการทดลอง ขั้นตอนนี้จะใช้ค่ามาตรฐานของโปรแกรม และทำการรันโปรแกรมเพื่อดูผลการทดลอง



ตารางที่ 3 ผลการจำลองการไหลรูปแบบเดิม – เปิดพัดลมด้านซ้ายและเปิดพัดลมด้านขวา





จากการใช้โปรแกรม สรุปได้ว่าผลการทดลอง การจำลองการไหลของเตาอบไม้ยางพาราที่มีรูปแบบ การจัดเรียงกองไม้รูปแบบที่ 1 การเปิดพัดลมด้านซ้าย มีค่าความเร็วลมที่ต่ำและเกิดลมหมุนมากในกองไม้ และระหว่างกองไม้เยอะ เมื่อเปิดพัดลมฝั่งขวา ลักษณะ การไหลของลมมีตำแหน่งที่เกิดลมหมุนอยู่ โดยค่า ความเร็วลมของการเปิดพัดลมสองฝั่งมีค่าไม่เท่ากัน และไหลไม่สม่ำเสมอ จากผลการจำลองการไหลของ ลมภายในเตาอบไม้ ยางพารา ของการจัดเรียงรูปแบบ ใหม่รูปแบบตาม ทฤษฎี เมื่อทำการเว้นระยะห่าง ระหว่างกองไม้กับผนัง ด้านที่ลมเข้าและระยะห่าง ระหว่างกองไม้แล้วจะมีอีกด้านหนึ่งที่ระยะของกองไม้ กับผนังไม่ถึงที่กำหนดไว้ ทำให้การเปิดพัดลมทั้งสอง ด้านแตกต่างกันเมื่อ เปิดทางด้านซ้ายซึ่งเป็นระยะที่ ไม่ถึงที่กำหนดไว้ลมที่เข้ากองไม้จะน้อยกว่าการเปิด พัดลมอีกด้านอาจจะทำให้ไม้แห้งได้ไม่สม่ำเสมอ การเว้นระยะระหว่าง กองไม้ช่วยให้ไม้สามารถ แห้งได้ดีขึ้นสังเกตในระนาบ Section 1-4 จะมีลักษณะไหลขึ้นแล้วออก จากกองไป ซึ่งเป็น การนำ ความชื้นออกไปจากกองไม้ นั่นเอง แต่เนื่องจาก ระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังที่ ไม่เท่ากันทำให้ลม เข้าไปในกองไม้ได้ไม่เท่ากัน อาจจะทำให้ไม้แห้งได้ไม่ สมบูรณ์จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบต่อไปเพื่อ หาแบบที่เหมาะสม (ตารางที่ 4)

4.3 จำลองการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ยางพาราในการเรียงกองไม้รูปแบบที่ 2

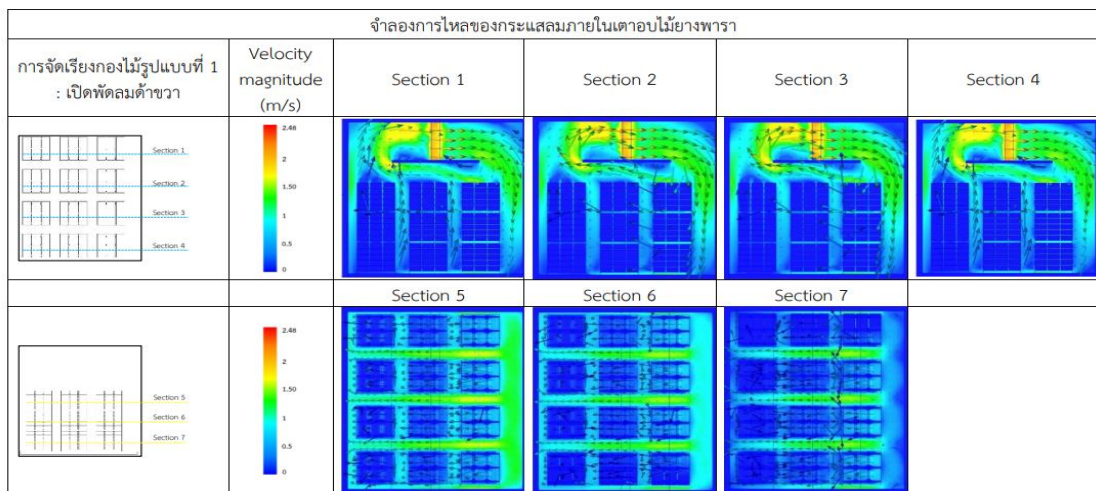
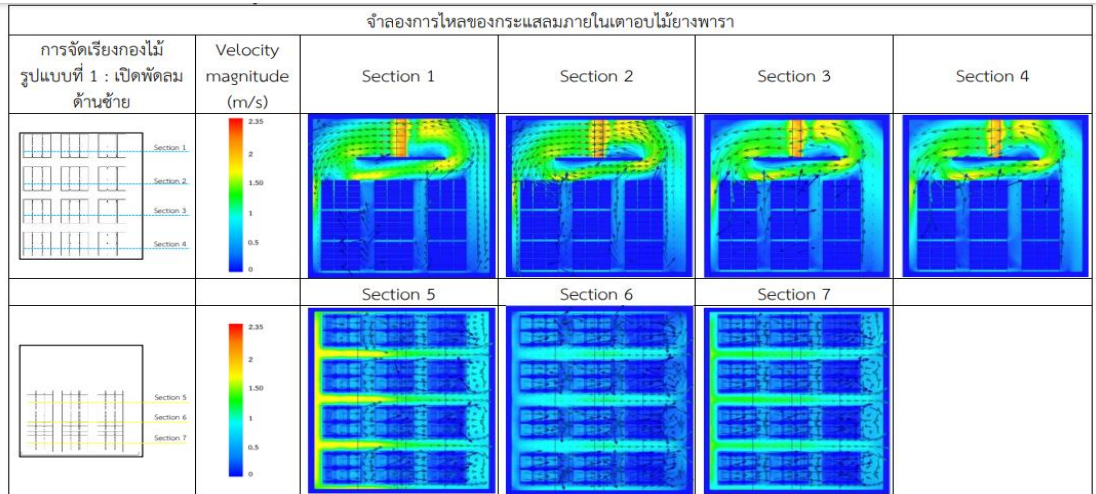
จากการจัดเรียงกองไม้รูปแบบใหม่ รูปแบบที่ 1 มี ระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านที่ลมเข้าไม่เท่ากัน

เพราะมีการเว้นระยะระหว่าง 50 เซนติเมตรทำให้ ระยะห่างของกองไม้กับผนังอีกด้านมีค่าน้อย ผู้จัดทำ จึงการขยับกองไม้โดยให้ด้านข้างระหว่างกองไม้กับ ผนังด้านที่ลมเข้า มีระยะ 80 เซนติเมตรเท่ากัน ระยะห่างระหว่างกองจะเหลือห่างกัน 25 เซนติเมตร เพื่อศึกษาการไหลของกระแสอากาศภายในเตาอบไม้ ยางพาราในการจัดเรียงกองไม้รูปแบบเดิมใน การศึกษานี้จึงเลือกศึกษาในระนาบดังนี้

จากการใช้โปรแกรม สรุปได้ว่า ผลการจำลองการ ไหลของการจัดเรียงกองไม้รูปแบบใหม่รูปแบบที่ 2 เนื่องจากระยะห่างระหว่างกองไม้และระยะห่าง ระหว่างกองไม้กับผนังมีค่าเท่ากัน ผลการจำลองการ ไหลจึงมีลักษณะเหมือนกัน ค่าความเร็วลมต่ำบางจุด จะสังเกตเห็นบางจุดเป็นลมหมุนอยู่กับที่เพียงเล็กน้อย มีค่าความเร็วลมหน้ากองและหลังค่าต่างกันน้อยกว่า การจัดรูปแบบก่อนหน้านั้นแสดงว่าลมสามารถ ไหลเวียนได้ดีกว่าการจัดเรียงรูปแบบอื่นๆ จากผลการ จำลองการไหลการจัดเรียงรูปแบบ กรณีศึกษา ได้ทำ การปรับขนาดระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังให้มี ขนาดเท่ากัน เพิ่มระยะห่างเป็น 80 เซนติเมตรทั้งคู่ พบว่า ค่าความเร็วลมที่ต่ำนั้นมีปริมาณน้อยลงจาก การจัดเรียงรูปแบบเดิมจะพบได้ในบริเวณกองแถว สุดท้ายที่เกิดลมหมุนได้แต่มีการกลับทิศทางพัดลม เพื่อให้ไม้แห้งเท่ากันทั้งกองเองสังเกตเห็นได้ว่าการที่ ลดระยะห่างระหว่างกองไม้ลมสามารถไหลออกมาได้ แสดงว่าการจัดเรียงรูปแบบกรณีศึกษานี้มีการกระจาย ของลมได้อย่างทั่วกองและสม่ำเสมอ (ตารางที่ 5)



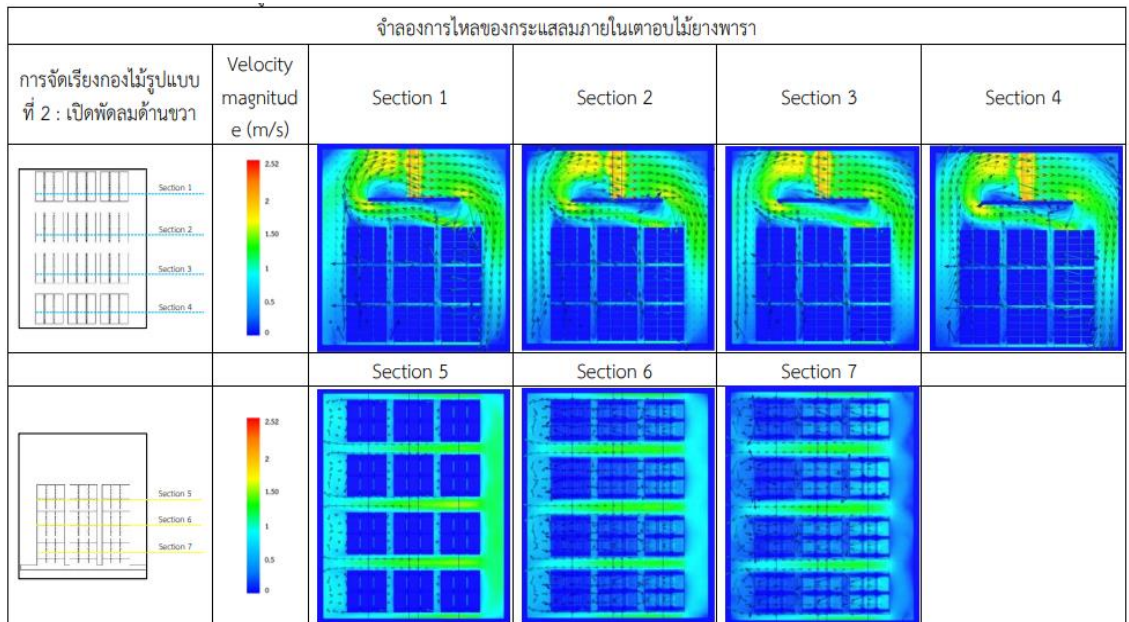
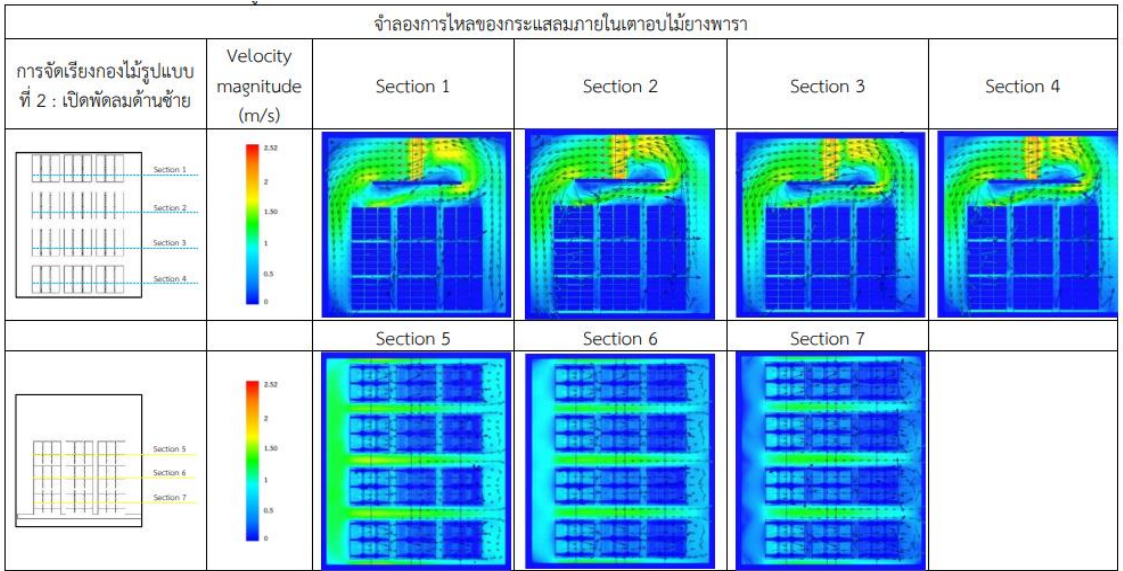
ตารางที่ 4 ผลการจำลองการไหลรูปแบบที่ 1 – เปิดพัดลมด้านซ้ายและเปิดพัดลมด้านขวา





บทความวิจัย

ตารางที่ 5 ผลการจำลองการไหลรูปแบบที่ 2 – เปิดพัดลมด้านซ้ายและเปิดพัดลมด้านขวา





5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาและควบคุมความเร็วลมภายในเตาอบไม้ยางพารา วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจำลองการไหลของกระแสลมภายในเตาอบไม้และศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสลมกับรูปแบบและตำแหน่งการวางไม้ยางพาราภายในเตาอบ เพื่อจัดวางตำแหน่งของกองไม้ภายในเตาอบไม้ยางพาราให้มีการกระจายตัวของความเร็วอากาศได้อย่างทั่วถึง โดยนำเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยแก้ไขปัญหา จากการวิเคราะห์ผลการจำลองรูปแบบดั้งเดิมโดยที่ไม้กั้นอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน ได้ทำการจัดเรียงกองไม้ก่อนปรับเปลี่ยนนั้น ผลการทดลองทำให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายตัวของกระแสลมที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงกองไม้รูปแบบเดิมที่มีด้านกระแสลมเข้าและออกเท่ากันที่ 25 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างกองอยู่ที่ 10 เซนติเมตร พบว่า ภายในกองไม้มีลักษณะของสีที่ได้จากโปรแกรมที่เป็นสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งหมายถึงค่าความเร็วลมต่ำเป็นส่วนใหญ่และจากลักษณะของลูกศรมีลักษณะหมุนอยู่กับที่ในปริมาณมาก ลักษณะนี้เกิดจากระยะห่างระหว่างกองและระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านที่ลมเข้ามีระยะที่น้อยเกินไป จึงนำไปสู่ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจำลองการไหลในรูปแบบเดิมมาปรับเปลี่ยนการจัดวางกองไม้ใหม่ 2 รูปแบบ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ รูปแบบที่ 1 เมื่อทำการเพิ่มขนาดช่องว่างระหว่างกองไม้เป็น 50 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนัง 80 เซนติเมตร ในทิศทางที่กระแสลมเคลื่อนที่เข้าปะทะกองไม้ ระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังทางด้านลมออกเป็น 20 เซนติเมตร ผลของการรันโปรแกรมโดยกำหนดกระแสลมเข้าทางด้านขวา

ลักษณะของสีที่ได้จากโปรแกรมแสดงถึงการกระจายตัวของกระแสลมได้ดีกว่ารูปแบบเดิม ทำให้เกิดลมหมุนอยู่กับที่ที่น้อยลง แต่เมื่อสลับด้านของกระแสลมเข้าเป็นทางด้าน 20 เซนติเมตร ด้านกระแสลมออกเป็นทางด้าน 80 เซนติเมตร ลักษณะของสีที่ได้จากโปรแกรมแสดงให้เห็นถึงความเร็วของกระแสลมที่ลดลงจากด้านแรกเล็กน้อย ในช่วงท้ายลักษณะของสีที่ได้จากโปรแกรมแสดงให้เห็นถึงลักษณะของความเร็วลมต่ำอาจจะเกิดลมหมุนอยู่กับที่ตำแหน่งนี้ได้ แต่เมื่อมีการกลับด้านของกระแสลมลม เป็นการให้กระแสลมเข้าทางด้านซ้าย ตำแหน่งนี้ก็จะมีการไหลผ่านปกติ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างกองไม้กับผนังไม่เท่ากัน ทำให้กระแสลมเข้าไปได้ไม่เท่ากัน กระแสลมที่กองไม้ด้านนี้ก็จะน้อยกว่าอีกด้านส่งผลต่อการกระจายความเร็ว อุณหภูมิ และความร้อนซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการแห้งของไม้ในเตาอบ รูปแบบที่ 2 มีระยะด้านกระแสลมเข้า และด้านกระแสลมออกอยู่ที่ 80 เซนติเมตรเท่ากันทั้งสองด้าน ระยะห่างระหว่างกองจะเหลือห่างกัน 25 เซนติเมตรช่องว่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านข้าง 20 เซนติเมตรผลการทดลองของการจัดเรียงรูปแบบที่ 2 เมื่อเว้นระยะห่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านที่กระแสลมเข้าให้เท่ากัน สังเกตเห็นอย่างได้ลักษณะของสีที่แสดงความเร็วของกระแสลมที่ได้จากโปรแกรมที่เคลื่อนผ่านกองไม้ แสดงให้เห็นลักษณะของความเร็วเพิ่มขึ้นและมีการกระจายได้เยอะกว่ารูปแบบเดิมและรูปแบบที่ 1 เห็นได้ว่ามีการเกิดลมหมุนอยู่กับที่น้อยลง ในช่วงท้ายกองด้านล่างมีสีน้ำเงินเข้มอยู่บ้างเล็กน้อยแสดงว่ามีความเร็วลมต่ำอาจจะเกิดลมหมุนอยู่กับที่ตำแหน่งนี้ได้ แต่เมื่อเปลี่ยนด้านกระแสลมเข้าเป็นด้านซ้าย ตำแหน่งนี้กระแสลมไหลผ่านปกติ



แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความชื้น อุณหภูมิ และความร้อนที่เป็นปัจจัยต่อการแห้งของไม้ภายในเตาอบได้ดีกว่ารูปแบบเดิมและรูปแบบที่ 1 ถึงแม้ว่าการจัดรูปแบบนี้ระยะห่างระหว่างกองไม้จะน้อยลงก็ตาม แสดงว่าการจัดวางรูปแบบกรณีศึกษานี้มีการกระจายตัวของกระแสลมได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ จากปัญหาที่เกิดจากการจัดเรียงกองไม้รูปแบบเดิมได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบใหม่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบตามทฤษฎี และรูปแบบกรณีศึกษาซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองเป็นองค์ความรู้ได้ ดังต่อไปนี้ 1. การเพิ่มช่องว่างระหว่างกองไม้กับผนังด้านที่ลมเข้าให้มีขนาด 80 เซนติเมตรช่วยทำให้กระแสลมสามารถไหลเข้าไปในกองไม้ได้ในปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมและช่วยลดลมหมุนอยู่กับที่ลงได้ 2. การเพิ่มช่องว่างระหว่างกองไม้ช่วยให้กระแสลมกระจายตัวออกมาจากกองไม้ได้ดีกว่าเดิม ดังนั้น ช่องว่างระหว่างกองไม้ไม่ควรแคบเกินไป และการเพิ่มช่องว่างระหว่างกองไม้ช่วยให้เกิดลมหมุนอยู่กับที่น้อยลง จากผลการจำลองการไหลของกระแสลมภายในเตาอบไม้ยางพาราของรูปแบบการจัดเรียงกองไม้ทั้ง รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 พบว่ารูปแบบที่ 2 มีการกระจายตัวของกระแสลมได้อย่างทั่วถึง เมื่อสังเกตจากความเร็วลมทางด้านกระแสลมเข้ากับทางด้านกระแสลมออกและมีลมที่หมุนอยู่กับที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่ 1 และรูปแบบเดิมดังนั้นระยะห่างของรูปแบบที่ 2 จึงเป็นรูปแบบที่สัมพันธ์กับกระแสลมภายในเตาอบมากที่สุด

ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นแนวทางที่ได้จากการจำลองการไหลผ่านกองไม้ของกระแสลม เป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการแห้งของไม้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมในครั้งนี้ไปทำการทดสอบ

ร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความร้อนที่ส่งผลต่อการแห้งของไม้ในเตาอบไม้ยางพาราที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม เพื่อพิสูจน์ว่าความสัมพันธ์ของระยะห่างกองไม้ที่เหมาะสมกระแสลมภายในเตาอบสามารถช่วยลดของเสียอันได้แก่ ไม้คดตัว ไม้ตกขนาดไม่ขึ้นรา ไม้หัวแตกที่เกิดจากกระบวนการอบไม้ลงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0620/2022

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Nupra-in, Applying lean manufacturing mettod to reduce wastes in rubber woods processing: Case study rubber wood company, Thesis, Sripatum University, Thailand, 2018, (in Thai)
- [2] <http://www.fio.co.th/p/km/document/57/menu3-57-7.pdf> (Accessed on 29 March 2024)
- [3] S. Rukdach, Manufacturing process improvement using lean concept to reduce waste in rubber industry, Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, 2017, (in Thai)
- [4] K. Boonseng, A Study on the influence of rubberwood drying parameters, Thesis, Prince of Songkla University, Thailand, 2006, (in Thai)
- [5] <https://issuu.com/ipc1/docs/1>, (Accessed on 29 March 2024)



- [6] T. Theppaya. Identification of good practice in sawn rubber wood-drying process, Research Report, Prince of Songkla University, Thailand, 1998, 15-17. (in Thai)
- [7] N. Parsearsakda, Design for wind speed improvement in open space underneath tall building, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 2007, (in Thai)
- [8] T. Okwala, Fluid Mechanics, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Thailand, 2010.
- [9] C. Wanichpong, A study of lot patterns and building layouts of housing project in Chiang Mai to enhance natural ventilation, Thesis, Silpakorn University, Thailand, 2013, (in Thai)
- [10] P. Kamsaeng, Airflow simulation in cold storage room using computational fluid dynamics, Thesis, Maejo University, Thailand, 2015, (in Thai)



ผลของการกรองสารละลายตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ส่งผลต่อการกำจัดและการดูดซับของเยื่อกรองแบบนาโน

อภิญา อ่อนสาร* สุวัฒน์พงษ์ มัตราช วิภาดา เดชะปัญญา กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา
เทียมมะณีร์ รัตนวีระพันธ์ และ สมภพ สหนองราษฎร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Apinya.on.58@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 5 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 11 ตุลาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 7 พฤศจิกายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดสารละลายตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (EfOM) จากน้ำเสีย รวมถึงพฤติกรรมการลดลงของฟลักซ์และรูปแบบการดูดซับโดยใช้แบบจำลองของเฮอริเมีย เยื่อกรองแบบนาโนผลิตจาก GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040 FM ถูกใช้ทดสอบภายใต้การกรองแบบการไหลตายตัว ปัจจัยที่ใช้ศึกษาได้แก่ ชนิดของสารละลายตะกั่ว (เลดไนเตรท $Pb(NO_3)_2$ และเลดคลอไรด์ $PbCl_2$) และสารร่วมระหว่างสารละลายตะกั่วกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง สารละลายที่เตรียมมีความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเท่ากับ 10 mg/L ที่มีค่าพีเอช 7 ขณะที่ความดันของเยื่อกรองเท่ากับ 60 psig จากผลการทดลองพบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ มีค่าการกำจัดตะกั่วร้อยละ 84.47-88.14 และ 78.88-83.95 ตามลำดับ ในกรณีที่เป็นสารร่วมระหว่างสารละลายตะกั่วกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากน้ำเสียพบว่าค่าการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 90.08-92.49 และ 86.8-89.16 สำหรับสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ +EfOM และ $PbCl_2$ +EfOM ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อกรองแบบนาโนสามารถกำจัด EfOM ได้มากกว่าร้อยละ 95 ส่วนค่าฟลักซ์ ในรูปของ J/J_0 พบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ และ $Pb(NO_3)_2$ +EfOM ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์สูงสุด สำหรับรูปแบบการจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับรูปแบบจำลองการเกิดเค้ก (CFM) เนื่องจากการสะสมของตะกั่วและสารอินทรีย์บนผิวเยื่อกรองแบบนาโน

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง; ฟลักซ์; การดูดซับ; สารละลายตะกั่ว; เยื่อกรองแบบนาโน



Effects of Filtration for Lead Solutions and Effluent Organic Matter (EfOM) from Wastewater Treatment Systems for Affecting Rejection and Fouling with Nanofiltration (NF) Membrane

Apinya Onsarn^{*}, Supatpong Mattaraj, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Tiammanee Rattanaweerapan and Sompop Sanongraj

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

^{*}Corresponding author, E-mail: Apinya.on.58@ubu.ac.th

Received: 5 August 2024; Revised: 11 October 2024; Accepted: 7 November 2024

Online Published: 20 December 2024

Abstract: This research investigates the rejections of lead solution and effluent organic matter (EfOM) from wastewater, including flux decline behavior and fouling model using the Hermia model. The nanofiltration (NF) membrane obtained from GE Water & Process Technologies (model HL4040 FM) was operated under a dead-end stirred cell. Factors used in this study were the types of lead solutions (i.e., lead nitrate ($Pb(NO_3)_2$), lead chloride ($PbCl_2$) and combined solutions between lead solution and EfOM. The prepared solutions contained an ionic strength of 0.01 M and EfOM concentration of 10 mg/L with pH 7, while the membrane operating pressure was operated at 60 psig. Experimental results found that the lead rejections of $Pb(NO_3)_2$ and $PbCl_2$ solutions were 84.47-88.14% and 78.88-83.95%, respectively. In the case of a combined solution between lead solution and EfOM, the lead rejections increased to 90.08-92.49% and 86.8-89.16 % for $Pb(NO_3)_2$ +EfOM and $PbCl_2$ +EfOM, respectively. In addition, the nanofiltration membrane could remove EfOM of more than 95%. For the flux value in terms of J/J_0 , it was found that the $Pb(NO_3)_2$ and $Pb(NO_3)_2$ +EfOM solutions have the highest flux decline values. The mathematical fouling model was followed with the cake filtration model (CFM) due to lead-NOM accumulated on the NF membrane surface.

Keywords: Effluent organic matter; Flux; Fouling; Lead solutions; Nanofiltration



1. บทนำ

ปัญหาการเสื่อมโทรมของน้ำ เป็นสิ่งที่สำคัญต่อทั่วโลก โดยเฉพาะแหล่งน้ำในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของสารกลุ่มโลหะหนักในน้ำเสีย เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ทองแดง เป็นต้น [1] จนนำไปสู่การสะสมในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ตลอดจนส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ โดยการสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต [2] สารที่อยู่ในกลุ่มของโลหะหนักที่เป็นอันตรายที่สุดคือ ตะกั่ว แม้ว่าตะกั่วที่มีความเข้มข้นในระดับต่ำ ๆ (0.01-5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ยังสามารถสะสมในร่างกายของมนุษย์ได้ [3] ระดับความเป็นพิษสะสมในร่างกายในระดับปริมาณที่สูงจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพจนถึงแก่ชีวิตได้ [4] โดยที่ภาวะเป็นพิษจากโลหะหนักจะมีอาการเฉียบพลันและเรื้อรัง ได้แก่ ปวดท้อง น้ำหนักลด เมื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ประสาทหลอน ซึม ชัก เป็นอัมพาตและเสียชีวิต ดังนั้นองค์การอนามัยโลก จึงได้กำหนดระดับการปนเปื้อนของสารตะกั่ว ให้เป็นศูนย์หรือเฉพาะขีดจำกัดเท่านั้นคือไม่เกิน 10 ppb [5] ซึ่งความเข้มข้นของสารตะกั่วที่มากเกินไปขีดจำกัดจะทำให้ไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ โดยแหล่งกำเนิดของตะกั่ว (II) ส่วนใหญ่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สี ปุ๋ยอินทรีย์และยาฆ่าแมลง ส่วนใหญ่พบตะกั่วชนิด $PbCl_2$ สำหรับการหลอมโลหะ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ โรงงานแบตเตอรี่ เป็นต้น ส่วนใหญ่พบสารตะกั่วในรูปของ $Pb(NO_3)_2$ [6] [7] นอกจากนี้ยังพบสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ทำให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำและการผลิตน้ำสะอาดเช่นกัน สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้สามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สารอินทรีย์

ธรรมชาติ (Natural Organic Matter; NOM) ซึ่งสามารถพบได้ไม่เกิน 10 mg/L สารอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Organic Compounds) และสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Product) (2) สารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก [8]

วิธีการแยกโลหะหนักจำพวกตะกั่วออกจากน้ำเสียมีหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การตกตะกอน [9] การแลกเปลี่ยนไอออน [10] การดูดซับ [11] และออกไซด์ของโลหะ [12] เป็นต้น ถึงแม้ว่าวิธีการข้างต้นจะมีประสิทธิภาพและราคาถูก แต่ก็ยังคงมีข้อเสียในเรื่องของการกำจัดโลหะหนักที่ไม่สมบูรณ์ การใช้พลังงานที่สูง อัตราการกำจัดช้า และการสร้างตะกอนที่เป็นพิษ [13] ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมที่จะช่วยแก้ไขปัญหานี้ที่กล่าวมาข้างต้น คือ การใช้เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology) ซึ่งเป็นการกรองภายใต้หลักการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลวแบ่งออกเป็น 4 ระบบ ได้แก่ (1) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) กำจัดอนุภาคตั้งแต่ช่วง 0.1-10 ไมครอน (2) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) กำจัดอนุภาคตั้งแต่ช่วง 0.1-0.01 ไมครอน (3) เยื่อกรองแบบนาโน หรือนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration: NF) กำจัดอนุภาคตั้งแต่ช่วง 0.01-0.001 ไมครอน และ (4) การกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis: RO) กำจัดอนุภาคตั้งแต่ช่วง 0.001-0.0001 ไมครอน [14] ทั้งนี้กระบวนการเยื่อกรองได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดสูง โดยนิยมนำเยื่อกรองแบบนาโนมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากน้ำเสียและสารปนเปื้อนในกลุ่มของโลหะหนัก (ตะกั่ว) โดยสามารถกำจัดไอออนของ



โลหะหนักออกจากน้ำปนเปื้อนได้ การกำจัดจะอาศัยหลักการคัตขนาดซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพน้ำที่ผ่านการกำจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [15-16] ข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถแยกสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ โดยที่น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยที่ขั้นตอนของกระบวนการเยื่อกรองเมื่อถูกกรองแล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ (1) น้ำส่วนที่ผ่านเยื่อกรอง โดยจะเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า เพอมีเอท (Permeate) และ (2) น้ำส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง โดยจะเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า คอนเซนเตรท (Concentrate) สำหรับรูปแบบของการกรองของเยื่อกรองจะเป็นแบบการไหลตายตัว (Dead-end Filtration) และการไหลตามขวาง (Crossflow Filtration) ทั้งนี้การใช้เทคโนโลยี เยื่อกรองก็ยังคงมีข้อเสียอยู่ เช่น การไหลของน้ำและความต้านทานของเยื่อกรองต่อสารออกซิไดซ์ค่อนข้างต่ำซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกใช้ชนิดของเยื่อกรองให้เหมาะสมต่อสารที่ใช้บำบัด เช่น คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าปัญหาหลักของการใช้เทคโนโลยีเยื่อกรอง คือการเกิดการอุดตัน (Fouling) บนผิวหน้าของเยื่อกรองซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของฟลักซ์ (Flux decline) โดยพบว่ารูปแบบของการอุดตันมี 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) Complete blocking model (CBM), (2) Standard blocking model (SBM), (3) Intermediate blocking model (IBM) และ (4) Cake filtration model (CFM) ซึ่งจากผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์โดยเกลือคลอไรด์แบบ monovalent และ divalent ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าเกิดการ

ลดลงของฟลักซ์ ซึ่ง monovalent (Na^+) ให้การลดลง 26.1% ในขณะที่ divalent (Ca^{2+}) ให้การลดลง ของฟลักซ์ 32.5% และพบรูปแบบการอุดตันที่เกิดขึ้นเป็นแบบ CBM และ CFM ของเกลือคลอไรด์แบบ monovalent (Na^+) ที่ความแรงประจุ 0.01 M และ divalent (Ca^{2+}) ที่ความแรงประจุ 0.05 M ตามลำดับ [17] อย่างไรก็ตามเยื่อกรองสามารถให้ประสิทธิภาพการกรองได้ใกล้เคียงกับการกรองใช้งานตอนเริ่มต้นได้ โดยการล้างแผ่นกรองด้วยวิธีทางกายภาพจากการล้างย้อนและการใช้สารเคมี ซึ่งเมื่อล้างเยื่อกรองด้วยวิธีการที่เหมาะสมจะทำให้ยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรองได้ยาวนานขึ้น ซึ่งเมื่อล้างเยื่อกรองด้วยวิธีการข้างต้นแล้วไม่สามารถทำให้ฟลักซ์กลับมาเท่าเดิมหรือใกล้เคียงได้ จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนระบบกรองชุดใหม่ เพื่อให้ได้ผลผลิตจากกระบวนการกรองเท่าเดิม [18]

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในรูปของ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ และ PbCl_2 เนื่องจากพบได้ตามกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปของเยื่อกรองแบบนาโนภายใต้การกรองแบบการไหลตายตัว สภาวะที่ศึกษา ได้แก่ (1) ผลของชนิดตะกั่วในรูปของ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ และ PbCl_2 (2) ผลรวมของ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ และ PbCl_2 ร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทั้งจากน้ำเสีย และ (3) รูปแบบการอุดตันของเยื่อกรอง (4) ประสิทธิภาพการล้างของเยื่อกรองหลังการใช้งาน ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าฟลักซ์และค่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทั้งจากน้ำเสีย นอกจากนี้ผลการทดลองสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสภาวะจริงที่



อาจเป็นไปได้จากการปนเปื้อนของสารตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติที่สามารถพบได้โดยทั่วไป และนอกจากนี้การศึกษานี้ยังเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแผ่นกรองชนิดนาโนได้ และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ โดยเฉพาะการเปลี่ยนเยื่อกรอง ตลอดจนสามารถหลีกเลี่ยงสภาวะที่อาจทำให้เกิดการอุดตันบนแผ่นกรองได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เลด(II)ไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) และเลด(II)คลอไรด์ ($PbCl_2$) (Analytical reagent, KemAusTM, Australia) กรดไฮโดรคลอริก 36% (Hydrochloric Acid: HCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide: NaOH) และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium Metabisulphite: $Na_2 S_2 O_5$) (Analytical UNIVAR reagent, APS Finechem, Australia) และกรดซิตริก (Citric Acid: $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) (Analytical reagent, BDH)

2.2 เยื่อกรองแบบนาโน

เยื่อกรองแบบนาโนของบริษัท GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ซึ่งเป็นเยื่อกรองเชิงการค้า มีคุณสมบัติคือเป็นเยื่อกรองแบบ Thin Film Membrane ผลิตจาก Polyamide มีขนาดรูพรุนในช่วง 150-300 Da การกำจัดเกลือ $MgSO_4$ อยู่ที่ระดับ 98% ที่ 100 psig ช่วงพีเอชดำเนินการในช่วง 3-9 และช่วงพีเอชของการทำความสะอาดอยู่ที่ 2-10.5 มีความทนทานต่อคลอรีน < 0.1 ppm ความดันของการดำเนินการอยู่ที่ 70-300 psig และความดันสูงสุดที่ทนได้คือ 600 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ติดตั้งเสร็จ

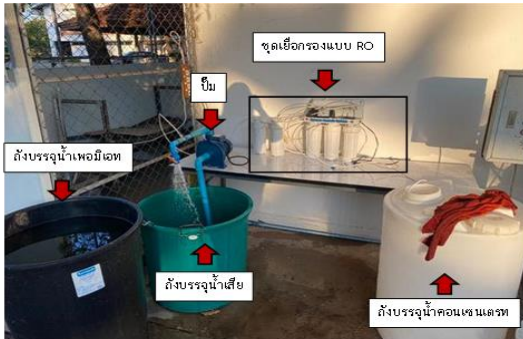
เรียบร้อยแล้วจะถูกเก็บรักษาโดยการนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ความเข้มข้น 1% เก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อป้องกันการทำลายผิวหน้าของเยื่อกรองจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผิวของเยื่อกรอง

2.3 การเตรียมสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากน้ำเสีย

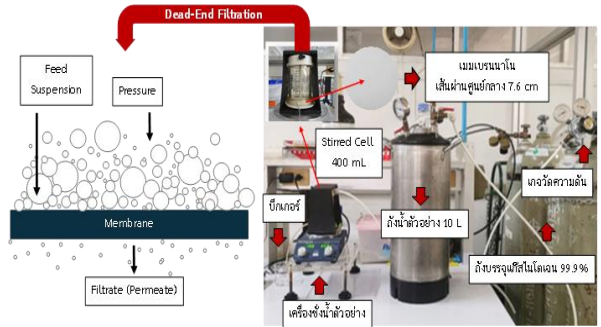
การเตรียมน้ำตัวอย่างของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (EfOM) จากน้ำเสีย สามารถเตรียมได้โดยการเก็บน้ำตัวอย่างจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ต่อด้วยบ่อดักตะกอน โดยการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งที่ไหลล้นออกจากบ่อดักตะกอนด้วยปริมาณน้ำทิ้งสิ้น 500 ลิตร ใส่ลงถังเก็บน้ำตัวอย่างน้ำเสีย จากนั้นนำน้ำดังกล่าวเข้าสู่การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนการกรองผ่านเยื่อกรองแบบไมโครต่อเนื่องด้วยขนาด 5 และ 10 ไมโครเมตรตามลำดับ สำหรับน้ำส่วนที่ผ่านการกรองขั้นต้นแล้ว จะถูกนำมาแยกสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยการกรองแบบออสโมซิสผันทกลับ (Reverse Osmosis: RO) ซึ่งในส่วนนี้จะสามารถแยกน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) เพอร์มิเอต คือส่วนของน้ำดีหรือน้ำสะอาด และ (2) คอนเซนเตรท หรือน้ำที่มีความเข้มข้นสูงของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง อันเนื่องมาจากความสามารถในการกักกันของเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันทกลับ (โดยเยื่อกรองที่ใช้มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.0001 ไมครอน) จากนั้นทำการหยุดระบบ เมื่อปริมาณน้ำคอนเซนเตรทในถังบรรจุลดลงเหลือปริมาณเท่ากับ 30 ลิตร เพื่อใช้สำหรับการทดลองในกระบวนการกรองแบบนาโนต่อไป แผนภาพของระบบการกรองแบบ RO ถูกแสดงดังรูปที่ 1



บทความวิจัย



รูปที่ 1 ชุดเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันทกลับสำหรับแยกสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง



รูปที่ 2 ชุดทดสอบแบบไหลตายตัวของเยื่อกรองนาโน

2.4 การดำเนินระบบของชุดเยื่อกรองแบบนาโน

ชุดการทดสอบแบบการไหลตายตัว (Dead-end stirred cell) สำหรับเยื่อกรองแบบนาโนถูกแสดงดังรูปที่ 2 แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร ถูกติดตั้งอยู่ภายในชุด Stirred Cell ที่มีขนาด 400 มิลลิลิตรภายในบรรจุหม้อวนติดตั้งอยู่บนแท่น โดยอาศัยการกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อน (Magnetic stirrer) สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 75 psig สารตัวอย่างจะถูกบรรจุในถังแรงดันที่มาจากเหล็กสแตนเลส มีปริมาตร 10 L โดยสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 100 psig น้ำตัวอย่างจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบโดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อนของแก๊สไนโตรเจนที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ที่ถูกต่อเข้ากับถังน้ำตัวอย่าง ทำให้สามารถขับเคลื่อนสารตัวอย่างให้ผ่านเยื่อกรองได้และเกิดการไหลของน้ำซึมผ่านเยื่อกรองจากชุดทดสอบไปยังภาชนะเก็บน้ำเพอร์มิเอท โดยใช้ปั๊มเกอร์ขนาด 500 mL และใช้เครื่องชั่งน้ำหนักของ Mettler toledo ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ 2 ตำแหน่งทศนิยม โดยน้ำส่วนดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการตามการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือชนิดต่าง ๆ

2.5 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

การวัดปริมาณของโลหะหนัก (ตะกั่ว) โดยใช้เครื่องมือ Atomic Absorption Spectrometer (AAAnalyst 200) โดยใช้ความยาวคลื่น 217 nm (สำหรับการเตรียมโลหะหนัก โดยการชั่งสาร $Pb(NO_3)_2$ เท่ากับ 1.102 กรัม และสาร $PbCl_2$ เท่ากับ 0.926 กรัม ปรับด้วยน้ำปราศจากประจุ ปริมาณ 1 ลิตร จะให้ความเข้มข้นของสารตะกั่วเท่ากับ 0.01 M) การวัดความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่ใช้ทดสอบ โดยใช้เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, ประเทศเยอรมัน) การวัดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทิ้ง โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) (Shimadzu Corporation รุ่น UV mini 1240, ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 นาโนเมตร โดยการเก็บน้ำตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ ปริมาณ 3 mL เข้าเครื่อง UV_{254nm} ซึ่งข้อมูลที่อ่านได้ จะถูกนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นสำหรับสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทิ้ง แล้วแสดงผลให้รูปของความเข้มข้น (mg/L)



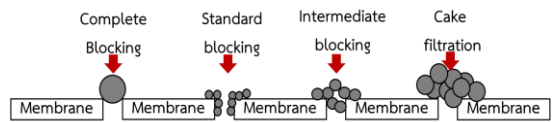
2.6 รูปแบบการอุดตันบนเยื่อกรอง

รูปแบบการอุดตันของเยื่อกรองที่ได้ทำการศึกษา เป็นแบบจำลองเฮอริเมีย จากสมการ

$$dJ/dt = -kJ_f^{2-n} J_f \quad (1)$$

โดยที่ค่า J_f เท่ากับค่าฟลักซ์สารละลาย ค่า k เท่ากับค่าคงที่ของการอุดตัน และค่า n เป็นค่าคงที่ สำหรับการกรองขึ้นอยู่กับรูปแบบการอุดตัน โดยรูปแบบการอุดตันมี 4 รูปแบบดังต่อไปนี้ (1) Complete blocking model (CBM) เป็นรูปแบบการอุดตันของสารหรืออนุภาคที่สามารถปิดกั้นรูพรุนได้พอดี ทำให้ปริมาตรการไหลของน้ำลดลงจากจำนวนรูพรุนที่ลดลง (2) Standard blocking model (SBM) เป็นรูปแบบการอุดตันของสารหรืออนุภาคอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อกรอง ทำให้ปริมาตรการไหลของน้ำลดลงจากขนาดของรูพรุนที่ลดลง (3) Intermediate blocking model (IBM) เป็นการอุดตันของสารหรืออนุภาควางบางส่วนอยู่ในรูพรุนของเยื่อกรองและบางส่วนเกิดเป็นชั้นความหนาของสารบนผิวของเยื่อกรองตามระยะเวลาของการกรอง (4) Cake filtration model (CFM) เป็นการอุดตันของสารหรืออนุภาคบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองในลักษณะที่เกิดเป็นชั้นเค้ก กลไกการอุดตันในแต่ละรูปแบบสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln J_f$ เทียบกับ t ($n = 2$ สำหรับ CBM), $(1/J_f)$ เทียบกับ t ($n = 1.5$ สำหรับ SBM), $(1/J_f)$ เทียบกับ t ($n = 1$ สำหรับ IBM), และ $(1/J_f^2)$ เทียบกับ t ($n = 0$ สำหรับ CFM) โดยที่ ค่า J_f เท่ากับค่าฟลักซ์สารละลาย มีหน่วยเป็น LMH ($L/m^2/h$), t เท่ากับระยะเวลาในการกรอง และ n เท่ากับค่าดัชนีของ

ค่าบ่งชี้การอุดตัน ซึ่งสามารถหาเป็นสมการเส้นตรงได้ และทำให้ทราบค่า R^2 โดยหลักการพิจารณาว่าเป็นรูปแบบการอุดตันแบบไหน จะพิจารณาที่ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์รูปแบบของการอุดตันถูกแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการอุดตันบนเยื่อกรอง

2.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

แผ่นเยื่อกรองแบบที่ตัดแล้วนำมาติดตั้งแผ่นเยื่อกรองดังกล่าวเข้ากับชุดทดสอบการไหลแบบตายตัว จากนั้นล้างเยื่อกรองผ่านระบบชุดทดสอบโดยใช้สารเคมีกรดและด่างตามลำดับ ได้แก่ (1) สารละลายกรดซัลฟูริก (2) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการทดลองจริงด้วยน้ำตัวอย่าง สำหรับการทดสอบด้วยน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วตามความเข้มข้นของสารละลายถูกฉีดเข้าสู่ระบบและเริ่มต้นการทดลองโดยอาศัยการปรับความดันในระบบตามที่ต้องการ โดยควบคุมจากถังกักความดันเป็นตัวขับเคลื่อนน้ำตัวอย่างจากถังเก็บน้ำตัวอย่างผ่านท่อ นำส่งไปยังชุดทดสอบการไหลแบบตายตัวที่มีปริมาตร 400 มิลลิลิตร โดยภายในจะมีแผ่นเยื่อกรองแบบนาโนติดตั้งไว้แล้ว และแรงดันจะดันสารตัวอย่างผ่านแผ่นเยื่อกรองและน้ำจะเกิดจากการซึมผ่านจากชุดทดสอบไปยังภาชนะเก็บตัวอย่างเพื่อซึ่งหา



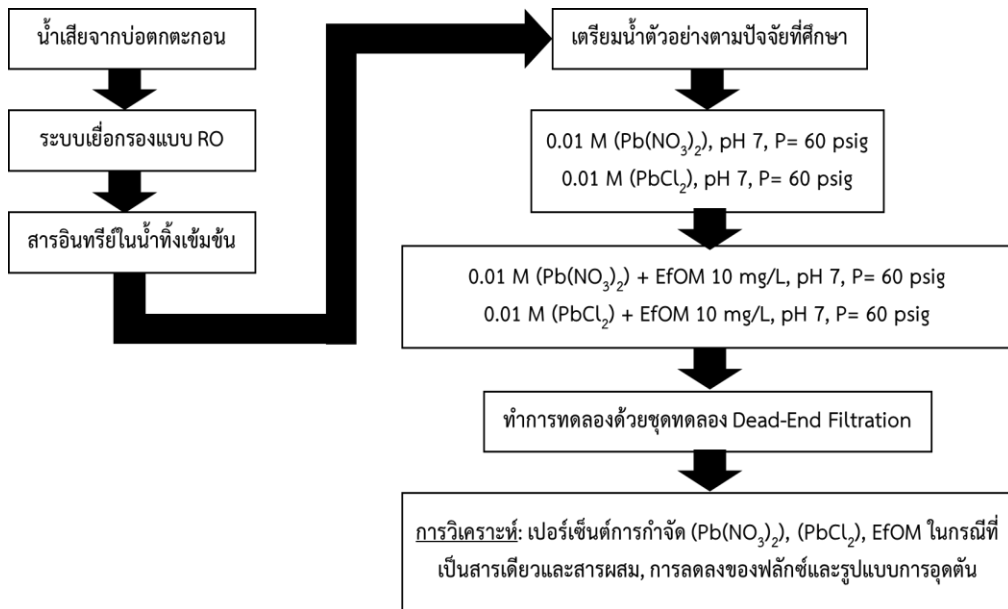
บทความวิจัย

น้ำหนักของปริมาตรน้ำ จากการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนดังกล่าว (เพอมีเอท) เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ตลอดการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์ร้อยละการกำจัดโลหะหนัก (ตะกั่ว) และสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโนตามช่วงของเวลา และ (2) การวิเคราะห์หาค่าฟลักซ์สารละลาย โดยจะเก็บตัวอย่างตั้งแต่เวลาที่ 0-240 นาที (3) การวิเคราะห์หารูปแบบการดูดซับจากข้อมูลของฟลักซ์สารละลาย แผนการทดลองได้ปรับตามปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษา ได้แก่ ชนิดของโลหะตะกั่ว โดยใช้ความแรงประจุ 0.01 M ผลร่วมระหว่างโลหะตะกั่วกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (ความเข้มข้น 10 mg/L) [17] ดังแสดงระบุขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยตามแผนงานในรูปที่ 4

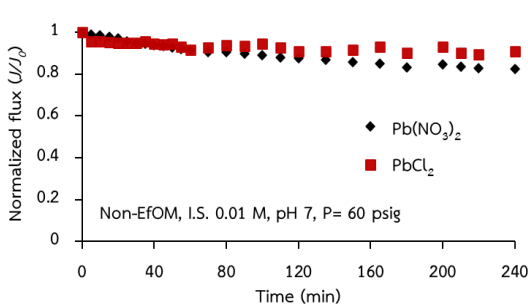
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลของผลของ $Pb(NO_3)_2$, $PbCl_2$ และ EfOM ต่อการลดลงของฟลักซ์

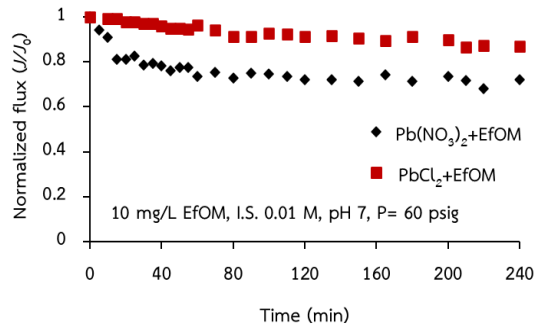
จากการศึกษาผลของสารละลายตะกั่วที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์โดยใช้สารละลายตะกั่ว 2 ชนิด ได้แก่ $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ ความแรงประจุ 0.01 M ค่าพีเอช 7 และใช้ความดันที่ 60 psig ตามระยะเวลาในการทดสอบทั้งสิ้น 240 นาที แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์จากการแปรผลในรูปแบบของ Normalized flux (J/J_0) โดยที่คำนวณจากค่าฟลักซ์สุดท้าย (J) หารด้วยค่าฟลักซ์ตั้งต้น (J_0) พบว่าฟลักซ์ของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ ลดลงเมื่อ



รูปที่ 4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 5 ค่าฟลักซ์ (J/J_0) ของ $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ โดยใช้ความแรงประจุ 0.01 M พีเอช 7 ความดัน 60 psig อุณหภูมิ 28 ± 3 °C



รูปที่ 6 ค่าฟลักซ์ (J/J_0) ของ $Pb(NO_3)_2$ +EfOM และ $PbCl_2$ +EfOM โดยใช้ความแรงประจุ 0.01 M พีเอช 7 ความดัน 60 psig อุณหภูมิ 28 ± 3 °C

ระยะเวลา ในการกรองเพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 0-60 นาทีแรกของการทดลอง ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว และที่เวลา หลัง 60 นาทีเป็นต้นไป ฟลักซ์ลดลงเล็กน้อยและค่อย ๆ คงที่ เนื่องจากในช่วงแรกของการทดลองเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเทรชัน-โพลาไรเซชัน และเริ่มเกิดชั้นเจลเกิดขึ้น ชั้นเจลจะหนาขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ค่าความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น [19] อีกทั้งอนุภาคของสารละลายต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบเข้าไปเกาะติดภายในรูพรุนหรือสะสมบริเวณพื้นผิวเยื่อกรอง ซึ่งการลดลงของฟลักซ์มีค่ามากกว่าสำหรับสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เทียบกับสารละลาย $PbCl_2$ โดยที่ค่าการลดลงของฟลักซ์สามารถบ่งบอกถึงค่าอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองได้ลดลง ซึ่งค่าการซึมผ่านที่ลดลงนี้มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูพรุนหรือจำนวนรูของเยื่อกรอง อาจเนื่องจากการบีบอัดตัวหรือเกิดการสะสมของสารละลายบริเวณผิวหน้าหรือพื้นผิวของแผ่นเยื่อกรอง [20] ทำให้ความเข้มข้นสูงมากขึ้นบนผิวเยื่อกรองทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้จึงลดลง นอกจากนี้ความเข้มข้นเริ่มต้น

และชนิดของสารละลายส่งผลให้ค่าฟลักซ์ที่ได้แตกต่างกัน [21-22] ค่าฟลักซ์ที่ลดลงยังสันนิษฐานได้ว่าเกิดขึ้นจากการเพิ่มแรงต้านทานภายในของแผ่นเยื่อกรอง [23]

จากรูปที่ 6 ผลการศึกษาผลของสารละลายตะกั่วร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ได้แก่ $Pb(NO_3)_2$ + EfOM และ $PbCl_2$ + EfOM ความเข้มข้นของ EfOM ที่ใช้เท่ากับ 10 mg/L ความแรงประจุ 0.01 M พีเอช 7 และใช้ความดันที่ 60 psig ตลอดจนการทดลอง ระยะเวลาในการทดสอบทั้งสิ้น 240 นาที เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์จากการแปรผลในรูปแบบของ Normalized flux (J/J_0) พบว่าผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาสารละลายตะกั่วในกรณีที่เป็นสารเดี่ยว (ไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง) ที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ จากภาพแสดงสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ + EfOM ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ที่สูงกว่าสารละลาย $PbCl_2$ + EfOM โดยที่เหตุผลหลักการลดลงของฟลักซ์ในกรณีนี้ เกิดจากการสะสมมวลสารอินทรีย์บริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรอง เนื่องจากขนาดรูพรุนของ



เยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้อยู่ในช่วง 150-300 Da ในขณะที่ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ใช้อยู่ในช่วง 300-5000 Da [24] ดังนั้นจากขนาดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโนจึงทำให้เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกักสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้ [25] นอกจากนี้จากผลกระทบบดงกล่าว ยังส่งผลให้มีความหนาแน่นของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่เกาะติดอยู่บริเวณผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองแบบนาโนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในระบบจึงเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นค่าฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าลดลง และนอกจากนี้การจับตัวกันระหว่างประจุลบของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งและประจุบวกของโลหะตะกั่ว เป็นสาเหตุจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตซึ่งจะไปช่วยส่งเสริมการเกาะติดของสารดังกล่าวบนแผ่นเยื่อกรองแบบนาโนนั่นเอง [22]

3.2 ผลของ $Pb(NO_3)_2$, $PbCl_2$ และ EfOM ต่อการกำจัด

จากการศึกษาผลของสารละลายตะกั่ว $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ (ไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง) โดยใช้เยื่อกรองแบบนาโนที่มีต่อการกำจัดในช่วงเวลาตั้งแต่ 0-240 นาที แสดงดังรูปที่ 7 บ่งชี้ความคุมความแรงประจุ 0.01 M ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และความดันการเดินระบบเท่ากับ 60 psi สำหรับในกรณีของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ ให้ค่าการกำจัดในช่วงร้อยละ 84.47-88.14 ส่วนสารละลาย $PbCl_2$ ให้ค่าการกำจัดในช่วงร้อยละ 78.88-83.95 โดยพบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ ให้ค่าการกำจัดที่สูงกว่าสารละลาย $PbCl_2$ ซึ่งค่าการกำจัดที่แตกต่างกันนี้ อาจเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของ $Pb(NO_3)_2$ (MW = 331.2 g/mol) ที่ใหญ่กว่า $PbCl_2$ (MW = 278.2 g/mol) ดังนั้นเยื่อกรองแบบนาโนจึงสามารถกักกันสารที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่า จึงเกิดการ

สะสมของมวลสารดังกล่าวบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง นอกจากนี้สารไนเตรท (NO_3^-) และคลอไรด์ (Cl^-) มีไอออนที่เป็นประจุลบ (Monovalent Ion) จะถูกผลักรันด้วยประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งประจุที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกผลักรันได้มากกว่าประจุที่มีขนาดเล็ก (คุณลักษณะทางฟิสิกส์) และประจุที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการกักกันที่น้อยลง (คุณลักษณะทางเคมี) ทำให้สารละลายเกิดการแพร่กระจาย (Solution-Diffusion) ผ่านเยื่อกรองได้

จากการศึกษาผลของสารละลายตะกั่วร่วมกับ EfOM โดยใช้เยื่อกรองแบบนาโนที่มีต่อการกำจัด แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ ให้ค่าการกำจัดที่สูงกว่าสารละลาย $PbCl_2$ เช่นเดียวกับในกรณีที่ไม่มี EfOM ซึ่งมีค่าการกำจัดของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงร้อยละ 90.08-92.49 ส่วนสารละลาย $PbCl_2$ ให้ค่าการกำจัดเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 86.8-89.16 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [23] ซึ่งได้ทำการศึกษากำจัด $Pb(NO_3)_2$ จากน้ำเสีย (aqueous wastewater) โดยใช้เยื่อกรองแบบนาโนที่ต่างกัน 2 ชนิด คือ ACF 40 (Tabular Configuration: ค่าการกำจัดเกลือ NaCl เท่ากับร้อยละ 60) และ ACF 80 (Thin-film composite: ค่าการกำจัดเกลือ NaCl เท่ากับร้อยละ 80) ซึ่งรูปแบบการทดลองเป็นแบบการไหลตามขวาง (Cross flow filtration operating) สำหรับผลการทดสอบพบว่า เยื่อกรองแบบนาโนชนิด ACF 40 ให้ค่าการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 80 ขณะที่เยื่อกรองชนิด ACF 80 ให้ค่าการกำจัดตะกั่วสูงสุดถึงร้อยละ 98 เมื่อเปรียบเทียบผลงานในการวิจัยนี้พบว่าค่าการกำจัดสารละลายตะกั่วในกรณีที่เติมและไม่เติม EfOM พบว่าร้อยละการกำจัดในกรณีที่เติม EfOM ให้ค่าสูง

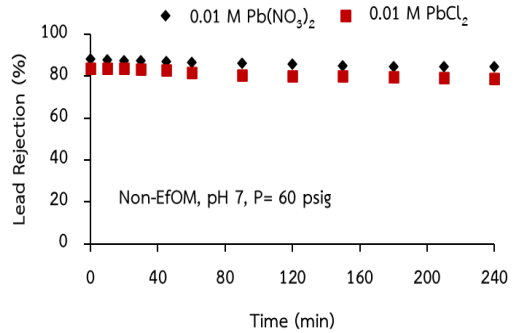


บทความวิจัย

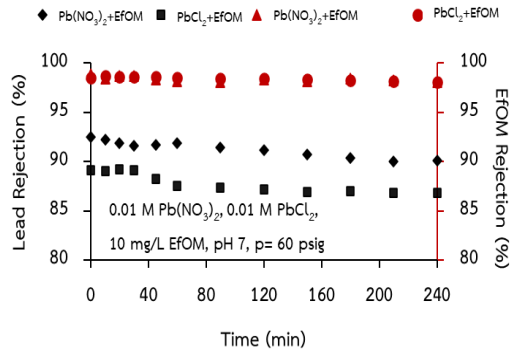
กว่า อาจเนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างสารละลาย ตะกั่วกับ EfOM ทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกั่วบนผิว ของเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองแบบนาโนสามารถกักกัน สารละลายได้เพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อค่าการกำจัดตะกั่ว สูงขึ้นด้วย สำหรับผลการกำจัด EfOM (แสดงดังรูปที่ 8) โดยควบคุมความแรงประจุของ $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ เท่ากับ 0.01 M ใช้ความเข้มข้นของ EfOM เท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และความดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 60 psig อุณหภูมิที่ใช้เป็น อุณหภูมิในระดับห้องปฏิบัติการ 28 ± 3 °C จากผล การศึกษาพบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ +EfOM และ $PbCl_2$ +EfOM มีค่าการกำจัด EfOM ที่ใกล้เคียงกัน ตั้งแต่ที่ระยะเวลา 0-240 นาที โดยที่ค่าการกำจัด สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 อาจด้วย เหตุผลมาจากกลไกการแยกโดยการคัดขนาด (Size Exclusion) ของเยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งสารอินทรีย์ใน น้ำทิ้งที่ใช้โดยทั่วไปจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุน ของเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ทดสอบ จึงส่งผลให้มีค่าการ กำจัดของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งมีค่าสูง

3.3 ผลของรูปแบบการดูดซับของ $Pb(NO_3)_2$, $PbCl_2$ และ EfOM ด้วยแบบจำลองเฮอริเมีย

ผลจากการศึกษาการดูดซับของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$, $PbCl_2$ และ EfOM โดยใช้ค่าพลาซึตาม ระยะเวลาการทดลอง (ตั้งแต่ที่ระยะเวลา 0-240 นาที) จากนั้นนำผลการทดสอบมาเทียบกับรูปแบบการดูดซับ ทางคณิตศาสตร์แบบจำลองเฮอริเมียใน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) CMB (2) SBM (3) IBM และ (4) CFM ซึ่งทำ ให้ทราบถึงรูปแบบการดูดซับที่เกิดขึ้นของเยื่อกรอง แบบนาโน ในแต่ละกรณี ถูกแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่า การดูดซับแบบ CFM ของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ +EfOM



รูปที่ 7 ผลของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ (ไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง) ที่มีต่อการกำจัด โดยใช้ความ แรงประจุเท่ากับ 0.01 M ที่ค่าพีเอช 7 ความดันในระบบ เท่ากับ 60 psig อุณหภูมิ 28 ± 3 °C



รูปที่ 8 ผลของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ +EfOM และ $PbCl_2$ +EfOM ที่มีต่อการกำจัด ค่าความแรงประจุ เท่ากับ 0.01 M ความเข้มข้น EfOM 10 mg/L พีเอช 7 ความดันที่ใช้เท่ากับ 60 psig อุณหภูมิ 28 ± 3 °C

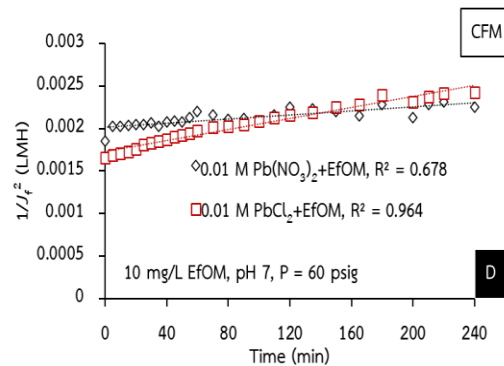
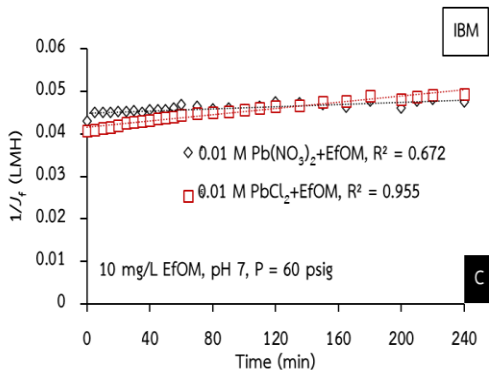
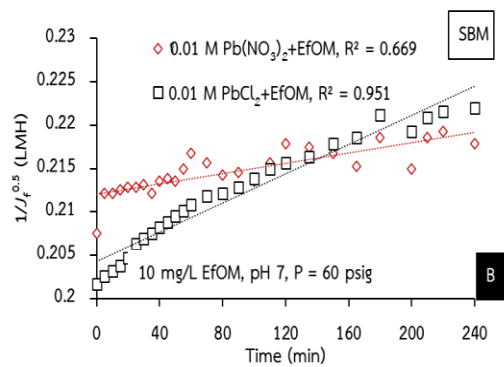
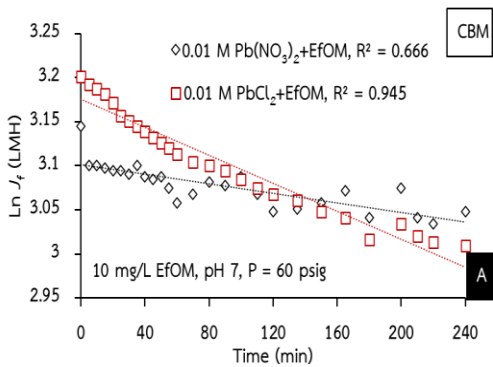
และ $PbCl_2$ +EfOM ให้ค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด โดยที่มีค่า R^2 ของ $Pb(NO_3)_2$ +EfOM และ $PbCl_2$ +EfOM เท่ากับ 0.678 และ 0.964 ตามลำดับ



บทความวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองกับรูปแบบการดูดซับทางคณิตศาสตร์ โดยพบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2 + EfOM$ และ $PbCl_2 + EfOM$ สอดคล้องกับการดูดซับแบบการเกิดเค้ก (CFM) อาจเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีขนาดใหญ่กว่า

ขนาดรูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโน จึงทำให้อนุภาคของสารละลายไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละการกำจัดตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีค่าสูง การกักกั้นอนุภาคเหล่านี้เกิดจากการสะสมของสารละลายตะกั่วร่วมกับ EfOM ทำให้เกิดการดูดซับจากการเกิดเค้กบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง



รูปที่ 9 การวิเคราะห์การดูดซับของ $Pb(NO_3)_2 + EfOM$ และ $PbCl_2 + EfOM$ ที่ความแรงประจุ 0.01 M ค่าพีเอช 7 ความดันในระบบ 60 psig อุณหภูมิในระดับห้องปฏิบัติการ 28 ± 3 °C โดยรูปแบบการดูดซับแบบ:

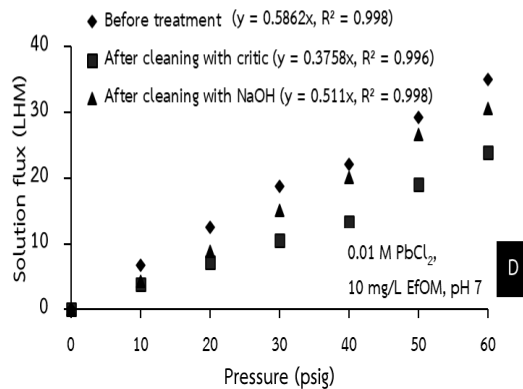
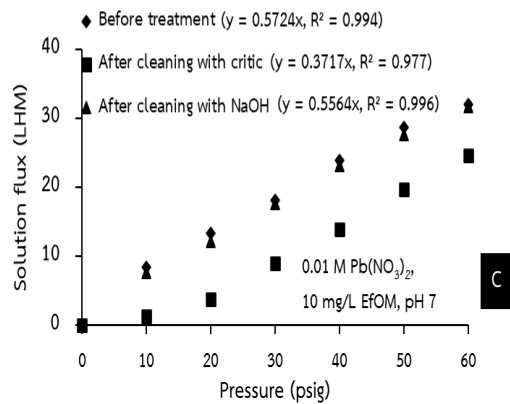
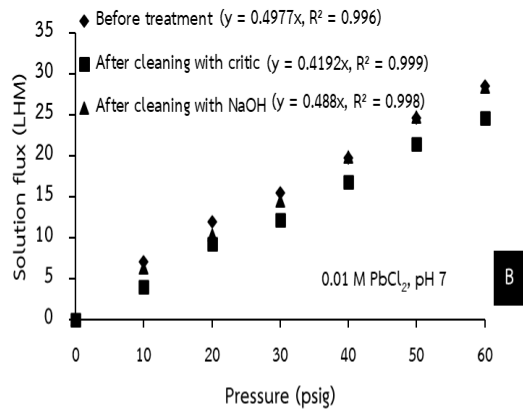
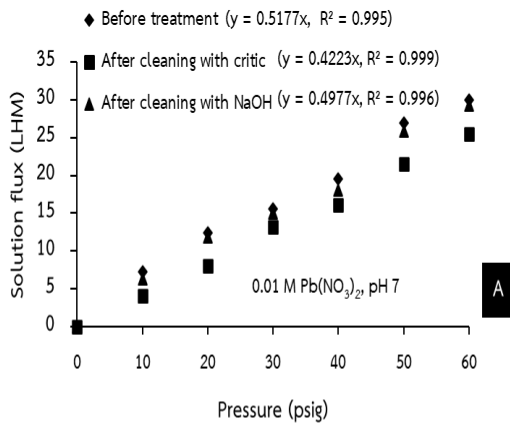
(A) CBM, (B) SBM, (C) IBM และ (D) CFM



3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันก่อนทดสอบและหลังล้างเยื่อกรอง

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันทั้งก่อนทดสอบและหลังล้างทำความสะอาดแผ่นกรอง โดยเยื่อกรองแบบนาโนแผ่นใหม่ถูก

ทดสอบเพื่อหาฟลักซ์เริ่มต้น โดยน้ำปราศจากประจุ (Deionized water: DI) ความดันที่ทดสอบอยู่ในช่วง 30-60 psig ผลการทดสอบพบว่าเมื่อความดันในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงภาพที่ 10 (A), (B), (C) และ (D)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันก่อนการทดสอบและหลังการล้างเยื่อกรองด้วยกรดและด่าง โดยที่: (A) $Pb(NO_3)_2$, (B) $PbCl_2$, (C) $Pb(NO_3)_2$ +EfOM และ (D) $PbCl_2$ +EfOM



สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองแบบนาโน พบว่าค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองแผ่นใหม่ก่อนทดสอบเท่ากับ 0.517, 0.497, 0.572 และ 0.586 LMH.psig-1 และหลังจากการกรองผ่านน้ำตัวอย่างของสารละลาย $Pb(NO_3)_2$, $PbCl_2$, $Pb(NO_3)_2+EfOM$ และ $PbCl_2+EfOM$ แล้วถูกล้างด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (ตะกั่ว) บนผิวหน้าของเยื่อกรอง ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองที่ได้หลังล้างด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าเท่ากับ 0.422, 0.419, 0.371 และ 0.375 LMH.psig-1 ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนการซึมผ่านเยื่อกรองหลังล้างด้วยกรดเมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านเยื่อกรองก่อนใช้งานเท่ากับร้อยละ 81.62, 84.30, 64.86 และ 63.99 ตามลำดับ การทดลองยังพบว่าน้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งให้ร้อยละการฟื้นฟูแผ่นเยื่อกรองในสัดส่วนที่ต่ำที่สุดอาจเนื่องจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งบนผิวของเยื่อกรองสอดคล้องกับรูปแบบการอุดตันจากการเกิดเค้กที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ส่วนการล้างด้วยด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ติดผิวหน้าของเยื่อกรอง ดังนั้นค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองที่ได้หลังจากล้างด้วยด่างมีค่าเท่ากับ 0.497, 0.488, 0.556 และ 0.511 LMH.psig-1 ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านของแผ่นเยื่อกรองก่อนใช้งานได้เท่ากับร้อยละ 96.13, 98.18, 97.20 และ 87.20 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น แสดงถึงการกู้คืนประสิทธิภาพของเยื่อกรองแบบนาโนให้ได้กลับมาใกล้เคียงกับฟลักซ์ก่อนทดสอบ และความสามารถในการล้างอนุภาคที่ติดบริเวณพื้นผิวเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากนี้พบว่าสารละลายของ $PbCl_2+EfOM$ เป็นสารให้ค่าการฟื้นฟู

ของค่าฟลักซ์น้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลของรูปแบบการอุดตันจากการเกิดเค้กเนื่องจากการสะสมมวลสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งบนผิวหน้าของเยื่อกรอง

4. สรุปผล

การศึกษานี้เป็นการศึกษากำจัดโลหะหนักของสารละลายตะกั่วและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ($EfOM$) และการวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันระหว่างผลรวมของโลหะตะกั่วและ $EfOM$ โดยใช้สารละลายตะกั่วที่ต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ รวมถึงผลรวมระหว่างสารละลายตะกั่วและ $EfOM$ คือ $Pb(NO_3)_2+EfOM$ และ $PbCl_2+EfOM$ ภายใต้การดำเนินระบบแบบไหลตายตัวด้วยเยื่อกรองแบบนาโน จากการพิจารณาค่าฟลักซ์ในรูปของ normalized flux (J/J_0) พบว่าในกรณีที่เป็นสารเดี่ยวสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ มีค่าฟลักซ์ลดลงสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าในกรณีที่เป็นสารร่วมระหว่างสารละลาย $Pb(NO_3)_2+EfOM$ ให้ผลของฟลักซ์ลดลงสูงสุดเช่นกันเมื่อเทียบกับสารละลาย $PbCl_2+EfOM$ ส่วนผลการกำจัดพบว่าในกรณีที่เป็นสารเดี่ยวพบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ และ $PbCl_2$ ให้ค่าการกำจัดที่สูง โดยมีค่าการกำจัดตะกั่วร้อยละ 84.47-88.14 และ 78.88-83.95 ตามลำดับ ในกรณีที่เป็นสารละลายตะกั่วร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งพบค่าการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 90.08-92.49 และ 86.8-89.16 ของสารละลาย $Pb(NO_3)_2+EfOM$ และ $PbCl_2+EfOM$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อกรองแบบนาโนสามารถกำจัด $EfOM$ ได้มากกว่าร้อยละ 95 สำหรับรูปแบบการอุดตันที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้แบบจำลองของเฮอร์เมีย พบว่าสารละลาย $Pb(NO_3)_2+EfOM$



และ $PbCl_2 + EfOM$ สอดคล้องกับรูปแบบการเกิดเค้ก (CFM) ซึ่งการดูดซับชนิดนี้ สามารถล้างพื้นฟูเยื่อกรองให้กลับมาใช้งานใหม่ จากการล้างด้วยน้ำสะอาดและสารเคมีปรับสภาพด้วยความเป็นกรดและต่างตามลำดับ จากผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลต่อการใช้งานและการพัฒนาเทคโนโลยีเยื่อกรอง ทำให้ยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรอง และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบจากการเปลี่ยนเยื่อกรอง ตลอดจนลดความเสี่ยงสถานะที่ทำให้เกิดการอุดตันบนแผ่นกรอง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.J. Gonzalez-Munoz, M. A. Rodriguez, S. Luque and J.R. Alvarez, Recovery of heavy metals from metal industry waste waters by chemical precipitation and nanofiltration, *Desalination*, 2006, 200(1-3), 742-744.
- [2] B. Sandhya, and T.A. Kurniawan, Cr (VI) removal from synthetic wastewater using coconut shell charcoal and commercial activated carbon modified with oxidizing agents and/or chitosan, *Chemosphere*, 2004 54(7), 951-967.
- [3] S. Prakash, M. Kumar, B.P. Tripathi and V. K. Shahi, Sol-gel derived poly (vinyl alcohol)-3-(2-aminoethylamino) propyl trimethoxy silane: Cross-linked organic-inorganic hybrid beads for the removal of Pb (II) from aqueous solution, *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162(1), 28-36.
- [4] F.M. Pang, P. Kumar, T.T. Teng, A.M. Omar and K.L. Wasewar, Removal of lead, zinc, and iron by coagulation-flocculation, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011, 42(5), 809-815.
- [5] J. Drzymala, J. Kapusniak and P. Tomasiak, Removal of lead minerals from copper industrial flotation concentrates by xanthate flotation in the presence of dextrin, *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 70(1-4), 147-155.
- [6] V. Kumar, S. K. Dwivedi and S. Oh, A critical review on lead removal from industrial wastewater: Recent advances and future outlook. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 45, 102518.
- [7] X. Rao, Q. Li, C. Inoue, I. Ahmad, J. Yi, Y. Liu and J. Zhang, Simultaneous removal of lead (II) and nitrate from water at low voltage, *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 32, 100940.



- [8] A. Bhatnagar and M. Sillanpaa, Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption—a review, *Chemosphere*, 2017, 166, 497-510.
- [9] M. M. Matlock, B. S. Howerton and D.A. Atwood, Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage, *Water Research*, 2002, 36(19), 4757-4764.
- [10] M. Ghaedi, F. Ahmadi and A. Shokrollahi, Simultaneous preconcentration and determination of copper, nickel, cobalt and lead ions content by flame atomic absorption spectrometry, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142(1-2), 272-278.
- [11] D. Dong, L. Liu, X. Hua and Y. Lu, Comparison of lead, cadmium, copper and cobalt adsorption onto metal oxides and organic materials in natural surface coatings, *Microchemical Journal*, 2007, 85(2), 270-275.
- [12] C.V. Gherasim, J. Cuhorka and P. Mikulasek, Analysis of lead (II) retention from single salt and binary aqueous solutions by a polyamide nanofiltration membrane: Experimental results and modelling, *Journal of Membrane Science*, 2013, 436, 132-144.
- [13] A.E. Childress and M. Elimelech, Effect of solution chemistry on the surface charge of polymeric reverse osmosis and nanofiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, 1996, 119(2), 253-268.
- [14] V. Blet, Effluent decontamination, *Encyclopedia of Nuclear Energy*, Elsevier, 2021, 534-547.
- [15] Y. Xu and R.E. Lebrun, Investigation of the solute separation by charged nanofiltration membrane: effect of pH, ionic strength and solute type, *Journal of Membrane Science*, 1999, 158(1-2), 93-104.
- [16] C. V. Gherasim and P. Mikulasek, Influence of operating variables on the removal of heavy metal ions from aqueous solutions by nanofiltration, *Desalination*, 2014, 343, 67-74.
- [17] C. Jarusutthirak, S. Mattaraj, and R. Jiratananon, Influence of inorganic scalants and natural organic matter on nanofiltration membrane fouling. *Journal of Membrane Science*, 2007, 287(1), 138-145.
- [18] J. E. Kilduff, S. Mattaraj, J. Sensibaugh, J. P. Pieracci, Y. Yuan and G. Belfort, Modeling flux decline during nanofiltration of NOM with poly (arylsulfone) membranes modified using UV-assisted graft polymerization, *Environmental Engineering Science*, 2002, 19(6), 477-495.
- [19] T. Mohammadi, M. Kazemimoghadam, and M. Saadabadi, Modeling of membrane fouling and flux decline in reverse osmosis during separation of oil in water emulsions. *Desalination*, 2003, 157(1-3), 369-375.



- [20] P. Eriksson, Water and salt transport through two types of polyamide composite membranes, *Journal of Membrane Science*, 1988, 36, 297-313.
- [21] B.V. der Bruggen and C. Vandecasteele, Flux decline during nanofiltration of organic components in aqueous solution, *Environmental science and technology*, 2021, 35(17), 3535-3540.
- [22] O.T. Mahlangu and B.B. Mamba, Interdependence of contributing factors governing dead-end fouling of nanofiltration membranes, *Membranes*, 2021, 11(1), 47.
- [23] A.J.V. Reenen and R.D. Sanderson, Dynamically formed hydrous zirconium (IV) oxide-polyelectrolyte membranes VII. Poly (acrylic acid-co-vinyl acetate) and poly (acrylic acid-co-vinyl alcohol) membranes: The effect of feed salt concentration on membrane properties, *Desalination*, 1992, 85(3), 247-261.
- [24] N. G. Her, Identification and characterization of foulants and scalants on NF membrane, Thesis, University of Colorado at Boulder, USA, 2002.
- [25] J. Guo, H. Liu, J. Liu and L. Wang, Ultrafiltration performance of EfOM and NOM under different MWCO membranes: Comparison with fluorescence spectroscopy and gel filtration chromatography, *Desalination*, 2014, 344, 129-136.



การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งและการขึ้นรูปแบบสลับทางที่มีต่อการบางลงของถั่วกันโค้ง

วารุณี เปรมานนท์^{*} พงษ์นที ถนอมกุลบุตร และ จิราพร ศรีประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

^{*} ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: varunee.pre@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 มีนาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 11 พฤศจิกายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 15 พฤศจิกายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวฟันซี่ในการลากขึ้นรูปถั่ว ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของถั่วกันโค้งอะลูมิเนียมผสม เกรด 5052 H32 โดยทดสอบขึ้นรูปแบบขั้นบันไดและแบบสลับทาง (2 ขั้นบันได) จากการทดสอบขึ้นรูปแบบขั้นบันไดพบว่าการขึ้นรูปด้วยฟันซี่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่ำ ทำให้ส่วนโค้งกันถั่วบางลงมากกว่าบริเวณอื่น โดยตำแหน่งที่บางลงมากที่สุดอยู่ที่บริเวณส่วนโค้งกันถั่ว ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยฟันซี่ที่มีอัตราส่วนโค้งสูง (เข้าใกล้ถั่วกันแบน) ตำแหน่งที่เกิดการบางลงมากที่สุดอยู่ที่ผนังตรงใกล้กับโค้งกันถั่ว การลากขึ้นรูปแบบสลับทางช่วยลดการบางลงของชิ้นงานกรณีที่มีอัตราส่วนโค้งต่ำ และถั่วสำเร็จมีความยาวส่วนผนังตรงไม่มาก กลไกการขึ้นรูปของถั่วกันโค้งที่มีส่วนของผนังตรงพบว่า การขึ้นรูปช่วงแรกเป็นการขึ้นรูปส่วนโค้งกันถั่วซึ่งเกิดการดึงยืดทุกทิศทาง และตามด้วยการขึ้นรูปบริเวณผนังตรง ซึ่งเกิดความเค้นแรงดึงสูงตามแนวรัศมีส่งผลให้เกิดการบางลงมากที่บริเวณผนังตรงใกล้รัศมีฟันซี่ ดังนั้นการขึ้นรูปแบบสลับทางจึงมีผลกับการกระจายความหนาได้เฉพาะในการขึ้นรูปช่วงแรก กรณีถั่วที่มีอัตราส่วนโค้งสูงมีความยาวส่วนผนังตรงมาก การขึ้นรูปส่วนใหญ่อยู่ที่การขึ้นรูปช่วงที่สอง จึงมีส่วนช่วยลดการบางลงได้น้อย

คำสำคัญ: การลากขึ้นรูปลึก; อัตราส่วนโค้ง; การลากขึ้นรูปแบบสลับทาง; ถั่วกันโค้ง; กลไกการบางลง



Study on Influences of Curved Ratio and Reverse Drawing Technique on Thinning of Curved Bottom Cup

Varunee Premanond^{*}, Pongnatee Thanomkulbud and Jiraporn Sripraserd

Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

^{*} Corresponding author, E-mail: varunee.pre@kmutt.ac.th

Received: 8 March 2024; Revised: 11 November 2024; Accepted: 15 November 2024

Online Published: 21 December 2024

Abstract: This work studied the influences of the punch head curve ratio on thickness changing of cup by deep drawing process using one step or conventional drawing and reverse drawing (2-step) from 1 mm thick Aluminum 5052 H32. For conventional drawing, it was found that the curve bottom part of cup was thinner than other area when deep drawing with lower curve ratio punch. The maximum thinning area was found on curve bottom part of cup. While deep drawing with high curve ratio punch, the thinnest area had shift to straight wall close to bottom of cup. Deep drawing of 2 steps using reverse drawing could reduce thinning with low curve ratio punch and short straight wall cup. The mechanism for deep drawing of curve bottom cup could be divided into two parts; the curve bottom with main stretching was formed initially and followed by forming the straight wall with main radial tensile stress. Thus, reverse drawing could help reduce thinning only on the first part of curved bottom cup forming. Therefore, using reverse drawing had less effect on thinning for cup with high curve bottom ratio with large straight wall due to second part of forming straight wall area was dominated.

Keywords: Deep drawing process; curve ratio; Reverse drawing; Curve bottom cup; Thinning



1. บทนำ

การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกกันโค้งมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างอุตสาหกรรมการผลิตถึงความดันสูง ถึงแก๊ส ปัจจุบันเริ่มมีความต้องการสิ่งที่ทำจากวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเช่นอะลูมิเนียม เพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย ขณะเดียวกันความแข็งแรงสูงยังเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเพื่อความปลอดภัย การขึ้นรูปทั่วไปส่งผลให้เกิดการบางลงเฉพาะบริเวณ เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดทางด้านความปลอดภัยต้องทำการปรับความหนาเริ่มต้น ซึ่งต้นทุนวัสดุของแผ่นอะลูมิเนียมสูงกว่าแผ่นเหล็กทั่วไปมาก การศึกษาเพื่อลดการบางลงขณะขึ้นรูปจึงมีความสำคัญเพื่อลดต้นทุนการผลิต

เป็นที่ทราบกันดีว่าด้วยที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Process) รูปทรงถ้วยกันแบน ตำแหน่งการบางลงมากที่สุดของถ้วยจะอยู่ที่ส่วนผนังตรงของถ้วยใกล้กับรัศมีพันซ์ [1, 2, 3] ซึ่งเกิดจากค่าความเค้นแรงดึงสูงในแนวความสูงของถ้วยตามทิศทาง การให้แรงจากพันซ์ ส่วนกันถ้วยแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนา ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยกันโค้ง จะเกิดการยืดตัวตามแนวรัศมีของบริเวณส่วนโค้งกันถ้วยที่สัมผัสกับพันซ์ ส่วนที่บางที่สุดอยู่บริเวณโค้งกันถ้วย มีการศึกษาเพื่อลดการบางลงของถ้วยที่ผ่านการลากขึ้นรูปลึก Zein และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตัวแปรรูปร่างแม่พิมพ์ประกอบด้วย รัศมีพันซ์ รัศมีตาย ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปค่าแรงจับแผ่นจับยึดชิ้นงานและความเสียดทานผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงงานของ Olguner [5] สนับสนุนผลการบางลงมากขึ้นของถ้วยจากค่าความเสียดทานที่เพิ่มมากขึ้น Mahdi [6] ลดการบางลงของถ้วยกันโค้ง

ด้วยการปรับรัศมีตายให้มีรูปร่างเฉพาะแบบ Tractrix เทคนิคการลากขึ้นรูปแบบสลับทาง (Reverse Drawing) มีการศึกษาอยู่หลากหลาย Zhang [7] ศึกษา ร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละบริเวณเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปให้กับแผ่นอะลูมิเนียม Liu [8] และ Mu [9] ศึกษา ร่วมกับการใช้ Magnetorheological Fluid พบว่าการลากขึ้นรูปสลับทางสามารถลดการยืดตัวของบริเวณกันด้วยทรงครึ่งวงกลม ทำให้เกิดการกระจายตัวของความหนาอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงงานวิจัยของ Zhang [10] ขึ้นรูปด้วยกันโค้งทรงครึ่งวงกลมจากเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า พบว่าการลากขึ้นรูปสลับทาง 3 ครั้ง ให้ผลการกระจายความหนาที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด การศึกษาเพื่อลดปัญหาการบางลงของถ้วยกันแบนและถ้วยกันโค้งทรงครึ่งวงกลม (Hemispherical End) มีมาแล้วอย่างกว้างขวาง แต่ยังคงขาดผลการศึกษากรณี ที่กันถ้วยมีรูปร่างโค้งที่ไม่ได้เป็นทรงครึ่งวงกลม เช่นกรณี ของโค้งกันถึงแก๊ส ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารูปทรงผิวโค้งของหัวพันซ์ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนโค้ง (Curve Ratio, CR) แสดงอยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนรัศมีต่อความสูงบริเวณโค้ง (R/H) และการใช้เทคนิคการขึ้นรูปสลับทาง เพื่อศึกษาอิทธิพลที่เกิดกับการบางลงของถ้วยกันโค้งโลหะอะลูมิเนียมผสม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 5052 H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการศึกษาทางด้านพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรมาแล้วอย่างกว้างขวาง [11, 12] สมบัติทางกลที่สำคัญแสดงในตารางที่ 1 การทำงานของแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกกันโค้งแสดงในรูปที่ 1 ชุดแม่พิมพ์ทำมาจากวัสดุ JIS-SKD11 ผ่านการชุบแข็ง

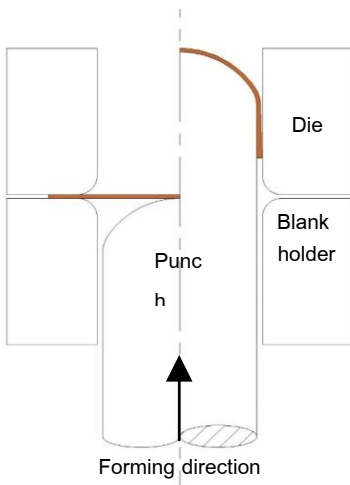


บทความวิจัย

ที่ 60 ± 2 HRC แม่พิมพ์ออกแบบให้มีระยะช่องว่าง (Tool Clearance) 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีตาย 5 มิลลิเมตร ใช้พื้นที่ปลายโค้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ใช้เครื่อง Universal Sheet Metal Testing 350 kN ในการขึ้นรูป ใช้สารหล่อลื่น Forming oil ทุกเงื่อนไขการทดสอบ โดยทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุ AL5052-H32 [12]

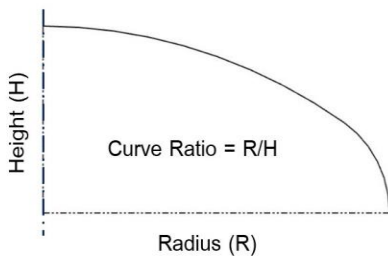
Yield strength	167.75 MPa
Ultimate tensile strength	216.21 MPa
Total elongation	9.7%
Hardening coefficient	341.25 MPa
Strain-hardening exponent	0.148



รูปที่ 1 การลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (Conventional drawing)

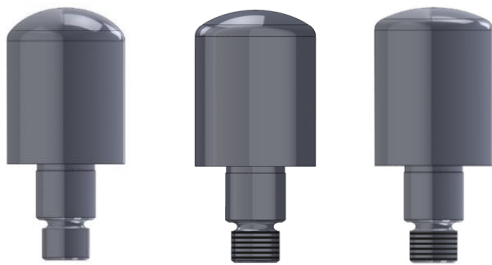
เบื้องต้นทำการทดสอบค่าขีดความสามารถในการขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio) จากพื้นที่ที่มีค่าอัตราส่วนโค้ง (CR) 1.35 1.7 และ 2 โดยนิยามอัตราส่วนโค้งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีต่อความสูง ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นอะลูมิเนียม (Blank Size) เริ่มต้นที่ 80 มิลลิเมตร (อัตราส่วนการลากขึ้นรูป, Drawing Ratio, DR 2.0) ปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force, F_{BH}) ให้ขึ้นรูปได้สำเร็จ ปราศจากรอยแตกและการย่นในกรณีที่ขึ้นรูปไม่สำเร็จ จะทำการปรับลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นลง และปรับแรงที่ใช้ในการกดแผ่นจับยึดชิ้นงานจนกระทั่งได้ถ้วยสำเร็จในแต่ละชุดการทดลอง โดยจะเลือกใช้ชุดการทดลองที่ปรับตั้งค่า F_{BH} ต่ำที่สุดที่ขึ้นรูปได้ในแต่ละกรณี เนื่องจากการเพิ่มค่า F_{BH} ส่งผลให้การจับยึดที่ปีกถ้วยเพิ่มเนื้อวัสดุไหลตัวได้ยาก ทำให้เกิดการบางลงเพิ่มมากขึ้น และการศึกษาการบางลงของถ้วยจะเลือกสถานะการทำงานที่อัตราส่วนการขึ้นรูป และค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่เท่ากันในการเปรียบเทียบต่อไป

การศึกษาการบางลงของถ้วยจากการลากขึ้นรูปแบ่งเป็น 2 ส่วนคือศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพื้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาถ้วยที่ผ่านการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (Conventional Drawing) และศึกษาอิทธิพลของการขึ้นรูปแบบสลับทาง (Reverse Drawing) ที่มีต่อการบางลง โดยทำการลากขึ้นรูป 2 ขั้นตอน แบบสลับทิศทางกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ (Stroke) ของพื้นที่ขึ้นรูปขั้นตอนแรก (Pre-draw)



การวัดความหนาหลังขึ้นรูปทำโดยตัดผ่าด้วย อะลูมิเนียม ใช้ไมโครมิเตอร์แบบหัวบอลวัดที่ตำแหน่ง ตามแสดงในรูปที่ 4 โดยเบี่ยงต้นวัดแต่ละตำแหน่งห่าง กัน 2.5 มิลลิเมตร และขยับตำแหน่งอย่างละเอียดเพื่อ แสดงตำแหน่งและค่าความหนาในตำแหน่งที่บางลง มากที่สุด

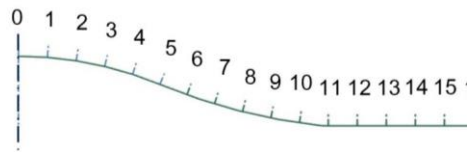
ก) นิยามอัตราส่วนโค้งของหัวพินซ์



ข) CR 1.35

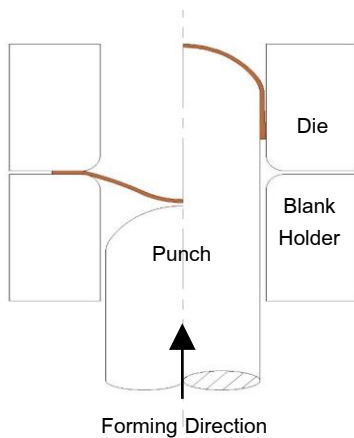
ค) CR 1.7

ง) CR 2

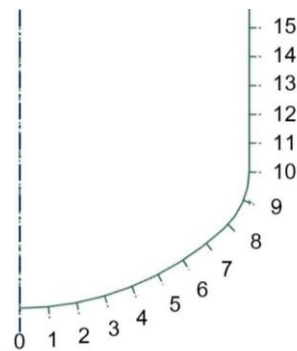


ก) ถ้วยที่ผ่านการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1 Pre-draw

รูปที่ 2 พินซ์ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3 การลากขึ้นรูปแบบสลับท่าง (Reverse Drawing)



ข) ถ้วยสำเร็จ

รูปที่ 4 ตำแหน่งการวัดความหนาของถ้วย

3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพินซ์

ทดสอบการลากขึ้นรูปโดยใช้พินซ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1.35 1.7 และ 2



3.1.1 ผลการทดสอบความสามารถในการลากขึ้นรูป

ทดสอบการลากขึ้นรูปโดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR เท่ากับ 1.35 1.7 และ 2 ทดสอบบนแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 70 และ 68 มิลลิเมตร (DR เท่ากับ 2 1.75 และ 1.7 ตามลำดับ) ใช้แรงกดแผ่นจับยึดเริ่มต้น 1.3 kN ทำการเพิ่มค่า F_{BH} กรณีที่พบการย่น และลด F_{BH} กรณีที่แตกจนกระทั่งได้ชิ้นงานสำเร็จ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยพันธที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 1.7 และ 2

CR	F_{BH} (kN)	Drawing Ratio (DR)		
		2	1.75	1.7
1.35	0	แตก	-	-
	1.3	แตก	ย่น	✓
	2	แตก	ย่น	-
1.7	2.2	-	✓	-
	1.3	ย่น	ย่น	✓
	2	ย่น	✓	-
	3.5	ย่น	-	-
2	4	✓	-	-
	1.3	ย่น	ย่น	✓
	2	ย่น	✓	-
	2.1	แตก	-	-

หมายเหตุ: ✓ หมายถึง ชิ้นรูปสำเร็จ
- หมายถึง ไม่ได้ทำการทดสอบ

กรณีที่ใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 ที่ DR 2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ กรณีใช้แรงจับยึดชิ้นงานที่ 1.3 และ 2 kN เกิดคอคอด (Necking) และฉีกขาด เมื่อไม่มีการจับยึดชิ้นงาน ($F_{BH} = 0$ kN) เกิดการย่นและส่งผลให้ฉีกขาด ดังรูปที่ 5(ก) เมื่อลดขนาดแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นลงที่ DR 1.75 ถ้วยเกิดการย่นเมื่อใช้ F_{BH} 1.3 และ 2

kN ชิ้นรูปได้สำเร็จเมื่อใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ 2.2 kN ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) และที่ DR 1.7 ชิ้นรูปได้สำเร็จด้วยการใช้ F_{BH} 1.3 kN

กรณีที่ใช้พันธ CR 1.7 ชิ้นรูปชิ้นงานที่ DR 2 ชิ้นรูปได้สำเร็จเมื่อใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน 4 kN (ทดลองลดแรงกดที่ 3.5 kN พบว่าชิ้นงานเกิดรอยย่นชิ้นเล็กน้อยที่ขอบ จึงนำเสนอผลชิ้นรูปได้ดังตารางที่ 2) แรงกดที่ 2 kN เกิดรอยย่นที่เห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 6 และที่ DR 1.75 และ 1.7 ชิ้นรูปได้สำเร็จด้วยการใช้ F_{BH} 2 และ 1.3 kN ตามลำดับ



$F_{BH} = 0$ kN

$F_{BH} = 1.3$ kN

$F_{BH} = 2$ kN

ก) การขึ้นรูปโดยใช้ DR 2



$F_{BH} = 1.3$ kN

$F_{BH} = 2$ kN

$F_{BH} = 2.2$ kN

ข) การขึ้นรูปโดยใช้ DR 1.75

รูปที่ 5 ชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน โดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.35



$F_{BH} = 2$ kN

$F_{BH} = 3.5$ kN

$F_{BH} = 4$ kN

รูปที่ 6 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานโดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.7 ที่ DR 2



กรณีของพันธ CR 2 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ DR 2 ได้สำเร็จ ดังแสดงในรูปที่ 7 ถ้วยมีรอยย่นที่ขอบเมื่อใช้ F_{BH} 2 kN หรือน้อยกว่า เมื่อทำการเพิ่มแรงจับยึดเป็น 2.1 kN เกิดการฉีกขาด ส่วนที่ DR 1.75 และ 1.7 ขึ้นรูปได้สำเร็จด้วยการใช้ F_{BH} 2 และ 1.3 kN ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าพันธ CR 1.7 ให้ค่าขีดความสามารถในการขึ้นรูปได้สูงสุด (DR 2) ส่วนพันธ CR 1.35 และพันธ CR 2 ขึ้นรูปได้มากที่สุดที่ DR 1.75 เท่ากันโดยใช้ค่า F_{BH} ที่ต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่ DR สูง คือกรณีใช้แผ่นชิ้นงานเริ่มต้นขนาดใหญ่ ขณะขึ้นรูปเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงเพิ่มขึ้น จึงต้องเพิ่มแรงจับยึดแผ่นชิ้นงานให้สูงขึ้นด้วยความเค้นแรงอัดในแนวเส้นรอบวงเป็นต้นเหตุให้เกิดการย่นของขอบถ้วย แรงจับยึดที่ไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดการย่น โดยการทดลองด้วยพันธที่มี CR ต่างกัน ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ที่ DR 2 (กรณีของ CR 1.7 ที่ขึ้นรูปได้สำเร็จ) ใช้แรงจับยึดสูงกว่า DR 1.75 และ DR 1.7 ตามลำดับ ส่วนที่ DR 2 ซึ่งเกิดจากการใช้แผ่นเปล่าที่มีขนาดใหญ่ที่สุด พันธ CR 1.35 และ 2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ แรงจับยึดที่สูงเกินไปส่งผลให้เกิดการแตกของถ้วยที่เกิดจากความเค้นแรงดึงในแนวรัศมีแผ่นเริ่มต้นขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่สัมผัสบริเวณปีกถ้วยมาก เกิดแรงต้านทานการไหลตัวของแผ่นโลหะลงไปใตยสูง จึงทำให้เกิดการฉีกขาด

3.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพันธที่มีต่อความหนาของชิ้นงาน

การเปรียบเทียบค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อขึ้นรูปด้วยพันธทั้ง 3 ตัว (CR 1.35 1.7 และ 2) วัดความหนาจากถ้วยกรณี DR 1.7 เนื่องจากขึ้นรูปได้สำเร็จโดยใช้ F_{BH} เท่ากันที่ 1.3 kN เพื่อตัดอิทธิพลการบางลง



รูปที่ 7 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานโดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 2 ที่ DR 2

ของถ้วยที่เกิดจากแรงจับยึดงานที่ต่างกัน ถ้วยที่ได้จากพันธทั้ง 3 ชุด ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน แสดงในรูปที่ 8 และผลการกระจายค่าความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงในรูปที่ 9 ส่วนโค้งกันถ้วยจนถึงผนังตรง (ตำแหน่งที่ 0-9) เกิดการบางลง และขอบถ้วย (ตำแหน่งที่ 13-14) มีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นกลไกปกติของกระบวนการลากขึ้นรูปถ้วยกลม [6] โดยพบว่าถ้วยที่ขึ้นรูปโดยใช้พันธ CR 1.35 ซึ่งมีลักษณะโค้งมากที่สุด เกิดการบางลงมากที่สุด (จากความหนา 1 มิลลิเมตร เหลือ 0.834 มิลลิเมตร คิดเป็นการบางลง 16.6%) ที่บริเวณโค้งตำแหน่ง 3-4 ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) เมื่อใช้พันธที่มีความโค้งน้อยลง (CR 1.7 และ 2 ตามลำดับ) เกิดการบางน้อยลง การใช้พันธ CR 2 ให้ถ้วยที่มีการบางลงของชิ้นงานน้อยที่สุด (จากความหนา 1 มิลลิเมตร เหลือ 0.932 มิลลิเมตร คิดเป็นการบางลง 6.8%) และตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยที่ขึ้นรูปด้วยพันธ CR 2 เลื่อนออกจากกึ่งกลางกันถ้วยเข้าใกล้ส่วนผนังตรง (ตำแหน่ง 8-9) ดังแสดงในรูปที่ 10 (ค)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ C. Zhang และคณะ [10] ขึ้นรูปโดยใช้พันธที่มี CR 1 (ทรงครึ่งวงกลม) ตำแหน่งที่บางที่สุดจากการลากขึ้นรูปอยู่ที่ตำแหน่งยอดของส่วนโค้ง และในกรณีถ้วยกันแบน ส่วนที่บางที่สุดจะอยู่ส่วนผนังตรงที่ใกล้กับกันถ้วย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ แสดงให้

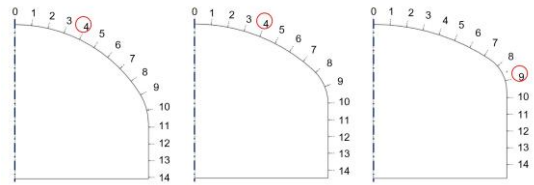


บทความวิจัย



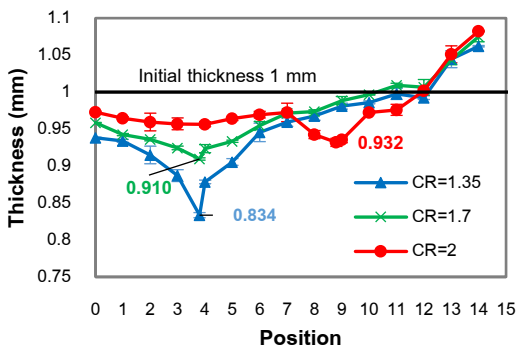
ก) CR 1.35 ข) CR 1.7 ค) CR 2

รูปที่ 8 ถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยพื้นที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน (DR 1.7, F_{BH} 1.3 kN)



ก) CR 1.35 ข) CR 1.7 ค) CR 2

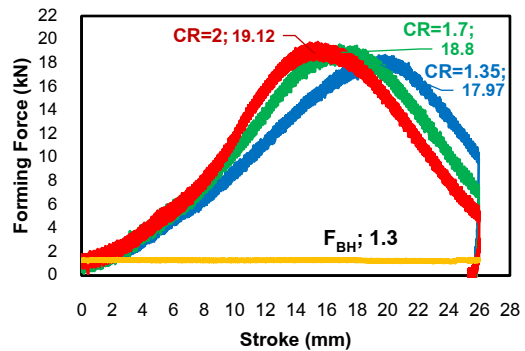
รูปที่ 10 ตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน



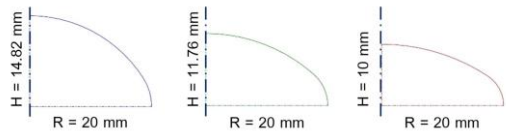
รูปที่ 9 ความหนาของถ้วยอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน (DR 1.7)

เห็นว่าเมื่อความโค้งที่กันถ้วยลดลง (ค่า CR เพิ่มขึ้น) ตำแหน่งที่เกิดการบางลงมากที่สุดเลื่อนจากกึ่งกลางกันถ้วยไปยังส่วนผนังตรง

รูปที่ 11 แสดงแผนภาพแรง-ระยะทางของการลากขึ้นรูปถ้วย (DR 1.7) โดยใช้พื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 1.7 และ 2 พบว่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงานอยู่ที่ 17.97 18.80 และ 19.12 kN ตามลำดับ ค่าความโค้งกันถ้วยที่ต่างกัน ส่งผลให้ ระยะ Stroke ที่พื้นที่พาแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นส่วนที่อยู่ปิกถ้วย ลงในช่องตายที่ระยะต่างกัน รูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงระยะ Dome height ของพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน โดยหัวพื้นที่ที่มีลักษณะโค้งน้อย (CR 2) ระยะทางในการขึ้นรูปส่วน



รูปที่ 11 Load stroke diagram ของการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้พื้นที่อัตราส่วนโค้งต่างกัน ที่ DR 1.7



ก) CR 1.35 ข) CR 1.7 ค) CR 2

รูปที่ 12 ระยะความสูง Dome height (H) ของพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน

โค้งต่ำกว่า เกิดส่วนที่เป็นผนังตรงก่อน และผนังตรงยาวกว่าโค้งที่มีอัตราส่วนมาก ระยะที่เกิดแรงสูงสุดจึงเกิดก่อน และใช้แรงสูงสุดที่มากกว่าพื้นที่ที่มีลักษณะความโค้งมากกว่าเล็กน้อย



จากผลการทดสอบอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพินซ์ที่มีต่อการลากขึ้นรูป แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปโดยในช่วงแรกเป็นการขึ้นรูปส่วนโค้งที่ หัวพินซ์ เกิดการดึงยืด (Stretching) พินซ์ที่มีความโค้ง มาก จะใช้ Stroke ในช่วงนี้ที่ยาวกว่าพินซ์ที่มีความโค้ง น้อย ส่งผลให้ส่วนของแผ่นโลหะกันถ้วยมีการยืดตัวที่ มากกว่า กรณีกันถ้วยที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.7 ตำแหน่งที่ บางที่สุดต่างจากกรณีกันถ้วยที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 ไม่ มากนัก อาจเนื่องมาจากค่าความโค้งที่ไม่ต่างกันมาก เมื่อระยะเคลื่อนที่ลงของพินซ์เพิ่มมากขึ้นถึงส่วนที่สร้าง ผนังตรง ส่วนที่ใกล้กับรัศมีพินซ์จะเป็นบริเวณที่รับ ความเค้นแรงดึงมากที่สุดเพื่อส่งแรงขึ้นไปใช้ในการดึง แผ่นขึ้นงานบริเวณปีกลงมาในช่องตาย การเปลี่ยนรูป บริเวณปีกถ้วยจะเกิดความเค้นแรงอัดในแนวเส้นรอบวง ที่เป็นตัวที่ส่งผลให้ขอบถ้วยมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่ง กรณีของถ้วยที่มีความโค้งน้อยจะเหลือส่วนที่เป็นผนัง ตรงยาวกว่า ทำให้กลไกส่วนนี้รุนแรงกว่าจึงเกิดการบาง ลงมากที่สุดที่ตำแหน่งที่ใกล้กับผนังตรง

จากผลที่ได้ก็นำมาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ ที่พินซ์ CR 1.7 ได้ค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปที่สูงกว่าพินซ์ CR 1.35 และ CR 2 (ขึ้นรูป DR 2 ได้สำเร็จ) จากการที่ เกิดการบางลงของถ้วยผ่าน 2 กลไก ในช่วงแรกที่เป็น การบางลงของกันถ้วย และจากนั้นเปลี่ยนผ่านเป็นการ ขึ้นรูปส่วนผนังตรง พินซ์ CR 1.35 ด้วยความโค้งมาก ของพินซ์ทำให้ถ้วยเกิดการฉีกขาดตั้งแต่ช่วงแรกของการ ขึ้นรูปดังรูป 5 (ก) ในขณะที่ CR 1.7 พินซ์โค้ง น้อยลง ลดภาระการเปลี่ยนรูปช่วงแรก กระจายการบาง ลงของถ้วยไปที่บริเวณผนังตรงจึงทำให้การขึ้นรูปสำเร็จ ส่วนกรณี CR2 ความโค้งพินซ์น้อยที่สุด เกิดการเปลี่ยน รูปช่วงแรกที่สัน ส่วนผนังตรงในช่วงการขึ้นรูปจังหวะที่ 2

จึงรับภาระในการดึงยืดเพื่อเปลี่ยนรูป บางลงมากจน เกิดการฉีกขาด ดังแสดงตำแหน่งการฉีกขาดที่ใกล้ผนัง ตรงรูปที่ 7

3.2 ผลการทดสอบการลากขึ้นรูปสลับทาง

ทำการทดสอบการลากขึ้นรูปสลับทาง (Reverse Drawing) 2 กรณีศึกษา โดยกรณีแรกใช้พินซ์ CR 1.35 ที่ DR 1.7 ซึ่งเกิดการบางลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพินซ์ CR 1.7 และ 2 จากรูปที่ 9 หัวข้อ 3.1.2 และ กรณีที่ 2 ใช้พินซ์ที่ CR 1.7 ที่ DR 2 ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่รุนแรงที่สุดจากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2 โดยแต่ละชุดการทดลอง ใช้พินซ์ตัวเดียวกันในการขึ้น รูปทั้งในขั้นตอนที่ 1 Pre-draw และขั้นตอนที่ 2 Reverse Draw

3.2.1 การลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพินซ์ CR 1.35 DR 1.7

ผลการทดสอบการขึ้นรูปสลับทาง โดยใช้พินซ์ที่มี อัตราส่วนโค้ง 1.35 ที่ DR 1.7 ใช้ F_{BH} 1.3 kN ทั้ง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ชิ้นงานถูกลากขึ้นรูปที่ความสูง 5 7 9 และ 11 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 33.74 47.23 60.7 และ 74.22 % ของระยะความสูงส่วนโค้งของหัวพินซ์ (H) จากนั้นทำการสลับทิศทางเพื่อขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 ให้ได้ถ้วยสำเร็จ ชิ้นงานทดสอบแสดงในรูปที่ 13 และ ตำแหน่งการวัดความหนาของถ้วยทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 14

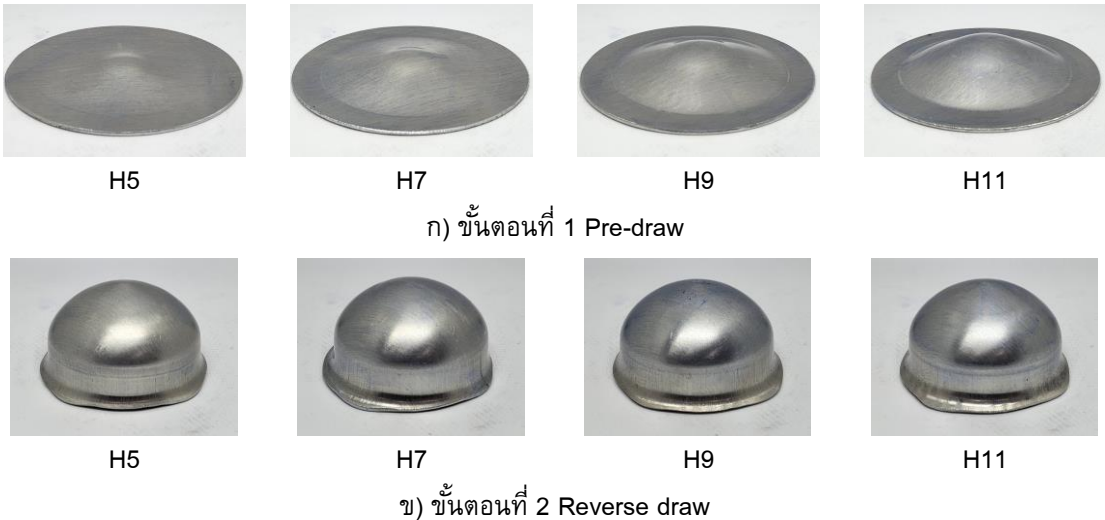
การกระจายตัวของความหนาถ้วยจากการลากขึ้น รูปสลับทางทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 15 การขึ้นรูปใน ขั้นตอนที่ 1 แสดงโดยกราฟเส้นทึบ เมื่อระยะการขึ้นรูป เพิ่มมากขึ้น ตำแหน่งที่เกิดการบางลงมากที่สุด จะเลื่อนออกห่างจากกึ่งกลางตามความสูงที่เพิ่มขึ้นของ



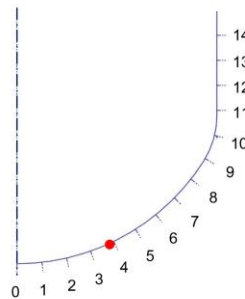
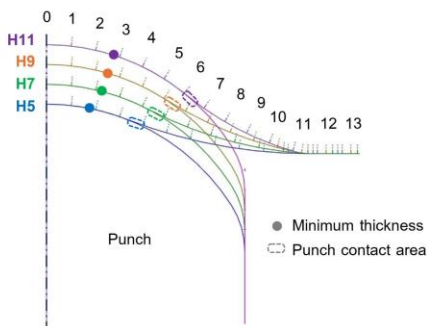
บทความวิจัย

ขั้นตอนแรก จากระยะ Stroke ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างหัวพunchกับแผ่นชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14 (ก) เกิดการดึงยืดมากขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานบางลงเมื่อระยะการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น หลังจากการขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 ค่าความหนาแสดงโดยเส้นประในกราฟที่กันถ้วยบางลงมากขึ้นทุกตำแหน่งและหนาขึ้นบริเวณ

ผนังตรง การขึ้นรูปแบบสลับทางทั้ง 4 กรณี บางลงน้อยกว่าการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว สังเกตได้ว่าตำแหน่งที่บางที่สุดของทั้ง 4 ชุดการทดลองอยู่ในบริเวณเดียวกันคือใกล้กับตำแหน่งที่ 4 (รูปที่ 14 (ข)) ซึ่งเป็นบริเวณส่วนโค้งของถ้วย รวมถึงการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วย



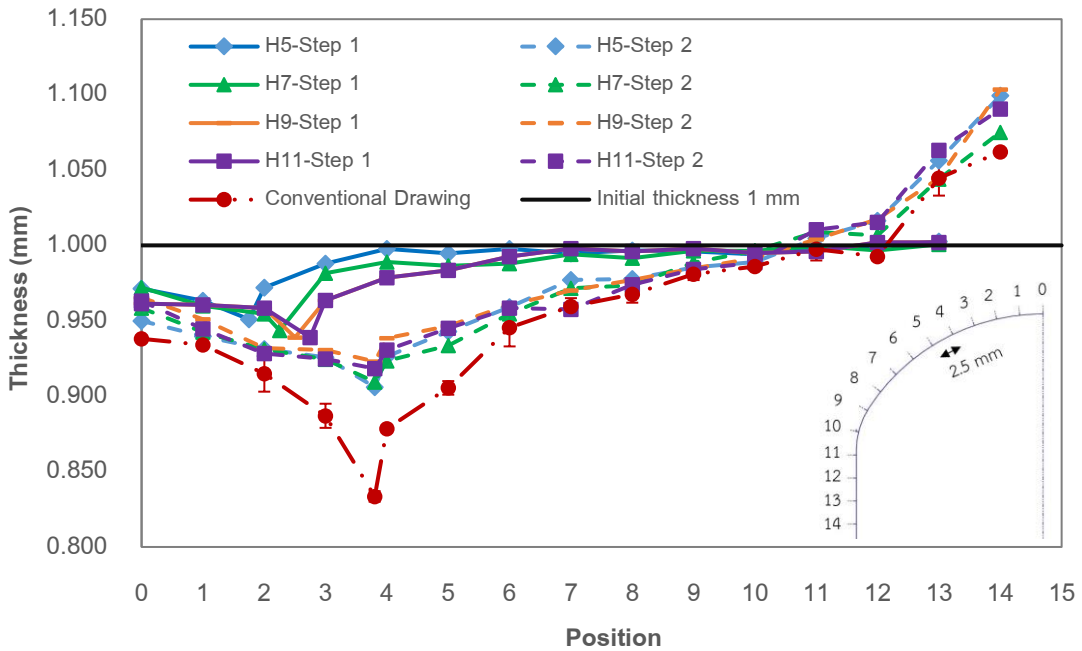
รูปที่ 13 ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพunch CR 1.35 ที่ DR 1.7



ก) บริเวณสัมผัสของแผ่นชิ้นงานและพunch และตำแหน่งที่บางที่สุดหลังขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1

ข) ตำแหน่งที่บางที่สุดหลังขึ้นรูปขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 14 ตำแหน่งการวัดความหนาจากการลากขึ้นรูปแบบสลับทาง ด้วยพunch CR 1.35 ที่ DR 1.7

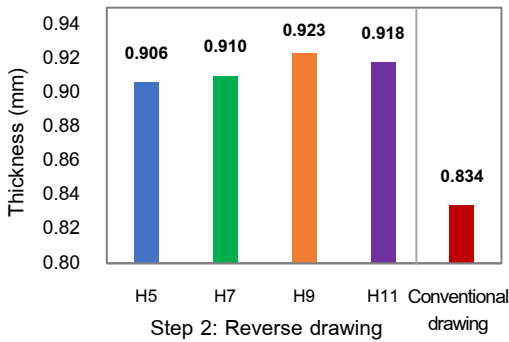


รูปที่ 15 การกระจายตัวของความหนาถั่วจากการลากขึ้นรูปสลับทางทั้ง 2 ขั้นตอนด้วยพันธ์ CR 1.35 และ DR 1.7

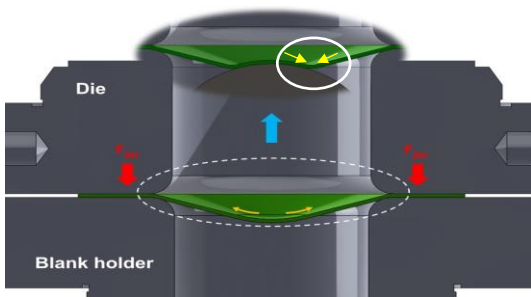
ค่าความหนาที่ตำแหน่งบางที่สุดของชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปสลับทาง ทั้ง 4 กรณี เทียบกับการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว แสดงในรูปที่ 16 โดยที่การลากขึ้นรูปสลับทางที่ความสูงในขั้นตอนแรก 9 มิลลิเมตร เกิดการบางลงน้อยที่สุด อยู่ที่ 0.923 มิลลิเมตร (บางลง 7.7%) เมื่อเทียบกับถั่วที่ขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวที่มีความหนาของถั่ว ณ ตำแหน่งที่บางที่สุด คือ 0.834 มิลลิเมตร (บางลง 16.6%)

กลไกการเปลี่ยนรูปทั้ง 2 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 17 การขึ้นรูปครั้งแรก เกิดการยืดตัวของแผ่นชิ้นงานไปบนผิวโค้งของพันธ์เกิดความเค้นแรงดึงในแนวรัศมี (Tensile Radial Stress) เมื่อทำการขึ้นรูปครั้งที่ 2 แบบ

สลับทิศทาง บริเวณแนวเส้นที่เกิดจากการขึ้นรูปสลับทิศทางทำให้ผิวในของโค้งเกิดความเค้นอัดในแนวรัศมี (Radial Compressive Stress) ดังแสดงกลไกในรูปที่ 17 เมื่อระยะการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ชิ้นงานบริเวณปีกถั่วไหลลงมาในช่องตาย เกิดความเค้นแรงอัดในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Compressive Stress) เข้ามารวมด้วย ความเค้นแรงอัดที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้ชิ้นงานบางส่วนหนาขึ้น และบางส่วนด้านกรบางลงของชิ้นงานได้ รวมถึงจากการขึ้นรูปในขั้นตอนแรก เกิดกลไกความเครียดแข็ง (Work Hardening) [10] ช่วยสนับสนุนให้ลดการบางลงตรงบริเวณโค้งร่วมด้วย



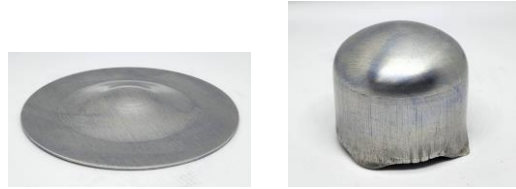
รูปที่ 16 ความหนาชิ้นงานตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยสำเร็จจากการลากขึ้นรูปสลับทางเทียบกับถ้วยที่ขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วยพันธ CR 1.35 ที่ DR 1.7



รูปที่ 17 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของการลากขึ้นรูปขั้นตอนแรกและขึ้นรูปสลับทางในขั้นตอนที่ 2

3.2.2 การลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพันธ CR 1.7 DR 2

ผลการทดสอบการขึ้นรูปสลับทาง โดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.7 ที่ DR 2 ใช้ F_{BH} 4 kN ทั้ง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ชิ้นงานถูกขึ้นรูปที่ความสูง 4 6 9 และ 11 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 34.01 51.02 76.53 และ 93.53% ของระยะความสูงส่วนโค้งของหัวพันธ (H) ตัวอย่างงานหลังผ่านการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1 ที่ระยะ 9 มิลลิเมตร และถ้วยสำเร็จแสดงในรูปที่ 18



ก) ขั้นตอนที่ 1 (H9)

ข) ขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 18 ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพันธ CR 1.7 ที่ DR 2

ผลการกระจายตัวความหนาของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทางทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 19 พบว่า หลังการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1 เมื่อขึ้นรูปที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ชิ้นงานเกิดการบางลงมากขึ้นและตำแหน่งที่บางลงขยับออกห่างจากยอดส่วนโค้งไปบริเวณผนังตรง หลังผ่านการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 2 ตำแหน่งที่บางที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด รวมถึงการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วย คือระหว่างตำแหน่งที่ 10 และ 11 ซึ่งเป็นบริเวณผนังตรงเหนือรัศมีกันถ้วย ค่าความหนาของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่บางที่สุดที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทาง ทั้ง 4 กรณี เทียบกับการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว แสดงในรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าเฉพาะถ้วยที่ใช้ความสูงในขั้นตอนแรกที่ 6 มิลลิเมตร หลังผ่านการขึ้นรูปแบบสลับทางแล้ว บางลงน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (หนา 0.893 มิลลิเมตร) อย่างไรก็ตามการลากขึ้นรูปสลับทางในกรณีนี้ช่วยลดการบางลงได้ไม่มากนัก

จากการขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนการขึ้นรูป DR 2 มีขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นที่ใหญ่กว่า DR 1.7 ดังนั้นเมื่อขึ้นรูปเป็นถ้วยสำเร็จมีส่วนสูงของถ้วยส่วนผนังตรงมากกว่า ช่วงแรกของการขึ้นรูปส่วนโค้งมีระยะการขึ้นรูปที่สั้น (การขึ้นรูปสลับทางในขั้นตอนแรกมีผลกับ

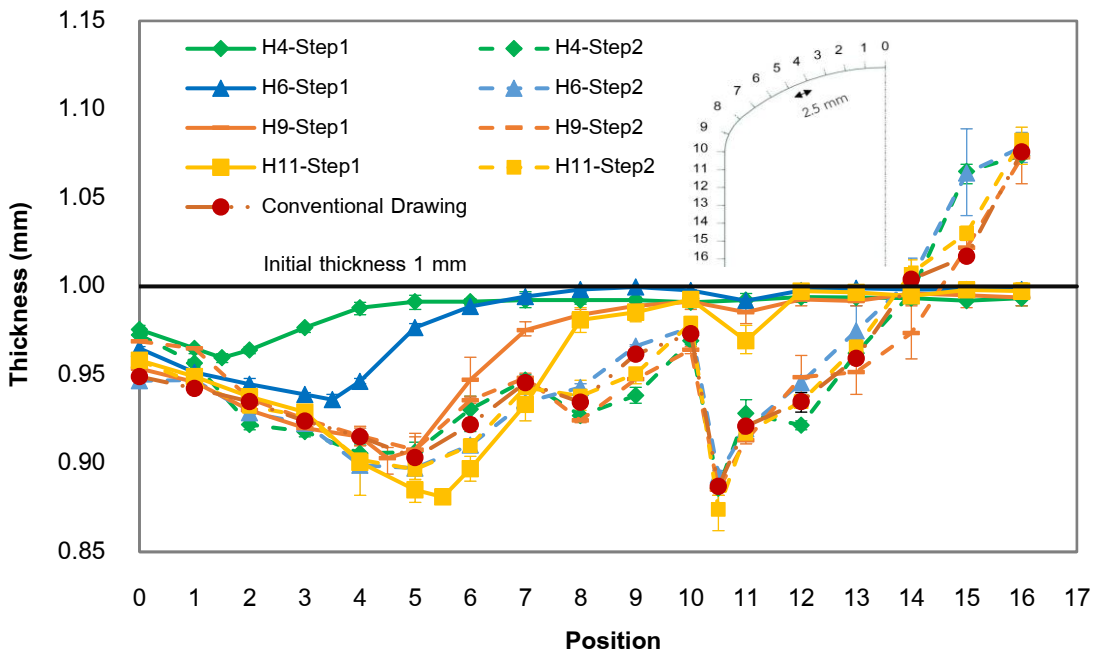


บทความวิจัย

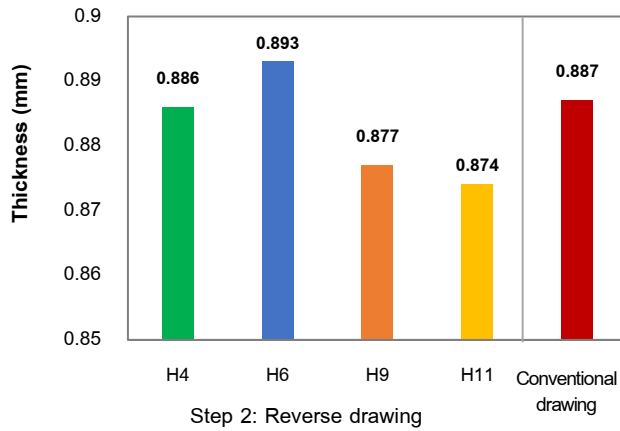
การเปลี่ยนรูปช่วงการขึ้นรูปส่วนโค้งกันด้วยเท่านั้น) ซึ่งการขึ้นรูปในส่วนผนังตรงเกิดการยืดตัวช่วงผนังบริเวณเหนือรัศมีพันธ์ [5] สร้างความเค้นแรงดึงสูงจึงทำให้เกิดการบางลงมากที่สุดที่ตำแหน่งระหว่าง 10-11 จึงเป็นข้อสังเกตที่การขึ้นรูปแบบสลัทางในกรณีขึ้นรูปด้วยพันธ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.7 ที่ DR 2 ไม่สามารถช่วยลดการบางลงของถ้วยสำเร็จได้มากนักเนื่องจากกลไกการขึ้นรูปส่วนใหญ่เป็นการขึ้นรูปในช่วงที่เป็นผนังตรงของถ้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีขึ้นรูปด้วยพันธ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.35 ที่ DR 1.7 ถ้วยสำเร็จมีส่วนที่เป็นผนังตรงสั้น การขึ้นรูปส่วนใหญ่เป็นการยืดตัว

ของโค้งกันด้วย ตำแหน่งที่บางที่สุดจึงอยู่บริเวณโค้ง (ตำแหน่งที่ 4 จากรูปที่ 15)

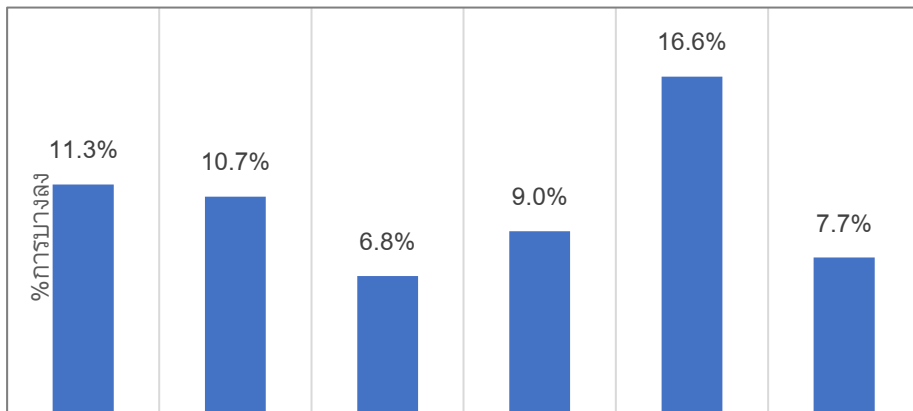
เปอร์เซ็นต์การบางลงของถ้วยทุกสภาวะที่ทำการทดสอบ (กรณีการขึ้นรูปแบบสลัทางนำเสนอสู่ชุดการทดลองที่ถ้วยบางลงน้อยที่สุด) และตำแหน่งที่บางลงมากที่สุด แสดงในรูปที่ 21 ที่ DR 2 ถ้วยสำเร็จมีส่วนสูงของถ้วยส่วนผนังตรงมาก การเปลี่ยนรูปช่วงผนังตรงรุนแรงกว่าจึงบางลงมากที่สุดบริเวณ 10-11 ส่วนที่ DR 1.7 ถ้วยสำเร็จมีส่วนผนังตรงที่สั้น ถ้วยที่โค้งมากกว่า (CR 1.35) จึงบางลงมากกว่าและการใช้เทคนิคการขึ้นรูปสลัทางช่วยลดการบางลงได้ในกรณีนี้



รูปที่ 19 การกระจายตัวของความหนาของการลากขึ้นรูปแบบปกติและแบบสลัทาง 2 ขั้นตอน ด้วยพันธ์ CR 1.7 และ DR 2



รูปที่ 20 ความหนาชิ้นงานตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยสำเร็จจากการลากขึ้นรูปสลับทางเทียบกับถ้วยที่ขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วยพันธ์ CR 1.7 ที่ DR 2



	DR 2		DR 1.7			
รูปแบบการลากขึ้นรูป	Conventional	Reverse	Conventional	Conventional	Conventional	Reverse
ตำแหน่งที่บางที่สุด	10-11	10-11	9	4	4	4

รูปที่ 21 เปอร์เซนต์การบางลงและตำแหน่งที่บางลงมากที่สุดของถ้วยสำเร็จที่สภาวะการขึ้นรูปต่างกัน



4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษางานลากขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกกันโค้ง โดยใช้พังก์ที่มีอัตราส่วนโค้งที่แตกต่างกัน คือ 10.35 1.7 และ 2 รวมถึงใช้เทคนิคการลากขึ้นรูปแบบสลัทาง ได้ข้อสรุปดังนี้

- ถ้วยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยพังก์ที่มีอัตราส่วนโค้งต่ำ CR 1.35 และ CR 1.7 จะเกิดการบางลงบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 3-4) ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยพังก์ที่มีอัตราส่วนโค้งสูง CR 2 (ส่วนผนังตรงของถ้วยสำเร็จยาวกว่า) ตำแหน่งการบางลงมากที่สุดเลื่อนเข้าใกล้ผนังตรงห่างออกจากศูนย์กลางของถ้วย (ตำแหน่ง 9) และการใช้พังก์ CR 2 เกิดการบางลงน้อยที่สุด โดยบางลง 6.8 % จากความหนาเริ่มต้น (เปรียบเทียบกับที่ DR เท่ากันที่ 1.7)

- การลากขึ้นรูปแบบสลัทาง ช่วยลดการบางลงในการลากขึ้นรูปด้วยกันโค้ง จาก 16.6% เหลือเพียง 7.7% จากความหนาเริ่มต้นในกรณีการขึ้นรูปด้วย CR 1.35 ที่ DR 1.7 ด้วยกลไกการเปลี่ยนทิศทางการสร้างความเค้นแรงอัดในแนวรัศมี และกลไกความเครียดแข็งจากการขึ้นรูปในขั้นตอนแรก

- กรณีถ้วยกันโค้งที่มีส่วนของผนังตรงยาว การขึ้นรูปช่วงแรกเป็นการขึ้นรูปส่วนโค้งกันถ้วย และการขึ้นรูปช่วงที่ 2 เป็นส่วนที่ขึ้นรูปบริเวณผนังตรง โดยการขึ้นรูปบริเวณผนังตรง เกิดความเค้นแรงดึงสูงที่บริเวณผนังตรงใกล้รัศมีพังก์ การขึ้นรูปแบบสลัทางช่วยลดการบางลงได้เฉพาะในการขึ้นรูปช่วงแรกจึงช่วยลดการบางลงในกรณี CR 1.35 ที่ DR 1.7 ซึ่งมีส่วนโค้งกันถ้วยมาก และส่วนผนังตรงที่สั้น และแทบไม่ส่งผลต่อกลไกการบางลงในกรณี CR 1.7 ที่ DR 2.0 ที่มีส่วนโค้งกันถ้วยน้อย และส่วนผนังตรงที่ยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทสหมิตรถึงแก๊ส จำกัด ที่สนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. H.I. Demirci, M. Yasar, K. Demiray and M.Karali, The theoretical and experiment investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL1050 material, *Materials and Design*, 29, 2008, 526-532.
2. A.I.O. Zaid, Deep drawing mechanism, parameters, defects and recent results: State of the art, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 146, 2016.
3. L. The-Thanh, B. Tien-Long, T. The-Van and N. Duc-Toan, A study on a deep drawing process with two shaping states for a fuel-filter cup using combined simulation and experiment, *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11(8) 1-11.
4. H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou and M. El Shazly, Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process, *American Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 1(2), 20-29.
5. S. Olguner and A.T. Bozdana, The effect of friction coefficient on punch load and thickness reduction in deep drawing process, *International Journal of Materials*, 2016, 3, 64-68.



6. M. Vahdati and M. Gerdooei, Numerical analysis of hot deep drawing process of the thick hemispherical head without the blank-holder, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74, 1775-1786.
7. Z. Zhang, Y. Xu and S.Yuan, Analysis of thickness variation of reverse deep drawing of preformed 5A06 aluminum alloy cup under different temperatures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86, 521-529.
8. Y. Liu, F. Li, C. Li and J. Xu, Effect of reverse pre-bulging on magnetic medium deep drawing formability of aluminum spherical bottom cylindrical parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103, 4649-4657.
9. Y.Y. Mu, F. Li, C. Li, Y.Q. Zang and J. Xu, Mechanism of pre-deformation effect on sheet deep-drawing forming under magnetic field condition using a magnetorheological fluid (MRF) medium, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(3-4), 863–875.
10. C. Zhang, W. Huang, C. Xi, P. Xue, B. Tian and J. Luo, Alternate deep drawing process for spherical parts in near equal-thickness wall, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111, 517-524.
11. J.W. Park, J. Kim and S.S. Kang, Development on a prediction model for experimental condition of flexibly reconfigurable roll forming process, *Metals*, 2019, 9, 869.
12. M. Murugesan, M. Sajjad and D.W. Jung, Experimental and numerical investigation of AA5052-H32 Al alloy with u-profile in cold roll forming, *Materials*, 2021, 14, 470.



การเปรียบเทียบระหว่างผลกระทบของภาพสีและสีขาวดำด้วยการเรียนรู้เชิงลึก: กรณีศึกษาการตรวจจับก้อนน้ำที่มีข้อบกพร่องในสายการผลิต

อรรณพ ปิยะสินธ์ชาติ¹ พิสิฐ พรพงศ์เตชวานิช² ภราดร บุญพอ³ ภัคศิษฐ์ ศรีอมรตระกูล³ และ เทอดพงษ์ แดงสี*

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล, คณะเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

² สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

³ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้ประสานงาน E-mail: therdpong.d@rmutp.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 กรกฎาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 8 พฤศจิกายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 26 พฤศจิกายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: ปัจจุบันผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ได้เริ่มมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการที่จะนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่มาช่วยในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิต ด้วยเหตุนี้ การศึกษาที่มุ่งเน้นการขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอนในการจำแนกตรวจจับก้อนน้ำที่มีข้อบกพร่องในสายการผลิตและเพื่อพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการคัดแยกชิ้นงานที่มีความบกพร่องออกจากสายการผลิต วิธีดำเนินการวิจัยเริ่มจากการเก็บรวบรวมภาพ การทำเครื่องหมายกำกับภาพ การประมวลผลภาพเบื้องต้น การแบ่งข้อมูล การเรียนรู้โมเดล การตรวจสอบความถูกต้อง และการประเมินโมเดลเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยใช้โมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอน 6 โมเดล ซึ่งจากผลการวิจัยที่ได้ พบว่า ในการประมวลผลภาพสี โมเดล EfficientNetB0 ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุด (100%) ส่วนภาพขาวดำ DenseNet121, InceptionV3, MobileNet และ Xception ให้ความแม่นยำ 100% เท่ากัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดโมเดลร่วมด้วย พบว่า MobileNet มีขนาดเล็กที่สุดคือ 38.70 MB โดยมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 8.824% จึงสรุปได้ว่าควรเลือกใช้โมเดล MobileNet ในการประมวลผลภาพขาวดำ เพื่อพัฒนาต่อยอดสำหรับสร้างสถานีงานอัตโนมัติในการคัดแยกชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องออกจากสายการผลิตก้อนน้ำ

คำสำคัญ: การเรียนรู้แบบถ่ายโอน; การเรียนรู้เชิงลึก; การคัดแยก; การประมวลผลภาพ; โมเดลการเรียนรู้



Comparison Between Impacts of Color and Gray Images by Deep Learning: A Case Study of Defective Water Tap Detection in Production Line

Annop Piyasinchart¹, Phisit Pornpongtechavanich², Paradorn Boonpoor³,
Pakkasit Sriamorntrakul³ and Therdpong Daengsi^{3*}

¹ Department of Digital Business Technology, Faculty of Technology Digital and Innovation,
Southeast Bangkok University

² Department of Information Technology, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus

³ Department of Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

* Corresponding author, E-mail: therdpong.d@rmutp.ac.th

Received: 4 July 2024; Revised: 8 November 2024; Accepted: 26 November 2024

Online Published: 21 December 2024

Abstract: Currently, entrepreneurs across various industrial sectors have begun studying the feasibility of implementing artificial intelligence, a modern technology, to help improve and develop their production processes. For this reason, this study was conducted with the objective of comparing the efficiency of transfer learning models in classifying and detecting defective water taps in the production line and to develop an automated system for sorting defective pieces from the production line. The research methodology begins with image collection, image labeling, preliminary image processing, data splitting, model training, validation, and model evaluation as the final step. Six transfer learning models were used. The research results show that for color image processing, the EfficientNetB0 model provides the highest accuracy (100%), while for grayscale images, DenseNet121, InceptionV3, MobileNet, and Xception all achieve 100% accuracy. However, MobileNet is the smallest at 38.70 MB, with an efficiency of 0.824% when considering model size. Therefore, it is concluded that the MobileNet model should be chosen for grayscale image processing to develop further an automated workstation for sorting defective parts from the water tap production line.

Keywords: Transfer learning; Deep learning; Classification; Image Processing; Learning Models



1. บทนำ

กึ่งอัตโนมัติ โดยทั่วไปผลิตจากโลหะผสมทองแดง เป็นอุปกรณ์ติดตั้งที่พบได้ในทุกครัวเรือนและอาคาร ไม่ว่าจะเป็นบ้านพักอาศัย สำนักงาน หรือสถานที่สาธารณะ ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันที่ใช้ตลอดทั้งวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตอนเช้าและก่อนเข้านอน ความจำเป็นนี้สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญอย่างยิ่งของอุตสาหกรรมกึ่งอัตโนมัติในระบบเศรษฐกิจและชีวิตความเป็นอยู่ของผู้คน อย่างไรก็ตาม การผลิตกึ่งอัตโนมัติแต่ละประเภทเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ประกอบด้วยขั้นตอนมากกว่าสิบขั้นตอน แต่ละขั้นตอนมีความสำคัญและต้องการความแม่นยำสูง ตัวอย่างขั้นตอนที่ต้องการความแม่นยำได้แก่ การตีขึ้นรูป การกลึง การเจาะ และการประกอบ แต่ละขั้นตอนต้องใช้ทักษะและเทคโนโลยีเฉพาะทางเป็นอย่างมากจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตสินค้าสำเร็จรูป มีความเป็นไปได้สูงที่ผลลัพธ์ของแต่ละขั้นตอน ที่เรียกว่างานระหว่างทำ (Work in Process: WIP) อาจมีผลิตภัณฑ์ที่บกพร่อง ซึ่งอาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความผิดพลาดของเครื่องจักร คุณภาพวัตถุดิบ หรือข้อผิดพลาดในการตั้งค่า ชิ้นงานที่บกพร่องเหล่านี้ต้องได้รับการระบุและคัดออกอย่างรวดเร็วและแม่นยำก่อนที่จะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายและลดการสูญเสียทรัพยากร ซึ่งหนึ่งในขั้นตอนที่น่าสนใจและมีความสำคัญในการผลิตกึ่งอัตโนมัติคือ การตีขึ้นรูปเป็นกระบวนการบีบขึ้นรูปโลหะให้ได้รูปทรงตามที่ได้มีการออกแบบไว้ ก่อนนำชิ้นงานที่ได้ไปเข้ากระบวนการตัดแต่งในขั้นตอนถัดไป ซึ่งจะเกิดการสูญเสียเวลาพลังงาน และทรัพยากรอื่น ๆ โดยไม่จำเป็น ส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิตของ

สายการผลิตทั้งหมด หากชิ้นงานที่มีตำหนิหรือบกพร่องถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการดังกล่าว การตรวจจับข้อบกพร่องก่อนที่จะดำเนินการสู่กระบวนการตัดแต่งจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดเหล่านี้ จึงเกิดเป็นแนวคิดที่จะนำเอาเทคโนโลยีที่ทันสมัยในปัจจุบันมาช่วยในการลดข้อผิดพลาด เช่น การประมวลผลภาพและปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพื่อตรวจจับข้อบกพร่องล่วงหน้าที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของอุปกรณ์ (Overall Equipment Effectiveness: OEE) เนื่องจากเทคโนโลยีเหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วแม่นยำ และต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง มากกว่าใช้มนุษย์ในการทำงาน

ด้วยเหตุนี้ การศึกษานี้ซึ่งพัฒนาต่อยอดจาก [1-2] ได้ถูกดำเนินการขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่ใช้จำแนกชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตที่เป็นขั้นที่ดีและที่มีตำหนิ โดยมีเป้าหมายคือ การหาโมเดลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปพัฒนาระบบในการทำงานด้วยการสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการจำแนกและคัดแยกชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องออกจากสายการผลิต (ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีมีการนำระบบอัตโนมัติที่ทำงานร่วมกับปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในงานดังกล่าว) ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการการผลิตถัดไป ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดของเสีย และปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยรวมในกระบวนการผลิต ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันของบริษัทในอนาคต อีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงาน และช่วยลดต้นทุนการผลิตของบริษัทในภาพรวมด้วย



2. การประมวลผลภาพ

การจัดการภาพดิจิทัลเพื่อสกัดข้อมูลสำคัญนั้น โดยทั่วไปเรียกว่า “การประมวลผลภาพ” หรือ “การประมวลผลภาพดิจิทัล” [1, 3] ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในยุคดิจิทัลปัจจุบัน โดยครอบคลุมตั้งแต่การปรับปรุงคุณภาพภาพไปจนถึงการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกจากภาพ ในศาสตร์ของข้อมูลในสาขานี้ จะมีการใช้กลยุทธ์ที่หลากหลายเพื่อจัดการกับความท้าทายเฉพาะด้าน เช่น การเกิดสัญญาณรบกวนและการบิดเบือนของสัญญาณ ซึ่งเป็นปัญหาพื้นฐานที่พบบ่อยในการทำงานกับภาพดิจิทัล ทำให้การประมวลผลสัญญาณที่เป็นเทคนิคหนึ่งในการประมวลผลภาพดิจิทัลได้พิสูจน์แล้วว่ามีความสำคัญอย่างมากในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย โดยวิธีการนี้ได้ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติในการวิเคราะห์และปรับแต่งสัญญาณดิจิทัล เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนและฟื้นฟูคุณภาพของภาพ นอกจากนี้ การประมวลผลภาพยังขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ไปสู่ด้านที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์กราฟิกและคอมพิวเตอร์วิชัน ซึ่งไม่เพียงแต่สกัดข้อมูลเท่านั้น แต่ยังสามารถสร้างภาพเสมือนจริงและทำความเข้าใจเนื้อหาของภาพในระดับที่ลึกซึ้งขึ้น [3] เทคโนโลยีเหล่านี้จะช่วยการวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขอบเขตของการแก้ไขภาพดิจิทัลสำหรับการประมวลผลภาพ สามารถแยกย่อยลงลึกได้อีกหลายวิธีการ [4] โดยแต่ละวิธีการจะมีความเชี่ยวชาญและเทคนิคเฉพาะทางของแต่ละวิธีการ ได้แก่ (1) การแบ่งส่วนภาพ (Segmentation) เป็นกระบวนการแยกภาพออกเป็นส่วน ๆ ตามลักษณะหรือวัตถุที่สนใจ ช่วยใน

การวิเคราะห์ภาพที่ซับซ้อน เช่น การแยกพื้นหลังออกจากวัตถุหลัก (2) การสกัดและคัดเลือกคุณลักษณะ (Feature Extraction and Selection) เป็นการระบุและเลือกคุณลักษณะเด่นของภาพที่สำคัญต่อการวิเคราะห์หรือจำแนกประเภท เช่น การหาขอบ สี หรือพื้นผิว (3) การบีบอัดภาพ (Compression) เป็นเทคนิคการลดขนาดของไฟล์ภาพโดยพยายามรักษาคุณภาพไว้ให้มากที่สุด ช่วยประหยัดพื้นที่จัดเก็บและทำให้การส่งข้อมูลเร็วขึ้น (4) การเพิ่มคุณภาพภาพ (Image Enhancement) เป็นการปรับปรุงคุณภาพของภาพให้ดีขึ้น เช่น การเพิ่มความคมชัด การปรับความสว่าง หรือการลดสัญญาณรบกวน และ (5) การบูรณะภาพ (Restoration) เป็นการฟื้นฟูภาพที่เสียหายหรือเสื่อมคุณภาพให้กลับมามีคุณภาพใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคนิคขั้นสูงอื่น ๆ เช่น การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) ในการประมวลผลภาพ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์และตีความภาพให้ซับซ้อนและแม่นยำ [5] ยิ่งขึ้น เทคโนโลยีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในหลากหลายอุตสาหกรรม ตั้งแต่การแพทย์ การเกษตร ไปจนถึงระบบรักษาความปลอดภัยและยานยนต์ไร้คนขับ

การพัฒนาอย่างต่อเนื่องในด้านการประมวลผลภาพไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพและการวิเคราะห์ข้อมูลเท่านั้น แต่ยังเปิดโอกาสใหม่ ๆ ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในชีวิตประจำวันและในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งจะส่งผลต่อการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมในอนาคตอย่างมีนัยสำคัญ



3. การเรียนรู้เชิงลึกและการเรียนรู้แบบถ่ายโอน

ปัญญาประดิษฐ์ เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ขั้นสูงและวิธีการที่ขับเคลื่อนด้วยตรรกะ เช่น การเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อทำความเข้าใจเหตุการณ์ได้ง่ายขึ้น ช่วยในการตัดสินใจ และทำให้การดำเนินการเป็นไปโดยอัตโนมัติ ปัญญาประดิษฐ์เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้สิ่งต่าง ๆ มีความสามารถมากยิ่งขึ้น โดยปัญญาประดิษฐ์ไม่เพียงแต่จำลองกระบวนการคิดของมนุษย์ แต่ยังสามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนมากมหาศาลหรือที่เรียกกันว่าบิ๊กเดต้า (Big Data) และทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเป็นเครื่องจักร [6] ซึ่งการเรียนรู้ของเครื่อง (ML) นั้นสามารถแยกย่อยลงไปได้อีกซึ่งที่เรียกว่าการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยทั้งการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกนี้เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากโครงสร้างของสมองมนุษย์ การเรียนรู้เชิงลึกเลียนแบบการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมอง โดยใช้ชั้นของโหนดในการประมวลผลหลายชั้นเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในระดับที่ซับซ้อนมากขึ้น

การเรียนรู้เชิงลึกใช้เทคนิคที่เรียกว่าการเรียนรู้แบบถ่ายโอน ซึ่งคุณลักษณะที่เรียนรู้จากการฝึกฝนเครือข่ายหลักบนชุดข้อมูลหนึ่งสามารถถ่ายโอนไปยังเครือข่ายรองที่ฝึกฝนบนชุดข้อมูลอื่นได้ [7] วิธีการนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการฝึกฝนสำหรับงานที่ต้องการได้ โดยใช้ประโยชน์จากความรู้ที่ได้รับจากการฝึกฝนเบื้องต้น ซึ่งโมเดลที่ผ่านการฝึกฝนมาก่อนนี้ เป็นที่นิยมในด้านคอมพิวเตอร์วิชันและการประมวลผลภาษาธรรมชาติ เนื่องจากประสิทธิภาพและความสามารถที่เหนือกว่าในงานที่คล้ายคลึงกัน โมเดล

เหล่านี้ได้รับการฝึกฝนบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่และหลากหลาย ทำให้มีความชำนาญในการเข้าใจพื้นฐานที่ดีเกี่ยวกับคุณลักษณะทั่วไปของภาพหรือภาษา

การเรียนรู้แบบถ่ายโอน (Transfer Learning) มีความโดดเด่นซึ่งวิธีการนี้จะมี การปรับปรุงประสิทธิภาพอยู่เสมอเมื่อเปรียบ เทียบกับโมเดลการฝึกฝนทั่ว ๆ ไป การใช้โมเดลที่ผ่านการฝึกฝนมาก่อน ทำให้ค่าเริ่มต้นที่ดีกว่า เสถียรกว่าก่อนนำไปใช้งาน เพราะได้เกิดการเรียนรู้ของเครื่องมาแล้วหลายครั้ง ความชันของเกรเดียนต์ที่ดีกว่า และประสิทธิภาพโดยรวมที่สูงกว่า นอกจากนี้ ยังช่วยประหยัดทรัพยากรการคำนวณและเวลา ทำให้สามารถพัฒนาโมเดล AI ที่ซับซ้อนได้เร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การพัฒนาเหล่านี้ในด้าน AI, ML, และ Deep Learning กำลังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม ตั้งแต่การวินิจฉัยทางการแพทย์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น ไปจนถึงระบบการขนส่งอัจฉริยะและการวิเคราะห์ข้อมูลทางธุรกิจขั้นสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตและการทำงานในอนาคต การเรียนรู้แบบอู้นัย การเรียนรู้แบบทรานสดักทิฟ และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน เป็นเกณฑ์การจำแนกบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้แบบถ่ายโอน ช่วยในการจัดหมวดหมู่สถานการณ์การเรียนรู้แบบถ่ายโอนเพิ่มเติม [8] โมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอน 6 แบบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วยโมเดลต่อไปนี้ [2]

- 1) ResNet50: ย่อมาจาก Residual Network ที่มี 50 ชั้น เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกที่มีเทคนิคพิเศษที่ช่วยให้เครือข่ายเข้าใจสิ่งที่เปลี่ยนแปลงจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่ง ทำให้ง่ายต่อการจับลักษณะและรูปแบบที่ซับซ้อน



- 2) DenseNet121: เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกที่ซับซ้อน แต่ได้รับการยอมรับอย่างสูงในด้านประสิทธิภาพในงานคอมพิวเตอร์วิชั่น ต่างจากเครือข่ายประสาทเทียมแบบดั้งเดิม โดยมีการเชื่อมต่อพิเศษที่ช่วยเพิ่มการนำคุณลักษณะกลับมาใช้ใหม่ ลดความเสี่ยงของการสูญเสียข้อมูลสำคัญเมื่อข้อมูลเคลื่อนที่ผ่านเครือข่าย
- 3) EfficientNetBo: เป็นโมเดลที่ออกแบบมาเพื่อสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความแม่นยำ โดยใช้เทคนิคการปรับขนาดที่เพิ่มประสิทธิภาพขนาดและความสามารถของโมเดล ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการปรับเพิ่มขนาดความลึก 20% ความกว้าง 10% และความละเอียด 15%
- 4) InceptionV3: เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกที่มีความแม่นยำในด้านคอมพิวเตอร์วิชั่น สถาปัตยกรรมของโมเดลนี้อยู่บนพื้นฐานของวิธีการสกัดคุณลักษณะด้วยเทคนิคพิเศษเพื่อรวบรวมคุณลักษณะในหลายสเกลและความละเอียด ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการรู้จำรูปแบบและวัตถุที่ซับซ้อนในภาพ
- 5) MobileNet: เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีบนอุปกรณ์มือถือ โมเดลนี้ใช้เทคนิคพิเศษที่ช่วยลดภาระการคำนวณและความซับซ้อนของโมเดล แต่ยังคงรักษาความแม่นยำและเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วและประสิทธิภาพบนอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด

- 6) Xception: ย่อมาจาก "Extreme Inception" เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกขั้นสูง ปรับปรุงจากสถาปัตยกรรม Inception โดยใช้ Convolutions แบบพิเศษที่ปรับมีการแต่ง จนทำให้ได้ความแม่นยำที่สูงขึ้นแต่สามารถลดการฝึกฝนลง

4. การทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการศึกษาที่น่าสนใจในอดีตหลายงานวิจัย อย่างไรก็ตามมีเพียงผลงานวิจัยก่อนหน้าบางส่วนเท่านั้น ดังที่แสดงในตารางที่ 1 [9-14] ที่เกี่ยวข้องกับคำสำคัญ เช่น การเรียนรู้เชิงลึก การจำแนกประเภท การเรียนรู้แบบถ่ายโอน และการผลิต แต่ก็ยังไม่ม้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุที่อยู่ระหว่างการผลิตที่คล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ก๊อมน้ำที่กล่าวถึงในการศึกษานี้ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ที่นำโมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอนที่มีคุณสมบัติโดดเด่น และนิยมใช้ใน [9-14] จำนวน 6 โมเดลมาประยุกต์กับงานการผลิตก๊อมน้ำซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปโลหะ ซึ่งช่วยลดเวลาในการฝึกฝนลงได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากได้ผ่านการฝึกฝนเบื้องต้นกับชุดข้อมูลขนาดใหญ่และหลากหลายมาแล้ว ทำให้มีค่าเริ่มต้นที่ดีกว่าและเสถียรกว่าโมเดลทั่วไป นอกจากนี้ โมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอนทั้ง 6 โมเดลที่นำมาประยุกต์กับการศึกษานี้เป็นโมเดลที่มีสมรรถนะที่ดี โดยถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และถูกนำไปอ้างอิงอย่างกว้างขวาง คณะผู้วิจัยจึงเลือกทั้ง 6 โมเดลมาใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้าที่ไม่มีบทความใดศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 6 โมเดลกับข้อมูลภาพที่เป็นข้อมูลชุดเดียวกัน



ตารางที่ 1 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอนทั้ง 6 โมเดล

Ref.	Learning Model						Major Findings
	ResNet	DenseNet	EfficientNet	Inception	MobileNet	Xception	
[9]	✓	-	✓	-	-	-	บทความนี้ได้นำเสนอ GarbageNet เพื่อแก้ไขโมเดลการรู้จำเชิงลึกที่มีข้อจำกัดทางด้านการขาดข้อมูลที่เพียงพอต้นทุนสูงและคุณภาพข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าโมเดล GarbageNet มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในแง่ของความแม่นยำ เมื่อเทียบกับโมเดลที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน
[10]	✓	✓	-	✓	✓	-	บทความนี้เสนอระบบการจำแนกขยะอัจฉริยะที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึกและระบบ Linux ผังตัว โดยใช้ Raspberry Pi 4B เป็นฮาร์ดแวร์หลักและโมเดล GNet สำหรับการจำแนกขยะ พร้อมพัฒนา GUI ด้วยภาษา Python และ QT ซึ่งระบบสามารถจำแนกขยะได้ด้วยความแม่นยำ 92.62% ที่ 0.63 วินาที
[11]	✓	✓	-	✓	-	✓	บทความนี้ทำการศึกษาเสนอระบบการจำแนกขวดพลาสติกโปร่งใสอัตโนมัติเพื่อช่วยในการรีไซเคิลขวดพลาสติกปกป้องสิ่งแวดล้อมและลดมลพิษโดยใช้เทคนิค Transfer Learning และ Ensemble Learning ซึ่งสามารถจำแนกขวดพลาสติกได้ด้วยความแม่นยำถึง 99.76%
[12]	✓	-	-	-	✓	✓	งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อจำแนกอาหารไทย 6 ประเภทจากชุดข้อมูลที่ไม่สมดุล โดยใช้วิธีการ Augmentation ที่ต่างกัน ก่อนทำการฝึกฝนโมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอน (ResNet50, MobileNet, InceptionV3) ผลลัพธ์พบว่าวิธีการ Hybrid Sampling ช่วยเพิ่มความแม่นยำของโมเดล ResNet50 จาก 94% เป็น 96%
[13]	✓	-	-	✓	✓	-	งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจจับข้อบกพร่องในการหล่อโลหะโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกโดยใช้โมเดล EfficientNet แบบแยกความลึกเพื่อลดการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ วิธีการนี้สามารถทำงานได้ดีแม้ในสภาวะที่มีกำลังประมวลผลจำกัด
[14]	✓	-	✓	-	-	-	งานวิจัยนี้เสนอการใช้การเรียนรู้แบบถ่ายโอนในการจำแนกโรคกล้วย โดยทดลองใช้โมเดลหลายรูปแบบ เช่น EfficientNet, AlexNet, VGG และ ResNet เพื่อจำแนกโรคกล้วย 25 ชนิด ผลการทดลองพบว่า VGG-19 LeoNet ที่ใช้ตัวปรับ SGD มีประสิทธิภาพสูงสุดในการจำแนกโรค



5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ ซึ่งก็คือ การศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) การเรียกคืน (Recall) และค่า F1-score ที่ได้จากโมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอนแต่ละโมเดลที่ถูกคัดเลือกมาศึกษา ซึ่งเลือกมาจากการพิจารณาคุณสมบัติ และจากการยอมรับและความนิยมใช้งานวิจัยก่อนหน้า [9-14] เพื่อพิจารณาหาโมเดลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่สามารถตรวจจับและคัดแยกชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องในระหว่างกระบวนการผลิตในอนาคต วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาวิธีการที่ดำเนินการใน [2] มาประยุกต์ใช้ โดยขั้นตอนในการดำเนินการประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการได้ดังนี้

5.1 การเก็บรวบรวมภาพ: มุ่งเน้นไปที่ก๊อกรุ่นยอดนิยมหรือรุ่นขายดี (ดังรูปที่ 1) ที่ผลิตจากโรงงานกรณีศึกษานี้ โดยบันทึกภาพทั้งชิ้นส่วนที่ใช้งานได้ และชิ้นส่วนที่มีข้อบกพร่อง การศึกษานี้ครอบคลุมภาพก๊อกรุ่นที่มีการผลิตมากที่สุด ซึ่งประกอบด้วย 1) ภาพชิ้นงานดีด้านที่ระบุตราเครื่องหมายการค้า จำนวน 403 ภาพ 2) ภาพชิ้นงานดีด้านที่ระบุขนาด จำนวน 410 ภาพ 3) ภาพชิ้นงานเสียหรือมีตำหนิด้านที่ระบุตราเครื่องหมายการค้า จำนวน 404 ภาพ และ 4) ภาพชิ้นงานเสียหรือมีตำหนิด้านที่ระบุขนาด จำนวน 406 ภาพ

5.2 การทำเครื่องหมายกำกับภาพ: ภาพของชิ้นส่วนที่ดีและชิ้นส่วนที่มีตำหนิเป็นข้อมูลดิบของ 4 กลุ่มภาพหรือ คลาส (Class) ก่อนที่จะนำไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไป

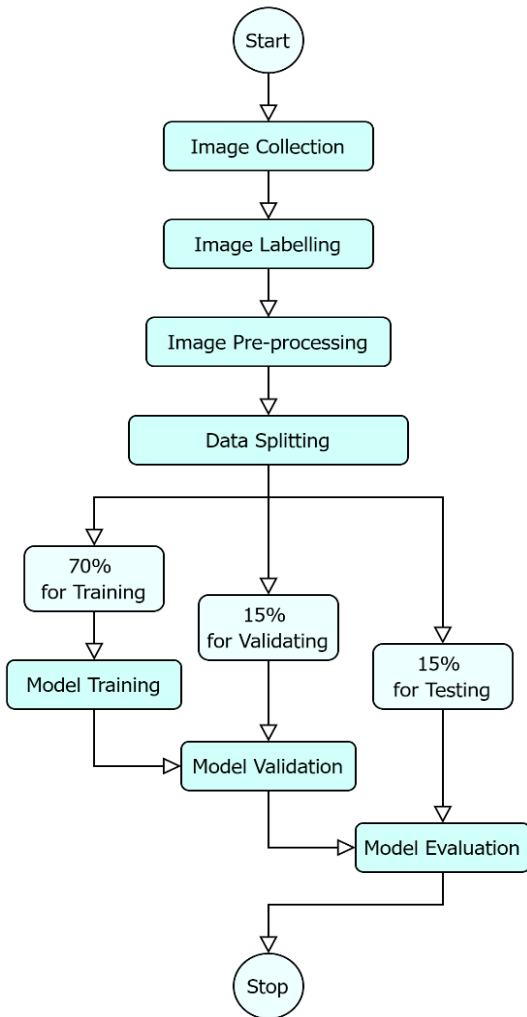
5.3 การประมวลผลภาพเบื้องต้น: ในขั้นตอนนี้ใช้เทคนิคการครอบตัดและการแบ่งส่วนเพื่อทำให้ภาพที่ได้มามีมาตรฐานเดียวกัน โดยให้ทุกภาพมีอัตราส่วน 1:1 การครอบตัดแบบสม่ำเสมอนี้ช่วยแก้ไขความไม่สมมาตรเริ่มต้นโดยครอบคลุมทั้งส่วนบนและส่วนล่าง ซึ่งในขั้นตอนนี้ มีการจัดทำชุดข้อมูลภาพที่เป็นภาพสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับต้นฉบับ และนำภาพเดียวกันจัดทำเป็นภาพขาวดำ ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4

5.4 การแบ่งข้อมูล: ในขั้นตอนนี้ ชุดข้อมูลที่เพิ่มขึ้นถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนย่อย ประกอบด้วย ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (70%) ชุดข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง (15%) และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (15%) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เป็นที่ยอมรับและใช้อย่างกว้างขวางในงานวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ [1-2] โดยชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบถูกสำรองไว้สำหรับการประเมินโมเดลในขั้นตอนนี้สุดท้าย

5.5 การเรียนรู้โมเดล: ในขั้นตอนนี้ ใช้โมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอน 6 โมเดลตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4 โดยแต่ละโมเดลผ่านการฝึกฝนโดยใช้ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (70%) ที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อ 5.4



รูปที่ 1 ก๊อกรุ่นยอดนิยมที่นิยมติดตั้งในอาคาร



รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการทำงาน

5.6 การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล: โมเดลที่ผ่านการฝึกฝนทั้งหมดได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อยืนยันความแม่นยำ โดยใช้ชุดข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องซึ่งประกอบด้วย 15% ของข้อมูลในขั้นตอนนี้

5.7 การประเมินโมเดล: ขั้นตอนสุดท้ายนี้เกี่ยวข้องกับ การทดสอบโมเดลทั้งหมดโดยใช้ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (15%) เพื่อให้ได้ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) การเรียกคืน (Recall) และ ค่า F1-score โดยเมตริกเหล่านี้คำนวณโดยใช้สมการที่ให้ไว้ใน (1)-(4) [12]

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนสุดท้าย ผลลัพธ์จากการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลและการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยค่าความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) การเรียกคืน (Recall) และค่า F1-score ได้ถูกรวบรวมและนำเสนอหัวข้อถัดไป

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

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

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

$$F1 - score = \frac{TP}{2TP + FP + FN} \quad (4)$$

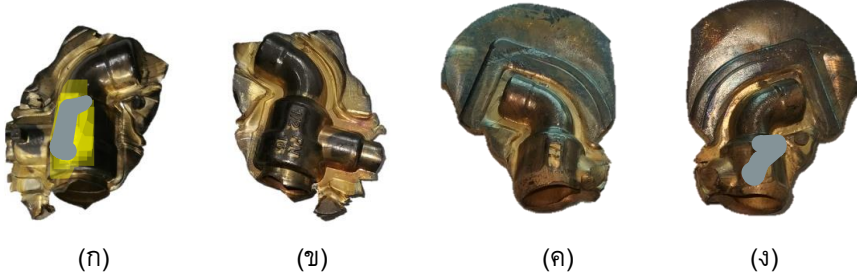
เมื่อ

TN (True Negative) = สิ่งที่ทำนายว่าไม่จริง และ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ ไม่จริง

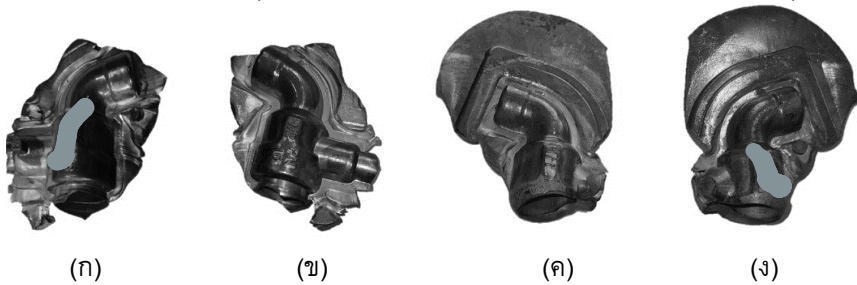
FP (False Positive) = สิ่งที่ทำนายว่าจริง แต่สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ ไม่จริง

FN (False Negative) = สิ่งที่ทำนายว่าไม่จริง แต่ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ จริง

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนสุดท้าย ผลลัพธ์จากการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลและการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยค่าความแม่นยำ ความเที่ยง การเรียกคืน และค่า F1-score ได้ถูกรวบรวมและนำเสนอหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3 ภาพชิ้นงานที่เป็นภาพสี (ก) ชิ้นงานดีด้านที่ระบุตราเครื่องหมายการค้า (ข) ชิ้นงานดีด้านที่ระบุขนาด ค) ชิ้นงานเสียด้านที่ระบุตราเครื่องหมายการค้า และ ง) ชิ้นงานเสียด้านที่ระบุขนาด



รูปที่ 4 ภาพชิ้นงานที่เป็นภาพขาวดำ (ก) ชิ้นงานดีด้านที่ระบุตราเครื่องหมายการค้า (ข) ชิ้นงานดีด้านที่ระบุขนาด ค) ชิ้นงานเสียด้านที่ระบุตราเครื่องหมายการค้า และ ง) ชิ้นงานเสียด้านที่ระบุขนาด

6. ผลการดำเนินงานวิจัย

หลังจากดำเนินการตามกระบวนการที่นำเสนอในรูปที่ 2 ทุกโมเดลได้รับการฝึกฝนโดยใช้ภาพจาก 4 กลุ่มภาพของก๊อคน้ำที่อยู่ระหว่างกระบวนการผลิต จากนั้น จึงทำการทดสอบและหาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) ความเรียกคืน (Recall) และค่า F1-score ของแต่ละโมเดลภายใต้แต่ละเงื่อนไขที่กำหนด จากนั้นผลลัพธ์จากการทดสอบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าความแม่นยำ ความเที่ยง การเรียกคืน และค่า F1-score จึงได้ถูกนำเสนอไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของโมเดลที่ประมวลผลภาพสีพบว่าโมเดลที่มีค่าความแม่นยำสูงที่สุดคือ

EfficientNetB0 คือ มีค่า 100% และในส่วนของโมเดลที่ประมวลผลภาพ ขาวดำพบว่าโมเดลที่มีค่าความแม่นยำมากที่สุดได้แก่ DenseNet121 InceptionV3 MobileNet และ Xception โดยมีค่าความแม่นยำ 100 % เท่ากันทั้ง 4 โมเดล และเมื่อพิจารณาค่าความเที่ยง ค่าการเรียกคืน และค่า F1-Score พบว่าได้ผลการประมวลผลที่สอดคล้องกันกับค่าความแม่นยำจึงอาจกล่าวได้ว่า ทั้ง 4 โมเดล มีสมรรถนะเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่สามารถตรวจจับและคัดแยกชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องในระหว่างกระบวนการผลิตก๊อคน้ำดังกล่าวได้ในอนาคต

อย่างไรก็ตาม สำหรับขนาดของโมเดล พบว่า MobileNet มีขนาดของโมเดลที่เล็กที่สุด คือมีขนาดเป็น



บทความวิจัย

38.70 MB รองลงมาคือ EfficientNetB0 ที่มีขนาดเป็น 48.80 MB และอันดับที่ 3 คือ DenseNet121 ซึ่งมีขนาดโมเดล 83.10 MB ดังแสดงในตารางที่ 2 แต่เนื่องจาก EfficientNetB0 ไม่เหมาะกับการประมวลผลภาพवाद้า ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเฉพาะ DenseNet121 และ MobileNet เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อคำนวณด้วยจากสมการที่ (5) ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการประมวลผลภาพवाद้าเทียบกับการประมวลผลภาพสีของโมเดล MobileNet มีค่าประมาณ 0.824% มีค่าสูงกว่าของโมเดล DenseNet121 ซึ่งมีค่าประมาณ 0.410% เล็กน้อย

$$Efficiency = \left(\frac{Accuracy_{Gray} - Accuracy_{Color}}{Accuracy_{Color}} \right) \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ Efficiency = ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น

$Accuracy_{Gray}$ = ความแม่นยำเมื่อประมวลผลภาพवाद้า

$Accuracy_{Color}$ = ความแม่นยำเมื่อประมวลผลภาพสี

7. การวิเคราะห์และอภิปรายผล

เมื่อทำการฝึกฝนและทดสอบโมเดลด้วยชุดข้อมูลที่เป็นภาพสี แล้วหาค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยง ค่าการเรียกคืน และค่า F1-score พบว่าโมเดล EfficientNetB0 ให้ผลการทดสอบทั้ง 4 ด้านสูงสุด 100% เท่ากัน อย่างไรก็ตาม เมื่อฝึกฝนและทดสอบด้วยชุดข้อมูลที่เป็นภาพवाद้า กลับพบว่า ค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยง ค่าการเรียกคืน และค่า F1-score ลดลงเหลือประมาณ 98.7% -98.8% แสดงว่าโมเดล EfficientNetB0 มีแนวโน้มที่จะทำงานกับภาพสีซึ่งมีข้อมูลสำหรับการฝึกฝนปริมาณมากเนื่องจากเป็น

ข้อมูล 3 มิติที่เกิดจากการผสมของแสงสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) โดยแต่ละสีมีค่าระหว่าง 0-255 ต่างจากภาพवाद้ามีข้อมูลสำหรับการฝึกฝนน้อย เนื่องจากเป็นข้อมูล 1 มิติ โดย 0=สีดำ และ 255=สีขาว)

นอกจากนี้ยังพบว่า EfficientNetB0 ยังแตกต่างจากโมเดล DenseNet121, InceptionV3, MobileNet และ Xception ที่ฝึกฝนและทดสอบด้วยชุดข้อมูลที่เป็นภาพสีพบว่า ค่าความแม่นยำประมาณ 99.6%, 99.6%, 99.2% และ 99.6% ตามลำดับ แต่เมื่อทำการฝึกฝนและทดสอบโมเดลด้วยชุดข้อมูลที่เป็นภาพवाद้าแล้วหาค่าความแม่นยำ พบว่ามีสมรรถนะดีขึ้นโดยมีค่าความเที่ยง ค่าการเรียกคืน และค่า F1-score เพิ่มขึ้นเป็น 100% ทั้ง 4 โมเดล ทั้งนี้สันนิษฐานว่า โมเดลทั้งสี่นี้มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อต้องประมวลผลกับข้อมูลภาพสีแบบ RGB ที่เป็นข้อมูล 3 มิติที่ซับซ้อนกว่าภาพवाद้าवाद้าที่ เป็นข้อมูล 1 มิติ จึงสามารถนำโมเดลเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในระบบที่สามารถตรวจจับและคัดแยกชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องในระหว่างกระบวนการผลิตก็กน้าดังกล่าวได้ในอนาคตได้ทั้ง 4 โมเดลเนื่องจากมีสมรรถนะสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อประมวลผลกับภาพवाद้า

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดโมเดลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อ จะเห็นได้ว่า ด้วยค่าความแม่นยำ ความเที่ยง การเรียกคืน และค่า F1-score ที่สูงสุด 100% เท่ากัน โมเดล MobileNet มีขนาดโมเดลเพียง 38.7 MB ซึ่งเล็กกว่าของ DenseNet121, Xception และ InceptionV3 ที่มีขนาดของโมเดลประมาณ 83.1 MB, 242.0 MB และ 253.4 MB ตามลำดับโมเดล MobileNet ที่มีขนาดเล็กกว่าจึงย่อมใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อยกว่า และมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการ



ประมวลผลน้อยกว่า ดังนั้น MobileNet จึงเป็นโมเดลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบตรวจจับและคัดแยกชิ้นงาน ภายใต้เงื่อนไขและบริบทของอุตสาหกรรมกักน้ำตาลในการศึกษา

นอกจากนี้ เมื่อเทียบประสิทธิภาพของ MobileNet กับงานวิจัยก่อนหน้าที่ศึกษาในบริบทที่แตกต่างกัน

พบว่า ค่าความแม่นยำจากการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าการศึกษาเหล่านั้น [10, 12] ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากจำนวนกลุ่มภาพหรือ คลาส ในการศึกษาที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันจำนวนเพียง 4 กลุ่มภาพ ซึ่งแตกต่างจาก [12] ที่มีความหลากหลายของภาพมากกว่า ความแม่นยำจากการศึกษาดังกล่าวจึงน้อยกว่า

ตารางที่ 2 ผลการทดลองของแต่ละโมเดล

Model	Image Color	Test Result				Model Size (MB)
		Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	
ResNet50	Color	99.180%	99.194%	99.153%	99.159%	273.40
	Gray	99.590%	99.590%	99.576%	99.580%	
DenseNet121	Color	99.590%	99.590%	99.576%	99.580%	83.10
	Gray	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	
EfficientNetB0	Color	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	48.80
	Gray	98.771%	98.763%	98.736%	98.740%	
InceptionV3	Color	99.590%	99.590%	99.576%	99.580%	253.40
	Gray	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	
MobileNet	Color	99.180%	99.194%	99.153%	99.160%	38.70
	Gray	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	
Xception	Color	99.590%	99.590%	99.576%	99.580%	242.00
	Gray	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพโมเดล

Model	Image Color	Accuracy	Efficiency
DenseNet121	Color	99.592%	0.410%
	Gray	100.000%	
MobileNet	Color	99.183%	0.824%
	Gray	100.000%	



8. สรุปผล

หากพิจารณาถึงการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นประเด็นสำคัญ ผลจากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ควรเลือกใช้การประมวลผลภาพขาวดำ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดหากล้องและเลือกใช้โมเดล MobileNet เพื่อพัฒนาต่อยอด สำหรับการสร้างสถานีงานอัตโนมัติที่ใช้สำหรับตรวจจับ และคัดแยกชิ้นงานที่บกพร่องหรือไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดออกจากสายการผลิต ยกตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมก๊อกร้า ที่ได้การทดสอบในครั้งนี้ รวมถึงอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพื่อช่วยในการลด ข้อผิดพลาดในการทำงานและยังช่วยในการประหยัดต้นทุนจากการผลิต เพราะชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์จะถูกคัดแยกออกก่อนสู่กระบวนการผลิตในสถานีต่อไป

9. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษานี้ มีประเด็นที่เป็นข้อเสนอแนะและประเด็นเกี่ยวกับข้อจำกัด ดังนี้

1) ในการศึกษาครั้งนี้ แม้จะสามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้แบบถ่ายโอนทั้ง 6 โมเดล จนสามารถสรุปได้ว่า MobileNet เป็นโมเดลที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อใช้งานในสายการผลิตมากที่สุด แต่การศึกษานี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อหาว่าเหตุใดโมเดลต่าง ๆ มีความแม่นยำแตกต่างกัน เนื่องจากอยู่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษานี้ อย่างไรก็ตาม ประเด็นนี้ถือเป็นประเด็นที่มีความน่าสนใจ จึงควรมีการศึกษาวិเคราะห์เพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

2) แนวคิดนี้สามารถนำไปขยายผลกับเครื่องจักรในสายการผลิตได้ โดยอาจประยุกต์ใช้ร่วมกับแขนกลที่ทำหน้าที่ตรวจจับและหยิบจับชิ้นงานงานที่บกพร่องหรือมีตำหนิที่ลำเลียงไปบนสายพานลำเลียงออก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมหรือ OEE ของสายการผลิต ก๊อกร้าในโรงงาน อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพิสูจน์ประเด็นนี้ต่อไปในโครงการวิจัยที่คาดว่าจะดำเนินการในอนาคตอันใกล้

3) หากมีการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานจริงในอุตสาหกรรม อาจพบข้อจำกัดเรื่องความสว่างของแสงและการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในบริเวณสถานีงาน ซึ่งอาจทำให้ได้ภาพถ่ายชิ้นงานที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของโมเดลได้

4) แม้ว่าผลจากการศึกษานี้จะชี้ว่าโมเดล Mobilenet จะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจจับก๊อกร้าที่มีข้อบกพร่องในสายการผลิตจากการประมวลผลภาพขาวดำ เนื่องจากมีค่าความแม่นยำ 100% และมีขนาดของโมเดลเล็กที่สุด แต่ความแม่นยำอาจลดลงหากดำเนินการกับชุดข้อมูลภาพอื่นจากงานลักษณะอื่นหรืออุตสาหกรรมอื่น จึงควรศึกษาและทดสอบกับชุดข้อมูลใหม่ทุกครั้งก่อนนำไปใช้งานในบริบทอื่น นอกจากนี้โมเดลอื่นๆ ก็ควรได้รับการพิจารณาใหม่ด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และบริษัท อาซาฮีไทย อัลลอย จำกัด



8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Piyasinchart, P. Boonpoor, T. Thammachai and T. Daengsi, Detection of defects in work-in-process products using deep learning: A case of a water tap production line, 6th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Proceeding, 2023, 369-372.
- [2] A. Piyasinchart, P. Sirawongphatsara, P. Boonpoor, N. Chantasen and T. Daengsi, Improving water tap production lines: A proof of concept for deep learning-based defect detection system development, *Journal of Applied Information Technology*, 2024, 10(1), 8-21.
- [3] T. Daengsi, K. Cheevanichapan, U. Soteyome and T. Thimthong, Irrigation management: A pilot study for automatic water level measurement and report system development using machine learning associated with modified images, 5th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Proceeding, 2022, 543-547.
- [4] K.G. Dhal, A. Das, J. Gálvez, S. Ray, and S. Das, An overview on nature-inspired optimization algorithms and their possible application in image processing domain, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 30, 2020, 614–631.
- [5] T. Benjawilaikul and T. Kaewwichit, Classification of carbon steels by automated spark test technique using feature extraction based on machine learning image processing, *The Journal of Industrial Technology*, 2022, 18(2), 203-216.
- [6] C. Rattanapoka, P. Jannet and T. Moonpanyo, A service system for estimation of gender and assessing the person's age from facial images by deep learning-based method, *The Journal of Industrial Technology*, 2022, 18(2), 165-179.
- [7] M.Y. Ansari and M. Qaraqe, MEFood: A large-scale representative benchmark of quotidian foods for the middle east, *IEEE Access*, 2023, 11, 4589-4601.
- [8] F. Zhuang, Z. Qi, K. Duan, D. Xi, Y. Zhu and H. Zhu, A Comprehensive Survey on Transfer Learning, *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(1), 43-76.
- [9] J. Yang, Z. Zeng, K. Wang, H. Zou, and L. Xie, GarbageNet: A Unified learning framework for robust garbage classification, *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2021, 2(4), 372–380.
- [10] B. Fu, S. Li, J. Wei, Q. Li, Q. Wang and J. Tu, A novel intelligent garbage classification system based on deep learning and an embedded linux system, *IEEE Access*, 2021, 9, 131134–131146.



- [11] S. Chatterjee, D. Hazra, and Y.-C. Byun, IncepX-ensemble: performance enhancement based on data augmentation and hybrid learning for recycling transparent PET bottles, *IEEE Access*, 2022, 10, 52280–52293.
- [12] P. Boonpoor, P. Wuttidittachotti, K. Puangnak, T. Thimthong and T. Daengsi, Accuracy improvement of transfer learning using hybrid approach: a case study of imbalanced Thai food image classification, 2023 International Conference on Artificial Intelligence, Blockchain, Cloud Computing, and Data Analytics (ICoABCD), Proceeding, 2023, 48-52,
- [13] R. R. Subramanian, M. Lakshmi, M. Lavanya, M. K. G. Roy and M. C. Manvitha, Detecting defects in manufacturing process using deep learning models, 4th International Conference on Data Engineering and Communication Systems (ICDECS), Proceeding, 2024, 1-6.
- [14] M. I. Faiz Mohd Derafi, S. F. Abdul Razak and M. S. Sayeed, Banana disease classification using transfer learning, *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, Proceeding, 2024, 1-7.
- [15] T. Daengsi, P. Boonpoor, K. Puangnak, P. Pholchanngam, P. Wuttidittachotti and P. Unahalekhaka, Comparison of impacts from color-based and geometric augmentations for deep learning: A case of Thai food images, *IEEE 14th Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE)*, Proceeding, 2024, 1-5.



อีวิริสติกสองเฟสสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งของรถบรรทุกสินค้าที่มีข้อจำกัดความจุ

กนกพร บุญจวบบุตร จิรวัดณ์ โลพันธ์ และ ประชัญ บุญแซม*

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: prat.b@nrru.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 เมษายน 2024; วันที่ทบทวนบทความ: 4 พฤศจิกายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 26 พฤศจิกายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: การขนส่งสินค้ามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจอย่างมาก ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (VRP) ถือเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเพื่อนำมาแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่ทำให้ได้ระยะทางสั้นที่สุด งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีอีวิริสติก (Heuristic) สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีข้อจำกัดด้านความจุของยานพาหนะ (CVRP) โดยประยุกต์ใช้การจัดเส้นทางด้วยวิธีจัดกลุ่มก่อนและจัดเส้นทางทีหลัง (CFRS) จากโจทย์ปัญหา (Instance) โดยมีขั้นตอนการหาผลลัพธ์ 2 เฟส โดยเฟสแรกคือ การจัดกลุ่ม (Clustering) จำนวน n กลุ่มย่อยเท่ากับจำนวนรถขนส่งที่ต้องใช้ขนส่ง ซึ่งแบ่งเป็น 3 วิธีได้แก่ 1) การจัดกลุ่มย่อยโดยใช้จุดศูนย์กลางแต่ละกลุ่มย่อย (Seed Point) จากระยะทางที่ไกลสุดจากจุดกระจายสินค้า 2) การจัดกลุ่มย่อยโดยใช้จุดศูนย์กลางแต่ละกลุ่มย่อยจากระยะทางที่ใกล้สุดจากจุดกระจายสินค้า และ 3) การจัดกลุ่มย่อยโดยใช้จุดศูนย์กลางแต่ละกลุ่มย่อยจากจุดที่มีความต้องการสินค้ามากที่สุด ส่วนเฟสสองคือการหาลำดับการเดินทางโดยใช้วิธีในการหาผลลัพธ์ด้วยปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบวิธีการจัดเส้นทางด้วยวิธีจัดกลุ่มก่อนและจัดเส้นทางทีหลังที่มีการดำเนินการเฟสแรกที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 วิธี พบว่าการจัดเส้นทางขนส่งที่มีข้อจำกัดความจุด้วยวิธีจัดกลุ่มก่อนและจัดเส้นทางทีหลัง โดยการใช้วิธีจัดกลุ่มจากจุดที่มีความต้องการสินค้ามากที่สุดในการจัดกลุ่มย่อยแต่ละกลุ่มย่อยแล้วจัดลำดับเส้นทางในการวิ่งรถบรรทุกสินค้าด้วยวิธี TSP ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการจัดกลุ่มแบบอื่น คิดเป็นร้อยละ 60 จากโจทย์ที่ทดสอบทั้งหมด

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางขนส่ง; ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย; อีวิริสติก; จัดกลุ่มก่อนจัดเส้นทางทีหลัง



Two-Phase Heuristic Approach for Solving Capacitated Vehicle Routing Problem

Kanokporn Boonjubut, Jirawat Lopandung and Prat Boonsam^{*}

Department of Engineering Management, Faculty of Industrial Technology,
Nakhon Ratchasima Rajabhat University

^{*} Corresponding author, E-mail: prat.b@nrru.ac.th

Received: 4 April 2024; Revised: 4 November 2024; Accepted: 26 November 2024

Online Published: 21 December 2024

Abstract: The transportation of goods is essential to the operation of a business. The problem of planning transportation routes that accomplish the shortest distance is receiving attention, and the vehicle routing problem (VRP) is one of these subjects. This research presents a heuristic approach to using routing techniques to solve the capacitated vehicle routing problem (CVRP). Through applying routing techniques, two phases are involved in solving the instance, namely the cluster-first route-second (CFRS). The initial phase involves clustering n sub-groups according to the number of transport vehicles required. There are three methods for conducting this: 1) clustering based on the distance farthest from the depot to the center (seed point) of each sub-group, 2) seed point from the point of distribution nearest to the depot, and 3) seed point from the maximum demand. The second phase involves applying the travelling salesman problem (TSP) approach to find the route sequence. The results of the CVRP using the CFRS with the three different methods for the initial phase and the second phase, the routing for all goods using the TSP, are presented. Clustering using the seed point with the highest demand for each sub-group yielded better results than the other clustering methods, accounting for 60% of all benchmark instances.

Keywords: Vehicle routing problem; Travelling salesman problem; Heuristic; Cluster-first route-second



1. บทนำ

การจัดเส้นทางขนส่งถือเป็นตัวแปรสำคัญในธุรกิจอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการขนส่งขององค์กร จากความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงหรือน้ำมันที่มีอัตราสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากระยะทางในการขนส่งมากจะส่งผลให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถ้าหากสามารถลดระยะทางในการขนส่งลงได้ ทำให้สามารถลดต้นทุนค่าขนส่งได้ด้วยการองค์กรมีการวางแผนและการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ จะส่งผลทำให้สามารถลดต้นทุนการดำเนินงานที่เกิดขึ้นในส่วนของต้นทุนค่าขนส่งได้ ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้า หรือปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) ถูกอธิบายว่าเป็นปัญหาการกำหนดเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสมในด้านค่าใช้จ่าย หรือในด้านระยะทางรวมสั้นที่สุด หรือเวลารวมในการเดินทางน้อยสุด โดยในปัจจุบันปัญหา VRP เป็นปัญหาที่ยังคงได้รับการสนใจในการทำวิจัยวิจัยเป็นอย่างมากและบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหาดังกล่าวยังถูกตีพิมพ์เผยแพร่อย่างต่อเนื่อง

ปัญหา VRP [1] ถูกพัฒนามาจากปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem: TSP) คือ การหาเส้นทางที่มีระยะทางรวมในการเดินทางสั้นที่สุดให้บริการลูกค้าได้ทั้งหมด ตามที่ได้กำหนดไว้ และกลับมายังจุดเริ่มต้น โดยปัญหานี้ไม่มีข้อจำกัดประเด็นของความสามารถความจุของพาหนะ VRP คือปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ ซึ่งเดินทางออกจากจุดเริ่มต้นแล้วเดินทางไปยังจุดหมายปลายทางหรือลูกค้าวันละครั้ง แต่ความ

เป็นจริงในทางปฏิบัติอาจต้องเข้าพบลูกค้ามากกว่าหนึ่งครั้งโดยลูกค้าอาจได้รับสินค้าชนิดอื่นในเวลาถัดไปเนื่องจากข้อจำกัด ด้านปริมาณในการขนส่ง ปัญหาการกำหนดเส้นทางหรือ VRP สามารถทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ หลายวิธี [2] เช่น วิธีแบบแม่นยำตรง (Exact Algorithm) หรือแบบฮิวริสติก (Heuristic) หรือ เมตะฮิวริสติก (Metaheuristic) ในการแก้ปัญหา VRP วิธีแบบแม่นยำตรง จะให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimal Solution) แต่มีข้อเสียด้านเวลาในการประมวลผลนาน เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่อาจไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้ ด้วยเหตุนี้ส่วนใหญ่จึงนิยมหาผลลัพธ์ด้วยการใช้วิธีฮิวริสติกหรือเมตะฮิวริสติก [3]

Russell and Gribbin [4] เสนอวิธีแก้ปัญหา VRP แบบฮิวริสติกสามแบบ วิธีแรกคืออัลกอริทึมการจัดกลุ่มอัลกอริทึมที่สองในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางที่พัฒนาจากอัลกอริทึมแรกและปรับปรุงตามลำดับของการสลับเส้นทาง อัลกอริทึมที่สามสำหรับการแก้ปัญหา คืออัลกอริทึมการประหยัด Clarke and Wright [5] ซึ่งลูกค้าจะได้รับการจัดสรรตามข้อจำกัด ของระยะห่างในการจัดส่ง และเส้นทางถูกสร้างขึ้นโดยใช้อัลกอริทึมการประหยัด (Saving Algorithm) Bowerman *et. al.* [6] ได้แบ่งวิธีการแก้ปัญหา VRP ด้วยฮิวริสติก ทั้งหมด 5 วิธี ประกอบด้วย 1) วิธีจัดกลุ่มก่อนและจัดเส้นทางที่หลัง (Cluster-First and Route-Second: CFRS) 2) วิธีจัดเส้นทางก่อนจัดกลุ่มที่หลัง (Route-First Cluster-Second: RFCS) 3) ฮิวริสติกแบบประหยัด (Savings/insertion) 4) ฮิวริสติกแบบพัฒนา (Improvement/exchange) และ 5) ฮิวริสติกแบบอย่างง่าย (Mathematical Programming) โดย



CFRS เป็นแนวทางฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพและใช้กันมากที่สุด [7] ในการแก้ปัญหาการจัดการขนส่งที่มีข้อจำกัดด้านความจุของยานพาหนะ (Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP) ซึ่งมีการศึกษา CFRS โดย Gillett and Miller [8] และ Fisher and Jaikumar [9] กล่าวไว้ว่า CFRS ยังคงใช้อย่างต่อเนื่องเพราะวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และไม่ซับซ้อน โดยวิธี CFRS คือวิธีการดำเนินการแบ่งกลุ่มลูกค้าเป็นกลุ่มย่อยก่อนแล้วหาเส้นทางด้วยระยะทางรวมสั้นที่สุดแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะช่วยให้ลดความซับซ้อนของการหาผลลัพธ์โดยการแก้ปัญหาแต่ละกลุ่มที่มีขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Garside and Laili [10], Dondo and Cerdá [11], Shin and Han [12] พบว่า CFRS ให้ผลลัพธ์ (Solution) ที่มีคุณภาพดีกว่าการจัดเส้นทางก่อนและจัดกลุ่มทีหลัง (RFCS) แม้ใช้การคำนวณที่ซับซ้อนกว่า อีกทั้งยังพบงานของ Comert *et al.* [13] นำ CFRS ไปใช้ในการแก้ปัญหากรณีศึกษาในการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าโดยเปรียบเทียบการจัดกลุ่มแบบต่าง ๆ ด้วยการนำฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้ ที่ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ โดยมีข้อดีในด้านการประมวลผลเร็ว และยังพบว่าขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งของศูนย์กลางการจัดกลุ่ม (Seed) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหาผลลัพธ์ [14]

จากปัญหาและการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการจัดเส้นทาง การขนส่งเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการขนส่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประยุกต์ใช้วิธีฮิวริสติกที่ถือว่าเป็นวิธีหาผลลัพธ์ในการแก้ปัญหาจริงที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีคือเวลาการประมวลผลเร็ว อีกทั้งยังสามารถให้ผลลัพธ์ที่

ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดจากวิธีแมนตรง โดยจากการวิจัยพบว่าวิธี CFRS เป็นวิธีที่มีคุณภาพอีกหนึ่งวิธี แต่ในส่วนของขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งของศูนย์กลางการจัดกลุ่มนั้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหาผลลัพธ์ แม้ว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอวิธีการต่าง ๆ ในการหาผลลัพธ์ดังกล่าว ซึ่งแต่ละวิธีให้คำตอบที่เหมาะสม รวมทั้งใช้งานได้ดี แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่ยากและซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการนำเสนอวิธี CFRS ด้วยวิธีที่ง่าย โดยนำเสนอวิธีในการจัดกลุ่มรูปแบบต่าง ๆ ที่ประกอบด้วย 1) ระยะทางที่ไกลที่สุดจากจุดกระจายสินค้าเป็นจุดศูนย์กลาง (Farthest from Depot) 2) ระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดกระจายสินค้าเป็นจุดศูนย์กลาง (Nearest to Depot) และ 3) จุดที่มีความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) เป็นจุดศูนย์กลางในการกำหนดการแบ่งกลุ่ม (Clustering) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดเส้นทางด้วยระยะทางรวมสั้นที่สุด เพื่อสามารถเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดการเส้นทางเดินรถด้านขนส่งสินค้าที่ไม่เกินปริมาณความจุของรถบรรทุกสินค้า และการกระจายสินค้าไปยังลูกค้าโดยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การจัดเส้นทางเดินรถ (Vehicle Routing Problem: VRP)

ในการแก้ปัญหาการจัดการเส้นทางเดินรถ หรือ VRP คือ ปัญหาที่ผู้ขนส่งทำการออกแบบการขนส่งให้แก่ลูกค้าในด้านการใช้ยานพาหนะหรือรถบรรทุกในการขนส่งและลำดับการขนส่ง เพื่อให้เกิดต้นทุนในการขนส่งที่ต่ำที่สุดภายใต้ข้อจำกัดบางประการ มีการ

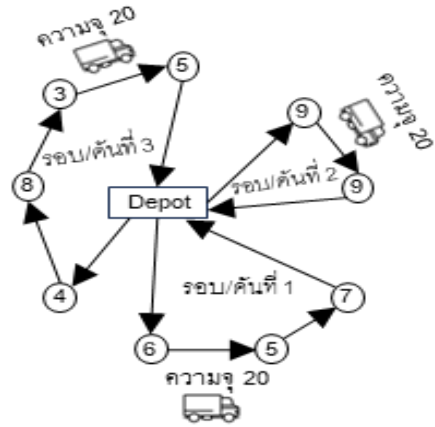


บทความวิจัย

นำมาใช้แก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดเส้นทางสำหรับการขนส่งในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น ปัญหา VRP ที่มีการพิจารณาความจุของรถบรรทุก (CVRP) ซึ่งในกรณีนี้รถบรรทุกไม่สามารถบรรทุกสินค้าไปส่งลูกค้าทุกจุดในคราวเดียว ในการขนส่งแต่ละรอบ จึงจำเป็นต้องพิจารณาความสามารถของความจุของรถบรรทุก หากเกินความจุให้เพิ่มรอบหรือเพิ่มจำนวนรถบรรทุก แสดงดังรูปที่ 1

VRP สามารถแสดงได้โดยกราฟ $G=(V,A)$ ซึ่ง v แทนเซตของลูกค้านับทั้งหมด $V=\{1,2,\dots,N\}$ โดยที่ A แทนเซตของเส้นเชื่อมระหว่างจุดลูกค้าทั้งหมด ซึ่งเป็นกลุ่มลูกค้าเท่ากับ $\{1,2,\dots,N\}$ และ $A=\{(V_i, V_j); 1 \leq i, j \leq N\}$ ที่ถูกกำหนดให้ v_0 คือ คลังสินค้า และ ลูกค้า $v_i \in V$ โดยมักจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดเส้นทาง การเดินทาง ดังสมการและอสมการที่ (1)-(8) ต่อไปนี้ ค่าพารามิเตอร์:

- d_{ij} = ระยะทางจากจุด i ไป j
- c_k = ความสามารถของความจุของรถบรรทุกแต่ละคัน k
- q_i = ความต้องการสินค้าของลูกค้าลำดับที่ i
- Q = ความต้องการสินค้าของลูกค้าทั้งหมด
- C_{ij} = ระยะทางระหว่างลูกค้าหรือคลังสินค้าจุด i ไป j
- ดัชนีและเซต:
 - i, j = ใช้แทนลำดับของลูกค้าที่ $i, j=1,2,\dots,n$ โดยที่ $i, j=0$ แทนจุดคลังสินค้า
 - k = รถบรรทุกในการขนส่งสินค้าที่ k
 - n = จำนวนลูกค้าทั้งหมด



รูปที่ 1 ปัญหาการจัดเส้นทางที่มีการพิจารณาความจุของรถบรรทุก (CVRP)

- N = เซตของลูกค้าทั้งหมด
- K = เซตของรถบรรทุกทั้งหมด

ตัวแปร:

$x_{ijk} = 1$ ถ้ารถบรรทุกเดินทางจากจุด i ไป j ,
0 คือ กรณีอื่นๆ (Binary)

สมการวัตถุประสงค์:

$$Min Z = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ijk} \tag{1}$$

ข้อจำกัด:

$$\sum_{k=1}^k \sum_{n=0}^n x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^k \sum_{j=0}^n x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \tag{3}$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} - \sum_{j=0}^n x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n q_i x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K \tag{5}$$



บทความวิจัย

$$\sum_{j=0}^n x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K \quad (8)$$

สมการที่ (1) คือ สมการวัตถุประสงค์เพื่อหา ระยะทางรวมในการขนส่งสั้นที่สุด สมการที่ (2) ถึง (8) เป็นข้อจำกัด โดยสมการที่ (2) และ (3) กำหนดให้ ลูกค้าแต่ละจุดสามารถรับการบริการจากรถบรรทุกได้ เพียงหนึ่งคันหรือหนึ่งเส้นทางเท่านั้น สมการที่ (4) แสดงความต่อเนื่องของตำแหน่งที่เชื่อมกันอยู่ในแต่ละ เส้นทางเมื่อรถบรรทุกเข้ามายังจุดใด ๆ และออกจาก จุดนั้น ๆ สมการที่ (5) แสดงข้อจำกัดทางด้านความจุ ของรถบรรทุก สมการที่ (6) และ (7) ยืนยันว่ามี จำนวนรถบรรทุกใช้ได้เท่าที่กำหนด และสมการที่ (8) เป็นการกำหนดตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี (Binary) ที่มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 เท่านั้น

2.2 อัลกอริธึมแบบสองเฟส (Two-Phase heuristic)

อัลกอริธึมแบบสองเฟสในงานวิจัยนี้คือ วิธีแบ่งกลุ่ม ก่อนจัดเส้นทางที่หลัง (Cluster-First Route-Second Method) เป็นวิธีที่ทำการสร้างกลุ่มลูกค้าก่อน แล้วจึง ทำการกำหนดเส้นทางเดินรถโดยให้ส่งสินค้าครบทุกจุด ของกลุ่มที่ได้จากการสร้างกลุ่มในขั้นตอนแรก การหาผลลัพธ์แบ่งออกเป็น 2 เฟส โดยเฟสแรกจะทำการแบ่งกลุ่มลูกค้าในการส่งสินค้าก่อน หลังจากนั้นเฟสที่สองทำการค้นหาผลลัพธ์เส้นทางเดินรถ เพื่อส่งสินค้าทั้งหมดภายในกลุ่มเพื่อให้ได้ระยะทางรวม สั้นที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 เฟสที่ 1: การแบ่งกลุ่มลูกค้า (Clustering)

เริ่มจากการเตรียมข้อมูลโดยการสร้างตารางระยะทาง ระหว่างจุด (Origin-Destination Matrix) ของทุกจุดมาจากพิกัด x,y ด้วยระยะทางแบบยูคลิเดียน (Euclidean) ดังสมการที่ (9) จากโจทย์แต่ละโจทย์ จากเว็บไซต์ของ CVRPLIB [15] มาทำการแบ่งกลุ่ม k กลุ่ม มากำหนดในการแบ่งกลุ่มตามข้อกำหนดข้อจำกัดจำนวนรถบรรทุก ในโจทย์ดังกล่าวเป็นจำนวนกลุ่ม และทำการแบ่งกลุ่ม ดังรูปที่ 2 โดยทำการควบคุมจำนวนสมาชิกในกลุ่มด้วยความสามารถของความจุของรถบรรทุก โดยนำหลักการแก้ปัญหา CVRP ดังสมการและสมการที่ (1) - (8) ด้วยวัตถุประสงค์ระยะทางรวมสั้นที่สุด

$$d_{Euclidean}(x, y) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (9)$$

ขั้นตอนแรก ทำการแบ่งกลุ่ม (Clustering) โดยกำหนดจุดตั้งต้น หรือที่เรียกอีกอย่างว่า จุดศูนย์กลางแต่ละกลุ่มย่อย (Seed Point) ซึ่งมีเกณฑ์ในการเลือกจุด Seed Point จากการเลือกด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี ดังนี้

- 1) ระยะทางที่ไกลที่สุดจากจุดกระจายสินค้าเป็นจุดศูนย์กลาง (Farthest from Depot)
- 2) ระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดกระจายสินค้าเป็นจุดศูนย์กลาง (Nearest to Depot)
- 3) จุดที่มีความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) เป็นจุดศูนย์กลาง

ขั้นตอนที่สอง เมื่อได้จุดตั้งต้นรับส่งสินค้า จากนั้นเลือกจุดรับส่งสินค้าจุดถัดไป โดยเลือกจุดที่มีระยะห่าง



บทความวิจัย

กันสั้นที่สุด และตรวจสอบความสามารถของความจุรถบรรทุกว่าเป็นไปตามเงื่อนไขหรือไม่

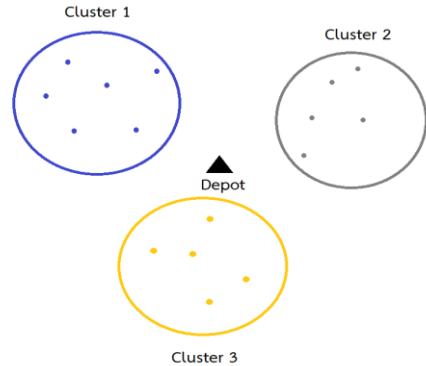
ขั้นตอนที่สาม รวมจุดรับส่งสินค้าจากขั้นตอนที่สองเข้าเป็นเส้นทางเดียวกัน และลบจุดที่ไปรับส่งสินค้าแล้วออก

ขั้นตอนที่สี่ ทำซ้ำขั้นตอนที่สอง โดยเลือกจุดรวบรวมสินค้าที่มีระยะทางสั้นที่สุดและตรวจสอบความสามารถของความจุรถบรรทุก ถ้าเกิดความสามารถให้เพิ่มรถบรรทุกแล้วทำซ้ำในขั้นตอนที่หนึ่ง

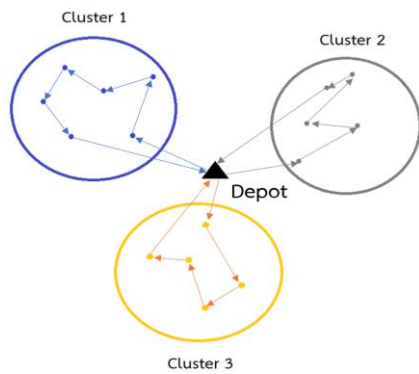
ขั้นตอนที่ 5 หยุดการคำนวณ หากกลุ่มเมื่อพบว่าทุกจุดที่ต้องรับส่งสินค้าถูกพิจารณาครบแล้ว

2.2.2 เฟสที่ 2: การจัดเส้นทางเดินรถรับส่งสินค้า (Routing)

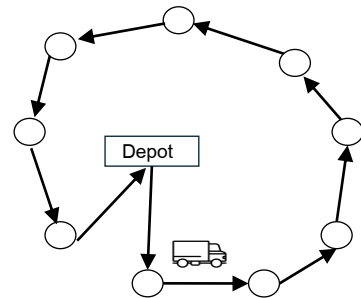
จากขั้นตอนการแบ่งกลุ่ม เมื่อได้กลุ่มจุดรับส่งสินค้าให้กับยานพาหนะหรือรถขนส่งแล้ว จากนั้นทำการค้นหาลำดับการเดินทางของแต่ละเส้นทางเพื่อจัดเส้นทางรถเดินรถ (ดังรูปที่ 3) จากผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกด้วยการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) ซึ่งปัญหา TSP คือตัวแบบที่ใช้กำหนดการเดินทางของพนักงานขาย เพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่สามารถบริการลูกค้าทั้งหมด เริ่มต้นเดินทางจากจุดเริ่มต้นผ่านทุก ๆ จุดที่กำหนดไว้ และกลับมาถึงจุดเริ่มต้น มีเงื่อนไขในการเดินทางไปยังลูกค้าแต่ละจุดนั้น สามารถเดินทางผ่านได้เพียงครั้งเดียว และไม่สามารถย้อนกลับไปยังจุดนั้นได้อีก โดยปัญหานี้ไม่มีข้อจำกัดความจุของรถเข้ามาเกี่ยวข้อง (แสดงดังรูปที่ 4) ตัวแบบคณิตศาสตร์สำหรับปัญหา TSP แสดงดังสมการและอสมการที่ (10) - (14)



รูปที่ 2 การแบ่งกลุ่ม (Clustering)



รูปที่ 3 การจัดเส้นทางรถเดินรถรับส่งสินค้า



รูปที่ 4 ปัญหาการกำหนดการเดินทางของพนักงานขาย (TSP)



บทความวิจัย

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter):

C_{ij} = ระยะทางในการเดินทางจากลูกค้า i ไปลูกค้า j

ค่าดัชนีและเซต (Indices):

m = จำนวนลูกค้า

T = จำนวนลูกค้าที่อยู่ในเส้นทาง

W = จำนวนลูกค้าทั้งหมด

M = เซตของลูกค้าทั้งหมด

i, j = ลูกค้ารายที่ i หรือ j โดยที่

$$i, j = 0, 1, 2, \dots, m$$

ตัวแปรในการตัดสินใจ (Decision Variables):

$X_{ij} = 1$, (ถ้ามีการเดินทางจาก i ไป j)

0, (กรณีอื่นๆ)

สมการวัตถุประสงค์

$$\text{Min } Z = \sum_i^m \sum_j^m C_{ij} X_{ij} \quad (10)$$

ข้อจำกัด:

$$\sum_j^m X_{ij} = 1 \quad \forall i \in M \quad (11)$$

$$\sum_i^m X_{ij} = 1 \quad \forall j \in M \quad (12)$$

$$\sum_{i,j \in T} X_{ij} \leq |T| - 1 \quad T \subset W \quad (13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in M \quad (14)$$

สมการที่ (10) คือ สมการวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาเส้นทางรวมสั้นที่สุดจากการเดินทาง สมการที่ (11) และ (12) กำหนดให้ลูกค้าจะต้องถูกผ่านเข้าหนึ่งเส้นทางเข้า และเส้นทางออกหนึ่งเส้น สมการที่ (13) คือ สมการป้องกันการเกิดเส้นทางรถบรรทุกขนส่งย่อย

(Subtour Elimination) และสมการที่ (14) เป็นการกำหนดตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี (Binary) ให้เป็นค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 เท่านั้น

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาระยะทางรวมในการขนส่งสั้นที่สุด เนื่องจากการลดระยะทางในการเดินทางจะทำให้ต้นทุนลดลงตามไปด้วยเพราะระยะทางเป็นต้นทุนแปรผัน (Variable Cost) ที่เกิดขึ้นในการขนส่ง ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าบำรุงรักษา รถบรรทุกตามระยะ เป็นต้น โดยกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้คือโจทย์ปัญหามาตรฐานปัญหา VRP จากเว็บไซต์ CVRPLIB ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย รวมถึงมีผลเฉลยที่เป็น Best Known Solution (BKS) สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการหาผลลัพธ์

3. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับโจทย์ปัญหามาตรฐานจากเว็บไซต์ CVRPLIB และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผล BKS ซึ่งสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 15 โดยความหมายของค่าผลลัพธ์ที่เป็นบวกหมายถึงผล BKS มีค่าต่ำกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ และค่าผลลัพธ์ที่เป็นลบจะหมายถึง ผล BKS มีค่าผลลัพธ์สูงกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

$$\% \text{Gap}_{\text{BKS}} = \frac{\text{The considered solution} - \text{The best known solution}}{\text{The best known solution}} \times 100 \quad (15)$$

โดยทำการเปรียบเทียบการจัดเส้นทางจากโจทย์มาตรฐานจากเว็บไซต์ CVRPLIB แบ่งออกเป็นเซต A, B และ P เซต E เซต F ด้วยวิธี CFRS ที่มีการแบ่งกลุ่ม (Clustering) แตกต่างกันทั้งหมด 3 วิธี ประกอบด้วย การกำหนดด้วยจุดที่มีความต้องการ

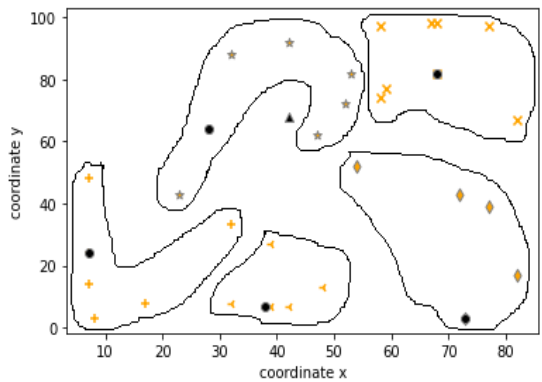


บทความวิจัย

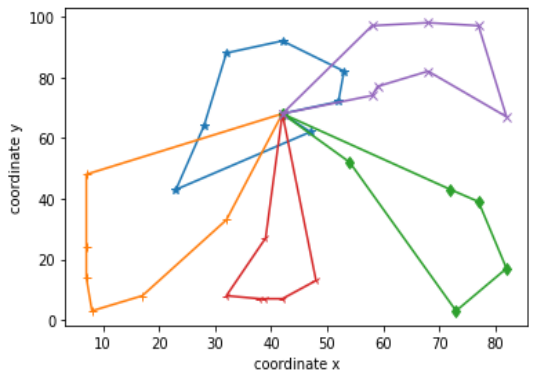
มากที่สุด (Maximum Demand) เป็นจุดตั้งต้นหรือจุดศูนย์กลาง เปรียบเทียบกับการกำหนดจุดตั้งต้นหรือจุดศูนย์กลาง จากระยะทางที่ไกลสุดจากจุดกระจายสินค้าที่สุด (Farthest from Depot) และการกำหนดจุดตั้งต้นหรือจุดศูนย์กลางจากระยะทางที่ใกล้สุดจากจุดกระจายสินค้าที่สุด (Nearest to Depot)

ในตารางที่ 1 และรูปที่ 11 จากผลลัพธ์การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอทั้งหมด 3 วิธี พบว่า วิธีการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าด้วยวิธีการจัดกลุ่มด้วยจุดศูนย์กลางจากความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) เป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ในการจัดเส้นทางที่มีระยะทางรวมสั้นที่สุด 15 โจทย์ จากโจทย์ทั้งหมด 25 หรือคิดเป็นร้อยละ 60 ของโจทย์ที่ทดสอบทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยของค่า %Gap_{BKS} เท่ากับร้อยละ 15.64 ค่า S.D. เท่ากับ 7.26 ลำดับถัดมาวิธีการจัดกลุ่มด้วยจุดศูนย์กลางจากระยะทางใกล้กับศูนย์กระจายสินค้าที่สุด (Nearest to Depot) โดยมีผลลัพธ์ระยะทางรวมสั้นสุด 9 โจทย์ จากโจทย์ทั้งหมด 25 โจทย์ หรือคิดเป็นร้อยละ 36 ของโจทย์ที่ทดสอบทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยของค่า %Gap_{BKS} เท่ากับร้อยละ 20.35 ค่า S.D. เท่ากับ 12.50 และลำดับสุดท้ายคือ วิธีการจัดกลุ่มด้วยจุดศูนย์กลางจากระยะทางไกลจากศูนย์กระจายสินค้าที่สุด (Farthest from Depot) โดยมีผลลัพธ์ระยะทางรวมสั้นสุด 1 โจทย์ จากโจทย์ทั้งหมด 25 โจทย์ หรือคิดเป็นร้อยละ 4 ของโจทย์ที่ทดสอบทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยของค่า %Gap_{BKS} เท่ากับร้อยละ 35.37 ค่า S.D. เท่ากับ 20.84 โดยแสดงตัวอย่างการจัดกลุ่มและจัดเส้นทางของ โจทย์ A-n33-k5 ดังรูปที่ 5-10 (เมื่อ ▲ คือศูนย์กระจายสินค้า ● คือ Seed point และ +, ★, ◆, x และ <

คือจุดลูกค้าแต่ละกลุ่ม จากการ Cluster) ซึ่งผลลัพธ์วิธีการจัดกลุ่มด้วยจุดศูนย์กลางจากความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) ให้ผลลัพธ์ของโจทย์ A-n33-k5 ที่มีระยะทางรวมสั้นสุด โดยแสดงผลวิธีการจัดกลุ่มแสดงดังรูปที่ 5 และผลลัพธ์การจัดเส้นทางแสดงดังรูปที่ 6 โดยผลลัพธ์มีระยะทางรวมเท่ากับ 718.18 หน่วย



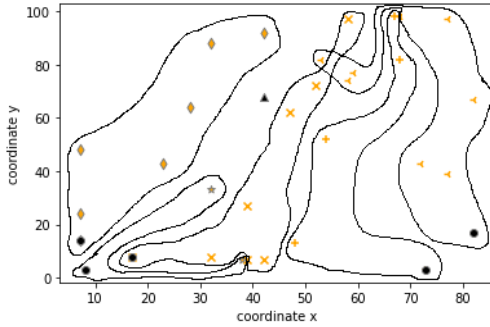
รูปที่ 5 ผลลัพธ์การจัดกลุ่มด้วย Maximum Demand โจทย์ A-n33-k5



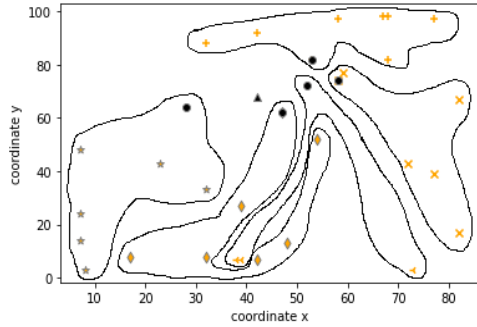
รูปที่ 6 ผลลัพธ์การจัดเส้นทางจาก Maximum Demand โจทย์ A-n33-k5



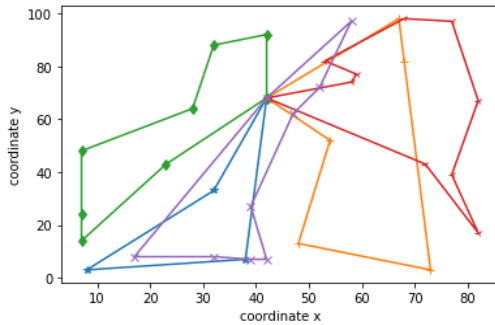
บทความวิจัย



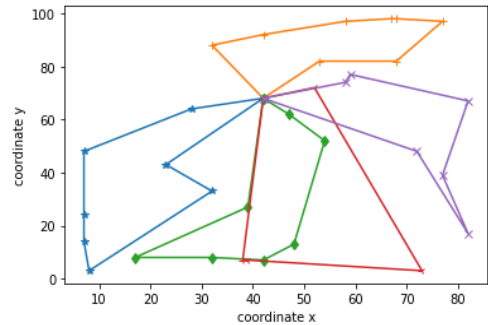
รูปที่ 7 ผลลัพธ์การจัดกลุ่มด้วย Farthest from Depot โจทย์ A-n33-k5



รูปที่ 9 ผลลัพธ์การจัดกลุ่มด้วย Nearest from Depot โจทย์ A-n33-k5



รูปที่ 8 ผลลัพธ์การจัดเส้นทางจาก Farthest from Depot โจทย์ A-n33-k5



รูปที่ 10 ผลลัพธ์การจัดเส้นทางจาก Nearest from Depot โจทย์ A-n33-k5

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของวิธี CFRS แต่ละวิธีกับโจทย์ปัญหามาตรฐานจากเว็บไซต์ CVRPLIB

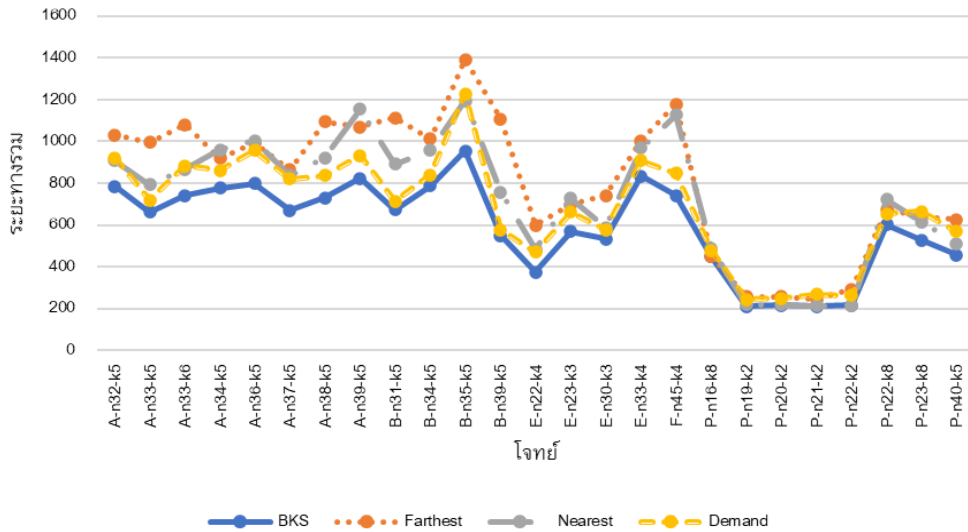
ชุดข้อมูล	BKS	Farthest	Nearest	Demand	%Gap _{BKS}			ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
					Farthest	Nearest	Demand	
A-n32-k5	784	1030.99	908.0183	921.36	31.50	15.82	17.52	Nearest
A-n33-k5	661	994.45	794.27	718.18	50.45	20.16	8.65	Demand
A-n33-k6	742	1079.99	867.64	883.24	45.55	16.93	19.04	Nearest
A-n34-k5	778	918.58	960.40	860.38	18.07	23.44	10.59	Demand



ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของวิธี CFRS แต่ละวิธีกับโจทย์ปัญหามาตรฐานจากเว็บไซต์ CVRPLIB (ต่อ)

ชุดข้อมูล	BKS	Farthest	Nearest	Demand	%Gap _{BKS}			ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
					Farthest	Nearest	Demand	
A-n36-k5	799	993.63	1003.64	958.12	24.36	25.61	19.91	Demand
A-n37-k5	669	864.126	836.95	821.56	29.17	25.10	22.80	Demand
A-n38-k5	730	1093.46	921.83	836.58	49.79	26.28	14.60	Demand
A-n39-k5	822	1070.31	1153.37	933.34	30.21	40.31	13.55	Demand
B-n31-k5	672	1112.90	890.61	714.21	65.61	32.53	6.28	Demand
B-n34-k5	788	1012.40	958.19	838.64	28.48	21.60	6.43	Demand
B-n35-k5	955	1392.84	1194.91	1228.22	45.85	25.12	28.61	Nearest
B-n39-k5	549	1108.38	757.41	577.12	101.89	37.96	5.12	Demand
E-n22-k4	375	598.95	484.81	471.06	59.72	29.28	25.62	Demand
E-n23-k3	569	696.95	728.12	662.89	22.49	27.96	16.50	Demand
E-n30-k3	534	741.21	587.70	576.66	38.80	10.06	7.99	Demand
E-n33-k4	835	1003.04	969.27	909.01	20.12	16.08	8.86	Demand
F-n45-k4	742	1178.24	1126.78	847.37	58.79	51.86	14.20	Demand
P-n16-k8	450	451.95	489.68	478.33	0.43	8.82	6.30	Farthest
P-n19-k2	212	258.67	219.75	245.17	22.01	3.66	15.65	Nearest
P-n20-k2	216	258.63	218.31	248.27	19.74	1.07	14.94	Nearest
P-n21-k2	211	245.09	212.71	268.58	16.16	0.81	27.29	Nearest
P-n22-k2	216	292.65	217.85	262.72	35.49	0.86	21.63	Nearest
P-n22-k8	603	674.42	721.72	653.69	11.84	19.69	8.41	Demand
P-n23-k8	529	640.55	615.09	665.99	21.09	16.27	25.90	Nearest
P-n40-k5	458	625.44	510.49	570.30	36.56	11.46	24.52	Nearest
ค่าเฉลี่ย (Average)					35.37	20.35	15.64	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)					20.84	12.50	7.26	

การเปรียบเทียบการจัดเส้นทางด้วยวิธีการ Clustering แบบต่าง ๆ



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธี CFRS แต่ละวิธีกับโจทย์ปัญหา

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีในการจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าเพื่อวางแผนในการขนส่งที่มีระยะทางรวมน้อยสุดเนื่องจากปัญหา VRP เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยปัญหานี้วัตถุประสงค์ในการหาวิธีในการแก้ไข้ปัญหาเพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเปรียบเทียบวิธีฮิวริสติกที่เป็นวิธีที่ใช้หาผลลัพธ์ที่ดีในเวลาที่เหมาะสม ในการจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าด้วยวิธี CFRS โดยมีขั้นตอนการหาผลลัพธ์ 2 เฟส โดยเฟสแรกคือ การจัดกลุ่ม (Clustering) ทั้งหมด 3 วิธี ประกอบด้วย ระยะทางที่ไกลสุดจากจุดกระจายสินค้าเป็นจุดศูนย์กลาง (Farthest from Depot) ระยะทางที่ใกล้สุดจากจุดกระจายสินค้าเป็นจุดศูนย์กลาง

(Nearest from Depot) และจุดที่มีความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) เป็นจุดศูนย์กลาง หลังจากนั้นดำเนินการเฟสสองคือ การหาลำดับการเดินรถโดยใช้วิธีในการหาผลลัพธ์ด้วย TSP จากผลการทดลองพบว่าวิธีการจัดกลุ่มด้วยจุดที่มีความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) เป็นจุดศูนย์กลาง สามารถให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่า BKS จำนวน 15 โจทย์มากที่สุด (คิดเป็นร้อยละ 60จากโจทย์ทั้งหมด 25 โจทย์)

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ในการแก้ปัญหาจริง เนื่องจากผลการวิจัยทำให้เห็นว่า วิธีการหาผลลัพธ์ 2 เฟส โดยเฟสแรกคือ การจัดกลุ่ม (Clustering) ด้วยจุดที่มีความต้องการมากที่สุด (Maximum Demand) เป็นจุดศูนย์กลาง หลังจากนั้นดำเนินการเฟสสอง คือ การหาลำดับการเดินรถโดยใช้



วิธีในการหาผลลัพธ์ด้วย TSP เป็นวิธีที่เหมาะสมในการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าที่เป็นการจัดกลุ่มก่อนแล้วจึงจัดเส้นทางที่หลัง ที่สามารถประยุกต์ใช้กับลักษณะของปัญหาที่ต้องการทำการจัดกลุ่มย่อยก่อนแล้วจัดลำดับเส้นทางในการวิ่งรถทุกสินค้า เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถบรรทุกสินค้า การกำหนดทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า (Distribution Center) ปัญหาโครงข่ายแบบ Hub เพื่อสามารถเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถด้านขนส่งสินค้าที่ไม่เกินปริมาณความจุของรถในการขนส่งได้ และวิธีนี้ยังเป็นวิธีที่ง่ายนำไปใช้จริงโดยผู้จัดเส้นทางไม่จำเป็นต้องมีความเชี่ยวชาญด้านการแก้ปัญหา VRP

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้กับกลุ่มลูกค้าขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 50 จุด ข้อเสนอแนะ สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรนำไปทดลองแก้ไขกับกลุ่มลูกค้าที่มีขนาดใหญ่ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการหาผลลัพธ์เนื่องจากวิธีการนี้เป็นการแก้ปัญหา VRP แบบฮิวริสติกที่มีข้อดีในด้านเวลาในการประมวลผลเร็ว อีกทั้งควรพิจารณาข้อจำกัดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การจัดเส้นทางเดินรถในปัญหาจริง เช่น กรอบเวลาในการจัดส่ง ความหลากหลายของความจุของรถบรรทุก เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Zhang, H. Ge, J. Yang and Y. Tong, Review of vehicle routing problems: Models, classification and solving algorithms, Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 195-221.
- [2] S.Y. Tan and W.C. Yeh, The vehicle routing problem: state-of-the-art classification and review, Applied Sciences, 2021, 11(21).
- [3] N. Wichaya and T.Sudsuansee, Solving the vehicle routing problems with time windows using hybrid genetic algorithm with push forward insertion heuristic and local search procedure, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2019, 29(1), 4-13. (in Thai)
- [4] R.A. Russell and D. Gribbin, A multiphase approach to the period routing problem, Networks, 1991, 21(7), 747-765.
- [5] G. Clarke and J.W. Wright, Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, Operations Research, 1964, 12(4), 568-581.
- [6] R.L. Bowerman, P.H. Calamai and G.B. Hall, The spacefilling curve with optimal partitioning heuristic for the vehicle routing problem, European Journal of Operational Research, 1994, 76(1), 128-142.
- [7] L. Lian and E. Castelain, A decomposition-based heuristic approach to solve general delivery problem, The World Congress on Engineering and Computer Science 2009 Vol II (WCECS 2009), Proceeding, 2009. 1-5.



- [8] B.E. Gillett and L.R. Miller, A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem, *Operations Research*, 1974, 22, 340-349.
- [9] M.L. Fisher and R. Jaikumar, A generalized assignment heuristic for vehicle routing, *Networks*, 1981, 11, 109-124.
- [10] A.K. Garside and N.R. Laili, A cluster-first route-second heuristic approach to solve the multi-trip periodic vehicle routing problem, *Jurnal Teknik Industri*, 2019, 20(2), 68-77.
- [11] R. Dondo and J. Cerdá, A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows, *European Journal of Operational Research*, 2007, 176, 1478-1507.
- [12] K. Shin and S. Han, A centroid-based heuristic algorithm for the capacitated vehicle routing problem, *Computing and Informatics*, 2011, 30, 721-732.
- [13] S.E. Comert and H.R. Yazgan, Effective cluster-first route-second approaches using metaheuristic algorithms for the capacitated vehicle routing problem, *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 2021, 28(1), 14–38.
- [14] A. Sriburum, T. Sudsuanssee, W. Waworot and A. Lawong, A Two-phase heuristic for solving vehicle routing problem: A case study of snack wholesale in Kalasin province, *Thai Journal of Operations Research*, 2022, 10(1), 15-28. (in Thai)
- [15] <http://vrp.galgos.inf.puc-rio.br/index.php/en/>. (Accessed on 16 October 2022)



อิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอย ชุมชนที่มีต่อกำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัด

เฉลิมพล วังสำเภา^{1,3} สกล โพลลาด^{2,3} พิมพ์นภัส คำมาวงศ์³ สุนันทา สี่มาจารย์³ อารยา บุญมี³
และ กীরติกานต์ พิริยะกุล^{3*}

¹ อุทยานเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² กองอาคารและสถานที่, มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

³ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 3 กันยายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 17 พฤศจิกายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 3 ธันวาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนต่อกำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัด เพื่อลดปริมาณซีเมนต์และน้ำของเสียจากจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนมาใช้สำหรับพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้แก้วลอยและแก้วจมเป็นส่วนผสมทำการทดสอบกำลังตัดตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 ทรายซีเมนต์บดอัดผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักทรายแห้งผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยปริมาตร ใช้ความยาวของเส้นใยแก้วที่ 3, 6 และ 12 มิลลิเมตร สัดส่วนแก้วลอย:แก้วจมที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ทำการบ่มที่ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังตัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงปริมาณปูนซีเมนต์มีผลต่อกำลังตัดของเมทริกซ์โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ร้อยละ 5 ความเหนียวที่ระยะแอนตัวของทรายซีเมนต์แปรผันโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่ง DI และ PSR เป็น 1 แสดงพฤติกรรมการแอนแบบวัสดุอ่อน ความยาวของเส้นใยแก้วแปรผันโดยตรงต่อระยะการแอนตัวซึ่งความยาวของเส้นใยแก้วที่เหมาะสมคือ 12 มิลลิเมตร ปริมาณแก้วลอยทดแทนปูนซีเมนต์อยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 15 ปริมาณสัดส่วนแก้วลอย:แก้วจมที่เหมาะสมคือ 25:75 และพบว่าที่บ่ม 90 วันมีค่าความเหนียวสูงที่สุด

คำสำคัญ: กำลังตัด; ทรายซีเมนต์บดอัด; เส้นใยแก้ว; ของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชน



Effect of Glass Fiber and Municipal Solid Waste Incineration on Bending Stress of Compacted Cement Sand

Chalermpon Wungsumpow^{1,3}, Sakol Pochalard^{2,3}, Pimnapat Kammawong³,
Sunantha Simachan³, Araya Boonmee³ and Keeratikan Piriyakul^{3*}

¹ KMUTNB Techno Park, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

² Building and Landscape Division, Suan Dusit University, 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: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

Received: 3 September 2024; Revised: 17 November 2024; Accepted: 3 December 2024

Online Published: 23 December 2024

Abstract: This research article studies on the effect of glass fiber and municipal solid waste from the RDF power plant to bending stress of compacted cement sand to reduce cement and municipal solid waste for development of the green construction materials. Fly ash (FA) and Bottom ash (BA) are mixed into the compacted cement sand and tested according to ASTM C1609-10 standard. Samples are prepared by adding the cement content between 3%, 5% and 7% by weight. The glass fiber is mixed at 0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2% by volume. The glass fiber lengths are 3, 6 and 12 mm. The FA:BA ratios are 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100. The curing times are 7, 14, 28, 60 and 90 days. It was found that bending stress is increased with increasing the cement content, that is direct proportion to the bending stress of the matrix. The optimum cement content is 5%. The toughness is in direct proportion to the cement content. The glass fiber content is optimum at 1% to 1.5%. The DI and PSR are 1, showing that the softening behavior. The glass fiber length is recommended at 12 mm. The FA content is optimum of about 10% to 15%. The FA:BA ratio is recommended at 25:75. The curing time is recommended at 90 days

Keywords: Bending Stress; Compacted Cement Sand; Glass Fiber; Municipal Solid Waste Incineration.



1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบัน การเติบโตอย่างต่อเนื่องของพื้นที่เมืองเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการเติบโตด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้างจำนวนมาก และมีการขยายตัวของเมืองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น อาคารที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม ระบบขนส่งมวลชนเพื่อการเคลื่อนย้ายผู้คน และสิ่งอำนวยความสะดวกในการจัดการน้ำดื่มและสิ่งปฏิกูลสำหรับประชาชน [1] อัตราการเติบโตของประชากรสูง และมีการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม ตลอดจนเทคโนโลยี [2] และความจำเป็นในการจัดการกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้จำเป็นต้องลดลงการใช้ถ่านหินในการผลิตพลังงานและกระบวนการทางอุตสาหกรรม เป็นสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม การก่อสร้างก็มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์คาร์บอนต่ำ เพื่อมุ่งเน้นในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [3] การใช้ตะกรันและเถ้าลอยในคอนกรีตเป็นนึ่งซึ่งถึงความต้องการที่จะลดปริมาณการใช้ซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ [4] การนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้ของเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในประเทศไทย โดยการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการผสมในดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งเถ้าลอยสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนได้ [5] นอกจากการนำผลพลอยได้จากถ่านหินมาช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังพบว่ามีการใช้เถ้าจมน้ำมาจากการเผาขยะชุมชนอีกด้วย โดยพบว่าปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2565 มีรายงานประมาณ 26.59 ล้านตัน ตามรายงานของ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [6] โดยทั่วไปงานก่อสร้างจะนำทรายแม่น้ำเป็นซึ่งเป็น

แหล่งทรายสำหรับการนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายและรวมถึงใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้าง มีการประมาณการใช้ทรายของอุตสาหกรรมที่นำทรายจากแม่น้ำมาใช้มีปริมาณมากกว่า 60% ของจำนวนทรายทั้งหมดที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตทั่วโลก [7] ถึงแม้ว่าการนำทรายมาใช้ยังคงมีส่วนที่ต้องคำนึงถึงด้านคุณสมบัติของทรายแม่น้ำที่นำมาใช้ทางด้านคุณภาพและลักษณะที่แตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ความแปรผันที่กล่าวมานี้ อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของส่วนผสมที่มีการนำทรายเข้ามาเป็นส่วนผสม [8] และการกำหนดความเหมาะสมของทรายก่อนนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของส่วนผสมที่มีทรายผสมผสมอยู่มีคุณภาพดีและทนทาน แต่ยังคงพบปัญหาโดยเฉพาะรอยแตกร้าวของวัสดุที่ผสมด้วยทราย [9]

การใช้เส้นใยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของดินซีเมนต์และชะลอการเกิดรอยแตกร้าวได้ ด้วยเติมปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จำนวนและความกว้างของรอยแตกร้าวจะลดลง [10] สำหรับดินซีเมนต์เสริมเส้นใยพบว่า การเติมเส้นใยสามารถปรับปรุงความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุที่แข็งตัวด้วยซีเมนต์ได้ [11] คุณสมบัติแรงดึงตามธรรมชาติ คุณสมบัติการเสียดสีที่พื้นผิว และการกระจายตัวที่ดีของวัสดุเหล่านี้ ทำให้วัสดุเหล่านี้เชื่อมต่อกับสารประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในโครงสร้างเครือข่าย ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะของส่วนต่อประสานหน้าสัมผัส และปรับปรุงความสามารถของดินในการต้านทานการเสีรูปร่างผลของการเสริมเส้นใยต่อความต้านทานแรงดึงของทรายเสริมซีเมนต์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพต่อ



บทความวิจัย

การติดตั้งของทรายเสริมซีเมนต์ได้ [12] งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของส่วนผสมทรายเสริมซีเมนต์บดอัดเสริมเส้นใยแก้ว โดยนำถ้ำลอย และถ้ำจมนจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration) มาผสมในอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยถ้ำลอย และถ้ำจมนนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ และเส้นใยแก้วนำมาเสริมกำลังตัด เพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดใช้ประโยชน์จากของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนให้เกิดนวัตกรรมวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเรียกวัดวัสดุที่นำมาศึกษานี้ว่า ทรายซีเมนต์บดอัดสีเขียว (Green Compacted Cement Sand)

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 ทราย

ทรายซิลิกาที่อยู่มากมายในหลายภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีลักษณะทางกายภาพที่โดดเด่นเช่น ความแข็ง ทนต่อสารเคมี และทนความร้อน ตลอดจนราคาที่ต่ำ หินและแร่ธาตุที่มีในซิลิกา เช่น ควอทซ์ ควอทซ์ไซต์ ทรายซิลิกา ร่วมกับซิลิกานชนิดอื่นๆ เช่น อากेट อเมทิสต์ แจสเปอร์ หินเหล็กไฟ ฯลฯ ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายแม่น้ำจากร้านขายวัสดุก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครที่มีการกระจายขนาดเม็ดทรายดังรูปที่ 1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 1

2.2 เส้นใยแก้ว

ใยแก้วเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้วที่ละเอียดมากจำนวนมาก ใยแก้วมีคุณสมบัติเชิงกลที่เทียบเคียงได้กับเส้นใยอื่นๆ เช่น โพลีเมอร์และคาร์บอนไฟเบอร์ ใยแก้วจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์หลายชนิด เพื่อสร้างวัสดุคอมโพสิตโพลีเมอร์

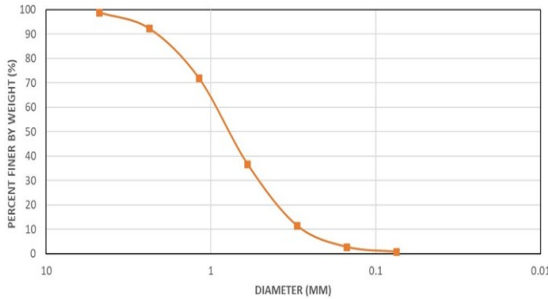
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายแม่น้ำ

Property	Value
Specific gravity (G_s)	2.65
Gravel content (%)	10.52
Sand content (%)	80.58
Fine content (%)	8.90
D_{60} (mm)	0.93
D_{30} (mm)	0.49
D_{10} (mm)	0.29
Coefficient of Uniformity (C_u)	3.21
Coefficient of Curvature (C_c)	0.89
Soil classification (USCS)	SP
Maximum void ratio	0.83
Minimum void ratio	0.28
Maximum dry unit weight (kN/m^3)	15.70
Optimum moisture content (%)	6.19

เสริมแรงด้วยเส้นใย (FRP) ที่แข็งแรงมากและค่อนข้างมีน้ำหนักเบา เรียกว่าพลาสติกเสริมด้วยแก้ว (GRP) เส้นใยแก้ว แบ่งตาม ASTM แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยสำหรับงานทั่วไป และเส้นใยชนิดพิเศษสูง ซึ่งเกือบประมาณ 90% เป็นเส้นใยสำหรับใช้งานทั่วไป สำหรับการจำแนกเส้นใยแก้วตาม ASTM บริษัท Owens Corning, Ventrotex, Ahlstrom และ Pilkington เป็นบริษัทผลิตเส้นใยแก้ว และองค์กรประกอบดังแสดงในตารางที่ 2 โดยในการวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยยี่ห้อ Owens Corning รุ่น Advantex CS 979-14 ชนิด E-glass ที่ความยาว 3, 6 และ 12 มิลลิเมตร



บทความวิจัย



รูปที่ 1 กราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างทราย

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว (เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก)

Components	AR-glass	C-glass	E-glass	S-glass
SiO ₂	62.2	65	55.2	65
ZrO ₂	16.7	-	-	-
TiO ₂	0.1	-	-	-
Al ₂ O ₃	0.74	4	14.8	25
Fe ₂ O ₃	0.09	0.3	0.3	-
B ₂ O ₃	-	5	7.3	-
CaO	5.2	14	18.7	-
MgO	0.16	3	3.3	-
Na ₂ O	14.3	8.5	0.3	-
K ₂ O	0.4	-	0.2	-
LiO ₂	-	-	-	-
F ₂	-	-	0.3	-

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ORDINARY PORTLAND CEMENT TYPE 1) ผลิตขึ้นโดยให้คุณภาพของปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติถูกต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ในมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2562 ประเภท 1 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1 การผสมปูนซีเมนต์จะทำให้ดินเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังเฉือน และลดการซึมผ่านของน้ำ

2.4 เถ้าลอย (Fly Ash) และ เถ้าจม (Bottom Ash)

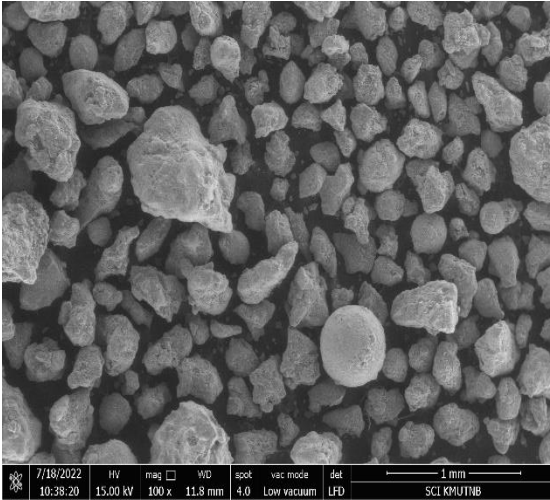
เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยชุมชนจากบริษัท โกลบอล เพาเวอร์ ซินเนอร์ยี จำกัด (มหาชน) หรือ GPSC จังหวัดระยอง ซึ่งใช้วิธีการเก็บตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C311/C311M-22 ซึ่งเม็ดที่ตกลงมาด้านล่างเรียกว่าเถ้าจม Bottom Ash (BA) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 และเม็ดที่ลอยขึ้นด้านบนปล่องไฟเรียกว่า เถ้าลอย Fly Ash (FA) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 ถึง 50 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C618 ประกอบด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ประกอบขึ้นเป็นองค์ประกอบทางเคมีของ BA วัสดุเหล่านี้จัดอยู่ในประเภทวัสดุปอซโซลานิก ASTM C 618 และ FA ถูกใช้เป็นตัวเพิ่มความคงตัวในการรักษาเสถียรภาพของดินบ่อยกกว่า BA เนื่องจากมีปริมาณ SiO₂ สูงมากกว่า BA ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ FA ยังมีอนุภาคที่ละเอียดมากโดยมีจำนวนอนุภาคบนพื้นที่ผิวที่สูงกว่า ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกด้วย [13]

3. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ ทำการผสมทรายให้ได้ความชื้นที่ร้อยละ 6.19 โดยใช้น้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนคงที่ (W/C) ร้อยละ 0.5 ในทุกสัดส่วน ผสมปูนซีเมนต์ เถ้าลอย เถ้าจม และเส้นใยแก้วในสัดส่วน ดังตารางที่ 3



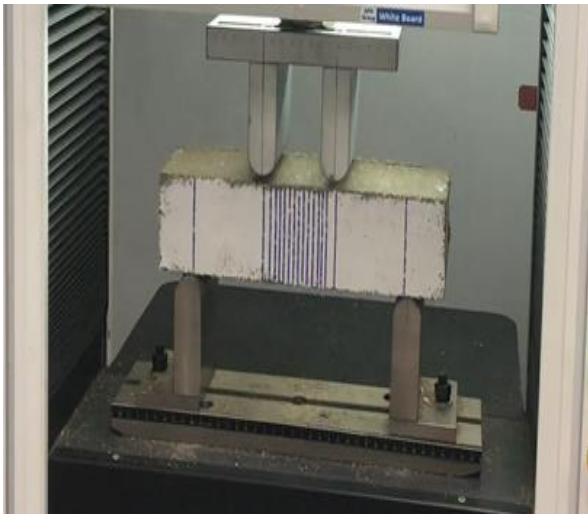
บทความวิจัย



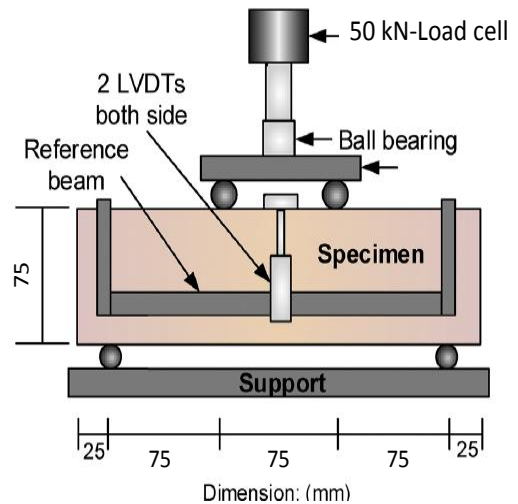
รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าจวมจากโรงไฟฟ้า
เชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชน

ทดสอบกำลังรับแรงดัด สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C 1609-10 ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ United Test รุ่น WDW-100Y มาตรฐานน้ำหนักแบบ Load Cell ขนาด 100 kN โดยมีวิธีการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบนำคานตัวอย่างวางบนแท่นเครื่องทดสอบโดยวางด้านที่เรียบเข้าหาแท่นกคน้ำหนัก การวางให้หัวกดอยู่ที่ระยะ $L/2$ ของคานทดสอบ และมีระยะพาดตัวอย่างเท่ากับ 225 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 (ก) และ 3 (ข)

ตั้งค่าโปรแกรมของเครื่องทดสอบ โดยโปรแกรมทดสอบเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อคุณสมบัติเบื้องต้น



(ก) รูปแสดงการวางตัวอย่างทดสอบ



(ข) รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ และตัวอย่างทดสอบ



ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างของทรายซีเมนต์

Group	Cement Content (g)	Fiber Content (g)	Cement (g)	Fiber Length (mm)	Fly Ash (g)	Bottom Ash (g)	Day
A1	94.12	44.82	70.59	6	23.53	0	28
A2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
A3	219.61	44.82	164.71	6	54.90	0	28
B1	156.87	0.00	117.65	6	39.22	0	28
B2	156.87	22.41	117.65	6	39.22	0	28
B3	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
B4	156.87	67.23	117.65	6	39.22	0	28
B5	156.87	89.64	117.65	6	39.22	0	28
C1	156.87	44.82	117.65	3	39.22	0	28
C2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
C3	156.87	44.82	117.65	12	39.22	0	28
D1	156.87	44.82	141.18	6	15.69	0	28
D2	156.87	44.82	133.34	6	23.53	0	28
D3	156.87	44.82	125.49	6	31.37	0	28
D4	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
D5	156.87	44.82	109.81	6	47.06	0	28
D6	156.87	44.82	101.96	6	54.90	0	28
D7	156.87	44.82	94.12	6	62.75	0	28
E1	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	7
E2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	14
E3	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
E4	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	60
E5	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	90
F1	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
F2	156.87	44.82	117.65	6	29.41	9.80	28
F3	156.87	44.82	117.65	6	19.61	19.61	28
F4	156.87	44.82	117.65	6	9.80	29.41	28
F5	156.87	44.82	117.65	6	0	39.22	28
CM	156.87	0	0	0	0	0	28
CM+FB	156.87	44.82	0	6	0	0	28



โดยกำหนดอัตราการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.05 มม./นาที และระยะเวลาการแอ่นตัวสุทธิเท่ากับ 3 มิลลิเมตร หรือจนกว่าการทดสอบดำเนินจนถึงการเกิดวิบัติ จึงหยุดการทดสอบแล้วเก็บข้อมูลที่บันทึกมา ข้อมูลที่บันทึกได้มาแปลงเป็นพารามิเตอร์ระหว่างน้ำหนักและระยะเวลาการแอ่นตัวสุทธิ แสดงในรูปที่ 3 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C78/C78M

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างของทรายซีเมนต์ โดยแบ่งเป็น 6 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่ม A ศึกษาผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์ กลุ่ม B ศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยแก้ว กลุ่ม C ศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยแก้ว กลุ่ม D ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอย กลุ่ม E ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม กลุ่ม F ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าจมน และ กลุ่ม CM กับกลุ่ม CM+FB เป็นกลุ่มตัวอย่างควบคุม

4. การคำนวณ

หลังการทดสอบจะได้ค่าข้อมูลเพื่อมาแปลงเป็นพารามิเตอร์เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิดังรูปที่ 4 (ก) และ 4 (ข) ตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 เพื่อหาพฤติกรรมของทรายซีเมนต์บดอัด โดยมีตัวแปรดังนี้

L = ช่วงความยาวพาดคาน

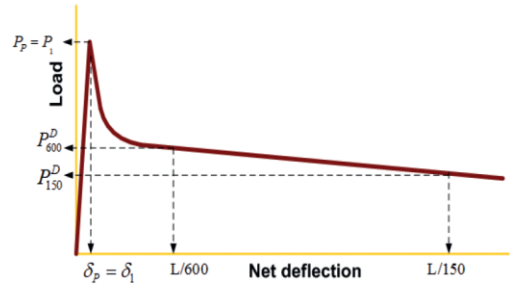
P_p = น้ำหนักสูงสุด

P_1 = น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

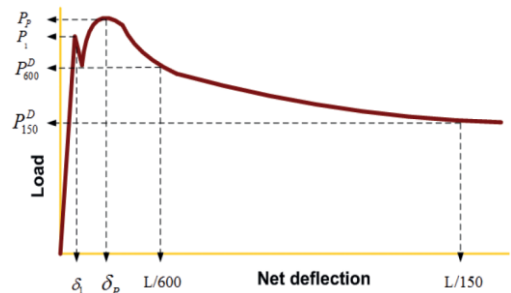
δ_p = ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุด

δ_1 = ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

f_p = กำลังตัดสูงสุด



(ก) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสำหรับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกเท่ากับน้ำหนักสูงสุด



(ข) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณเมื่อน้ำหนักสูงสุดมากกว่าน้ำหนักสูงสุดในตอนแรก

รูปที่ 4 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะเวลาแอ่นตัว

f_1 = กำลังตัดสูงสุดครั้งแรก

P_{600}^D = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ $L/600$

f_{600}^D = กำลังตัดคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ $L/600$

P_{150}^D = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ $L/150$

f_{150}^D = กำลังตัดคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ $L/150$



บทความวิจัย

T_{150}^D = พื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่าง
น้ำหนักกับระยะแอ่นตัว ตั้งแต่ 0 ถึง L/150

DI = ดัชนีความยืด

PSR = อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุด

กำลังดัด (f) สามารถคำนวณดังสมการ (1)

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

โดย P คือน้ำหนักใดๆ ที่ต้องการทราบค่ากำลังดัด
สำหรับอัตราส่วนกำลังเทียบเท่า

L = ความยาวช่วง

b = ความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

d = ความลึกของตัวอย่างทดสอบ

ดังนั้น เส้นโค้งของน้ำหนักกับระยะการแอ่นตัวสามารถ
คำนวณค่า $R_{T,150}^D$ ได้ [14] ดังสมการที่ (2)

$$R_{T,150}^D = \frac{150T_{150}^D}{f_1bd^2} \times 100\% = \frac{150T_{150}^D}{\frac{PL}{bd^2}} = \frac{T_{150}^D}{P_1 \frac{L}{150}} \quad (2)$$

โดยค่า $R_{T,150}^D$ ที่สูงกว่า 100% บ่งบอกว่าตัวอย่างจะมีความ
เหนียวสูงในทางกลับกันหากค่า $R_{T,150}^D$ ที่น้อยกว่า
100 % หมายถึงตัวอย่างจะมีความเหนียวต่ำ

$$DI = \frac{\delta_p}{\delta_1} \quad (3)$$

โดยค่า DI บ่งบอกคุณสมบัติความเป็นวัสดุเหนียว
(Ductile) ของตัวอย่าง [14] ดังสมการที่ (3)

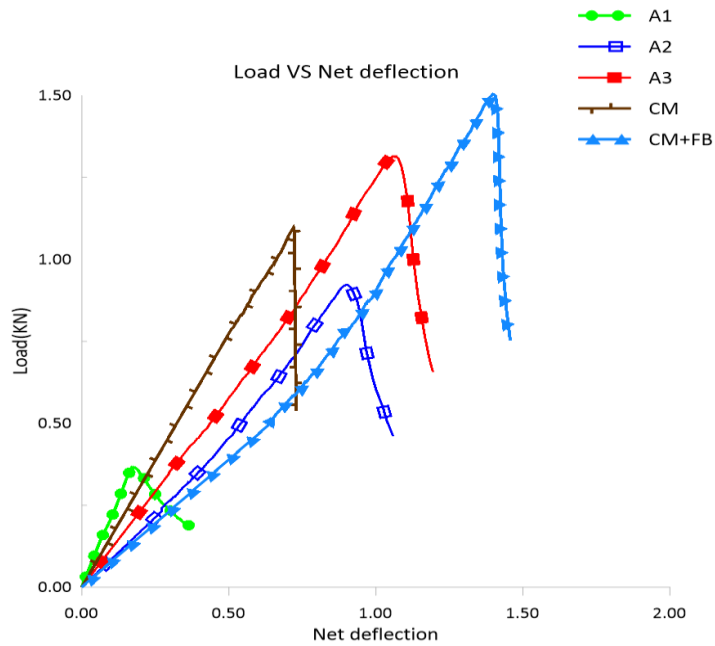
$$PSR = \frac{f_p}{f_1} \quad (4)$$

โดยค่า PSR ที่มีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดง
พฤติกรรมการอ่อนแบบวัสดุอ่อน (Softening) แต่ถ้ามีค่า
มากกว่า 1 จะบ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการอ่อน
แบบวัสดุเหนียว (Hardening) [14] ดังสมการที่ (4)

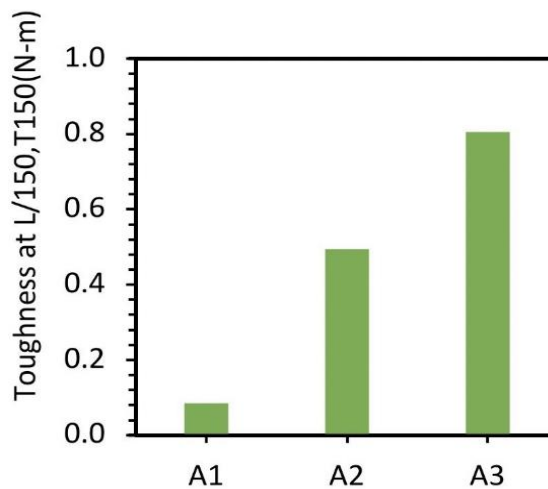
5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

5.1 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์และ เถ้าลอยที่เหมาะสม

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบ กำลังดัดใน
ห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัดของกลุ่ม A
ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 เส้นใยแก้วยาว 6 มิลลิเมตร
ในสัดส่วนร้อยละ 1 โดยปริมาตร และปริมาณซีเมนต์
ที่แตกต่างกัน โดย A1 เป็นตัวอย่างคานที่ผสมด้วย
ซีเมนต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก A2 ตัวอย่างคานที่ผสม
ด้วยซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ A3 เป็น
ตัวอย่างคานที่ผสมด้วยซีเมนต์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก
จากผลการทดสอบกำลังดัดพบว่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นตาม
ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณ
ปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังของเมทริกซ์ เมื่อ
เปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่าง A2
กับตัวอย่างควบคุม CM ที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่าง
เดียวที่ร้อยละ 5 พบว่ากำลังดัดลดลง แสดงให้เห็นว่า
การเพิ่มเถ้าลอย FA ในสัดส่วนที่ร้อยละ 25 ทดแทน
ปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังดัดลดลงแต่ระยะการแอ่นตัว
เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบของตัวอย่าง
ควบคุม CM+FB ที่ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดย
น้ำหนักและเส้นใยแก้วร้อยละ 1 โดยปริมาตร พบว่ามี
กำลังดัดและระยะการแอ่นตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุก
ตัวอย่าง โดยมี DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมี
พฤติกรรมการอ่อนแบบวัสดุอ่อน (Softening) รูปที่ 6
แสดงความเหนียวที่ระยะแอ่นตัวที่ L/150 ของคาน
A1 ถึง A3 พบว่าความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว
(Toughness at L/150) แปรผันโดยตรงกับปริมาณ
ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 กำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม A



รูปที่ 6 ความเหนียวที่ระยะแฉับตัวของกลุ่ม A (Toughness at L/150, T150 (N-m))

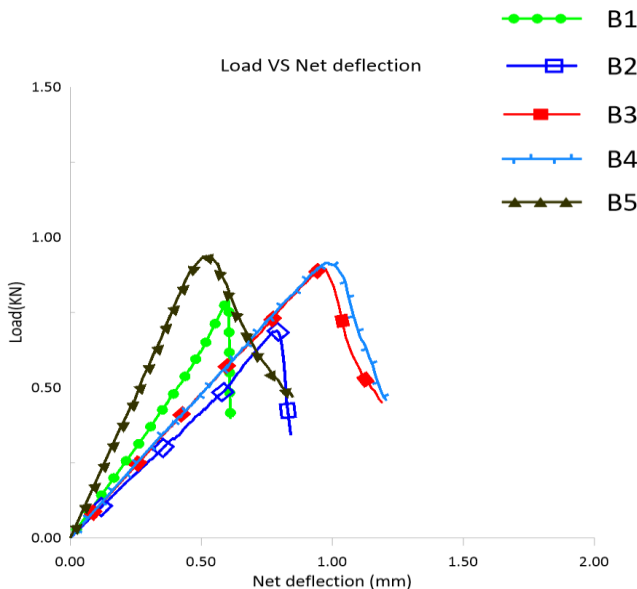


5.2 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม

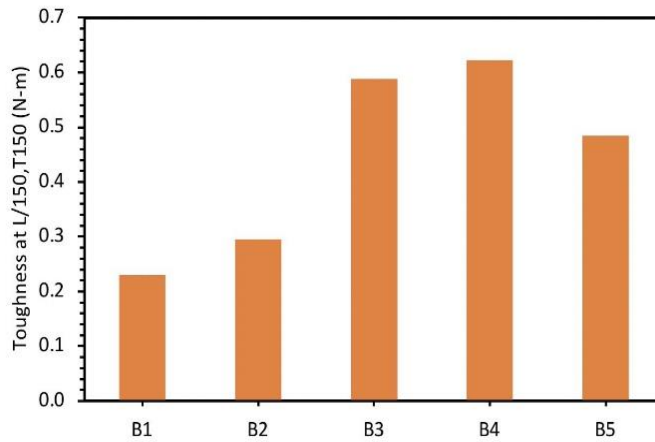
รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของกลุ่ม B โดยคาน B3 และคาน B4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 โดยปริมาตร จะมีระยะการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังดัดของคานในกลุ่ม B ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 1 kN รูปที่ 8 แสดงความเหนียวที่ระยะแอ่นตัวของกลุ่ม B และยืนยันว่าปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 โดยปริมาตร ให้ระยะการแอ่นตัวที่สูง โดย DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมีพฤติกรรมการแอ่นแบบวัสดุอ่อน (Softening) โดยปริมาณดังกล่าวยังสอดคล้องกับปริมาณการเติมเส้นใยโพลีเอทิลีนในการปรับปรุงคุณภาพดิน [15]

5.3 ผลการทดลองเพื่อหาความยาวเส้นใยที่เหมาะสม

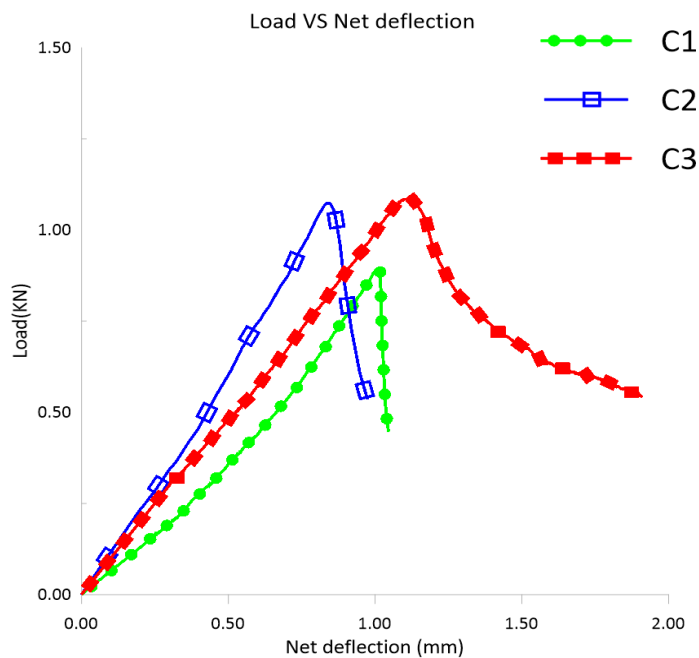
รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ที่ใช้ความยาวของเส้นใยแก้วที่แตกต่างกันของกลุ่ม C โดย C1 ใช้เส้นใยแก้วยาว 3 มิลลิเมตร C2 ใช้เส้นใยแก้วยาว 6 มิลลิเมตร และ C3 ใช้เส้นใยแก้วยาว 12 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบกำลังดัดพบว่า C3 มีระยะการแอ่นตัวสูงสุด รูปที่ 10 แสดงความเหนียวที่ระยะแอ่นตัวของกลุ่ม C และยืนยันว่าปริมาณเส้นใยแก้วที่ความยาว 12 มิลลิเมตร มีความเหนียวสูงที่สุด ค่า DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมีพฤติกรรมการแอ่นแบบวัสดุอ่อน (Softening)



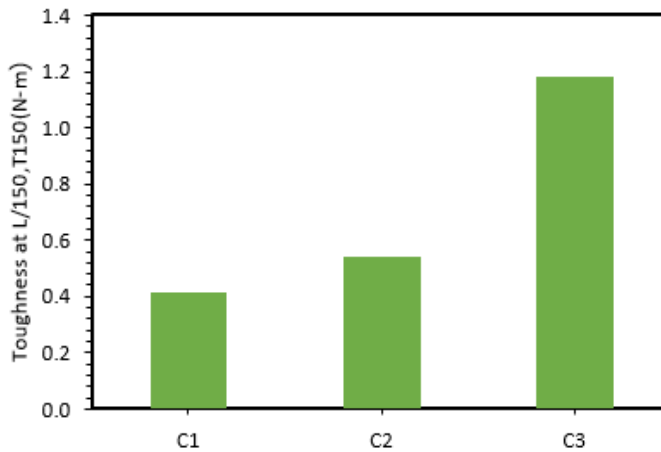
รูปที่ 7 กำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม B



รูปที่ 8 ความเหนียวที่ระยะแฉ่งตัวของกลุ่ม B (Toughness at L/150,T150 (N-m))



รูปที่ 9 กำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม C



รูปที่ 10 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม C (Toughness at L/150,T150 (N-m))

5.4 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม

รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันของกลุ่ม D โดย D1 ใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 โดย D2, D3, D4, D5, D6 และ D7 ใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 จากการทดสอบพบว่าคาน D1 และ D2 มีค่ากำลังดัดสูงที่สุดและมีระยะแ่นตัวสูง รูปที่ 12 แสดงความเหนียวที่ ระยะแ่นตัวของกลุ่ม D อย่างไรก็ตาม DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมีพฤติกรรมการแ่นแบบวัสดุอ่อน (Softening)

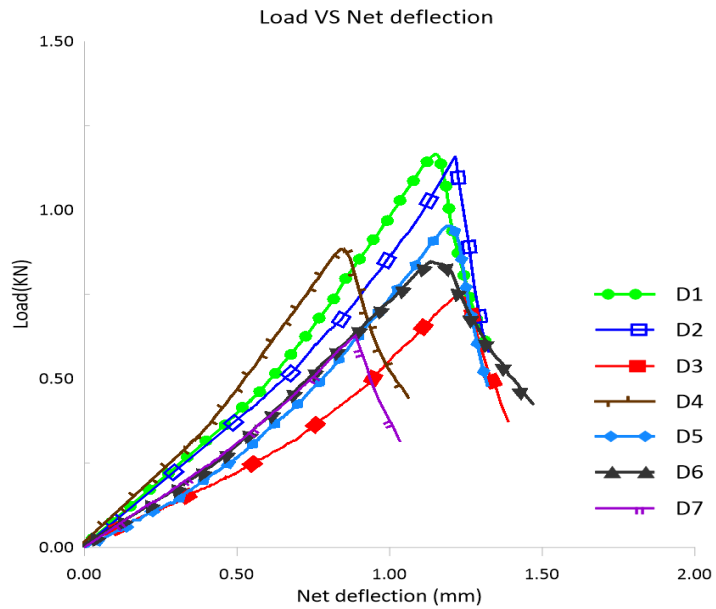
5.5 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม

รูปที่ 13 ผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่บ่มในระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดย E1, E2, E3, E4 และ E5 ใช้เวลา

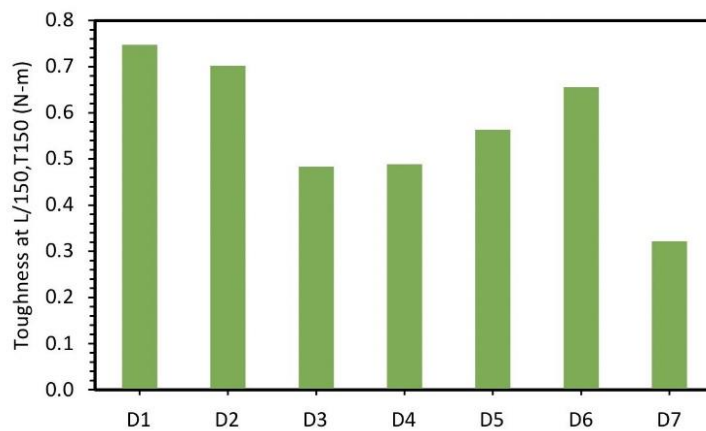
บ่มที่ 7, 14, 28, 60 และ 90 วันตามลำดับ จากการทดสอบพบว่ากำลังดัดจะมีค่าเพียงพอเมื่อบ่มตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป โดยคาน E3, E4 และ E5 มีกำลังดัดสูงจากรูปที่ 14 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม E พบว่า E5 ที่ บ่ม 90 วันมีค่าความเหนียวสูงที่สุด

5.6 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเถ้าจมนที่เหมาะสม

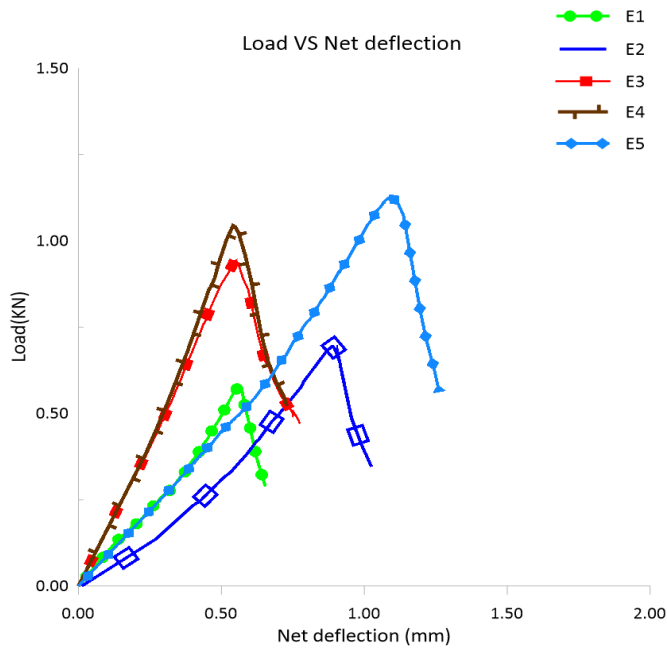
รูปที่ 15 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เถ้าลอยและเถ้าจมนทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันของกลุ่ม F โดย F1 ใช้เถ้าลอยร้อยละ 100 ต่อเถ้าจมนร้อยละ 0 ส่วน F2, F3, F4, และ F5 ใช้สัดส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าจมน (FA:BA) ทดแทนซีเมนต์ที่ร้อยละ 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จากการทดสอบพบว่าคาน F4 มีค่ากำลังดัดสูงที่สุด และใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมของคาน F1 รูปที่ 16 ยืนยันว่าคาน F4 มีค่าความเหนียว (Toughness at L/150,T150 (N-m)) สูงที่สุด



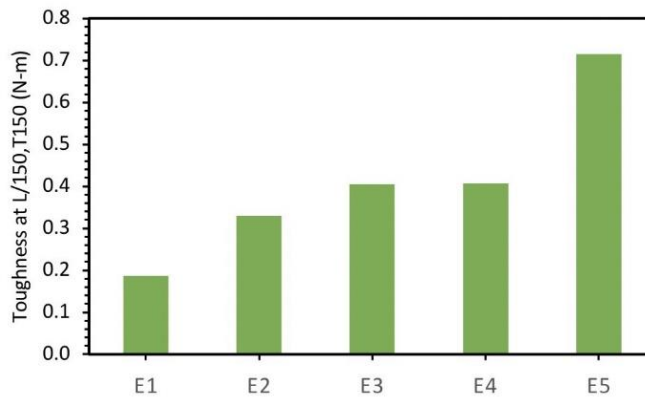
รูปที่ 11 กำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม D



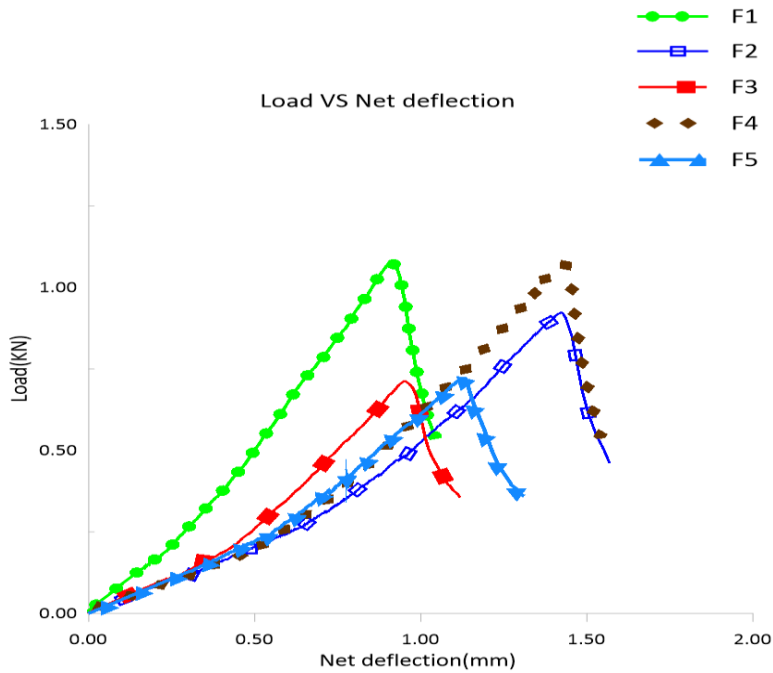
รูปที่ 12 ความเหนียวที่ระยะแฉกตัวของกลุ่ม D (Toughness at L/150,T150 (N-m))



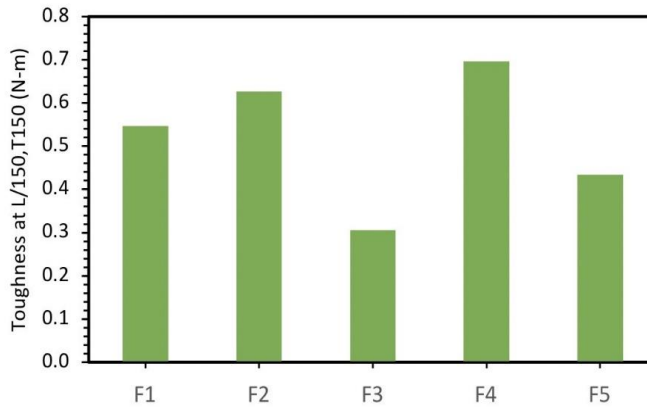
รูปที่ 13 กำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม E



รูปที่ 14 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม E (Toughness at L/150, T150 (N-m))



รูปที่ 15 กำลังตัดของทรายซี่เมนต์บดอัดกลุ่ม F



รูปที่ 16 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม F (Toughness at L/150,T150 (N-m))



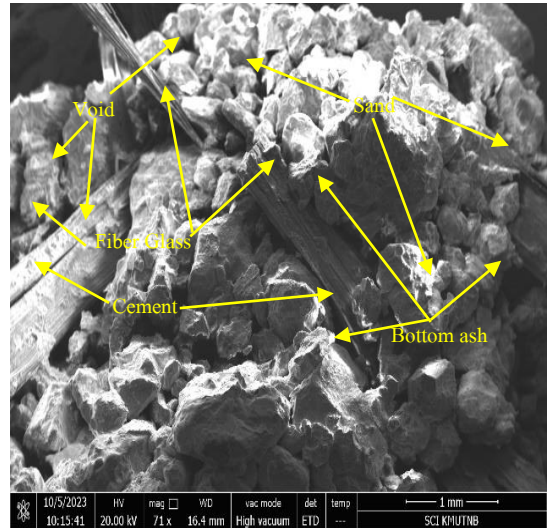
5.7 การวิเคราะห์ภาพ SEM

รูปที่ 17 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทรายแม่น้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ซีเมนต์ เถ้าจมน และเส้นใยแก้ว การขยายภาพ SEM 70x แสดงให้เห็นว่าเถ้าจมนถูกผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับใยแก้วและเมทริกซ์ทราย-ซีเมนต์ โดยสัมพันธ์กับแรงเสียดทานในสัดส่วนกับความยาวของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการแสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อย่างไร และยังส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพความแข็งแรงของซีเมนต์ในทรายอีกด้วย ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะของวัสดุคอมโพสิตและการกระจายตัวของเส้นใยแก้ว ความแข็งแรงจะเพิ่มมากขึ้นตามความยาวของเส้นใยแก้ว และสามารถเกาะติดกันได้

6. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- กำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังของเมทริกซ์ โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมแนะนำอยู่ที่ร้อยละ 5 ความเหนียวที่ระยะแอนตัว (Toughness at L/150) ของทรายซีเมนต์บดอัดแปรผันโดยตรงกับปริมาณปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น
- ปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมทรายซีเมนต์บดอัดซึ่ง DI และ PSR เป็น 1 แสดงพฤติกรรมการแอนแบบวัสดุอ่อน (Softening)



รูปที่ 17 ภาพถ่าย SEM 70 X ของทราย ซีเมนต์ เถ้าจมน และเส้นใยแก้ว

- ความยาวของเส้นใยแก้วแปรผันโดยตรงต่อระยะการแอนตัวของทรายซีเมนต์บดอัด โดยความยาวของเส้นใยแก้วที่เหมาะสมสำหรับผสมในทรายซีเมนต์บดอัดควรจะเป็น 12 มิลลิเมตร
- ปริมาณเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ของทรายซีเมนต์บดอัดควรอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 15 ซึ่งให้กำลังตัดและการแอนตัวสูงที่สุด
- ปริมาณเถ้าจมนที่เหมาะสมในส่วนผสมของทรายซีเมนต์บดอัด สัดส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าจมน (FA:BA) ที่เหมาะสมควรใช้ 25:75 ให้ค่าความเหนียว (Toughness at L/150) สูงที่สุด
- ระยะเวลาในการบ่มทรายซีเมนต์บดผสมเถ้าลอยควร อยู่ระหว่าง 28 ถึง 90 วัน โดยกำลังตัดจะมีค่าเพียงพอเมื่อบ่มตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป และพบว่าที่บ่ม 90 วันมีค่าความเหนียวสูงที่สุด



5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สัญญารับทุน CIT-2022-Grad-23

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Dubey, S. Gangopadhyay and W. Wadhwa, Occupational structure and incidence of poverty in Indian towns of different sizes, *Review of Development Economics*, 2001, 5, 49-59.
- [2] T. Sadashivam and S. Tabassu, Trends of urbanization in India: Issues and challenges in the 21st century”, *International Journal of Information Research and Review*, 2016, 3, 2375-2384.
- [3] H. Lu, C. Wang, Q. Li, R. Wiser and K. Porter, Reducing wind power curtailment in China: Comparing the roles of coal power flexibility and improved dispatch, *Climate Policy*, 2019, 19, 623-635.
- [4] C.Y. Lin and T.A. Chen, Effects of composition type and activator on fly ash-based alkali activated materials, *Polymers*, 2021, 14, 63.
- [5] A. Petcherdchoo, S. Pochalard and K. Piriyaikul, Use of bender element tests for determining shear modulus of fly-ash and cement admixed Bangkok clay with considering unconfined compressive strength, *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18, 1-13.
- [6] <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2565>. (Accessed on 30 August 2024)
- [7] H.L. Dinh, J. Liu, D.E. Ong and J.H. Doh, A Sustainable solution to excessive river sand mining by utilizing by-products in concrete manufacturing: A state-of-the-art review, *Cleaner Materials*, 2022, 6, 1-85.
- [8] <https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/concrete/270-concrete-definition-components-types>. (Accessed on 30 August 2024)
- [9] M.W.M. Abdias, M.M. Blanche, U.J.P. Nana, H.F. Abanda, N. François, and P. Chrispin, River sand characterization for Its use in concrete: A revue, *Open Journal of Civil Engineering*, 2023, 13, 353-366.
- [10] X. Yang, S. Liang, Z. Hou, D. Feng, Y. Xiao and S. Zhou, Experimental study on strength of polypropylene fiber reinforced cemented silt soil, *Applied Sciences*, 2022, 12, 8318.



- [11] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen and Y. Cai, Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25, 194-202.
- [12] P. Jamsawang, P. Voottipruex and S. Horpibulsuk, Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 27(9), 04014243.
- [13] J. Hu, Z. Ge and K. Wang, Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times”, *Construction and building materials*, 2014, 50, 657-663.
- [14] P. Jamsawang, P. Voottipruex, and S. Inthapichai, Improvement of the bending stress of polypropylene fiber-reinforced compacted cement sand”, *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2014, 24, 43-55.
- [15] S. Pochalard, C. Wungsumpow and K. Piriyaikul, Enhancement on compressive strength of Bangkok clay cement using novel high-strength polyethylene fibers, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1-8.



การออกแบบและสร้างต้นแบบของอนุกรมสแตกโมดูลของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราการขยายสูงสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวงจรส่วนหน้าของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

ธานี อยู่สมบูรณ์ พัสกร อุดมทรัพย์ ภัฏฐะ สวาระจันทร์ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง และ อนุศักดิ์ บิสลาม*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 1 มกราคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 24 ตุลาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 18 ธันวาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยฉบับนี้ขอเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับแรงดันโดยการอนุกรมโมดูลด้านออกที่มีการควบคุมแบบลูปิด เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าต่ำให้แปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าสูง ได้มีการพัฒนางจรทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิมโดยที่มีข้อจำกัดอัตราการขยายที่ต่ำ ซึ่งถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิคการเชื่อมโยงการเหนี่ยวนำ (Coupling Inductance) ในการเพิ่มขดลวด (L_2) มาเชื่อมโยงกับขดลวดเหนี่ยวนำเดิม (L_1) เทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มอัตราการขยายด้านออกให้สูงขึ้นผ่านตัวดำเนินการ a กำหนดให้โมดูลภาคกำลังทำงานภายใต้ความถี่สวิตซ์ 90 กิโลเฮิร์ตซ์ ภาคกำลังแต่ละโมดูลได้รับแรงดันด้านเข้าขนาด 36 โวลต์ แปลงผันเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกขนาด 200 โวลต์ ในส่วนของวงจรภาคกำลังมีลักษณะการต่อแบบอนุกรม 3 โมดูล ผลการทดลองที่ได้จะมีระดับแรงดันเพิ่มขึ้นตามจำนวน N โมดูลที่นำมาต่อแบบอนุกรมสแตก เป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกยกระดับขึ้นเป็น 600 โวลต์ ที่มีกำลังไฟฟ้าด้านออก 450 วัตต์ที่โหลดเต็มพิกัด ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบลูปิดที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข สภาวะไร้อโหลด สภาวะครึ่งโหลด และสภาวะเต็มโหลด ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกสามารถกลับเข้าสู่แรงดันไฟฟ้าตั้งค่า ทั้งนี้พบว่าผลที่ได้จากการจำลองและผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน และสามารถยืนยันลำดับการวิเคราะห์ได้ตามทฤษฎี

คำสำคัญ: อนุกรมสแตก; โมดูล; วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง; อัตราการขยาย

A Design and Implement Series Stack Modules of DC-DC High Step-Up Converter for Front-End of Photovoltaic Cells Application

Tanee Yusomboon, Passakorn Udomsup, Hata Sawachan, Koson Chaicharoenaudomrung and Anusak Billsalam*

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

* Corresponding author, E-mail: anusak.b@cit.kmutnb.ac.th

Received: 1 January 2024; Revised: 24 October 2024; Accepted: 18 December 2024

Online Published: 23 December 2024

Abstract: This study presents the development and model of a DC voltage conversion circuit using series output modules with closed-loop control. To transform a low DC voltage into a high DC voltage. A voltage level transmitter circuit with limited gain has been created using traditional methods. The development included the use of the coupling Inductance technology, which entailed the addition of a coil L_2 to be linked with the original inductance coil L_1 . This approach may enhance the output amplification by using operator the power modules are operated at a frequency of 90 kHz using a device that switches. Every power module is supplied with an input voltage of 36 volts and convert it into a voltage of 200 volts. A connection has been established in the power circuit. When connecting N modules in a series stack, the implement results will show an increase in voltage level. Consequently, the voltage is increased to 600 volts, generating an output power of 450 watts while operating at its full capacity. Using the proposed closed-loop control approach It is apparent that a change in electrical load occurs while changing from a no-load situation to a half-load one. at maximum load conditions. Consequently, the DC voltage output may revert again to the set value. The simulation findings and experimental results were found to be compatible. The analytical sequence may be verified based on theoretical principles.

Keywords: Series Stack; Modules; DC-DC Converter; High Step-Up



1. บทนำ

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกของแหล่งพลังงานทดแทนที่ใช้ลดภาระค่าใช้จ่ายในยุคปัจจุบันจากราคาและปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวันมีการปรับจำนวนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอดีตที่ผ่านมา จากสภาพการณ์การติดตั้งและประสิทธิภาพของแผงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตลาดเชิงพาณิชย์และแนวการพัฒนางานวิจัยยังคงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากที่ทราบโดยทั่วไปแหล่งพลังงานประเภทนี้ปัจจุบันหลักการผลิตพลังงานขึ้นอยู่กับแสงอาทิตย์รวมถึงถึงสภาพแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้ามักมีการแปรปรวน จากปัจจัยดังกล่าว กระบวนการหนึ่งที่ถูกหยิบยกมาใช้คือการต่อร่วมกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับแรงดันหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) เพื่อแปลงผันจากแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูงพร้อมทั้งรักษาระดับแรงดันด้านออก ผ่านวงจรควบคุมในการรักษาแรงดันให้คงที่ [1-2] ความสามารถของการแปลงผันจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างสถาปัตยกรรม อาทิ เช่น เทคนิคอินเตอร์ลีฟ (Interleaved: Is) เป็นการกำหนดช่วงเวลาสัญญาณสถานะการทำงานให้มีการเหลื่อม สำหรับใช้ลดการกระเพื่อมกระแสต้านเข้าให้มิต่ำลง [3-5] ต่อไปในส่วนสวิตช์คาปาซิเตอร์/ตัวเหนี่ยวนำ (Switched Capacitor/Switched Inductor: SC/SI) เป็นเทคนิคที่น่าสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากวิธีดังกล่าวมีการใช้สวิตช์ไวงานเพียงตัวเดียวเท่านั้นในการแปลงผัน จะมีลักษณะการต่อร่วมกับคาปาซิเตอร์/ตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการออกแบบช่วงเวลาการแปลงผัน อย่างไรก็ตามความเค้นบนตัวสวิตช์ไวงานมีค่าสูง เนื่องจากจะต้องรับภาระการแปลงผันพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้น [6-8]

จึงมีการหันมาใช้โวลต์เตจมัลติพลาย/ลิฟ (Voltage Multipliers/Lift /: VMs/VLs) ยกระดับแรงดันด้านออกให้มิต่ำสูงขึ้น จากรูปแบบวงจรเป็นการเพิ่มอุปกรณ์และโครงสร้างในการกักเก็บแรงดันและกระแสช่วงเวลาต่าง ๆ สำหรับปรับปรุงอัตราการขยายของระบบเพื่อเพิ่มความสามารถรองรับการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำได้ จากจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความเชื่อมั่นของระบบมีค่าลดน้อยลง [9-11] นอกเหนือจากวิธีการที่ได้กล่าวมา การนำวงจรมาต่อลักษณะคาสเคดโมดูล (Cascaded State: CS) เป็นทางเลือกที่นิยมใช้กัน เป็นการนำโมดูลมาอนุกรมลักษณะการทำงานแบบอันดับแรงดันด้านออกของโมดูลก่อนหน้าจะเป็นแรงดันด้านเข้าของโมดูลถัดไปผลที่ได้คืออัตราการขยายแรงดันเพิ่มสูงขึ้น แต่วิธีการนี้เป็นการเพิ่มภาระความเครียดแรงดันและกระแสบนตัวโมดูลสุดท้าย [12-13] แต่เมื่อพิจารณาด้านอวกาศที่มีความต้องการที่จะยกระดับแรงดัน สามารถต่อในลักษณะอนุกรมโมดูล (Series Stack Modules: SSM) ใช้สำหรับเพิ่มขนาดของแรงดันการต่อลักษณะดังกล่าวจะมีความยืดหยุ่น เมื่อเทียบกับแบบคาสเคดโมดูล และไม่เป็นการเพิ่มความเครียดแรงดันและกระแสบนตัวโมดูลใด ๆ

2. โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง

โครงสร้างของระบบที่นำเสนอจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ 1) ภาคกำลังเป็นการต่ออนุกรม 3 โมดูล แต่ละโมดูลมีแรงดันด้านออก ($V_{M1} = V_{M2} = V_{M3}$) มีค่าเท่ากับ 200 โวลต์ ทั้งนี้ในการออกแบบและจัดสร้างจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบในแต่ละโมดูลเท่ากัน ซึ่งจะมีแรงดันรวม (V_o) 600 โวลต์ ส่วนที่ 2) ภาระทางไฟฟ้า (P_o) ขนาด 450 วัตต์ และ 3) ตัวควบคุมแบบ

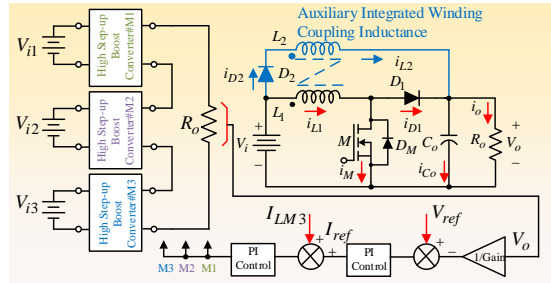


ไฟโอ จะมีการวัดแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรผ่าน เกณฑ์ลดทอน 1/150 เท่า เพื่อใช้เป็นสัญญาณ เปรียบเทียบ กระแสที่ได้จากการวัดค่ากระแสไหลผ่าน ตัวเหนี่ยวนำในโมดูลที่ 3 สำหรับสร้างเป็นสัญญาณ คำสั่งพัลส์วิดท์มอดูเลชันออกมาในลักษณะวัฏจักรงาน (D) เพื่อใช้สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้าน ออกให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 1

ในส่วนของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบ ระดับแรงดันที่มีอัตราขยายสูงเป็นวงจรที่พัฒนามาจาก วงจรทบระดับแรงดัน ซึ่งมีการใช้เทคนิคการเชื่อมต่อ ด้วยความเหนี่ยวนำ โดยการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 (L_2) ต่อเข้ากับขดลวดเหนี่ยวนำเดิม (L_1) ส่งผลให้ สามารถยกระดับแรงดันได้ 5.55 เท่า เมื่อเทียบกับ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า จากนั้นการพิจารณาสภาวะ ทำงานของวงจรในโหมดกระแสต่อเนื่อง (CCM) จึงจะ สามารถวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรโดยในสภาวะ การเปลี่ยนแปลงของสวิตช์ ซึ่งมีสภาวะการเปลี่ยนแปลง สวิตช์ 2 ช่วง คือ ช่วงสวิตช์นำกระแส (Switch-On) และ ช่วงสวิตช์หยุดนำกระแส (Switch-Off) จากสภาวะของ วงจรจะสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 2 ผ่านตัวดำเนินการ

$a = i_2/i_1 = \sqrt{L_1/L_2}$ สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ของอัตราขยายแรงดันซึ่งมีสภาวะการทำงานแบ่งได้ 2 สภาวะ ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของวงจรมี การกำหนดเงื่อนไขดังนี้ 1) กำหนดให้สวิตช์ไวงานและ ไดโอดเป็นสวิตช์แบบอุดมคติ 2) อุปกรณ์เป็นเชิงเส้น แปรผันตรงกับเวลาไม่ขึ้นกับความถี่สวิตช์

โหมดการทำงานที่ 1: ในสภาวะเริ่มต้นสวิตช์ไวงาน (M) นำกระแสและมีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงด้านเข้า (V_i) ผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่ 1 (L_1)



รูปที่ 1 โดอะแกรมการต่ออนุกรมโมดูลวงจรแปลงผัน ไฟฟ้ากระแสตรงทบระดับแรงดันที่นำเสนอ

และจะไหลผ่านมายังสวิตช์จนครบวงจรซึ่งในเวลานี้ ขดลวดเหนี่ยวนำที่ 1 (L_1) จะทำการสะสมพลังงานและ ในเวลาเดียวกันก็จะทำการถ่ายโอนพลังงานไปยัง ขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 (L_2) ผ่านตัวดำเนินการอัตราส่วน ของขดลวดเหนี่ยวนำทั้งสองขด a ซึ่งพลังงานที่เก็บ สะสมไว้ในขดลวดเหนี่ยวนำที่ 1 (L_1) จะมีกระแสไหล ผ่านขดลวดเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น และในขณะเดียวกัน แรงดันตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 (V_{L2}) จะทำการ คายแรงดันจากขั้วของตัวเหนี่ยวนำผ่านไปยังตัวเก็บ ประจุที่ต่อขนานกับภาระทางไฟฟ้าด้านออกต่อไป ใน โหมดการทำงานดังกล่าวไดโอด (D_1) และไดโอด (D_2) จะไม่มีการนำกระแส สามารถเขียนความสัมพันธ์กระแส ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (1)-(2)

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_i \tag{1}$$

$$\Delta i_{Lon} = \frac{V_i DT}{L_1} \tag{2}$$

โหมดการทำงานที่ 2: ในโหมดการทำงานนี้ เมื่อสวิตช์ ไวงาน (M) หยุดนำกระแส พลังงานที่สะสมอยู่ที่ขดลวด เหนี่ยวนำ (L_1, L_2) จะคายพลังงานผ่านไดโอดพื้นตัวเร็ว (D_1, D_2) ที่นำกระแสต่อเนื่อง จากพลังงานจากขดลวด



เหนี่ยวนำที่ 1 (L_1) จะไม่สามารถไหลผ่านไดโอด (D_1, D_2) ได้เนื่องจากพลังงานในขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 มีมากกว่า และเวลาเดียวกันนี้ขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 ก็จะมีการคายพลังงานไปยังตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันกับภาระทางไฟฟ้าด้านออกซึ่งลักษณะคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูงทั้ง 2 ขดที่การกำหนดค่าเหนี่ยวนำ (L_2) มีค่ามากกว่าขดลวดเหนี่ยวนำ (L_1) เป็นผลทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรจะใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (L_2) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดพิกัดของแรงดันด้านออกของวงจร และทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดสภาวะการทำงานของวงจรที่เกิดขึ้น สมการกระแสช่วงหยุดนำกระแสหาได้ดังสมการที่ (3)-(4)

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_i - V_o}{a} \quad (3)$$

$$\Delta i_{L2off} = \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T}{aL_2} \quad (4)$$

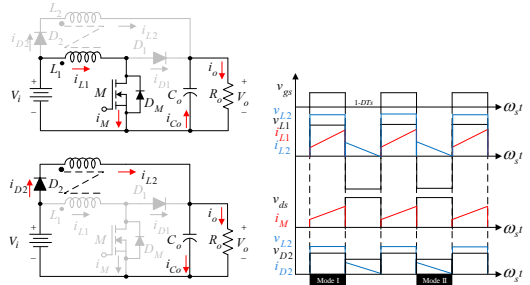
ในสภาวะอยู่ตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับ $\Delta i_{L1on} + \Delta i_{L2off} = 0$ จากอัตราส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำทั้งสองขดที่มีค่า $N_1/N_2 = V_1/V_2 = i_2/i_1$ ผ่านตัวดำเนินการเป็น $a = v_{L1}/v_{L2}$ ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวดำเนินการได้เป็น $L_1 = L_2 a^2$ จากนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (5)-(6)

$$\frac{V_i DT}{L_2 a^2} + \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T}{aL_2} = 0 \quad (5)$$

$$\left(\frac{V_i D}{a^2}\right)a = -(V_i - V_i D - V_o + V_o D) \quad (6)$$

ดังนั้น อัตราส่วนแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{D}{a(1 - D)} + 1\right) \quad (7)$$



รูปที่ 2 ลำดับการทำงานของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงทบระดับแรงดันที่นำเสนองาน

ต่อไปค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด กำหนดให้การสูญเสียในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงทบแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ด้านเข้ามีค่าเท่ากับด้านออก $P_i = P_o$ ได้ดังสมการที่ (8)-(9)

$$V_i (I_{L1} D + I_{L2} (1 - D)) = \frac{V_o^2}{R_o} \quad (8)$$

$$V_i (I_{L1} D + a I_{L1} (1 - D)) = \frac{\left(V_i \left(\frac{D}{a(1 - D)} + 1\right)\right)^2}{R_o} \quad (9)$$

ความสัมพันธ์ของกระแสเฉลี่ยเขียนได้ดังสมการที่ (10) จากนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดสามารถเขียนจากสมการที่ (11)-(12) ตามลำดับ

$$I_{L1} = \frac{V_i (D + a(1 - D))}{a^2 (1 - D)^2 R_o} \quad (10)$$

$$I_{Lmax} = \frac{V_i (D + a(1 - D))}{a^2 (1 - D)^2 R_o} + \frac{V_i DT}{2L_1} \quad (11)$$

$$I_{Lmin} = \frac{V_i (D + a(1 - D))}{a^2 (1 - D)^2 R_o} - \frac{V_i DT}{2L_1} \quad (12)$$

ดังนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดสำหรับการทำงานสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) กำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับศูนย์



$$L_{\min} = \frac{DR_o a^2 (1-D) 2}{2f (D+a(1-D))} \quad (13)$$

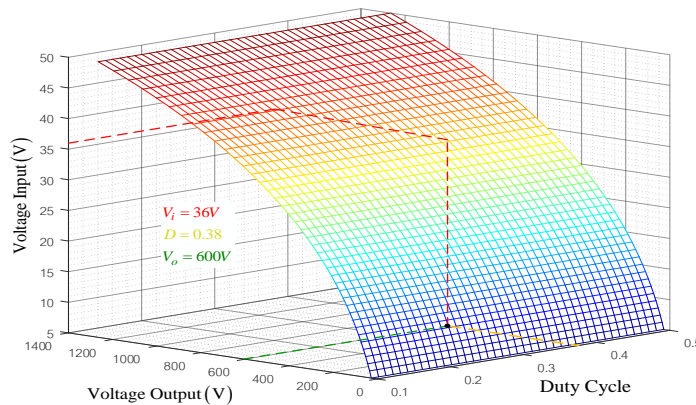
จากสมการที่ (7) เมื่อค่าวัฏจักรงาน (D) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถหาแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำหนดให้ $V_f = V_{sw}$ ได้ดังสมการที่ (14)

$$v_{sw} = \frac{aV_o}{D+a} \quad (14)$$

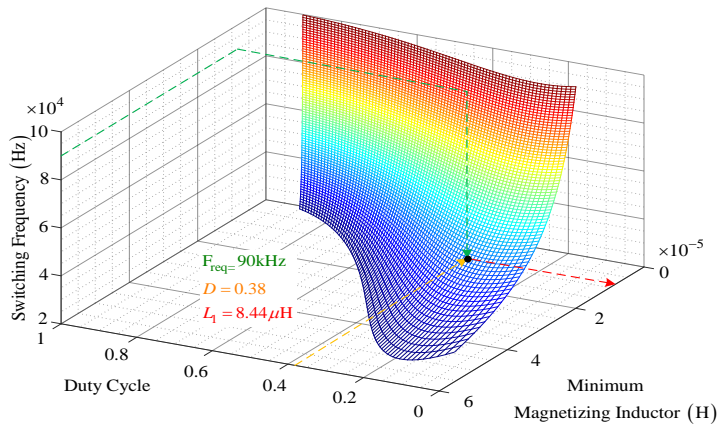
ท้ายสุดของการออกแบบภาคกำลังเป็นในส่วนของ อัตราการกระเพื่อมแรงดันด้านออกของวงจร กำหนด มีค่า 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังสมการที่ (15)

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LC_o f^2} \quad (15)$$

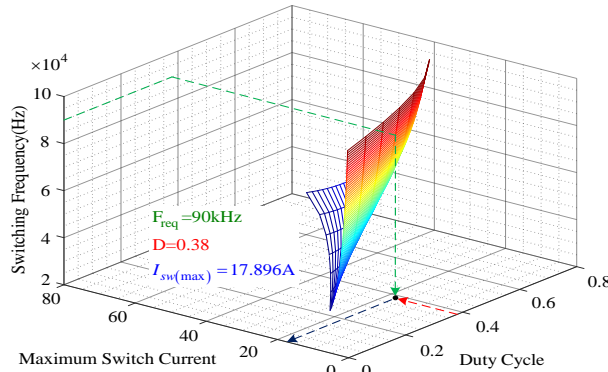
นำพารามิเตอร์ที่มีนัยความสำคัญไปสร้างกราฟสำหรับการ การตรวจสอบความถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 3-6



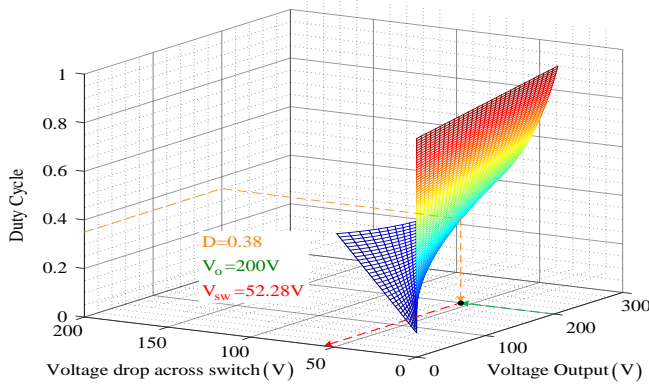
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรงาน (D) แรงดันด้านเข้า (V_i) และแรงดันด้านออก (V_o)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ (f_s) วัฏจักรงาน (D) และค่าขดลวดเหนี่ยวนำที่ 1 (L_1)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สวิตช์ (f_s) วัฏจักรงาน (D) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์สูงสุด ($I_{sw(max)}$)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ (v_{sw}) ค่าวัฏจักรงาน (D) และแรงดันด้านออก (V_o)

3. การออกแบบและคำนวณระบบควบคุม ป้อนกลับแบบวงรอบปิด

การออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเพื่อนำไปสร้างแผนภาพโพลไดอะแกรม

จากนั้นจึงนำไปออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิคผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งการเลือกที่ความถี่ตัดของลูบแรงดันและลูบกระแสโดยสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในสถานะสวิตช์ไงานงานนำกระแส (DT) และไม่นำกระแส $(1-D)T$ ดังแสดงในรูปที่ 7-11 ตามลำดับ

พิจารณาในโหมดการทำงานที่ 1: ใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law: KVL) เพื่อหาสมการแรงดันของภาคกำลัง ซึ่งคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำสามารถเขียนเป็นรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรไฟฟ้า ในการออกแบบวงจรจะนำกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 มาทำการควบคุมเนื่องจากขดที่ 2 นั้นจะช่วยยกกระดับแรงดันจาก $a=i_2/i_1=(L_1/L_2)^{1/2}$, $i_{L1}=i_{L2}/a$, $L_1=L_2a^2$ ทำการแทนขดลวดเหนี่ยวนำที่ 1 ลงในขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 และเปลี่ยนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดที่ 1 (i_{L1}) เป็นกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 (i_{L2}) ทำการจัดรูป



สมการแรงดันตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำที่ 2 ขณะสวิตช์นำกระแส ได้ตั้งสมการความสัมพันธ์ที่ (16)-(17)

$$v_i(t)D = v_{L1}(t) = L_1 \frac{di_L}{dt} \quad (16)$$

$$v_i(t)D = L_2 a^2 \frac{d\left(\frac{i_{L2}}{a}\right)(t)}{dt} \quad (17)$$

จากนั้นใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์หากระแสตัวเหนี่ยวนำที่ 2 $i_{L2}(t) = i_c(t) + i_o(t) = 0$ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในรูปสมการเชิงอนุพันธ์จะได้สมการกระแสไหลที่ผ่านตัวเก็บประจุขณะสวิตช์นำกระแส

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = -\frac{v_o(t)D}{R_o} \quad (18)$$

พิจารณาในโหมดการทำงานที่ 2 หาสมการแรงดันและกระแส ในขณะที่สวิตช์ไวงานไม่นำกระแส $(1-D)T$

$$L_2 \frac{di_{L2}(t)}{dt} = (V_i(t) - V_o(t))(1-D) \quad (19)$$

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = \left(i_{L2}(t) - \frac{V_o(t)}{R} \right) (1-D) \quad (20)$$

จากนั้นทำการจัดสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุด้านออกและแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่ 2

$$\left. \begin{aligned} L_2 \frac{d\tilde{i}_{L2}(t)}{dt} &= \underbrace{\frac{V_{in}D}{a} + V_{in} - V_{in}D - V_o + V_oD}_{\text{DC terms}} + \underbrace{\frac{V_{in}\tilde{d}}{a} + \frac{\tilde{v}_{in}(t)D}{a} - V_{in}\tilde{d} + \tilde{v}_{in}(t)}_{\text{1}^{\text{st}} \text{ order ac terms (linear)}} \\ &\quad - \underbrace{\tilde{v}_{in}(t)D + V_o\tilde{d} - \tilde{v}_o(t) + \tilde{v}_o(t)D}_{\text{1}^{\text{st}} \text{ order ac terms (linear)}} + \underbrace{\frac{\tilde{v}_{in}(t)\tilde{d}}{a} - \tilde{v}_{in}(t)\tilde{d} + \tilde{v}_o(t)\tilde{d}}_{\text{2}^{\text{nd}} \text{ order ac terms (nonlinear)}} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_{L2}(t)(1-D) - \frac{V_o(t)(1-D)}{R_o} \quad (21)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}(t)}{dt} = \frac{V_i(t)D}{a} + (V_i(t) - V_o(t))(1-D) \quad (22)$$

ในการออกแบบการควบคุมแบบรูปปิด จะต้องหาพลาหนท์ของระบบโดยจะใช้เทคนิควงจรมุมูลขนาดเล็ก โดยตัวแปรจะถูกมองเป็นค่าคงที่รวมกับสัญญาณขนาดเล็ก กำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} i_{L2}(t) &= I_{L2} + \tilde{i}_{L2}(t) \\ v_{in}(t) &= V_{in} + \tilde{v}_{in}(t) \\ D &= D + \tilde{d} \\ v_o(t) &= V_o + \tilde{v}_o(t) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

จากสมการที่ (24) จะเลือกใช้เทอมของไฟฟ้ากระแสสลับลำดับที่หนึ่ง เนื่องจากต้องการสมการที่เป็นเชิงเส้นในการหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ดังนั้นจะละเลยเทอมของไฟฟ้ากระแสตรงและเทอมของไฟฟ้ากระแสสลับลำดับที่สองหรือให้มามีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้สมการแรงดันตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำขดที่ 2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการที่ (25) และรูปที่ 7

ต่อไปเป็นการหาสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุขณะสวิตช์ไวงานนำกระแส ใช้เทคนิควงจรมุมูลขนาดเล็ก (Small Signal Technique) จากนั้นทำการจัดรูปเพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง ดังสมการที่ (26)-(28) และรูปที่ 8



$$L_2 \frac{d\tilde{i}_{L2}(t)}{dt} = \tilde{d} \left\{ \begin{aligned} & \left(V_{in} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) - V_o \right) + \tilde{v}_{in}(t) \\ & \left(\frac{D}{a} + 1 - D \right) + \tilde{v}_o(t)(D-1) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

การออกแบบวงจรควบคุมแบบลูปิดจะต้องนำสมการแรงดันตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำขดที่สองในรูปของสัญญาณขนาดเล็กและสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในรูปสัญญาณขนาดเล็กมาจัดให้อยู่ในรูปการแปลงลาปลาซ จากอัตราส่วนหม้อแปลง (1-D): 1 สามารถจัดเป็นรูปวงจรมุมของวงจรทบทระดับในรูปสัญญาณขนาดเล็กดังรูปที่ 9

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_{L2}(t)(1-D) - \frac{v_o(t)}{R} \quad (26)$$

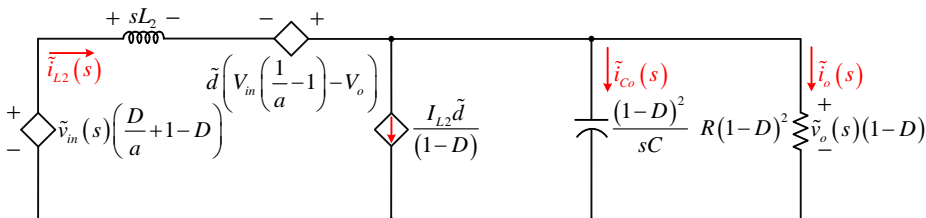
$$C \frac{d\tilde{v}_o(t)}{dt} = \left. \begin{aligned} & -\frac{V_o}{R} + I_{L2} - I_{L2}D - \frac{\tilde{v}_o(t)}{R} - I_{L2}\tilde{d} \\ & + \tilde{i}_{L2}(t) - \tilde{i}_{L2}(t)D - \tilde{i}_{L2}(t)\tilde{d} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$C \frac{d\tilde{v}_o(t)}{dt} = -\frac{\tilde{v}_o(t)}{R} - I_{L2}\tilde{d} + \tilde{i}_{L2}(t)(1-D) \quad (28)$$

สำหรับการออกแบบหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบในรูปกระแสและแรงดันต่อไป

4. ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลูปิดกระแสและแรงดัน

หาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปิดกระแส $\tilde{i}_{L2}(s)/\tilde{d}$ ได้จากการใช้ทฤษฎีการวางซ้อน ในการวิเคราะห์ห้วงจรมุมของวงจรทบทระดับแรงดันในรูปสัญญาณขนาดเล็ก



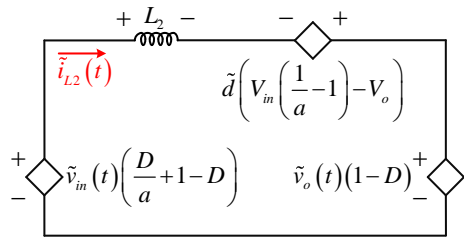
รูปที่ 9 วงจรมุมของวงจรทบทระดับแรงดันในรูปสัญญาณขนาดเล็กจากแรงดันและกระแสของวงจรทบทระดับแรงดันด้านออกสูง

ในขั้นตอนแรก จะพิจารณาเฉพาะแหล่งจ่ายแรงดันจะละเลยนิพจน์แหล่งจ่ายกระแสแสดงแสดงในรูปที่ 10

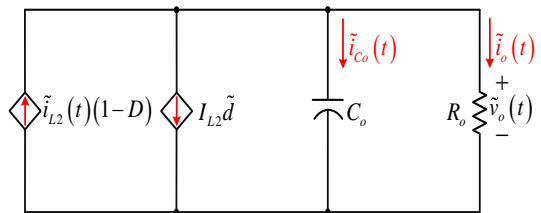
$$\tilde{i}_{L2}(s) = \frac{\tilde{d} \left(V_{in} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) - V_o \right)}{L_2 s + Z_o} \quad (29)$$

เมื่อสมการอิมพีแดนซ์ด้านออกมีค่าเท่ากับ

$$Z_o = \frac{R(1-D)^2}{RCs + 1} \quad (30)$$



รูปที่ 7 วงจรมุมของแรงดันรูปแบบสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 8 วงจรมุมกระแสรูปแบบสัญญาณขนาดเล็ก



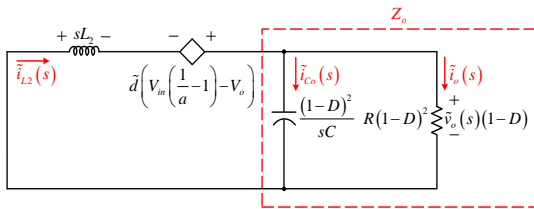
บทความวิจัย / บทความวิชาการ

$$\frac{\tilde{i}_{L2}(s)}{\tilde{d}} = \frac{\left(V_{in} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) - V_o \right) (RCs + 1) + I_{L2} R (1 - D)}{RCL_2 s^2 + L_2 s + R(1 - D)^2} \quad (31)$$

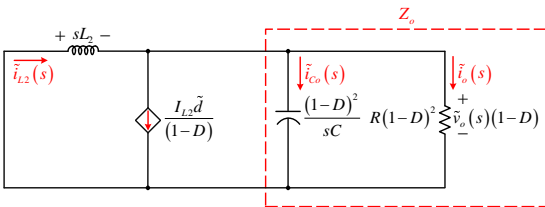
จากนั้นเป็นการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของรูปแรงดัน $\tilde{v}_o(s)/\tilde{i}_{L2}(s)$ จากรูปที่ 11 ชั้นตอนนี้จะเลยนิพจน์ของแหล่งจ่ายที่มีค่าวัฏจักรงานอยู่ร่วมด้วย จะใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law : KVL) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปแรงดัน และแทนอิมพีแดนซ์ด้านออก จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปแรงดันดังสมการที่ (32)-(33) ตามลำดับ

$$\tilde{v}_o(s)(1 - D) = \tilde{i}_{L2}(s) Z_o \quad (32)$$

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{i}_{L2}(s)} = \frac{R(1 - D)}{RCs + 1} \quad (33)$$



รูปที่ 10 วงจรสมมูลทระดับแรงดันในรูปแบบสัญญาณขนาดเล็กในกรณีพิจารณาแหล่งจ่ายแรงดัน



รูปที่ 11 วงจรสมมูลทระดับแรงดันในรูปแบบสัญญาณขนาดเล็กในกรณีพิจารณาแหล่งกระแส

ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ $\tilde{v}_o(s)/\tilde{d}$ ได้สมการที่ (34) ซึ่งจะนำไปออกแบบตัวควบคุมต่อไป

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}} = \frac{R \left((1 - D) \left(V_{in} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) - V_o \right) - I_{L2} L_2 s \right)}{RCL_2 s^2 + L_2 s + R(1 - D)^2} \quad (34)$$

5. การออกแบบตัวควบคุมแบบลูปิด

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบลูปิดของวงจรแปลงผันไฟฟ้าด้วยเทคนิคผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) โดยจะออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ผลตอบสนองความถี่ของระบบลูปิดที่ความถี่ตัด (Cut-Off Frequency) ซึ่งทำให้ขนาดของระบบมีค่าเท่ากับ 1 และมีมุมเฟสเท่ากับ $-180^\circ + \phi_m$ โดยที่ (ϕ_m) คือค่าเฟอิมมุมเฟส ที่ทำให้ระบบมีความเสถียรภาพ ดังสมการที่ (35-36) ตามลำดับ

$$|G_C(j\omega_C)| |G_P(j\omega_C)| = 1 \quad (35)$$

$$\angle G_C(j\omega_C) + \angle G_P(j\omega_C) = -180^\circ + \phi_m \quad (36)$$

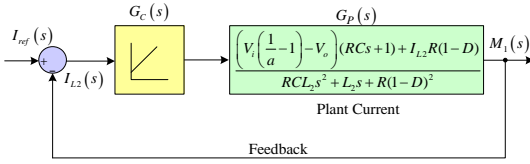
สามารถหาค่าเฟอิมมุมเฟส (ϕ_m) ได้โดยกำหนดอัตราकरणช่วงเวลา $\zeta = 1$ เพื่อให้ระบบใกล้เคียงกับการหน่วงวิกฤตและเกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุดจะได้ค่า (ϕ_m) เท่ากับ 76.3454 องศา

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta}{\left(\sqrt{4\zeta^4 + 1} - 2\zeta^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (37)$$

สมการถ่ายโอนของรูปแรงดันและรูปกระแส ในสมการที่ (31) และ (34) นำไปสร้างแผนภาพโพลและมุมเฟส เพื่อหาขนาด $|G_C(s)|$ และมุมเฟส $\angle G_C(s)$ ของตัวควบคุม ด้วยโปรแกรม MATLAB ได้อะแกรมการควบคุมกระแสและแรงดันในรูปที่ 12 และ 15 จากการสร้างแผนภาพโพลและมุมเฟส ในรูปที่ 13 และ 14 นำไปสู่การหาตัวควบคุมแบบพีไอ โดยลูกระแสจะเลือกใช้ความถี่ตัด (ω_c) ที่ 650 เฮิรตซ์ มีค่าขนาดของระบบแรงดัน $|G_p(s)|$ เท่ากับ 24.4 เดซิเบล และมุม



บทความวิจัย / บทความวิชาการ



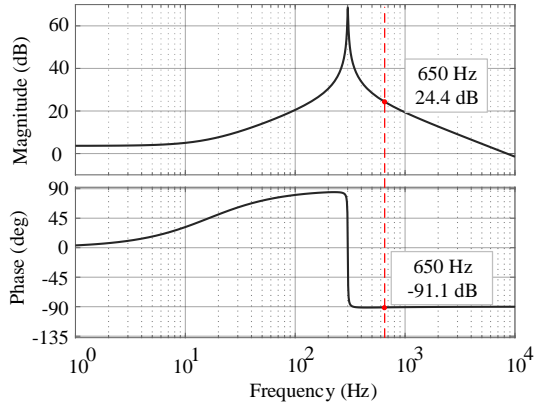
รูปที่ 12 ไตอะแกรมการควบคุมลูปกระแสใช้ในการควบคุมแบบตัวควบคุมลูปกระแส

เฟสของระบบแรงดัน $\angle G_P(s)$ เท่ากับ -91.1 องศาสามารถนำไปหาค่าขนาดของตัวควบคุมลูปกระแส $|G_C(s)|$ และมุมเฟส $\angle G_C(s)$ มีค่าเท่ากับ 0.0209 เดซิเบล และ -104 องศา ส่วนในลูปแรงดันจะเลือกใช้ความถี่ตัด ω_c ที่ 20 เฮิรตซ์ มีค่าขนาดของระบบกระแส $|G_P(s)|$ เท่ากับ -5.35 เดซิเบล และมุมเฟส $\angle G_P(s)$ เท่ากับ -80.6 องศา สามารถนำไปหาค่าขนาดของตัวควบคุมลูปกระแส $|G_C(s)|$ และมุมเฟสของตัวควบคุมลูปกระแส $\angle G_C(s)$ มีค่าเท่ากับ 0 และ -103.6545 องศาตามลำดับ

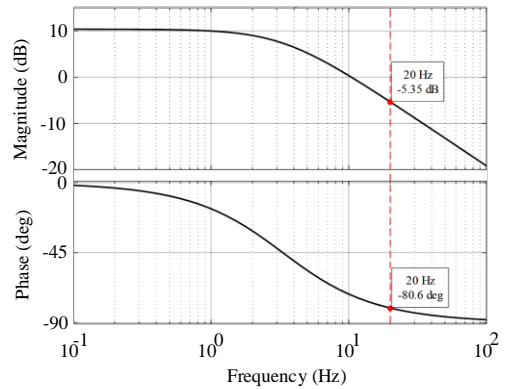
ในการหาค่าตัวควบคุมแบบพีไอของลูปกระแสและแรงดันจะแทนค่า ความถี่ตัด (ω_c) ขนาดของตัวควบคุมในแต่ละลูป $|G_C(s)|$ และมุมเฟสของตัวควบคุมในลูป $\angle G_C(s)$ ลงในสมการที่ (38)-(39) ตามลำดับ

$$K_p = \frac{|G_C(j\omega_c)|}{\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2(\angle G_C(j\omega_c) + 90^\circ)}}} \quad (38)$$

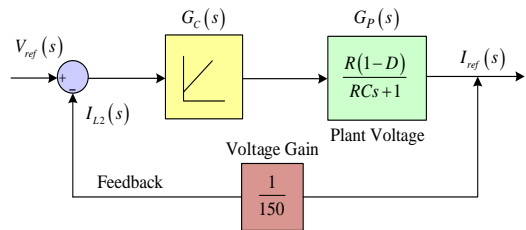
$$K_i = \frac{K_p \omega_c}{\tan(\angle G_C(j\omega_c) + 90^\circ)} \quad (39)$$



รูปที่ 13 แผนภาพโบเดและมุมเฟสของระบบที่ต้องการควบคุมลูปกระแส



รูปที่ 14 แผนภาพโบเดและมุมเฟสของระบบที่ต้องการควบคุมลูปแรงดัน



รูปที่ 15 ไตอะแกรมการควบคุมลูปแรงดันที่ใช้ในการควบคุมแบบตัวควบคุมลูปแรงดัน



การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สามารถสรุปได้ดังนี้ โดย ลูบของกระแสในแต่ละโมดูลจะมีค่า $K_{pc} = 0.059$, $K_{ic} = 53.640$ ในส่วนของตัวควบคุมลูบแรงดันจะมีค่า $K_{pv} = 1.704$, $K_{iv} = 91.109$ ซึ่งจะใช้ค่าที่ได้นำไปเป็นพารามิเตอร์สำหรับการสร้างแบบจำลองและวงจรต้นแบบต่อไป

6. ผลการจำลองและทดลอง

การทดลองและการจำลองการเปลี่ยนแปลงของภาระทางไฟฟ้าด้านนอกของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงทบแรงดันอัตราขยายสูงแบบต่ออนุกรมโมดูลแบบลูบปิด จะนำวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงทบแรงดันอัตราขยายสูงมาต่ออนุกรมกันจำนวนสามโมดูลโดยแต่ละโมดูลจะมีแรงดันด้านออก 200 โวลต์ และแรงดันรวมด้านออก 3 โมดูลไม่ต่ำกว่า 600 โวลต์ ที่ภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัดเท่ากับ 800 วัตต์ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟารวมไม่ต่ำกว่า 450 วัตต์ และกระแสด้านออก 750 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงให้ภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะโหลดเต็มพิกัด (Full-Load 100%) ไปสภาวะครึ่งโหลด (Half-Load 50%) และเปลี่ยนกลับมาสู่สภาวะโหลดเต็มพิกัด (Full-Load 100%)

จากรูปที่ 16 (ก-ข) แสดงผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะครึ่งโหลดแล้วกลับมาสภาวะโหลดเต็มพิกัด จะพบว่าช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะครึ่งโหลด ผลการทดลองแรงดันจะพุ่งเกิน 5.2 โวลต์ ใช้เวลากลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 3.3 มิลลิวินาที และช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะครึ่งโหลดเป็นสภาวะโหลดเต็มพิกัด ผลการ

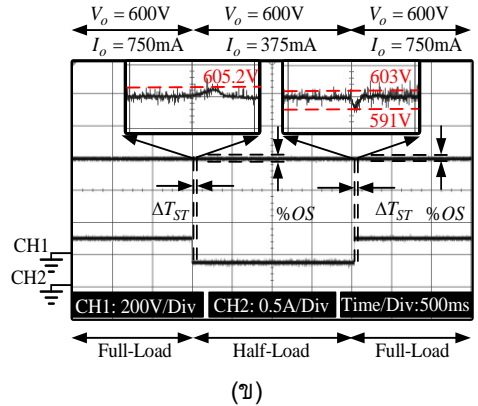
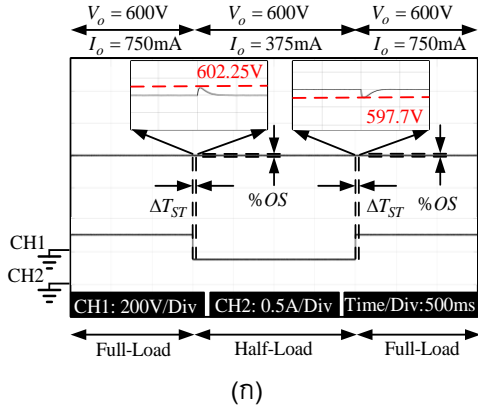
ทดลองแรงดันจะพุ่งต่ำจากสภาวะคงตัวที่ 9 โวลต์ ใช้เวลากลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 2.6 มิลลิวินาที

ถัดไปเงื่อนไขการการเปลี่ยนแปลงให้ภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะโหลดเต็มพิกัด ไปสภาวะไร้อโหลด และเปลี่ยนกลับมาเป็นสภาวะโหลดเต็มพิกัด ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะไร้อโหลดแล้วกลับมาสภาวะโหลดเต็มพิกัด จะพบว่าช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะไร้อโหลด ผลการทดลองแรงดันจะแกว่งพุ่งขึ้น 6.26 โวลต์และพุ่งลง 15 โวลต์ ใช้เวลากลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 86 มิลลิวินาที และช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะไร้อโหลดเป็นสภาวะโหลดเต็มพิกัด ผลการทดลองแรงดันจะพุ่งต่ำจากสภาวะคงตัวที่ 20 โวลต์ ใช้เวลากลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 9.4 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 17 (ก-ข)

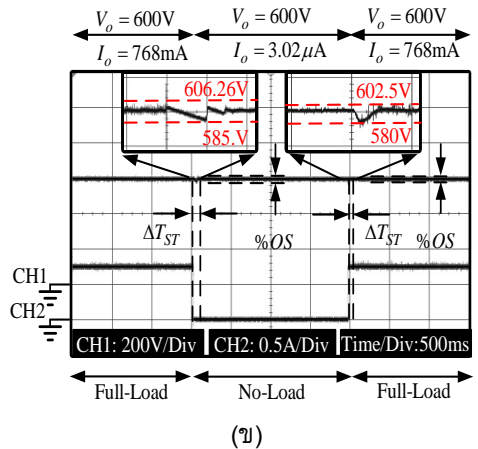
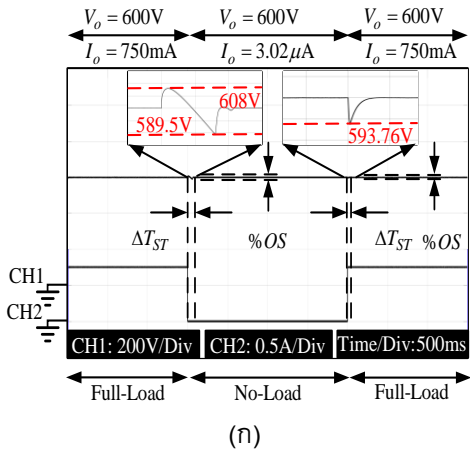
ภาพที่ 18 (ก-ข) เป็นเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงสุดท้ายกำหนดให้ภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะครึ่งโหลดไปสภาวะไร้อโหลด และเปลี่ยนกลับมาสภาวะครึ่งโหลด ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะครึ่งโหลดเป็นสภาวะไร้อโหลดแล้วกลับมาสภาวะไร้อโหลด จะพบว่าช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากครึ่งโหลดเป็นสภาวะไร้อโหลด ผลการทดลองแรงดันจะแกว่งพุ่งขึ้น 3.25 โวลต์และพุ่งลง 3.2 โวลต์ ใช้เวลากลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 3.2 มิลลิวินาที และช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจากสภาวะไร้อโหลดเป็นสภาวะครึ่งโหลด ผลการทดลองแรงดันจะพุ่งต่ำจากสภาวะคงตัวที่ 8 โวลต์ ใช้เวลากลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 4 มิลลิวินาที ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ในตารางที่ 1



บทความวิจัย / บทความวิชาการ



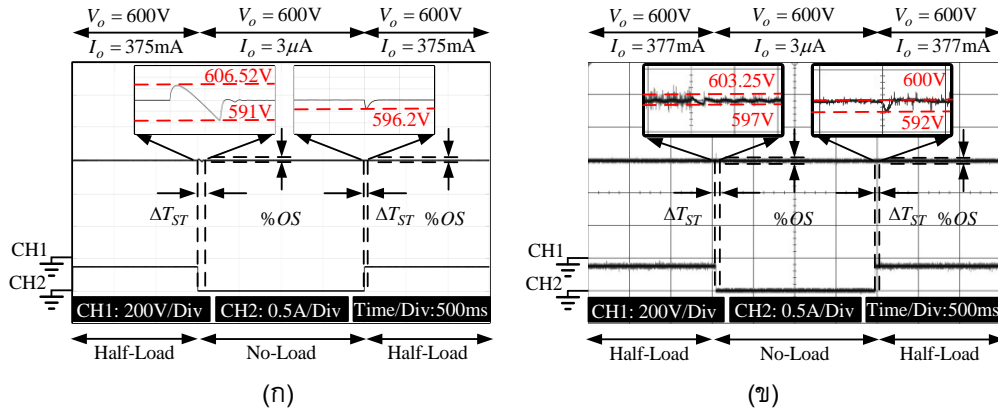
รูปที่ 16 ผลการจำลองและผลการทดลองการตอบสนองกระแสและแรงดันด้านออกต่อการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าในสภาวะโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะครึ่งโหลดแล้วเปลี่ยนกลับสภาวะโหลดเต็มพิกัด (Step Full-Load to Half Load to Full-Load) (ก) ผลการจำลอง (ข) ผลการทดลอง



รูปที่ 17 ผลการจำลองและผลการทดลองการตอบสนองกระแสและแรงดันด้านออกต่อการเปลี่ยนแปลง ภาระทางไฟฟ้าในสภาวะโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะไร้อโหลดแล้วเปลี่ยนกลับสภาวะโหลด เต็มพิกัด (Step Full-Load to No-Load to Full-Load) (ก) ผลการจำลอง (ข) ผลการทดลอง



บทความวิจัย / บทความวิชาการ



รูปที่ 18 ผลการจำลองและผลการทดลองการตอบสนองกระแสและแรงดันด้านออกต่อการเปลี่ยนแปลง ภาระทางไฟฟ้าในสภาวะครึ่งโหลดเป็นสภาวะไร้โหลดแล้วเปลี่ยนกลับสภาวะครึ่งโหลด (Step Half-Load to No-Load to Half-Load) (ก) ผลการจำลอง (ข) ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า

ค่าตอบสนอง	ผลการจำลอง	ผลการทดลอง
เงื่อนไขที่ 1		
สภาวะโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะครึ่งโหลด (Step Full-Load to Half-Load) และกลับคืนสภาวะ (Step Half-Load to Full-Load)		
อัตราการตอบสนองสูงสุดสำหรับวงรอบแรงดัน	0.375%, -0.383%	0.867%, -1.5%
แรงดันด้านออกใช้เวลาเข้าสู่จุดสมดุล	15 ms, 20 ms	3.3 ms, 2.6 ms
ค่ากระแสด้านออกก่อนการเปลี่ยนแปลง	750 mA, 375 mA	763 mA, 379 mA
ค่ากระแสด้านออกหลังการเปลี่ยนแปลง	375 mA, 750 mA	379 mA, 783 mA
อัตราการรักษาแรงดัน	0.375%, 0.383%	0.8%, 2.0%
เงื่อนไขที่ 2		
สภาวะครึ่งโหลดเต็มพิกัดเป็นสภาวะไร้โหลด (Step Full-Load to No-Load) และกลับคืนสภาวะ (Step No-Load to Full-Load)		
อัตราการตอบสนองสูงสุดสำหรับวงรอบแรงดัน	1.333%, 1.04%	1.043%, 3.33%
แรงดันด้านออกใช้เวลาเข้าสู่จุดสมดุล	122 ms, 16 ms	86 ms, 9.4 ms
ค่ากระแสด้านออกก่อนการเปลี่ยนแปลง	750 mA, 3.02 μ A	768 mA, 5 mA
ค่ากระแสด้านออกหลังการเปลี่ยนแปลง	3.02 μ A, 750 mA	5 mA, 768 mA
อัตราการรักษาแรงดัน	3.083%, 1.04%	3.5433%, 3.75%
เงื่อนไขที่ 3		
สภาวะครึ่งโหลดเป็นสภาวะเต็มพิกัด (Step Half-Load to No-Load) และกลับคืนสภาวะ (Step No-Load to Half-Load)		
อัตราการตอบสนองสูงสุดสำหรับวงรอบแรงดัน	1.087%, -0.633%	0.542%, -13.33%
แรงดันด้านออกใช้เวลาเข้าสู่จุดสมดุล	133 ms, 10ms	3.2 ms, 4ms
ค่ากระแสด้านออกก่อนการเปลี่ยนแปลง	375 mA, 0.3 μ A	377 mA, 0.3 mA
ค่ากระแสด้านออกหลังการเปลี่ยนแปลง	0.3 μ A, 375 mA	3 mA, 377 mA
อัตราการรักษาแรงดัน	2.5866%, 0.633%	1.041%, 1.33%



จากตารางที่ 1 พบว่าผลการจำลองเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าองค์ประกอบของค่าความต้านแฝงความถี่สูง และความเป็นอสมมาตรของแบบจำลอง ส่งผลให้อัตราการตอบสนองสูงสุดสำหรับวงรอบแรงดัน ในช่วงกลับคืนสภาวะมีค่าต่างกันอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาต่อในส่วนแรงดันด้านออกใช้เวลาเข้าสู่จุดสมดุลมีความสอดคล้องกันทั้ง 3 เงื่อนไข และค่ากระแสด้านออกก่อน/หลังการเปลี่ยนแปลง ระบบที่นำเสนอเป็นการควบคุมแบบความถี่สูงจะเห็นได้ว่า ค่ากระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงจะถูกองค์ประกอบความต้านทานแฝงรวมอยู่ส่งผลให้เวลาในส่วนของผลการทดลองจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ตัวแปรสุดท้ายคืออัตราการรักษาแรงดันของผลการจำลองและผลการทดลองมีเปอร์เซ็นต์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันทั้ง 3 เงื่อนไข ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ผลการยืนยันแสดงในรูป 16 – 18 ตามลำดับ

7. สรุปผลการทดลอง

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงทระดับแรงดัน อัตราการขยายสูงแบบต่ออนุกรมโมดูลจะช่วยยกระดับแรงดันเทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มอัตราการขยายแรงดันให้สูงขึ้นผ่านตัวดำเนินการอัตราส่วน a พบว่าวงจรจัดสร้างขึ้นนั้น สามารถยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าขนาด 36 โวลต์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาด 200 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ที่มีการควบคุมระดับแรงดันแต่ละโมดูลด้วยตัวควบคุมแบบพีโอเมื่อนำมาต่ออนุกรม 3 โมดูลด้วยเทคนิค อนุกรมโมดูล เพื่อเพิ่มระดับแรงดันสามารถเพิ่มแรงดันด้านออกเป็น 600 โวลต์และ

มีกำลังไฟฟารวม 450 วัตต์ที่สภาวะโหลดเต็มพิกัด และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวนั้นสามารถรักษาระดับแรงดันที่สภาวะคงตัวได้ทั้งในสภาวะครึ่งโหลด และในสภาวะไร้อโหลด ทั้งนี้เพื่อยืนยันความถูกต้องของวงจรและเทคนิคที่นำเสนอ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการจำลองที่สร้างขึ้น และสามารถยืนยันได้ตามทฤษฎีการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 วงจรต้นแบบทั้ง 3 โมดูลและระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ในส่วนเทคนิคที่ได้แนะนำนั้น การอนุกรมโมดูลสามารถกระทำได้ภายใต้ขีดจำกัดจุดเทียบศูนย์ของวงจร และในด้านตัวควบคุมนั้นการลดทอนสัญญาณแรงดันด้านออกจะส่งผลถึงการรับรู้ของภาระด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

8. ภาคผนวก

ตัวเหนี่ยวนำ $L_{1\text{module}1,2,3} = 8.45, 8.49$ และ $8.46 \mu\text{H}$

ตัวเหนี่ยวนำ $L_{2\text{module}1,2,3} = 526, 524$ และ $529 \mu\text{H}$



9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res CIT-0535/2023

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Long, M. Zhang, Y. Liao, L. Huang and K.T. Chong, An overview of DC component generation, detection and suppression for grid-connected converter systems, *IEEE Access*, 2019, 7, 110426-110438.
- [2] M. Forouzesh, Y.P. Siwakoti, S.A. Gorji, F. Blaabjerg and B. Lehman, Step-up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(12), 9143-9178.
- [3] L. Qin, T. Qian, J. L. Soon, W. Hassan, Y. Liu and J. Mao, Interleaved split-switched-capacitor boost converter with continuous output current for electric vehicle standalone photovoltaic charging systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(12), 16165-16179.
- [4] S. -W. Seo, J. -H. Ryu, H.H. Choi and J.-B. Lee, Input-parallel output-series high step-up DC/DC converter with coupled inductor and switched capacitor, *IEEE Access*, 2023, 11, 89164-89179.
- [5] R.R. Khorasani, H.M. Jazi, N.R. Chaudhuri, A. Khoshkbar-Sadigh, M. Shaneh and E. Adib, An interleaved soft switched high step-Up boost converter with high power density for renewable energy applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(11), 13782-13798.
- [6] S. Hasanpour and T. Nouri, New coupled-inductor high-gain DC/DC converter with bipolar outputs, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(3), 2601-2613.
- [7] S.-W. Lee and H.-L. Do, High step-up coupled-Inductor cascade boost DC–DC converter with lossless passive snubber, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(10), 7753-7761.
- [8] H. Liu and F. Li, A novel high step-up converter with a quasi-active switched-inductor structure for renewable energy systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(7), 5030-5039.
- [9] M.F. Guepfrih, G. Waltrich and T.B. Lazzarin, Unidirectional step-up DC–DC converter based on interleaved phases, coupled inductors, built-in transformer, and voltage multiplier cells, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(3), 2385-2395.



- [10] I.P. Rosas, E. Agostini and C.B. Nascimento, Single-switch high-step-up DC-DC converter employing coupled inductor and voltage multiplier cell, *IEEE Access*, 2022, 10, 82626-82635.
- [11] A. Rajabi, A. Rajaei, V.M. Tehrani, P. Dehghanian, J.M. Guerrero and B. Khan, A non-isolated high step-up DC-DC converter using voltage lift technique: analysis, design, and implementation, *IEEE Access*, 2022, 10, 6338-6347.
- [12] D. Vinnikov, I. Roasto, R. Strzelecki and M. Adamowicz, Step-up DC/DC converters with cascaded quasi-z-source network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(10), 3727-3736.
- [13] X. Hu, X. Liu, Y. Zhang, Z. Yu and S. Jiang, A hybrid cascaded high step-Up DC–DC converter with ultralow voltage stress, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(2), 1824-183



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/ทดลอง และการอภิปรายผล (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. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ

เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.

**Manuscript Submission Form**

1. Title

2. Type of manuscript Research Article Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

 I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

 Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/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 ๓ ประจำปี ๒๕๖๗

บทความ (Articles)

- Effect of Increasing Arc Welding Current with E3-UM-600 on Abrasive Wear Behavior of Agricultural Soil Preparation Equipment, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 1-14.
- Study of Air Conditions and Energy Impact in Air Conditioning Systems from Ventilation in COVID-19 Patient Wards, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 15-33.
- Heat Transfer and Flow Characteristics of Refrigerant R134a during Boiling Inside a Plate Heat Exchanger with a Copper Foam Insert, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 34-45.
- Design and Development of Cotton Seed Sorting Machine, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 46-61.
- Development of Absorbing Brick using Macadamia Shell Charcoal Powder, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 62-73.
- Designing a Signal Conversion Circuit Board between CAN bus and Modbus for Automated People Mover, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 74-90.
- Techno-Economic Assessment between Traditional and Fused Deposition Modeling- based Additive Manufacturing Technology, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 91-106.
- Development and Performance Study of Electric Wheelchair for the Elderly, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 107-121.
- Airflow and Wood stack Configuration in Rubber Wood Kiln Drying A Case Study of Processed Rubber Wood for Furniture, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 122-137.
- Effects of Filtration for Lead Solutions and Effluent Organic Matter (EfOM) from Wastewater Treatment Systems for Affecting Rejection and Fouling with Nanofiltration (NF) Membrane, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 138-154.
- Study on Influences of Curved Ratio and Reverse Drawing Technique on Thinning of Curved Bottom Cup, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 155-170.
- Comparison Between Impacts of Color and Gray Images by Deep Learning: A Case Study of Defective Water Tap Detection in Production, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 171-185.
- Two-Phase Heuristic Approach for Solving Capacitated Vehicle Routing Problem, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 186-199.
- Effect of Glass Fiber and Municipal Solid Waste Incineration on Bending Stress of Compacted Cement Sand, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 200-218.
- A Design and Implement Series Stack Modules of DC-DC High Step-Up Converter for Front-End of Photovoltaic Cells Application, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(3), 219-235.

จัดพิมพ์โดย: หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาชื่น 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร. +66 2 555-2000 ต่อ 6615 Email JIT.journal@gmail.com