

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

ISSN: 1686-9869 (Print), ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



Indexed In
TCI



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๔

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๔

VOLUME 17 | ISSUE 3 | 2021 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

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 พงษ์ศรีนาพานิช
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 ของภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขาที่เกี่ยวข้องแบบ Double-Blinded Peer Review ซึ่งทั้งผู้พิมพ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลรายชื่อของกันและกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์ บทความ ขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

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

ผู้จัดพิมพ์

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

Objectives

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

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality by the double-blinded peer review from the experts in related fields. The authors and reviewers will not know each other's contact information. 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 as the independent opinions of the author. The author is responsible for any legal consequences that may result from the published articles which editorial members not always necessary to 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 Print: 1686-9869, ISSN Online: 2697-5548) ฉบับที่ 3 ปีที่ 17 ทางกองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้รับการประเมินคุณภาพวารสารด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) ให้อยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ในปี พ.ศ. 2564 – พ.ศ. 2567 (รับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ไปจนถึง วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567)

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาบทความผ่านระบบ Online Journal Submission (OJS) และเผยแพร่บทความในรูปแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ร่วมกับการเผยแพร่แบบรูปเล่ม นอกจากนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัลหรือดีไอไอ (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าสู่ข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) ซึ่งจะทำให้การสืบค้นอ้างอิงข้อมูลของบทความและข้อมูลของผู้พิมพ์ด้วยระบบออนไลน์นั้น ถูกต้องสมบูรณ์และรวดเร็วยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้จัดพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี คือฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม และฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม นอกจากนี้วารสารฯ ยังเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech> และฐานข้อมูล Thai Journals Online (ThaiJO) รวมถึง Google Scholar

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชา ข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้ เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองของ TCI

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

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
ผลกระทบจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ต่อการเสื่อมสภาพที่ดินจากการปนเปื้อนโลหะหนักและ การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากผลผลิตข้าวในพื้นที่ปนเปื้อน Impact of Mining Industry on Agricultural Land Degradation from Heavy Metal Contamination and Health Risk Assess ละไม ศรีสวัสดิ์ ตูลวิทย์ สถาปนจารุ ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ พัฒนา อนุรักษ์พงศธร	1
การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับในท้องถิ่น Removal of Methylene Blue Dye using Local Adsorbent Materials อภิวัชร บุญกุลธนพัฒน์ กมลทิพย์ ดีบุกคา และ ขวัญเนตร สมบัติสมภพ	16
ความสามารถในการสตาร์ทของอะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับ เครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล The Engine Start Ability of Acetone-Butanol-Ethanol Blended Diesel Fuel for a Common Rail Diesel Engine อบ นิลผาย ศักดิ์ดา ชงชาย มานิดา ทองรุณ นาวี นันตะภาพ รณชาติ มั่นศิลป์ และ สถาพร เชื้อเพ็ง	28
การพัฒนาหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลงฐานสีย้อมที่ตรวจสอบได้ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ The Development of Dye-based, Anti-counterfeit Printing Ink Detected by CO ₂ กานต์พิชชา สุวรรณวัฒน์เมธี พิษิตพล พรหมท้าว ทรายดล อาษา และ สุรัชย์ ชันแก้ว	43



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีนปรับปรุงกระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมันรถแทรกเตอร์: กรณีศึกษาบริษัท เอ.บี.ซี จำกัด Applying the Lean Concept to Improve the Oil Pipelines Processing for Tractor: A Case Study of ABC Company Ltd. สุชาติ ชำรงสุข และ สมชาย เปรียงพรม	56
การปรับปรุงกระบวนการบีบขึ้นรูปในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ Improvement of Pressing Process in Automotive Industry นพภณี วัฒนสังสุทธิ์ และ วรพจน์ มีถม	79
การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กจากการใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาเป็นเชื้อเพลิง Study on the Performance of Small Size Diesel Engine Using Fish Oil Blended with Biodiesel as Fuel เนรมิตร กระแสร์ลม ชัยยศ ดำรงกิจโกศล และ ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์	99
Coating of Nano-film Cr_2O_3 on Welded 304L Stainless Steel and Its Surface Resistance Properties Nattapong Dussadeeworrarak Pocharapon Silakoo Attaphon Kaewvilai and Thammanoon Thaweechai	113
Queuing System Analysis: A Case Study of Fast Fashion Business Ratchadakorn Poohoi Choosak Pornsing and Prachuab Klomjit	124
การปรับปรุงวงจรคูณโหมดกระแสสี่ควอดแรนท์ที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำและ ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงมาก Improvement Current-Mode Four-Quadrant Multiplier Low input Impedance and Very High Output Impedance ธวัชชัย ทองเหลี่ยม	134



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
ผลกระทบของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ: สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลทั้งก่อน และหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง Effect of Crosslinking Agent and Blowing Agent on the Properties of Natural rubber: Morphology ธนวิชญ์ ภาคอรธ มนัสวิน แก้วทิพย์ ยศวีร์ พูนจันทร์ และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา	149
การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน Drying of Nam Dok Mai Mango Using Far-Infrared Radiation in Combination with Hot-Air วีระ ศรีอริยะกุล	169
การเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในพื้นที่โล่งด้วยปัญญาประดิษฐ์ Accuracy Improvement for Localization in Outdoor Area Using Artificial Intelligence กิตมงคลชัย พรหมบริรักษ์ชา กำพล แจ้วชุ่มชื่น และ กฤษฎา มามาตร	183
การออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ของแขนกลช่วยยก Bi-objective Design Optimization of a Manipulator Arm อภิชาติ มณีงาม กัลยา อุบลทิพย์ รัตติ มณีงาม กันต์ธร เก่งพล จูติพงษ์ มาคุ้ม ธิดาวลัยย์ อ่ำแจ่ม รักษริน วรไว และ พงษ์ธร จังพานิช	197
การเปรียบเทียบเทคนิคการพยากรณ์ราคาพืชไร่ในประเทศไทย The Forecasting Techniques Comparison of Field Crops in Thailand ศิรประภา ดีประดิษฐ์ และ พงศ์ธร รักซ้อน	214
บทความวิชาการ การกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้าง Sample size Determination for Structural Equation Modeling (SEM) มนตรี พิริยะกุล	232



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ	S4

ผลกระทบจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ต่อการเสื่อมสภาพที่ดินจากการปนเปื้อนโลหะหนักและการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากผลผลิตข้าวในพื้นที่ปนเปื้อน

ละไม ศรีสวัสดิ์ ตุลวิทย์ สถาปนจารุ ชลอ จารุสุทธิรักษ์* และ พัฒนา อหุรักษ์พงศธร

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ecclj@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 24 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 27 สิงหาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 กันยายน 2564

บทคัดย่อ: การปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรมอันเนื่องมาจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่จัดเป็นภัยคุกคามด้านความปลอดภัยอาหารที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินสภาพมลพิษดินของพื้นที่เกษตรกรรมแบบรายแปลงและแบบภาพรวม โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีเชิงธรณีเคมีของ As Cd Cu Pb และ Zn ในดินและประเมินค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าว ผลการศึกษาพบดินมีการปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn และพบผลผลิตข้าวที่มีความเสี่ยงสูงจำนวน 6 แปลง จาก 11 แปลงคิดเป็นร้อยละ 55 ผลวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรเพื่อประเมินภาพรวมของพื้นที่พบว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่มีการปนเปื้อนสูงเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่วนการจำแนกแปลงนาตามค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศพบที่มีความสัมพันธ์กับค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของบริโภคข้าวจากการปนเปื้อนของ As และ Cd ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าวิธีการประเมินสภาพมลพิษของแปลงนาสามารถนำไปใช้ในการคัดเลือกพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ดัชนีการสะสมเชิงธรณี, การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ, โลหะหนัก, มลพิษทางดิน

Impact of Mining Industry on Agricultural Land Degradation from Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Rice Crops in Contaminated Paddy Fields

Lamai Srisawat, Tunlawit Satapanajaru, Chalor Jarusutthirak* and Patana Anurakpongsatorn

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: ecclj@ku.ac.th

Received: 3 August 2021; Revised: 24 August 2021; Accepted: 27 August 2021

Online Published: 21 September 2021

Abstract: Heavy metal contamination in agricultural soils nearby the old mining industries has threatened food safety for human health. This research aimed to develop a new methodology for soil pollution assessment of individual and holistic agricultural areas. Geochemical index of heavy metals including As, Cd, Cu, Pb, and Zn, in selected paddy fields was evaluated together with health risk assessment of those heavy metals in rice grains. The results showed that soil in the studied areas was contaminated with As, Cd, Pb, and Zn. Rice harvested from 6 out of 11 paddy fields, corresponding to 55%, employed health risk at a high level. Multivariate analysis indicated that anthropogenic activity was a major source of soil pollution in a highly contaminated area. The classification of paddy fields based on potential ecological risk index (RI) was found to be related to the health risk assessment of As and Cd contaminating in rice grains. It was concluded that the proposed soil pollution assessment method was efficiently used to identify suitable agricultural areas in heavy metal contaminated zones adjacent to the old mining industries for safe rice crops.

Keywords: Geo-accumulation index; Health risk assessment; Heavy metals; Soil pollution



1. บทนำ

อุตสาหกรรมเหมืองแร่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สังคมและสุขภาพในหลายมิติ ทั้งมิติด้านสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรธรรมชาติ ระบบนิเวศที่มีความสำคัญต่อความหลากหลายทางชีวภาพและการเป็นแหล่งอาหาร รวมไปถึงมิติด้านเศรษฐกิจสังคมในส่วนของที่อยู่อาศัยของคนในชุมชน และพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งอาจนำไปสู่การปนเปื้อนของโลหะหนักในผลผลิตจากพื้นที่ปนเปื้อน มลพิษทางดินในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นผลกระทบอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของอาหารและส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากดินไปยังระบบพืชอาหารส่งผลต่อการสะสมโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตจากการถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหาร [1] โดยทั่วไปโลหะหนัก เช่น สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) พบในสภาพธรรมชาติของเปลือกโลกในปริมาณที่จำกัด อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่มีการรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น แหล่งอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอื่นๆ ตลอดจนถึงการทำการเกษตรกรรมมักพบปัญหาการปนเปื้อนของมลพิษดังกล่าวสะสมในดินด้วยปริมาณที่สูงจนก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม [1-3]

ในการประเมินระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในดินมีเกณฑ์การประเมินหลายวิธี เช่น ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Geo-accumulation Index, Igeo) โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษากับโลหะหนักในสภาพธรรมชาติของพื้นที่ [2] ค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (Enrichment Factor, EFs) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนปริมาณโลหะหนักที่

ศึกษากับปริมาณโลหะหนักในสภาพธรรมชาติของพื้นที่นั้น [3] ตลอดจนการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของดิน เช่น มาตรฐานคุณภาพดินในพื้นที่เกษตรของสหภาพยุโรปที่กำหนดปริมาณ Cd Cu Pb และ Zn ในดิน ไม่เกิน 3, 140, 100 และ 300 mg/kg ตามลำดับ [4] ส่วนค่าการปนเปื้อนในเมล็ดข้าวสารตามมาตรฐานของ Codex ซึ่งกำหนด As และ Cd ไม่เกิน 0.2 และ 0.4 mg/kg ตามลำดับ [5] ในขณะที่ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนในเมล็ดข้าวสารตามมาตรฐานของประเทศจีนสำหรับ As Cd Cu Pb และ Zn กำหนดมีค่าไม่เกิน 0.15, 0.2, 10, 0.2 และ 50 mg/kg ตามลำดับ [4] นอกจากนี้ การประเมินระดับมลพิษในดินด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในดินและพืชซึ่งมีการศึกษาหลายวิธี เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable) รูปที่ละลายน้ำ (Soluble) และการสะสมโลหะหนักในพืช ตลอดจนการประเมินค่าความเสี่ยงของการรับสัมผัสโลหะหนักจากดิน และจากการบริโภค น้ำ และอาหาร เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตามการประเมินดังกล่าวเป็นเพียงการประเมินปริมาณโลหะหนักในดินของพื้นที่ปนเปื้อนเท่านั้น ยังมิได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของการปนเปื้อนโลหะดังกล่าวในผลผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ซึ่งการศึกษาวិธีการประเมินสภาพการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่แปลงนาจากความสัมพันธ์ของค่าดัชนีดินและค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของผลผลิตพืชเพื่อการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตอาหารที่ปลอดภัยยังมีข้อมูลการศึกษาน้อย การศึกษาที่จึงทำการประเมินมลพิษทางดินจากการปนเปื้อนโลหะหนักที่มีความสัมพันธ์



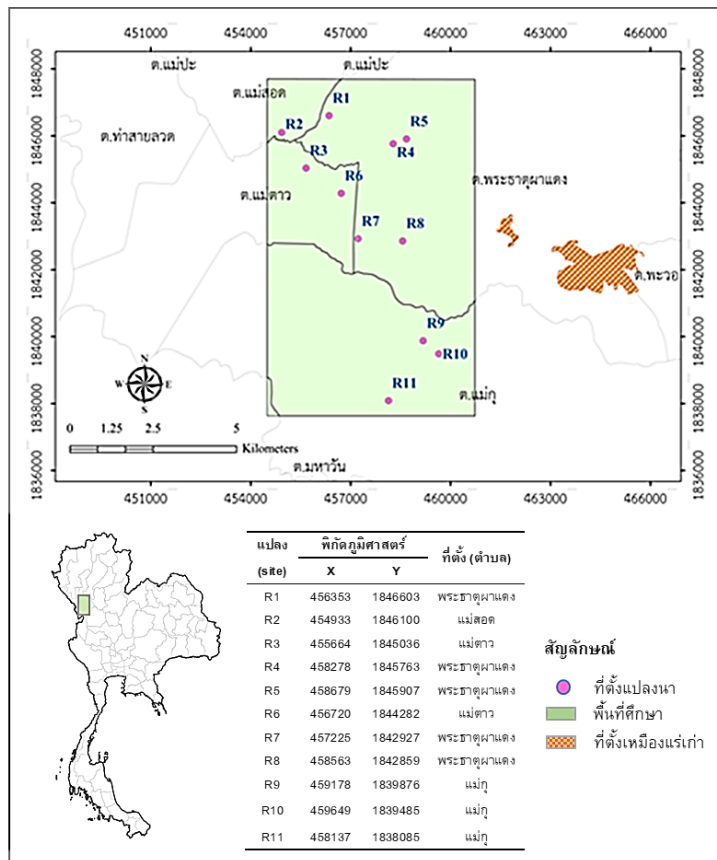
กับความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการตรวจสอบดินเชิงพื้นที่แบบรายแปลงเพื่อประเมินความเหมาะสมของการใช้ประโยชน์แปลงนาในเขตพื้นที่เสี่ยงต่อปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักจากการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ตั้งอยู่ใกล้กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่เก่า

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรที่มีขอบเขตใกล้พื้นที่เหมืองแร่สังกะสีเก่า ตั้งอยู่ในพื้นที่ของ อ.แม่สอด

จ. ตาก การศึกษาเชิงพื้นที่โดยคัดเลือกแปลงนาขนาดพื้นที่แปลงละ 25 ตารางเมตร จำนวน 11 แปลง ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการสุ่มตัวอย่างดินและข้าว (*Oryza sativa* L.) ด้วยวิธี Random ในตารางสุ่มขนาด 1 x 1 เมตร แปลงละ 5 ซ้ำ นำตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกไปเข้าเครื่องสีข้าว แล้วนำเมล็ดข้าวสารไปอบและบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 มม. เก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกบรรจุตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างดินผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (Air Dried) บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม. และ 0.07 มม. [2, 6-7]



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและพิกัดที่ตั้งแปลงนาที่เก็บตัวอย่าง



2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของดินบางประการของดินที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในดินโดยสมบัติทางเคมีดิน ได้แก่ ค่าความกรด-ด่างของดิน (pH) อัตราส่วน 1:1 ของดินต่อน้ำ (ดิน 10 กรัม ในน้ำกรอง 10 มิลลิลิตร) [8] ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Soil Organic Matter; SOM) โดยวิธี Walkley and Black [9] ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) วิเคราะห์โดยวิธี Ammonium Acetate [10] และส่วนสมบัติทางกายภาพดินวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคดินด้วยวิธีปิเปตต์ [6-7]

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินและพืช

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินทำโดยการย่อยสลายตัวอย่างดินน้ำหนัก 0.2 ± 0.0001 กรัม ด้วยกรด $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ (3:1) โดยเครื่องไมโครเวฟตามวิธี US.EPA. 3051A [11] ส่วนการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างข้าว ทำโดยการซังเมล็ดข้าวบดแห้งหนัก 1 ± 0.0001 กรัม ย่อยสลายตัวอย่างข้าวด้วยกรด $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (2:1) โดย Block Digestion technique [12] และวัดปริมาณ Cd Cu Pb และ Zn ของสารละลายที่ได้จากย่อยสลายตัวอย่างดินและเมล็ดข้าวด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-optical Emission) และวัดปริมาณความเข้มข้นของ As ในสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่อง HG-AAS (Hydride Generation Atomic Absorption Spectrophotometer) การควบคุมคุณภาพผลการวิเคราะห์ด้วยการประเมินค่า Detection Limit ของวิธีทดสอบ (สำหรับ As Cd Cu Pb และ Zn) ประเมินความถูกต้อง (Accuracy) ด้วยการเทียบกับสารอ้างอิง

(CRM) โดยค่า % Recovery อยู่ในช่วง 80 - 110 และประเมินความเที่ยง (Precision) ด้วยการทดสอบซ้ำ โดยค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ (RPD) น้อยกว่า 10%

2.4 การออกแบบแอปพลิเคชัน

การประเมินระดับมลพิษในดินด้วยดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Geo-accumulation Index, Igeo) ของโลหะหนัก ทำโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ต้องการศึกษากับโลหะหนักในสภาพธรรมชาติ การคำนวณค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี ตามสมการของ Muller ดังสมการที่ (1)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

โดยที่ C_n คือปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างดิน; B_n คือปริมาณโลหะหนักในสภาพธรรมชาติ โดยค่า B_n ในการศึกษาใช้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งประกอบด้วย Cd 0.3 mg/kg, Cu 45 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Zn 95 mg/kg และ As 1.8 mg/kg [6,7] ส่วนค่า 1.5 คือค่าคงที่ของปัจจัยการแก้ไขที่ใช้เพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีสามารถแบ่งเป็น 7 ระดับ ดังนี้ ระดับที่ 1 ($I_{geo} \leq 0$) เป็นระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน ระดับที่ 2 ($0 < I_{geo} < 1$) เป็นระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนจนถึงระดับที่มีการปนเปื้อนปานกลาง ระดับที่ 3 ($1 < I_{geo} < 2$) ระดับที่มีการปนเปื้อนปานกลาง ระดับที่ 4 ($2 < I_{geo} < 3$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนปานกลางจนถึงระดับที่มีการปนเปื้อนสูง ระดับที่ 5 ($3 < I_{geo} < 4$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนสูง ระดับที่ 6 ($4 < I_{geo} < 5$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนสูง จนถึงระดับที่มีการปนเปื้อนสูงมาก และระดับที่ 7 ($I_{geo} \geq 5$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนสูงมาก



2.5 ปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (Enrichment Factor, EF)

การสะสมตัวของโลหะหนักในดิน ประเมินจากค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนปริมาณโลหะหนักที่ศึกษาเทียบกับปริมาณโลหะหนักในพื้นที่นั้นๆ [3] ปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน คำนวณได้ตามสมการที่ (2)

การศึกษานี้ใช้เหล็กเป็นธาตุอ้างอิงเนื่องจากเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่พบมากในเปลือกโลก ค่า $(C_n/C_{Fe})_{sample}$ เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษาเทียบกับธาตุเหล็กในตัวอย่างดิน และค่า $(B_n/B_{Fe})_{background}$ เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นโลหะหนักที่ศึกษาเทียบกับธาตุเหล็กในสภาพธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของโลหะหนักในดินเซลล์ [13] และจำแนกชั้นของค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดินเพื่อบ่งบอกอิทธิพลของกิจกรรมมนุษย์ต่อการสะสมของโลหะหนักในดิน แบ่งเป็น 5 ระดับ ดังนี้ ระดับที่ 1 ($EF < 2$) เป็นระดับที่ไม่ได้รับอิทธิพลจนถึงได้รับอิทธิพลน้อย ระดับที่ 2 ($2 < EF < 5$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลปานกลาง ระดับที่ 3 ($5 < EF < 20$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลสูง ระดับที่ 4 ($20 < EF < 40$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลสูงมากและระดับที่ 5 ($EF > 40$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลอย่างรุนแรง

2.6 ค่าปัจจัยการปนเปื้อน (CF) ค่าความเสี่ยงทางนิเวศ (E) และการประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (Potential Ecological Risk Index, RI)

ค่าปัจจัยการปนเปื้อน (Contamination Factor, CF) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างดินกับค่าปริมาณโลหะหนักในสภาพธรรมชาติ (Background) คำนวณตามสมการของ

$$EF = \frac{(C_n/C_{Fe})_{Sample}}{(B_n/B_{Fe})_{Background}} \quad (2)$$

Hakason ดังสมการที่ (3) ค่า E_i เป็นค่าความเสี่ยงทางนิเวศ คำนวณตามสมการของ Hakason ดังสมการที่ (4) โดยที่ T_i เป็นค่าตอบสนองต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก (Toxic Response of the Heavy Metal) ดังนี้ $As=10$, $Cd=30$, $Cu=5$, $Pb=5$ และ $Zn=1$ [2] ศักยภาพความเป็นพิษของโลหะหนักต่อความเสี่ยงทางนิเวศ ประเมินตามสมการค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ ดังสมการที่ (5)

$$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (3)$$

$$E_i = T_i \times CF_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

ค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ แบ่งระดับเป็น 4 ระดับ ได้แก่ระดับที่ 1 ความเสี่ยงต่ำ ($RI < 150$) ระดับที่ 2 ความเสี่ยงปานกลาง ($150 \leq RI < 300$) ระดับที่ 3 ความเสี่ยงสูง ($300 \leq RI < 600$) และระดับที่ 4 ความเสี่ยงสูงมาก ($RI \geq 600$)

2.7 การประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

วิเคราะห์ปัจจัยการปนเปื้อนโลหะหนักด้วยการวิเคราะห์ด้วยสถิติหลายตัวแปร (Multivariate Analysis) และเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับค่า EF และ ค่า I_{geo} การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินโดยใช้ค่าสถิติการวิเคราะห์



องค์ประกอบหลัก (Principal Components Analysis; PCA) ที่มีการหมุนแกนแบบอโรโกนอลด้วยวิธีแวนริแมกซ์ (Varimax Rotation) และทวนสอบผลกับค่าจากการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster analysis; CA) [6]

2.8 การประเมินความเสี่ยงจากการบริโภคข้าว

การศึกษานี้เป็นการประเมินความเสี่ยงของสารในกลุ่มไม่ก่อมะเร็งสำหรับโลหะหนัก โดยการประเมินค่าความเสี่ยง (Risk) ตามสมการที่ (6)

$$\text{Hazard Quotient (HQ)} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}} \quad (6)$$

โดย $\text{HQ} > 1$ หมายความว่า สถานการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักชนิดนั้นๆ ค่อนข้างรุนแรงจนอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน ค่า RfD (Reference Dose) คือปริมาณสารเคมีที่มนุษย์สามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ทุกวัน โดยไม่ทำให้เกิดความผิดปกติใดๆ ต่อสุขภาพอนามัย หรือค่าความเป็นพิษของสารที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง ($\text{mg kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) โดยค่า RfD ของ As Cd Cu Pb Zn มีค่าเป็น 0.0004, 0.001, 0.04, 0.004 และ 0.3 ตามลำดับ[4] ค่า CDI (Chronic Daily Intake) คือ ค่าปริมาณสารเฉลี่ยที่ได้รับในแต่ละวันอย่างต่อเนื่อง ($\text{mg kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) โดยปริมาณการได้รับสัมผัสคำนวณตามสมการ USEPA ดังสมการที่ (7)

$$\text{CDI} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg} - \text{day}} \right) = \frac{\text{CF} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (7)$$

โดยที่ค่า CF คือความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ดข้าว (mg kg^{-1}) ค่า EF (Exposure Frequency) คือความถี่ของการได้รับในรอบ 1 ปี ในที่นี้กำหนดเป็น 365 วัน/ปี (day-year^{-1}) ค่า ED (Exposure Period)

คือจำนวนปีที่ได้รับสาร กำหนดให้เท่ากับ 60 ปีตลอดช่วงอายุ ค่า BW (Body Weight) คือน้ำหนักตัวเฉลี่ย กำหนดให้เท่ากับ 60 kg และค่า AT (Average Time) คือจำนวนวันทั้งหมดตลอดอายุขัย (Day) และค่า IR (Ingestion Rate) คือ อัตราการบริโภคข้าวของคนไทย เท่ากับ 0.23 kg ต่อคนต่อวัน ประเมินค่าค่าผลรวมความเสี่ยงรวมของโลหะหนัก (Total HQ) ได้ดังสมการที่ (8)

$$\text{Total HQ} = \sum \text{HQ}_i \quad (8)$$

โดยที่ HQ เป็นค่าความเสี่ยงรวมของจากการรับโลหะหนัก As Cd Cu Pb และ Zn เข้าสู่ร่างกายผ่านการบริโภคข้าว ค่า Total HQ มากกว่า 1 แสดงถึงความเสี่ยงในระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติทั่วไปของดินในพื้นที่เกษตร

การวิเคราะห์สมบัติทั่วไปของดินตรวจสอบจากคุณสมบัติดินของแปลงนาที่คัดเลือกจากพื้นที่เกษตรจำนวน 11 แปลง โดยการเก็บตัวอย่างดินแปลงละ 5 ซ้ำ พบว่าสมบัติดิน ได้แก่ สภาพความเป็นกรดต่างของดิน (pH) มีค่าระหว่าง 6.3 ถึง 8.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (SOM) ระดับต่ำถึงสูง (6.1-35.5 g/kg) ในขณะที่ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) มีค่าปานกลางถึงสูงโดยมีค่าระหว่าง 12.2 - 28.8 cmol/kg เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพพบว่าเป็นดิน (Soil texture) ส่วนใหญ่เป็นดินร่วน ยกเว้นแปลง 4R และ 5R เป็นดินเหนียวและ แปลง R1 และ R6 เป็นดินร่วนเหนียว (ตารางที่ 1)



ตารางที่ 1 สมบัติของดินในแปลงนาและลักษณะการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

สมบัติดิน	ค่าเฉลี่ยของสมบัติดิน ^{1/}										
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
1. สมบัติดินทั่วไป											
pH	7.6±0.1	6.7±1.4	7.5±0.2	7.3±0.2	7.6±0.1	7.5±0.1	8.0±0.1	8.3±0.1	7.5±0.1	6.3±0.2	7.8±0.2
OM (g/kg)	6.1±1.0	22.8±8.1	10.6±0.7	16.2±1.0	22.2±2.2	20.6±1.1	35.5±1.0	18.3±3.7	9.1±1.1	19.6±1.1	20.1±3.4
CEC (cmol/kg)	19.8±0.7	16.8±1.3	12.2±0.7	27.0±0.6	28.8±4.8	22.8±1.0	16.3±1.8	17.3±1.3	13.7±1.3	13.2±1.1	12.8±2.6
Sand (%)	44.1±0.4	37.5±2.3	42.3±0.7	25.0±0.9	25.0±0.1	30.6±1.3	32.0±1.9	48.8±0.5	46.4±2.3	51.9±0.4	41.7±0.9
Silt (%)	23.2±2.1	37.8±1.5	34.5±0.5	30.5±1.6	33.2±0.7	33.7±3.2	46.9±2.4	31.6±0.6	32.0±1.1	31.8±0.6	33.7±0.6
Clay (%)	32.7±2.0	24.7±1.6	23.2±1.0	44.5±2.0	41.8±0.8	35.8±3.4	21.1±1.0	19.6±0.9	21.6±2.2	16.3±0.8	24.6±0.8
Soil texture ^{2/}	CL	L	L	C	C	CL	L	L	L	L	L
2. ความเข้มข้นโลหะหนักในดิน (mg/kg)											
As	6.1±0.3	19.1±1.4	15.7±1.4	5.1±0.6	2.6±0.6	22.9±5.0	25.9±3.7	17.7±2.9	5.1±1.6	1.7±0.5	0.5±0.1
Cd	0.9±0.2	1.0±0.0	2.5±0.1	2.8±0.6	1.2±0.2	3.0±0.5	39.1±4.1	13.3±0.6	1.4±0.5	0.6±0.1	0.6±0.0
Cu	8.7±0.5	17.0±1.8	14.7±1.3	24.8±2.3	25.3±2.1	22.1±1.8	23.5±2.8	12.8±0.9	13.6±1.7	12.7±1.7	13.2±1.7
Pb	20.0±3.3	19.6±2.3	20.0±0.6	30.2±2.1	29.5±2.4	31.6±2.1	114±7.9	31.8±3.5	13.8±1.1	11.8±1.1	13.9±0.8
Zn	40.8±5.8	73.6±4.1	189±7.9	74.6±6.8	49.2±9.0	139±22.4	3,014±76	413±30	133±28	39.4±3.0	35.0±1.5
3. สัดส่วนธาตุหลักในดิน (%)											
Fe (%)	2.0±0.4	2.8±0.3	2.2±0.2	4.1±0.3	4.2±0.3	4.0±0.2	3.5±0.2	2.5±0.2	1.7±0.2	1.5±0.1	2.0±0.1
4. ค่าดัชนีการสะสมโลหะหนักในดิน (Geo-accumulation Index; Igeo)											
Igeo-As	1.2	2.8	2.5	0.9	-0.1	3.1	3.2	2.7	0.9	-0.7	-2.5
Igeo-Cd	0.9	1.1	2.5	2.6	1.4	2.7	6.4	4.9	1.5	0.3	0.5
Igeo-Cu	-3.0	-2.0	-2.2	-1.4	-1.4	-1.6	-1.5	-2.4	-2.3	-2.4	-2.4
Igeo-Pb	-0.6	-0.6	-0.6	0.0	0.0	0.1	1.9	0.1	-1.1	-1.4	-1.1
Igeo-Zn	-1.8	-1.0	0.4	-0.9	-1.6	-0.1	4.4	1.5	-0.1	-1.9	-2.0
5. ค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (Enrichment Factor; EF)											
EF-As	1.2	2.5	2.5	0.4	0.2	2.1	2.7	2.6	1.1	0.4	0.1
EF-Cd	7.0	5.6	17.8	10.8	4.6	12.1	174.2	85.2	12.7	5.8	5.0
EF-Cu	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.9	0.7
EF-Pb	2.4	1.7	2.1	1.8	1.6	1.9	7.6	3.1	1.9	1.9	1.7
EF-Zn	1.0	1.3	4.2	0.9	0.6	1.7	42.4	8.4	3.8	1.3	0.9
6. ค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (Potential Ecological Risk Intensity; RI)											
RI	128	212	344	315	147	442	4,116	1,446	173	69	70
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ	สูง	สูงมาก	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ

^{1/} ค่าเฉลี่ย ± SD^{2/} Soil Texture (เนื้อดิน) : C: Clay (ดินเหนียว), CL: Clay Loam (ดินร่วนเหนียว), L: Loam (ดินร่วน)



3.2 สภาพมลพิษในดินจากการปนเปื้อนโลหะหนัก

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นโลหะหนักในดินของแปลงนาทั้ง 11 แปลง โดยพบความเข้มข้นเฉลี่ยของ As, Cd, Cu, Pb และ Zn ในดินมีค่า 11.1, 6.0, 17.1, 30.5 และ 381.9 mg/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 2) โดยความเข้มข้นของ As มีค่าระหว่าง 0.5- 25.9 mg/kg Cd มีค่า 0.6 - 39.1 mg/kg Cu มีค่า 8.7 - 25.3 mg/kg Pb มีค่า 11.8 - 113.5 mg/kg และ Zn มีค่า 35 - 3,013.8 mg/kg เรียงลำดับความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในดิน Zn > Pb > Cu > As > Cd

จากการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการปนเปื้อนในดินพบว่าปริมาณโลหะหนักในดินเกินค่ามาตรฐานของดินในพื้นที่เกษตรโดยปริมาณของ As และ Cd เกินค่ามาตรฐานดินของประเทศไทย [14] และปริมาณของ Cd Pb และ Zn เกินค่ามาตรฐานดินของสหภาพยุโรป และปริมาณ As Cd และ Zn เกินค่ามาตรฐานดินของประเทศไทย ในขณะที่ปริมาณ Cu ในดินมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานของประเทศไทยและสหภาพยุโรป [4] (ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของดินเนื่องจากการปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn มากเกินขีดจำกัด จนอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ตลอดจนการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจากการรับสารมลพิษจากดิน

การวิเคราะห์สภาพมลพิษในดิน (Soil Pollution status) เป็นการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของมลพิษทางดินของแปลงนาโดยวิธีวิเคราะห์ค่าดัชนีทางธรณีเคมี ได้แก่ ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักโดยใช้ปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (EF) และค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (RI) ของดินในแปลงนาที่ศึกษา แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนักในดินแปลงนาที่ศึกษา

	ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/kg)				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn
1. ดินแปลงนาที่ศึกษา					
Min	0.5	0.6	8.7	11.8	35.0
Max	25.9	39.1	25.3	113.5	3013.8
Mean	11.1	6.0	17.1	30.5	381.9
SD	9.3	11.5	5.8	28.5	879.8
Detection limit	0.05	0.04	0.08	0.06	0.10
2. เกณฑ์มาตรฐาน (Guidelines)					
ไทย	3.9	37	-	400	-
จีน	20	0.6	100	350	300
สหภาพยุโรป	-	3	140	100	300

พบว่าค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ของตัวอย่างดินทุกแปลงมีค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Cu อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน (Igeo <1) ในขณะที่พบการปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn ในดิน โดยค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ As (Igeo-As = -2.5 ถึง 3.2) บ่งบอกระดับการปนเปื้อนของ As อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนไปจนถึงมีการปนเปื้อนสูง ส่วนค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Pb (Igeo-Pb = -1.4 ถึง 1.9) แสดงถึง Pb อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนถึงมีการปนเปื้อนปานกลาง ส่วนค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Cd (Igeo-Cd = 0.3 ถึง 6.4) แสดงระดับการปนเปื้อนของ Cd อยู่ในระดับปานกลางถึงระดับสูงมาก ในขณะที่ ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Zn (Igeo-Zn = -2.0 - 4.4) อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนไปจนถึงมีการปนเปื้อนสูงมาก



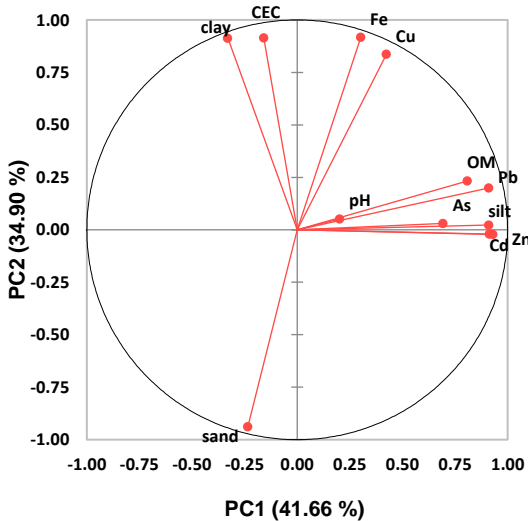
สำหรับผลการประเมินค่า EF (Enrichment Factor) หรือค่าปัจจัยการสะสมตัวของ Cd (EF= 4.6 ถึง 174.2) บ่งชี้ว่า การปนเปื้อนของ Cd ได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมมนุษย์อยู่ในระดับปานกลางถึงรุนแรงและ Zn (EF= 0.6 ถึง 42.4) ในดิน แสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนของ Zn ในดินได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมมนุษย์อยู่ในระดับน้อยถึงระดับรุนแรง ในขณะที่ปัจจัยการสะสมตัวของ As (EF= 0.1 ถึง 2.7) ในดินพบว่าได้รับอิทธิพลระดับน้อยจนถึงได้รับอิทธิพลปานกลางจากกิจกรรมมนุษย์ ส่วน Pb (EF= 1.6 ถึง 7.6) ในดินได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมมนุษย์อยู่ในระดับน้อยถึงระดับสูง ในขณะที่ปัจจัยการสะสมตัวของ Cu ในดินอยู่ในระดับที่ไม่ได้รับอิทธิพลจนถึงได้รับอิทธิพลน้อยจากกิจกรรมมนุษย์ การประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ (RI) ของแปลงนาที่ศึกษา พบว่ามีค่าระหว่าง 69 ถึง 4,116 โดยสามารถแบ่งแปลงนาได้เป็น 4 กลุ่มตามระดับการปนเปื้อนดินที่มีผลต่อระบบนิเวศ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง ระดับสูง และระดับสูงมาก (ตารางที่ 1)

3.3 การประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

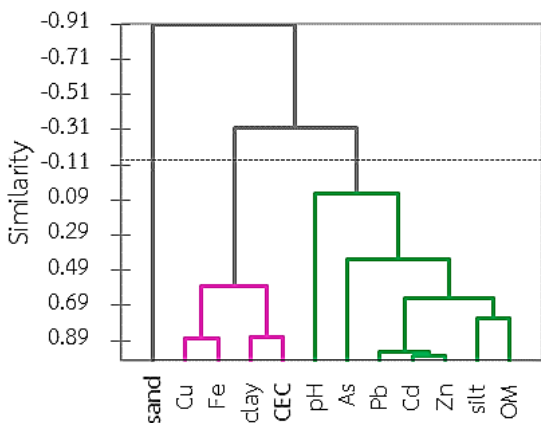
การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยทั้งสภาพธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินโดยใช้ค่าสถิติการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Components Analysis; PCA) ที่มีการหมุนแกนแบบอโรโกนอลด้วยวิธีแวนแมกซ์ (Varimax Rotation) และทวนสอบผลกับค่าจากการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis; CA) [6] แสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 3

ผลการศึกษา พบว่า องค์ประกอบที่มีค่าไอเกน (Eigen value) ที่มากกว่า 1 จำนวน 3 องค์ประกอบ โดยมี 2 องค์ประกอบที่สามารถอธิบายตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการปนเปื้อนโลหะหนักในดินซึ่งมีค่าสัดส่วนความแปรปรวนสะสม 76.56 % องค์ประกอบดังกล่าว ได้แก่ PC1 และ PC2 โดย PC1 สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้ 41.66 % ประกอบด้วยตัวแปร As Cd Pb และ Zn ซึ่งมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ OM และ silt เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดินสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี ทำให้เป็นแหล่งสะสม As Cd Pb และ Zn ส่วน PC2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้ 34.9 % โดยพบว่าค่า CEC มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ Cu Fe และ clay แต่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับ sand สามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่างดินประเภท clay ซึ่งมีค่า CEC สูง มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก ทำให้มีการตรวจพบค่า Cu Fe สูง ซึ่งตรงกันข้ามกับตัวอย่างดินประเภท sand ที่มีค่า CEC ต่ำ และเมื่อทวนสอบความสอดคล้องของตัวแปรระหว่างผลการวิเคราะห์ PCA กับผลการวิเคราะห์ CA (รูปที่ 3) พบว่าตัวแปรโลหะหนักมีความสอดคล้องในแนวเดียวกัน และมีความสอดคล้องกับค่า EF จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวบ่งชี้ว่า Cu ที่พบในดินเกิดจากสภาพธรรมชาติ ในขณะที่การปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn เกิดจากทั้งสภาพธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เมื่อพิจารณาค่าความสอดคล้องระหว่างค่า Igeo-Cd และ Igeo-Zn และค่า EF แสดงให้เห็นว่าระดับการปนเปื้อนของ Cd และ Zn สูงการปนเปื้อนเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

Variables (axes PC1 and PC2: 76.56 %)



รูปที่ 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินด้วยวิธี Hierarchical Cluster Analysis

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนัก

ตัวแปร	ค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัย (Factor Loadings)		
	PC1	PC2	PC3
As	0.694	0.030	0.161
Cd	0.914	-0.020	0.299
Cu	0.424	0.836	-0.126
Pb	0.911	0.199	0.242
Zn	0.931	-0.022	0.208
Fe	0.302	0.917	0.037
sand	-0.235	-0.938	0.054
silt	0.911	0.023	-0.238
clay	-0.330	0.913	0.093
pH	0.202	0.052	0.913
OM	0.809	0.233	-0.178
CEC	-0.159	0.914	0.118

3.4 ระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในเมล็ดข้าวและค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภค

จากการวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในเมล็ดข้าวที่ได้จากแปลงนาที่ศึกษาพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยในเมล็ดข้าวของ $Zn > Cu > Cd > As \cong Pb$ โดยปริมาณ As มีค่า 0.03 - 0.36 mg/kg Cd มีค่า <0.03 - 0.46 mg/kg Cu มีค่า 0.46 - 1.82 mg/kg Pb มีค่าระหว่าง <0.04 - 0.34 mg/kg และ Zn มีค่า 14.83-25.45 mg/kg เมื่อเทียบค่ามาตรฐานของโลหะหนักในเมล็ดข้าว [4] พบว่าเมล็ดข้าวมีการปนเปื้อนของ As Cd และ Pb เกินค่ามาตรฐานของโลหะหนักในเมล็ดข้าวตามมาตรฐานของประเทศจีน และพบปริมาณ As และ Cd ในเมล็ดข้าวสารเกินค่ามาตรฐาน



ของ WHO/FAO: Codex (CXS 193-1995) [5] แสดงดังตารางที่ 4 สำหรับผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภคจากพิษของโลหะหนัก (As Cd Cu Pb และ Zn) โดยพิจารณาค่า Hazard Quotient (HQ) ของผลผลิตข้าวจากแปลงนาทั้ง 11 แปลงพบว่าแปลงนาส่วนใหญ่ให้ผลผลิตข้าวที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค ยกเว้นแปลง R1 R4 R5 R10 และ R11 และจากผลการศึกษาพบแปลงนาที่มีค่าความเสี่ยงรวมสูง (Total HQ >1) จำนวน 6 แปลง ซึ่งคิดเป็น 55% ของแปลงนาทั้งหมด โดยแปลงนา 5 แปลง ได้แก่ R2 R3 R6 R7 และ R8 มีค่าความเสี่ยงสูงจากการสะสมของ As ในเมล็ดข้าว และมี 4 แปลง ได้แก่ R6 R7 R8 และ R9 มีค่าความเสี่ยงสูงจากการสะสมของ Cd ในเมล็ดข้าว แสดงให้เห็นว่าการใช้ประโยชน์ด้านการเพาะปลูกข้าวในแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนโลหะสูงมีโอกาให้เกิดการปนเปื้อนในเมล็ดข้าวซึ่งมีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค

3.5 ประเมินสภาวะมลพิษดินต่อค่าความเสี่ยงจากการบริโภคข้าวของแปลงนา

ในพื้นที่เกษตรที่มีการผลิตพืชอาหารปัจจัยด้านดินมีความสำคัญต่อคุณภาพผลผลิตที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค การประเมินสภาวะมลพิษดินของแปลงนาจากค่าตัวชี้วัดด้านดินและพืช โดยค่าดัชนีด้านธรณีเคมีที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระดับมลพิษดิน ได้แก่ ค่าดัชนีการสะสมโลหะหนักในดิน (Igeo) ค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ (Potential Ecological Risk Index: RI) เป็นต้น [2] ส่วนดัชนีด้านพืชที่ใช้ประเมินสภาพการปนเปื้อนด้วยค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคเมล็ดข้าวเนื่องจากค่า RI เป็นค่าที่แสดงความเสี่ยงทางนิเวศของระดับโลหะหนักในดินต่อสิ่งมีชีวิตจึงนำมาใช้ใน

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ดข้าว

แปลงนา	ความเข้มข้นโลหะหนักในเมล็ดข้าว(mg/kg)				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn
R1	<0.05	<0.03	1.19	0.10	14.83
R2	0.36	0.10	1.82	0.04	20.52
R3	0.31	0.04	1.11	<0.04	20.82
R4	<0.05	0.06	0.71	<0.04	18.30
R5	<0.05	<0.03	0.88	<0.04	16.50
R6	0.32	0.27	1.26	<0.04	20.21
R7	0.14	0.46	1.36	0.34	23.59
R8	0.20	0.22	0.95	<0.04	25.45
R9	0.05	0.21	1.18	<0.04	21.25
R10	<0.05	<0.03	1.24	<0.04	19.36
R11	<0.05	<0.03	0.46	<0.04	19.46
Min	<0.05	<0.03	0.46	<0.04	14.83
Max	0.36	0.46	1.82	0.34	25.45
Detection limit	0.05	0.03	0.06	0.04	0.07
เกณฑ์มาตรฐาน (Guidelines)					
ประเทศจีน	0.15	0.2	10	0.2	50
สหภาพยุโรป	-	0.2	-	-	-
WHO/FAO	0.2	0.4	-	-	-

การจำแนกแปลงนาตามชั้นของ RI (ตารางที่ 1) สามารถแบ่งแปลงนาออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนต่ำ กลุ่มที่ 2 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนปานกลาง กลุ่มที่ 3 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูง และกลุ่มที่ 4 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูงมาก ตารางที่ 5 แสดงผลการศึกษาความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าวที่ปลูกในแปลงนากลุ่มที่มีสภาพการปนเปื้อนของดินในระดับปานกลางถึงสูงมาก (กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4) พบว่าในแปลงนาเกือบทุกแปลง ให้ค่าความเสี่ยงรวมมากกว่า 1 (Total HQ > 1) แสดงถึง



ตารางที่ 5 ระดับความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าวปนเปื้อนโลหะหนักของกลุ่มแปลงนา 4 กลุ่ม

แปลง	Hazard quotient (HQ) ^{1/}					Total HQ
	As	Cd	Cu	Pb	Zn	
กลุ่มที่ 1 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนต่ำ (R1 R5 R10 R11)						
R1	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.16 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.53 ± 0.05
R5	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.12 ± 0.06	0.00 ± 0.00	0.28 ± 0.02	0.33 ± 0.08
R10	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.17 ± 0.03	0.00 ± 0.00	0.32 ± 0.04	0.49 ± 0.08
R11	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.06 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.32 ± 0.02	0.39 ± 0.03
กลุ่มที่ 2 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนปานกลาง (R2 R9)						
R2	3.94 ± 1.24	0.48 ± 0.18	0.25 ± 0.06	0.03 ± 0.03	0.34 ± 0.02	5.03 ± 1.08
R9	0.00 ± 0.00	1.03 ± 0.26	0.16 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.02	1.54 ± 0.28
กลุ่มที่ 3 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูง (R3 R4 R6)						
R3	3.47 ± 0.99	0.20 ± 0.21	0.15 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.02	4.16 ± 1.24
R4	0.00 ± 0.00	0.28 ± 0.19	0.10 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.31 ± 0.02	0.68 ± 0.22
R6	3.60 ± 0.61	1.35 ± 0.44	0.17 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.34 ± 0.02	5.46 ± 1.07
กลุ่มที่ 4 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูงมาก (R7 R8)						
R7	1.53 ± 0.45	2.28 ± 0.49	0.18 ± 0.07	0.42 ± 0.10	0.39 ± 0.02	4.80 ± 0.77
R8	2.18 ± 0.51	1.08 ± 0.50	0.13 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.42 ± 0.02	3.80 ± 0.95

^{1/} ค่าเฉลี่ย ± SD

ความเสี่ยงระดับสูง ยกเว้นแปลงนา R4 เมื่อพิจารณาความเสี่ยงจากโลหะหนักแต่ละชนิด พบว่าแปลงนา R6 R7 และ R8 มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงเนื่องจากการปนเปื้อนทั้ง As และ Cd แปลง R2 และ R3 มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงเนื่องจากการปนเปื้อน As ส่วนแปลงนา R9 มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงจากการบริโภคเมล็ดข้าวที่ปนเปื้อน Cd ทั้งนี้พบว่ามีความสัมพันธ์ของการจัดชั้นของดินตามค่า RI กับค่าปนเปื้อนในเมล็ดข้าว โดยดินมีการปนเปื้อนสูงมีโอกาสตรวจพบการปนเปื้อนโลหะหนักในเมล็ดข้าวสูง แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนต่ำ (กลุ่มที่ 1) พบค่าความเสี่ยงรวม (Total HQ) มีค่า

น้อยกว่า 1 ทุกแปลง โดยทุกแปลงในกลุ่ม 1 มีค่าความเสี่ยงแยกธาตุของ As Cd Cu Pb และ Zn น้อยกว่า 1 (HQ < 1) แสดงดังตารางที่ 5 ส่วนแปลงนาที่ดินปนเปื้อนโลหะหนักปานกลางถึงสูงมาก (แปลงนาในกลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4) พบว่าเกือบทุกแปลงมีค่าความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพโดยเฉพาะจาก As และ Cd ยกเว้น แปลง R4 ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะเนื้อดินที่เป็นดินเหนียวและมีค่า CEC สูง ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนย้ายของธาตุโลหะหนักไปสะสมในส่วนของเมล็ดข้าวต่ำกว่าดินร่วนและร่วนเหนียว จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นความแตกต่างของการดูดสะสมของโลหะหนักของข้าวนอกจากขึ้นกับระดับความรุนแรง



ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินแล้วยังขึ้นกับสมบัติดินซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในระบบของดินและพืช

4. บทสรุป

การปนเปื้อนโลหะหนักในดินของพื้นที่ปลูกข้าวบริเวณอุตสาหกรรมเหมืองแร่เก่าส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของที่ดินและการปนเปื้อนโลหะหนักในผลผลิตข้าว ผลการศึกษาพบว่าดินแปลงนา มีระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักที่แตกต่างกัน โดยลำดับความรุนแรงของการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน ได้แก่ $Cd > Zn > Pb > As$ จากการวิเคราะห์สภาพการปนเปื้อนโลหะหนักในแปลงนาด้วยวิธีการประเมินระดับมลพิษทางดินและความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าว พบว่าระดับความรุนแรงของสภาพการปนเปื้อนมีความสอดคล้องกันระหว่างค่าดัชนีด้านธรณีเคมี (Geochemical index) ได้แก่ ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (EF) ค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (RI) กับค่าความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการบริโภคข้าว การศึกษาแปลงนาที่มีระดับการปนเปื้อนต่ำถึงสูง 11 แปลง พบผลผลิตข้าวปนเปื้อน จากแปลงนา 6 แปลง คิดเป็นร้อยละ 55 การจำแนกพื้นที่ด้วยค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศเป็น 4 กลุ่มตามระดับความเสี่ยงจากการปนเปื้อนมลพิษ มีความสอดคล้องกับระดับความเสี่ยงต่อสุขภาพของการบริโภคข้าวโดยพบว่าแปลงนาที่มีระดับการปนเปื้อนปานกลางถึงสูงมากให้ผลผลิตข้าวที่มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค (Total HQ > 1) ดังนั้นวิธีการประเมินพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยค่าดัชนีด้านธรณีเคมีสามารถใช้ใน

การประเมินพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อการผลิตอาหารที่ปลอดภัยจากการปนเปื้อนโลหะหนักได้ อย่างไรก็ตามก็ควรศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการฟื้นฟูพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอาหารที่ปลอดภัยจากพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Zhuang, Z. Li, B. Zou, H. Xia and G. Wang, Heavy metal contamination in soil and soybean near the Dabaoshan mine, South China, *Pedosphere*, 2013, 23(3), 298-304.
- [2] H. Rajkumar, P.K. Naik and M.S. Rishi, Evaluation of heavy metal contamination in soil using geochemical indexing approaches and chemometric techniques, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(11), 7467-7486.
- [3] N. Adimalla, H. Qian and H. Wang, Assessment of heavy metal (HM) contamination in agricultural soil lands in northern Telangana, India: An approach of spatial distribution and multivariate statistical analysis, *Environmental Monitoring Assess*, 2019, 191(4), 246.



- [4] Z. Wang, X. Zeng, M. Geng, C. Chen, J. Cai, X. Yu, Y. Hou and H. Zhang, Health risks of heavy metals uptake by crops grown in a sewage irrigation area in China, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(3),1379-1386.
- [5] <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>. (Accessed on 25 June 2021)
- [6] B.A. Fonge, M.T. Larissa, A.M. Egbe, Y.A. Afanga, N.G. Fru and V.M. Ngole-Jeme, An assessment of heavy metal exposure risk associated with consumption of cabbage and carrot grown in a tropical Savannah region, *Sustainable Environment*, 2021, 7(1), 1-19.
- [7] Land Development Department of Thailand, Analytical manual for soil, water, fertilizer, plant and soil improvement materials, LDD, Thailand, 2004. (in Thai)
- [8] M. Peech, Soil pH by glass electrode pH meter, American Society of Agronomy, Inc., WI, USA, 1965.
- [9] A. Walkley and I.A. Black., Chromic and titration method for determination of soil organic matter, *Soil Science Society of America: Proceedings*, 1947, 63, 257.
- [10] H.D. Chapman and M.R. Carter, *Methods of soil analysis: part 2*, American Society of Agronomy, Inc., WI, USA, 1996.
- [11] U.S. EPA Method 3051A (SW-846), Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils, Washington D.C., USA, 2007.
- [12] Z. Hseu, Evaluating heavy metal contents in nine composts using four digestion methods, *Bioresource Technology*, 2004, 5, 53–59.
- [13] K.K. Turekian and K.H. Wedepohl, Distribution of the elements in some major units of the earths crust, *Geological Society of America Bulletin*, 1961, 72(2), 175-192.
- [14] Pollution Control Department of Thailand, Soil quality standards for habitat and agriculture, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand, 2004.

การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับในท้องถิ่น

อภิวัชร บุญภูธรพัฒน์ กมลทิพย์ ดีบุกคำ และ ชวิญเนตร สมบัติสมภพ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 10 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 19 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 30 สิงหาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 กันยายน 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านจากไม้ไผ่ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ (0.5-2.0 g) ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (0-120 min) ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู (65-140 mg/L) และค่าพีเอช (3-9) และศึกษาความสามารถในการดูดซับด้วยสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช จากการศึกษา พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณ และระยะเวลาที่เหมาะสม เท่ากับ 2 g และ 90 min ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ มีค่าเท่ากับ 75.48 23.90 และ 16.57% ตามลำดับ จากการศึกษาไอโซเทอม พบว่า กลไกการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดสอดคล้องกับสมการ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 18.73 5.18 และ 0.81 mg/g ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวในการดูดซับของถ่านแต่ละชนิด พบว่า ถ่านหุงต้มมีค่าสูงที่สุด รองลงมาถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ถ้าพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ถ่านหุงต้มมีราคาถูกที่สุด ดังนั้น ถ่านหุงต้มจึงเป็นวัสดุดูดซับในท้องถิ่นที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์; สีเมทิลีนบลู; วัสดุดูดซับในท้องถิ่น; ไอโซเทอม

Removal of Methylene Blue Dye using Local Adsorbent Materials

Apiwatch Boonkulthanapat, Kamontip Deebukkum and Kwannate Sombatsompop*

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

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

Received: 10 July 2021; Revised: 19 August 2021; Accepted: 30 August 2021

Online Published: 21 September 2021

Abstract: The objective of this study is to compare methylene blue dye removal ability by 3 types of adsorbent materials including activated carbon, charcoal and bamboo charcoal. The effects of adsorbent dosage (0.5-2.0 g), contact time (0-120 min), initial methylene blue concentration (65-140 mg/g) and pH solution (3-9) were investigated. The adsorption isotherms were analyzed by using Langmuir and Freundlich equations. The experimental results found that the optimum adsorbent dosage and contact time of the low-cost adsorbents were 2 g and 90 min, respectively. The removal efficiencies of methylene blue by activated carbon, charcoal and bamboo charcoal were 75.48, 23.90 and 16.57 %, respectively. Adsorption data were fit to Langmuir isotherm model. The maximum adsorption capacities of activated carbon, charcoal and bamboo charcoal were 18.73, 5.18 and 0.81 mg/g, respectively. When considering the maximum adsorption capacity per adsorption surface area of each adsorbent material, it was found that the charcoal had the highest value followed by bamboo charcoal and activated carbon respectively. If considering the economic value charcoal is the cheapest. Therefore, charcoal was the suitable local adsorbent material which can be used for methylene blue dye removal.

Keywords: Activated carbon; Methylene blue; Low-cost adsorbent; Isotherm



1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทย ปัจจุบันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทุกปี ส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียจากการปล่อยน้ำในกระบวนการฟอกย้อมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ปัญหาน้ำเสียจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลกระทบเป็นวงกว้าง โดยเฉพาะกับชุมชนบริเวณโดยรอบของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในกระบวนการผลิตสิ่งทอนั้นจะใช้น้ำในส่วนของกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี และสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเส้นใย กระบวนการดังกล่าวจะใช้น้ำในปริมาณมาก น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเกิดขึ้นจาก 2 แหล่งใหญ่ ได้แก่ น้ำเสียที่ใช้ในการฟอกย้อมน้ำเสียในส่วนนี้จะมีปริมาณน้อย แต่จะมีความเข้มข้นมาก และน้ำเสียที่ได้มาจากการซักล้างหลังการฟอกย้อม น้ำเสียในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นน้อยกว่าส่วนแรกค่อนข้างมาก นอกจากนี้ปัญหาที่พบคือโรงงานอุตสาหกรรมไม่ได้ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมี และความเข้มข้นของสีเจือปนอยู่ในปริมาณมาก ก่อนที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนี้ สีย้อมยังสามารถส่งผลกระทบต่อพืชน้ำ เนื่องจาก สีที่ปนเปื้อนในน้ำจะลดการส่องผ่านของแสงแดดผ่านน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถได้รับแสงอย่างเต็มที่เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังนั้นการกำจัดสารสีดังกล่าวออกจากน้ำเสียจึงมีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม เพราะแม้แต่สีย้อมในน้ำเพียงเล็กน้อยก็อาจเป็นพิษและมองเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เมื่อน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วจะเป็นเรื่องยากที่จะกำจัดได้เพราะสีย้อมที่ปนเปื้อนลงในน้ำมีการย่อยสลายทางชีวภาพ

ได้ยาก จากการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม พบว่าในปัจจุบันมีวิธีการกำจัดสีย้อมผ้าอยู่หลากหลายวิธี เช่น กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation-Flocculation) ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จะเกิดตะกอนจากสารเคมีในปริมาณมาก และยากต่อการกำจัด ในส่วนการกำจัดสีด้วยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment Process) จะใช้เวลานานในการกำจัดสี และต้องใช้แหล่งพลังงานมาก และมีค่าใช้จ่ายที่สูง [1] สำหรับกระบวนการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับ (Absorption) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ไม่ใช้สารเคมีในการบำบัด ค่าใช้จ่ายน้อย และใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน จากงานวิจัยของ Sae-ui และคณะ [2] ได้ศึกษาการนำซีโอไลต์สังเคราะห์ Na-A ที่สังเคราะห์จากตะกอนน้ำประปา มาใช้ในการดูดซับสีเมทิลีนบลู พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ Na-A มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีได้มากกว่า 90% และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 40.67 mg/g นอกจากนี้ Kahapana และ Phowan [3] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา จากการศึกษาพบว่า เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 8 ชั่วโมง ปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากับ 20 g/L และมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 21.88 mg/g งานวิจัยของ Sangarunlert [4] ศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครง พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลเรด 64.47% โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ เวลาในการดูดซับ



60 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 g ความเข้มข้นของสารละลายสีเมทิลีนบลูเริ่มต้นสูงสุด 300 mg/L Misran และ คณะ [5] ใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านกัลวยในการกำจัดเมทิลีนบลู โดยถ่านกัมมันต์จากถ่านกัลวยมีพื้นที่ผิว 837.45 m²/g มีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.76% ที่ ปริมาณ ความเข้มข้น 200 g/mL มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 101.01 mg/g Kliangpradith และคณะ [6] ได้นำถ่านลอยไม้ยางพารามาใช้บำบัดน้ำทิ้งจากการผลิตผ้าบาติก พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดีและสี มีค่า 96 และ 98% ตามลำดับ ที่สภาวะเหมาะสม คือ pH 7 ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง ที่ปริมาณถ่านลอย 100 g/L และการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิช จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการบำบัดสีย้อมสามารถนำวัสดุหลากหลายชนิดมาใช้บำบัด และวัสดุดูดซับในท้องถิ่นเป็นวัสดุที่น่าสนใจ มีราคาต้นทุนต่ำ และหาได้ง่ายในท้องถิ่น จึงเป็นทางเลือกหนึ่งของวัสดุต้นทุนต่ำเพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อม

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้ จึงได้เลือกใช้วัสดุทางธรรมชาติ 3 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ และวัสดุในท้องถิ่น ได้แก่ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำจากธรรมชาติไม่มีสารเคมีปนเปื้อน และถ่านยังมีคุณสมบัติที่ช่วยในเรื่องการดูดซับมวลสารขนาดเล็ก กิ่ง และสี ได้เป็นอย่างดี โดยศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ pH ระยะเวลา ความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลู และใช้สมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช สำหรับการศึกษาในครั้งนี้

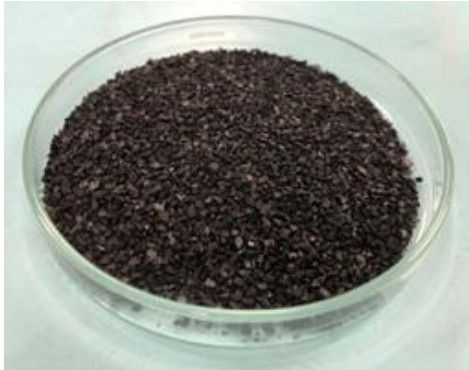
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

นำวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 1) ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Granular Activated Carbon) ID700 ยี่ห้อ Karbon เป็นถ่านหินนำเข้าจาก USA ใช้เป็นสารกรองคาร์บอน และวัสดุดูดซับในท้องถิ่น ได้แก่ ถ่านหุงต้ม ผลิตจากการเผาไม้รวมที่มีขายในท้องตลาด และถ่านไม้ไผ่ ยี่ห้อ บันตัน มาทำการบดและร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 30 นำวัสดุดูดซับมาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [2] หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางอณูฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และหาพื้นที่ผิวจำเพาะผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller: BET จากนั้นนำถ่านทั้ง 3 ชนิด ใส่ในบีกเกอร์ และนำมาเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น เพื่อรอการดำเนินการทดลองต่อไป

2.2 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

ในการทดลองจะเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู (C₁₆H₁₈N₃ClS.2H₂O) ของบริษัท UNILAB (C.I. 52015)) ซึ่งเป็นสีย้อม Cationic Dyes ที่มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีฟ้าเข้ม ในการทดลองจะเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 1000 mg/L โดยชั่งเมทิลีนบลู 2.225 g ผสมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเท่ากับ 2 L จากนั้นทำการเจือจางสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 mg/l สำหรับทำกราฟมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู และทำการเจือจางสีย้อมเมทิลีนบลูที่



(a)

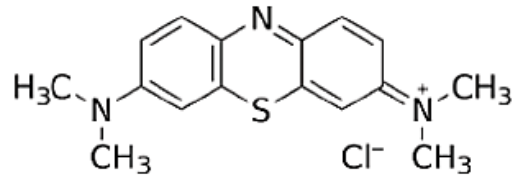


(b)



(c)

รูปที่ 1 วัสดุดูดซับในท้องถิ่น (a) ถ่านกัมมันต์ (b) ถ่านหุงต้ม และ (c) ถ่านไม้ไผ่



รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีเมทิลีนบลู

ความเข้มข้น 65 - 140 mg/l จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer จะได้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสีเมทิลีนบลูสูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 665 นาโนเมตร [2] จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านทั้ง 3 ชนิด

2.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยแปรค่าปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากับ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 g ระยะเวลาในการดูดซับเท่ากับ 15 30 60 90 และ 120 min ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 65 90 115 และ 140 mg/L และค่า pH เท่ากับ 3 5 7 และ 9 โดยเริ่มต้นจากการนำวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่เตรียมไว้ไปทำการผสมกับสีย้อมเมทิลีนบลูใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นระยะเวลา 90 min ที่อุณหภูมิ 25 °C หลังจากผ่านขั้นตอนของการดูดซับแล้วจึงนำสารละลายเมทิลีนบลูมาทำการแยกวัสดุดูดซับออกด้วยการกรองผ่านตะแกรงร่อนขนาด 300 μ m เพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง และวัดปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ หลังจากทำการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับอื่นๆ แล้วจึงนำผลการ



ทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\text{Adsorption Percent (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู (mg/L)

C_1 คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่หลังการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลู (mg/L)

$$q_e = \frac{C_0 - C_1}{W} \cdot V \quad (2)$$

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (mg/g)

V คือ ปริมาณของสีย้อมเมทิลีนบลู (L)

W คือ ปริมาณของวัสดุดูดซับ (g)

เมื่อได้ผลการทดลองจากการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นแล้ว นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ของสมการไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับได้สูงสุดของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} \quad (3)$$

q_m คือ ปริมาณสูงสุดของสีย้อมเมทิลีนบลูที่สามารถ

ดูดซับแบบชั้นเดียวต่อปริมาณซีไอไลต์ (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ของสมการ Langmuir

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C + \log K_F \quad (4)$$

K_F คือ ค่าคงที่ของสมการ Freundlich

$1/n$ คือ ค่าที่บ่งบอกความสามารถในการดูดซับและเขียน

กราฟความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรงระหว่างค่า

$1/q_e$ และ $1/C$ จะได้ค่า q_m เป็นค่าที่จุดตัดแกนตั้ง

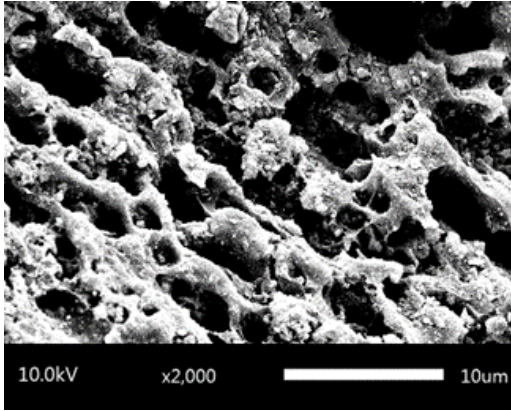
(แกน Y) และค่า K_L เป็นค่าความชันของกราฟ

เส้นตรงจากสมการเส้นตรงของไอโซเทอม Langmuir

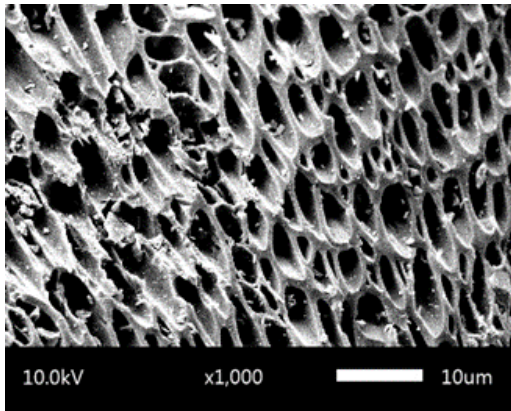
3. ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 การศึกษาลักษณะอสังฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

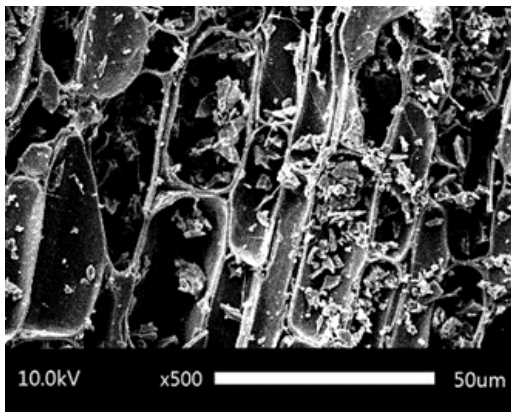
รูปที่ 2 3 และ 4 แสดงการศึกษาลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยา และรูปร่างลักษณะของถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากรูปลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ มีรูปร่างของรูพรุนที่เป็นรูปทรงอิสระ ในขณะที่ถ่านหุงต้มมีรูปทรงของรูพรุนที่มีสัดส่วนสมมาตร และรูปทรงรูพรุนของถ่านไม้ไผ่มีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้า และตื้นกว่าถ่านชนิดอื่นๆ ซึ่งกำลังขยายที่สามารถเห็นพื้นที่ผิวได้ชัดเจนของถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ เท่ากับ 2000 เท่า 1000 เท่า และ 500 เท่า ตามลำดับ เมื่อนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET พบว่าถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ จะมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 650.63 3.80 และ 3.32 m^2/g ตามลำดับจะเห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีลักษณะรูพรุนที่มีขนาดเล็กจึงทำให้มีปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเทียบกับมวลน้ำหนักของถ่าน รองลงมาคือ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่



รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์



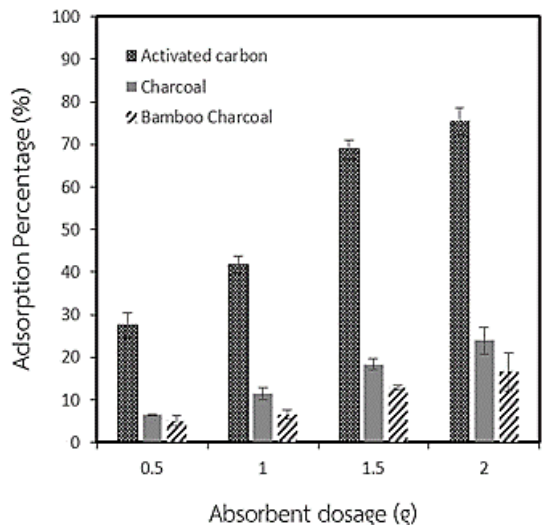
รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวของถ่านหุงต้ม



รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่

3.2 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับ

ผลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเมื่อแปรผันปริมาณถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ เท่ากับ 0.50 1.00 1.50 และ 2.00 g โดยมีค่า pH ที่สภาวะปกติของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 5.29 จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณวัสดุดูดซับที่เพิ่มขึ้น แปรผันตรงกับปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับสี ดังนั้นการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณ 2 g พบว่า ถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากที่สุดเท่ากับ 75.48 23.90 และ 16.57% ตามลำดับ



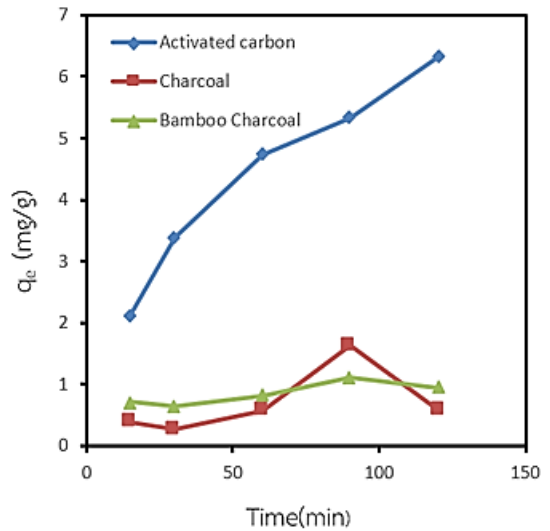
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุดูดซับกับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู



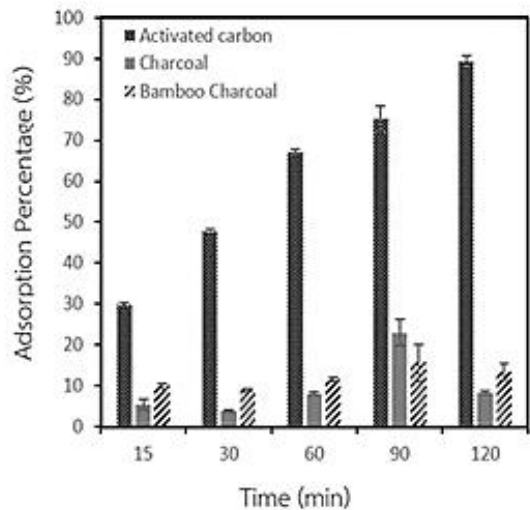
3.3 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

รูปที่ 6 พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นในระยะเวลาช่วงแรกอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูกับพื้นที่ผิวดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด โดยช่วงระยะเวลาแรกของการดูดซับในสารละลายเมทิลีนบลูจะมีสภาพความเข้มข้นที่สูง ส่งผลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนที่มาก จะเห็นว่าหลังจากระยะเวลา 90 min ผ่านไปจนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูต่ำลงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกรองน้ำเข้าสู่สภาวะคงที่ แต่ในขณะที่เดียวกัน ถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับพบว่าในช่วงที่ 60 ถึง 90 นาที จะดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด แต่หลังจาก 90 min ผ่านไประยะเวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ ที่น้อยกว่าทำให้เมื่อเกิดแรงขับเคลื่อนในช่วงแรกถ่านหุงต้มและไม้ไผ่ใช้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจนหมด จึงมีพื้นที่ผิวดูดซับไม่เพียงพอสำหรับการดูดซับในช่วงระยะเวลาต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู แสดงดังรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาช่วงแรกตั้งแต่ 30 ถึง 90 min ถ่านกัมมันต์ (พื้นที่ผิว 650.63 m²/g) มีความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มสูงขึ้นได้สูงสุดถึง 5.32 mg/g และเมื่อระยะเวลาผ่านไปหลังจาก 90 min ความสามารถในการดูดซับยังคงเกิดขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ทั้งนี้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซับกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

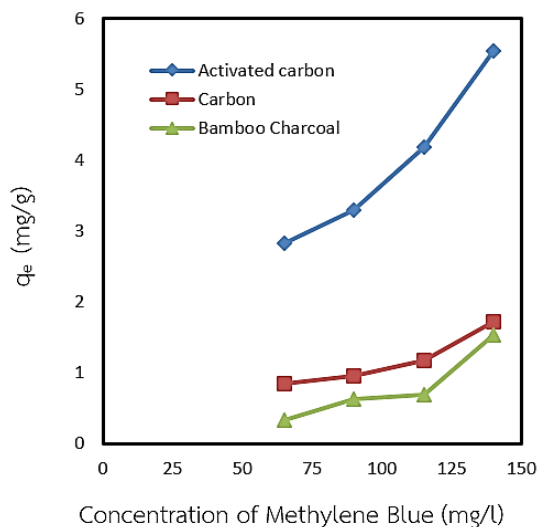


เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูกับพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) เกิดขึ้น โดยช่วงแรกของการดูดซับความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่มากทำให้มวลของสีย้อมถูกแรงขับเคลื่อนที่มากพามวลของสีย้อมไปยึดเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้มาก จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการดูดซับช่วงเริ่มต้นสีย้อมถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อน 90 min อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ พบว่าระยะเวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวดูดซับของถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ (พื้นที่ผิว 3.80 และ 3.32 m²/g ตามลำดับ) มีพื้นที่น้อยและจำกัด ทำให้ในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นเมทิลีนบลูถูกดูดซับจนเต็มพื้นที่ผิวดังนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่จึงไม่สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มได้อีก โดยประสิทธิภาพในการดูดซับที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ที่ระยะเวลา 90 min ประสิทธิภาพในการดูดซับยังคงเกิดขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเข้าสู่สภาวะสมดุล เท่ากับ 75.20 23.04 และ 15.63% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูและผิวของตัวดูดซับจึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ [7]

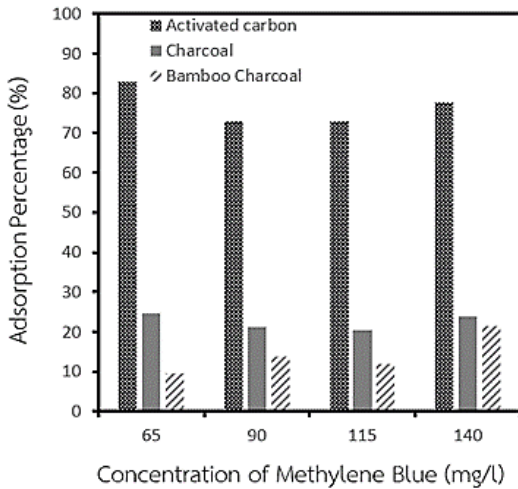
3.3 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

จากผลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 65-140 mg/L (รูปที่ 8) พบว่าความสามารถใน

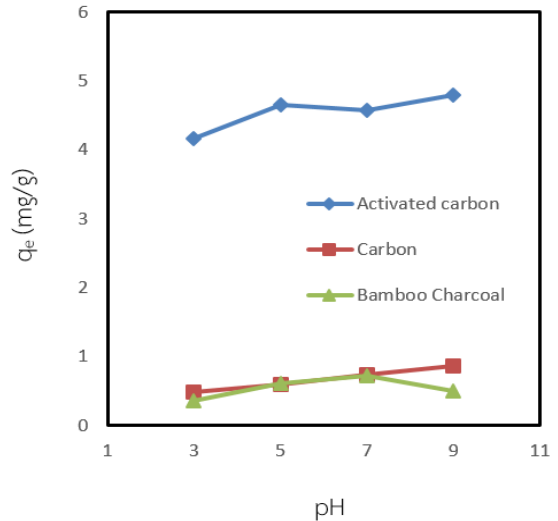
การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูส่งผลทำให้เพิ่มแรงขับเคลื่อนในการดูดซับที่ผิววัสดุดูดซับ ซึ่งเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นระหว่างสีย้อมเมทิลีนบลูกับวัสดุดูดซับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 140 mg/L ถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ มีความสามารถในการดูดซับสูงถึง 5.55 1.71 และ 1.54 mg/g ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ (รูปที่ 9) พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในช่วง 65-140 mg/L ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 72.84-82.93% ในขณะที่ถ่านหุงต้มมีค่าอยู่ในช่วง 20.38-24.60% และถ่านไม้ไผ่มีค่าอยู่ในช่วง 9.44-21.50%



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู



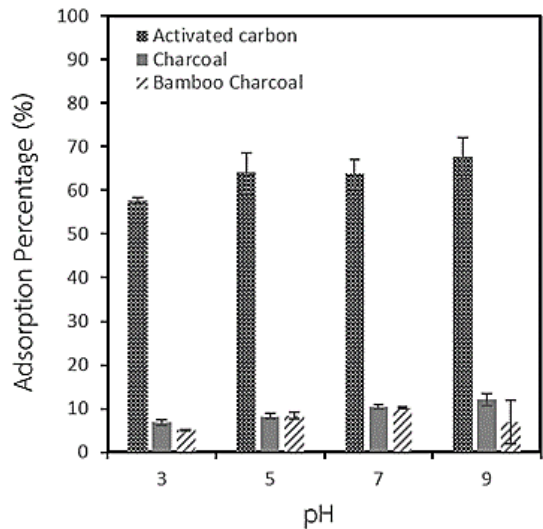
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

3.4 ผลของค่า pH ของสีย้อมเมทิลีนบลู

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ pH ระหว่าง 3-9 (รูปที่ 10) พบว่า ความสามารถในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุก pH และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับ (รูปที่ 11) จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอยู่ในช่วง 57.58 – 67.49% ส่วนถ่านหุงต้ม มีค่าอยู่ในช่วง 6.78 – 12.11 % และถ่านไม้ไผ่ มีค่าอยู่ในช่วง 5.03 – 10.18 % ซึ่งเป็นช่วงค่า pH ที่เห็นความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะของสารละลายที่มีค่า pH ต่ำ จะเกิดประจุบวกเกาะที่ผิวของวัสดุดูดซับ [8] โดยสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นบวก ทำให้ประจุบวกเกิดการผลักกัน จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูใกล้เคียงกันในทุกช่วงค่า pH ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู



3.5 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบไอโซเทอมของสีย้อมเมทิลีนบลูจากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich โดยใช้วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด พบว่าไอโซเทอมของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่มีความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูเริ่มต้นอยู่ในช่วง 65-140 mg/L เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (R^2) การดูดซับสีเมทิลีนบลูสอดคล้องกับสมการของ Langmuir มากกว่า Freundlich ซึ่งอธิบายได้ว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เนื่องจากถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากถึง 650.63 m^2/g ซึ่งมากกว่าถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ ที่มีพื้นที่ผิวดูดซับเพียง 3.80 และ 3.32 m^2/g ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวในการดูดซับของแต่ละชนิด พบว่า ถ่านหุงต้มมีค่าสูงที่สุด รองลงมาถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 1.36 0.24 และ 0.03 mg/m^2 นั้นแสดงให้เห็นว่า วัสดุดูดซับในท้องถิ่นทั้งสองชนิด คือ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ มีคุณสมบัติที่ดีและสามารถ

นำมาใช้ทดแทนถ่านกัมมันต์ในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ และยังเป็นวัสดุที่ง่ายในท้องถิ่น ถ้าพิจารณาค่า $1/n$ ของสมการ Freundlich พบว่าถ่านกัมมันต์และถ่านหุงต้ม มีค่า $1/n$ เท่ากับ 0.87 และ 0.89 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 อธิบายได้ว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวดูดซับที่จำกัด ซึ่งมีความสอดคล้องกับกลไกการดูดซับแบบพื้นผิวชั้นเดียวของสมการ Langmuir ไม่มีการซ้อนทับกันพื้นที่ว่างบนผิวของวัสดุดูดซับจับกับโมเลกุลสารได้เพียง 1 โมเลกุล [2] อย่างไรก็ตามจากตารางเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู นอกจากปริมาณวัสดุดูดซับ ความเข้มข้นสารตั้งต้น ระยะเวลา และ pH แล้ว ปัจจัยสำคัญในงานวิจัยนี้คือ ชนิดวัสดุดูดซับและพื้นที่ผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม และถ่านไม้ไผ่ มีราคาต่อกิโลกรัม เท่ากับ 40 20 และ 300 บาท ตามลำดับ ดังนั้น การเลือกวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับที่ต่างชนิดกัน

Adsorbent Dosage	Surface area (m^2/g)	Langmuir			Freundlich			Reference
		Q_m (mg/g)	K_L	R^2	$1/n$	K_f	R^2	
Activated carbon	650.63	18.73	0.0026	0.9329	0.8666	0.0717	0.9420	This study
Charcoal	3.80	5.18	0.0028	0.8792	0.8851	0.0193	0.8851	This study
Bamboo charcoal	3.32	0.81	0.0044	0.9511	3.6315	0.0021	0.9015	This study
Activated carbon from								
banana stem	837.45	101.01	123.75	0.9980	0.16	111.20	0.9977	[5]
Bamboo shoot	-	29.24	0.046	0.9225	0.72	1.55	0.988	[9]



ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งเชิงประสิทธิภาพ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดและความคุ้มค่าเชิง เศรษฐศาสตร์ พบว่า ถ่านหุงต้มเป็นวัสดุดูดซับใน ท้องถิ่นที่หาง่าย ราคาถูก และมีความเหมาะสมในการ นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีได้

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อม เมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ปริมาณวัสดุ ดูดซับ ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของสี ย้อมเมทิลีนบลู และ ค่า pH พบว่าปริมาณวัสดุดูดซับ 2 g ถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ให้ ประสิทธิภาพในการดูดซับ 75.48 23.90 และ 16.57% ตามลำดับ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูด ชับเท่ากับ 90 min ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ pH ในช่วงระหว่าง 3-9 ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดมีค่า ใกล้เคียงกัน จากการศึกษา ไอโซเทอมการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้มและถ่านไม้ไผ่ สอดคล้องกับ ไอโซเทอม Langmuir มากกว่า ถ่านหุงต้มเป็นวัสดุดูด ชับในท้องถิ่นที่หาง่าย ราคาถูกเหมาะในการบำบัดน้ำ เสียที่มีการปนเปื้อนสี

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความ อนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.W. Seow and C.K. Lim, Removal of dye by adsorption: A review, International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11(4), 2675-2679.
- [2] P. Sae-ui, T. Kongkaew, T. Wongsuk, T. Watcharamai and K. Sombatsompop, Adsorption of methylene blue dye by zeolite Na-A and standard Zeolite 4A, The Journal of Applied Science, 2019, 18(2), 51-63. (in Thai)
- [3] C. Kahapana and N. Phowan, A study on adsorption efficiency of methylene blue dye using adsorbent material prepared from water Hyacinth, SWU Engineering Journal, 2020, 15(2), 58-70.
- [4] W. Sangarunlert, Adsorption of methyl red dye by activated carbon from egg shell and ark shell by chemical activation method, Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal, 2015, 7(7) 97-110.
- [5] E. Misran, O. Bani, E.M. Situmeang and A.S. Purba, Banana stem based activated carbon as a low-cost adsorbent for methylene blue removal: Isotherm, kinetics, and reusability, Alexandria Engineering Journal, 2021. (Article in press)
- [6] K. Kiangpradith, N. Thongmak and P. Sridang, Adsorption of organic substance and dyestuff from batik textiles wastewater by rubber wood fly ash, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 1-14. (in Thai)



ความสามารถในการสตาร์ทของอะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลผสม ดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ คอมมอนเรล

อบ นิลผาย¹ ตักดีดา ธงชาย¹ มานิดา ทองรุ่ง¹ นาวี นันตะภาพ² รณชาติ มั่นศิลป์²
สถาพร เชื้อเพ็ง^{3*}

¹ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล,
คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

^{*} ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: schuepeng@eng.src.ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 29 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 31 สิงหาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 กันยายน 2564

บทคัดย่อ: การนำ อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล หรือ ABE ผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 (ABE20) มีศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงได้โดยมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษที่แตกต่างจากดีเซลเพียงเล็กน้อย ตลอดจนมีเสถียรภาพในการทำงานไม่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม การมีส่วนร่วมของแอลกอฮอล์ใน ABE20 ส่งผลต่อความสามารถในการจุดระเบิดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงส่งผลต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์เมื่อใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องทดสอบต่างกัน เครื่องยนต์ดีเซลที่มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล และตรวจสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงขณะทำการสตาร์ทและเดินเบาต่อเนื่อง 60 วินาที จากผลการทดสอบพบว่า ABE20 ใช้ระยะเวลาในการสตาร์ทที่ยาวนานกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบและมีการบริโภคเชื้อเพลิงที่มากกว่าดีเซล อย่างไรก็ตาม เมื่อลดอุณหภูมิห้องทดสอบลง 10 องศาเซลเซียส ABE20 ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์เล็กน้อยแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล; ABE20; ดีเซล; เครื่องยนต์ดีเซล; ความสามารถในการสตาร์ท

The Engine Start Ability of Acetone-Butanol-Ethanol Blended Diesel Fuel for a Common Rail Diesel Engine

Ob Nilaphai¹, Sakda Thongchai¹, Manida Tongroon¹, Nawee Nuntapap²,
Ronachart Munsin² and Sathaporn Chuepeng^{1*}

¹ Automotive Technology and Alternative Energy Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding author, E-mail: schuepeng@eng.src.ku.ac.th

Received: 27 July 2021; Revised: 29 August 2021; Accepted: 31 August 2021

Online Published: 30 September 2021

Abstract: Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) blended with diesel fuel in 20% by volume (ABE20) has been a promising alternative fuel for replacing diesel fuel. Consequently, it can be used in the unmodified diesel engine with slight effects on engine performance, combustion, and emissions, presenting stability during engine operation similar to diesel. However, ABE20 is composed of alcohol, presenting the low auto-ignition ability and high latent heat of vaporization compared to diesel fuel. These can affect the engine start ability. Therefore, this work aims to evaluate the engine start ability of ABE20 on a common rail diesel engine in different testing room temperatures and to investigate the fuel consumption during the period of engine start and continuously idling in 60 seconds. The experimental results show that ABE20 presented the engine start timing longer than diesel fuel for all testing conditions and its fuel consumption was higher than diesel fuel. However, the reduction of ambient temperature by 10°C insignificantly affected engine start ability but not for fuel consumption.

Keywords: Acetone-Butanol-Ethanol; ABE20; Diesel; Diesel Engines; Engine Start Ability



1. บทนำ

อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (Acetone-Butanol-Ethanol: ABE) เป็นสารผสมชั้นกลางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตบิวทานอลที่กำลังได้รับความสนใจให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับน้ำมันดีเซลในปัจจุบัน เนื่องจาก ABE มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับบิวทานอล [1, 2] จึงมีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ โดยผสมกับน้ำมันดีเซล จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เมื่อนำ ABE ผสมกับน้ำมันดีเซล (ABE-Diesel Blend) ในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร และนำมาทดสอบในห้องเผาไหม้จำลอง (Combustion Chamber) ที่สภาวะความดันสูงและอุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับในห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ามีคุณลักษณะของสเปรย์ทั้งในสถานะของเหลวและก๊าซไม่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล [3]

ในขณะที่ตัวแปรด้านการเผาไหม้ของ ABE ผสมดีเซลมีความสามารถในการส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้อัตราการปลดปล่อยควันดำ (Smoke) และอนุภาคฝุ่น (Particulate Matter) ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก ABE เป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนผสมอยู่ในโมเลกุลจึงช่วยส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [3] และ ABE มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ซึ่งมีค่าซีเทนัมเบอร์ที่ต่ำทำให้มีช่วงเวลาของความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่ยาวกว่าดีเซล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีช่วงระยะเวลาในการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ยาวนานกว่าก่อนการเผาไหม้ในช่วงการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ผสมก่อน (Premixed Combustion) [3, 4] อีกทั้งในสภาวะที่มีการฉีดเชื้อเพลิงแบบคงตัว (Steady-state Injection) ABE ผสมดีเซลยังมีความยาวของสเปรย์ในสถานะของเหลวที่สั้นกว่า (Liquid Length: LL) และมีความยาวของระยะยกของเปลวไฟ (Lift-off Flame: LOL) ที่สูงกว่าดีเซล ซึ่งช่วงระยะห่างระหว่าง LL และ LOL ที่ยาวกว่าดีเซลนี้เองทำให้มีการส่งเสริมการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีกว่า ก่อนที่ส่วนผสมเหล่านี้จะเคลื่อนตัวเข้าสู่โซนของการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction Zone of Combustion) ดังนั้น จึงทำให้การเผาไหม้ของ ABE ผสมดีเซลมีความสมบูรณ์มากกว่าและปลดปล่อยอนุภาคฝุ่นที่น้อยกว่า ซึ่งเห็นได้จากความสว่างของแสงธรรมชาติ (Natural Light Luminosity) ของ ABE ผสมดีเซลที่ต่ำกว่าดีเซลในงานวิจัยของ Wu และคณะ [4]

สำหรับการทดสอบใช้ ABE ผสมดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่า อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ ABE ผสมดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ABE20) มีความสิ้นเปลืองที่สูงกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบที่ภาระงานเครื่องยนต์ (Engine Load) ที่เท่ากัน เนื่องจากมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าดีเซล อย่างไรก็ตาม กลับพบว่าค่าความสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อนหรือค่าประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) ของ ABE20 สูงกว่าดีเซลเนื่องจาก ABE20 มีค่าความร้อนแฝงในการระเหยตัว (Latent Heat of Vaporization) ที่สูงกว่าดีเซลส่งเสริมให้เกิดผลจากความเย็น (Cooling Effect) ในห้องเผาไหม้ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการประจุอากาศ (Volumetric Efficiency) ขณะเครื่องยนต์ทำงาน [6] อีกทั้งการมีออกซิเจนในโมเลกุลของ ABE20 ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และประสิทธิภาพที่สูงกว่า [3, 4]



สำหรับคุณลักษณะการเผาไหม้ของ ABE20 ในเครื่องยนต์กลับพบว่ามีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สูงกว่าดีเซล ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่าดีเซลในช่วง Premixed Combustion และส่งเสริมให้เกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงกว่าดีเซล [5] อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ ABE20 ในเครื่องยนต์ดีเซลกลับพบว่าสามารถลดการปลดปล่อยควันดำลงได้มากกว่าดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะโหลดต่ำที่ลดได้มากถึง 25%-47% นอกจากนี้ยังพบว่า เสถียรภาพของเครื่องยนต์ (Engine Stability) เมื่อใช้ ABE20 ไม่มีความแตกต่างกันกับดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ [7] ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Coefficient of Variation: COV) ที่มีค่าไม่แตกต่างกับดีเซล (น้อยกว่า 1%) และมีค่าต่ำกว่าค่าความแปรผันสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5% [8]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าจะมีการศึกษาใช้ ABE ผสมดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลในด้านต่าง ๆ เช่น สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปลดปล่อยมลพิษ และเสถียรภาพในการใช้งานของเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ABE มีความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Auto-Ignition Ability) ที่ต่ำกว่าดีเซล อีกทั้งมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่สูง จึงส่งผลต่อความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเองของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสตาร์ทเครื่องยนต์ที่มีอุณหภูมิบรรยากาศต่ำ และไม่พบงานวิจัยที่ประเมินความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์สำหรับเชื้อเพลิงชนิดนี้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์

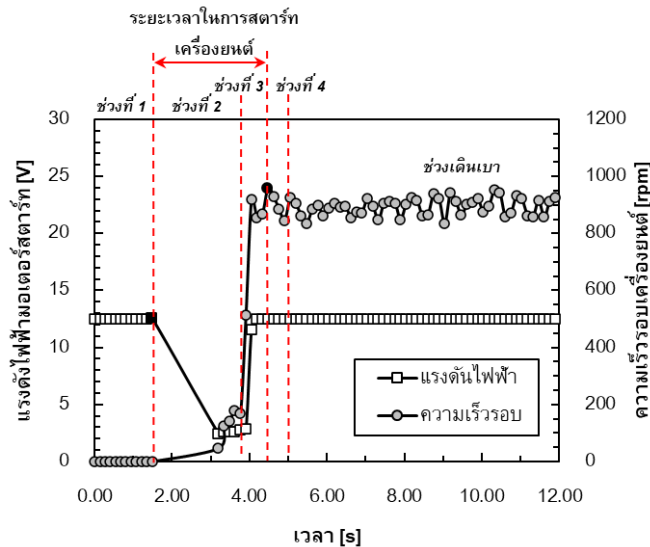
เพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์เมื่อใช้ ABE20 ผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ที่มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบัน และเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงที่มีผลต่อความสามารถในการสตาร์ทเพียงอย่างเดียว จึงมีการตัดระบบการทำงานของหัวเผาออกระหว่างการทดสอบ และทำการทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง 20 และ 30°C และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงอ้างอิงคือ น้ำมันดีเซลล้วน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 หลักในการวิเคราะห์และสภาวะการทดสอบ

หลักเกณฑ์ในการประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์พิจารณาจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการสตาร์ทเครื่องยนต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้ข้อมูลความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในการประเมินความสามารถในการสตาร์ท เพื่ออธิบายคุณลักษณะของเครื่องยนต์ในระหว่างการสตาร์ท [9-11] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพื่อใช้ในวิเคราะห์ความสามารถในการสตาร์ทของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด และใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทในการระบุตำแหน่งการเริ่มต้นการหมุนของเครื่องยนต์ ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

รูปที่ 1 แสดงข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในระหว่างการทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 30°C ซึ่งสามารถอธิบายคุณลักษณะการสตาร์ทของเครื่องยนต์ได้ดังนี้



รูปที่ 1 การอธิบายลำดับการสตาร์ทเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ช่วงที่ 1: ก่อนการสตาร์ท (Before Starting) ในช่วงเริ่มต้นเมื่อเปิดสวิตช์กุญแจ กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะถูกจ่ายผ่านมอเตอร์สตาร์ทด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าในแบตเตอรี่ 12.1 V และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็นศูนย์เนื่องจากยังไม่มีภาระของเครื่องยนต์

ช่วงที่ 2: การหมุนฟรีของเครื่องยนต์ (Cranking Period) [9] เมื่อกดสวิตช์สตาร์ทเครื่องยนต์ (Engine Start) กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะถูกจ่ายไปยังมอเตอร์สตาร์ทเพื่อออกแรงขับเครื่องยนต์ให้หมุนจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้ตกลงอย่างทันทีทันใด ดังรูปที่ 1 และในขณะเดียวกันความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นตามจากแรงขับของมอเตอร์สตาร์ทโดยมีความเร็วรอบราว 200 rpm

ช่วงที่ 3: การสตาร์ท (Starting Period) หรือบางครั้งเรียกช่วงเร่ง (Acceleration Period) [11] เมื่อ

เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปในช่วงที่ 2 เกิดการเผาไหม้ขึ้นภายในกระบอกสูบความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความเร็วมากกว่ามอเตอร์สตาร์ท ขณะนี้เองผู้ทดสอบจะปล่อยมือจากสวิตช์สตาร์ททำให้หยุดการจ่ายไฟฟ้าไปยังมอเตอร์สตาร์ท ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะกลับมาเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่อีกครั้ง จากนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุด (1,000 rpm)

ช่วงที่ 4: ช่วงหลังการสตาร์ท (After-starting Period) หลังจากความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นสูงสุดแล้ว จากนั้นรอบเครื่องยนต์จะตกลงและรักษาระดับของความเร็วให้อยู่ในระดับที่คงที่ต่อเนื่องกันไป จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในทุกวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์



จากพฤติกรรมการสตาร์ทเครื่องยนต์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถประเมินความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ได้จาก “ระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ (Engine Start Timing)” ซึ่งพิจารณาจากระยะเวลาจากจุดที่เครื่องยนต์เริ่มหมุน (Engine Start Moving) ซึ่งเป็นเวลาที่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทเริ่มตกลง (แสดงด้วยจุดสี่เหลี่ยม สีดำ) จนกระทั่งถึงเวลาที่เครื่องยนต์สตาร์ทติด (Engine Start) ซึ่งในที่นี้คือเวลา ณ ความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นสูงสุด (แสดงด้วยจุดวงกลมสีดำ)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [11-13] พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ดีเซล ได้แก่ อุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient Temperature), การออกแบบเครื่องยนต์ (Engine Design), เชื้อเพลิง (Fuel), การระบายความร้อน (Coolant), น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil), สภาวะแบตเตอรี่ (Battery Condition), มอเตอร์สตาร์ท (Starter Motor) และอุปกรณ์ช่วยการสตาร์ท (Starting Aided Device) ดังนั้น เพื่อให้สามารถประเมินผลกระทบของคุณสมบัติเชื้อเพลิงต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่างกันได้ งานวิจัยนี้จึงใช้เครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ที่มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล (Common Rail Injection System) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเครื่องยนต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายปัจจุบัน โดยเป็นเครื่องยนต์ยี่ห้อ Toyota รุ่น 2KD-FTV ปริมาตรกระบอกสูบ 2,494 cc อัตราส่วนการอัด 18.5:1 ให้กำลังสูงสุด 73 kW (102 HP) ที่รอบเครื่องยนต์ 3,600 rpm รายละเอียดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 1 และ

เพื่อขจัดผลกระทบของอุปกรณ์ช่วยสตาร์ทในระหว่างการทดสอบ จึงตัดการจ่ายไฟฟ้าไปยังหัวเผา (Glow Plug) เพื่อตัดการทำงาน

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะ	ข้อมูล
ยี่ห้อ/รุ่น	Toyota 2KD-FTV
แบบเครื่องยนต์	เครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ DOHC 16 วาล์ว ติดตั้งเทอร์โบชาร์จเจอร์
ระบบฉีดเชื้อเพลิง	แบบคอมมอนเรล
ขนาดกระบอกสูบ × ช่วงชัก	92.0 mm × 93.8 mm
ความจุกระบอกสูบ	2,494 cc
แรงบิดสูงสุด	200 Nm ที่ 1,400-3,200 rpm
กำลังสูงสุด	73 kW ที่ 3,600 rpm
อัตราส่วนการอัด	18.5:1

เพื่อความคุมให้สภาวะของการสตาร์ทอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันในทุกการทดสอบ แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 V กระแสไฟฟ้า 100 A ยี่ห้อ FB รุ่น PREMIUM M-2000R-MF (130D31R) ซึ่งกำหนดแรงดันไฟฟ้าก่อนการทดสอบทุกครั้ง 12.1 ± 0.1 V และใช้มอเตอร์สตาร์ทยี่ห้อ Denso รุ่น TA428000-2321 โดยมีการเชื่อมต่อไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ผ่านสวิตช์กุญแจเพื่อเปิดการทำงานของมอเตอร์สตาร์ทของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2

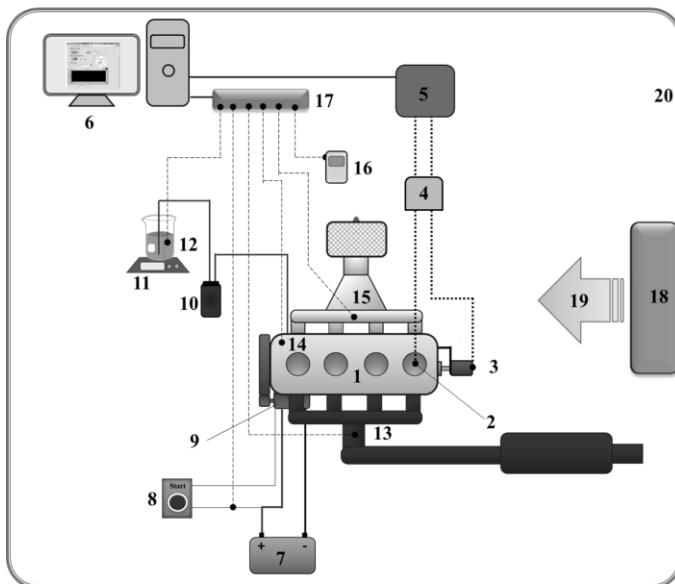
สำหรับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในขณะทำการทดสอบสามารถวัดและคำนวณได้จากเซ็นเซอร์วัดมุมเพลลาข้อเหวี่ยงชนิด Incremental Shaft Encoder



ยี่ห้อ Baumer Electric รุ่น BDK 16.05A360-5-4 ที่มีความละเอียดในการวัด 360 ppr โดยรับข้อมูลผ่านอุปกรณ์เก็บข้อมูลของ National Instruments รุ่น USB-6251 ผ่านช่องรับสัญญาณเคาท์เตอร์ที่รองรับความเร็วสูงสุด 80 MHz (32 bit) ส่วนแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สแตร์ทรับข้อมูลผ่านช่องรับสัญญาณแอนะล็อกที่อัตราการสุ่มเก็บตัวอย่าง (Sampling Rate) 1.25 MS/s (16 bit) และบันทึกข้อมูลทั้งสองโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งได้พัฒนาขึ้นเองภายในหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมภายในห้องทดสอบและอุณหภูมิต่างๆ ของเครื่องยนต์ถูกวัดด้วย Thermocouple ชนิด K และเก็บข้อมูลทั้งหมดด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูลของ National Instruments รุ่น

USB-6218 ด้วยช่องรับสัญญาณแอนะล็อกที่มีอัตราการสุ่มเก็บตัวอย่างที่ 250 kS/s (16 bit) โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เช่นเดียวกัน โดยมีตำแหน่งการวัดของอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ เพื่อวัดอุณหภูมิห้องทดสอบ Thermocouple ติดตั้งภายในห้องทดสอบซึ่งอยู่ห่างจากเครื่องยนต์ประมาณ 50 cm ส่วนอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิงจุดวัดถูกติดตั้งไว้ภายในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำมันทดสอบโดยไม่มีส่วนใดสัมผัสกับบีกเกอร์เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อหน้าหนักในการวัดอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สำหรับอุณหภูมิภายในท่อร่วมไอดีและไอเสียติดตั้งไว้ที่บริเวณท่อร่วมไอดีและไอเสียดังรูปที่ 2 ส่วนอุณหภูมิน้ำมันเครื่องได้ติดตั้ง Thermocouple ไว้บริเวณ อ่างน้ำมันเครื่องใต้เครื่องยนต์ และสำหรับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นถูกติดตั้งไว้บริเวณท่อทางออกเครื่องยนต์ก่อนเข้าของหม้อน้ำ



1. เครื่องยนต์ดีเซล
2. เซ็นเซอร์วัดความดันในกระบอกสูบ
3. เซ็นเซอร์วัดองศาของเพลาข้อเหวี่ยง
4. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ
5. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ
6. คอมพิวเตอร์และโปรแกรมจัดการข้อมูล
7. แบตเตอรี่
8. ปุ่มสตาร์ทเครื่องยนต์
9. มอเตอร์สแตร์ท
10. บิมน้ำมันเชื้อเพลิง
11. ตาชั่งดิจิทัล
12. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง
13. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิไอเสีย
14. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำมันเครื่อง
15. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิไอดี
16. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิห้องทดสอบ
17. อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิต่างๆ
18. เครื่องทำความเย็น
19. อากาศ
20. ห้องควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แผนผังการทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบ



2.3 การเตรียมเชื้อเพลิงทดสอบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้สารบริสุทธิ์ ได้แก่ อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% 99.8% และ 99.5% ตามลำดับ ในการเตรียมส่วนผสมของ ABE เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรผันของคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริงที่อาจส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยผสมกันในอัตราส่วนระหว่างอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอลเท่ากับ 3:6:1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นสัดส่วนทั่วไปที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตบิวทานอล [1, 2] โดยสารผสม ABE จะนำไปผสมกับดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร ซึ่งถูกเรียกว่า “ABE20” และผลการทดสอบทั้งหมดจะนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลล้วน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงอ้างอิง (Reference Fuel)

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ โดยค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงวัดด้วยเครื่อง Anton Paar DMA 4500 ที่ 15°C โดยที่มีความละเอียดในการวัด 0.05 kg/m³ ส่วนค่าความหนืดวัดได้

จาก Single-bath Kinematic Viscometer of CANNON Mini AV ที่ 40°C และสำหรับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงหาได้จากเครื่องบอมม์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-350 ส่วนข้อมูลค่าอื่นอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7]

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าความหนาแน่นของ ABE20 แตกต่างจากดีเซลน้อยกว่า 1% แต่กลับมีค่าความหนืดต่ำกว่าดีเซลมากถึง 34% และพบว่าค่าความร้อนน้อยกว่าดีเซลประมาณ 8% แม้ว่าค่าซีเทนัมเบอร์ ABE20 จะไม่ปรากฏข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามสามารถคาดการณ์ได้ว่าควรมีค่าต่ำกว่าดีเซล เนื่องจากแอลกอฮอล์ที่ผสมอยู่ใน ABE20 มีค่าซีเทนที่ต่ำกว่าดีเซลอย่างมาก เช่น บิวทานอล 25 และเอทานอล 8 เป็นต้น นอกจากนี้ ABE20 ยังมีค่าความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอสูงกว่าดีเซล อันจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการระเหย (Vaporization Process) ของสเปรย์รวมถึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำอีกด้วย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติ	Diesel	Acetone	Butanol	Ethanol	ABE20
สูตรโมเลกุล	C ₁₂ -C ₂₅	C ₃ H ₆ O	C ₄ H ₁₀ O	C ₂ H ₆ O	C _{8.5} H _{18.6} O _{0.4}
ความหนาแน่น 15°C (kg/m ³)	826	790	810	790	819
ความหนืด 40°C (mm ² /s)	3.5	0.35	2.63	1.1	2.3
ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg)	45.6	29.6	33.1	26.8	41.95
ซีเทนัมเบอร์ (-) [4-5]	51	-	25	8	-
ความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอที่ 298 K (kJ/kg) [4]	270	518	582	904	332.8



2.4 ระเบียบวิธีและสภาวะในการทดสอบ

เนื่องจากอุณหภูมิบรรยากาศรอบเครื่องยนต์มีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ [10] และจากข้อมูลของศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยาได้รายงานไว้ว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของประเทศไทยในคาบ 30 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2524-2553 มีค่าเท่ากับ 27.2°C ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยในปี 2562 และ 2563 อยู่ที่ 28.1 และ 28.0°C ตามลำดับ [12] ดังนั้น เพื่อให้การทดสอบครอบคลุมอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศ ไทยจึงกำหนดอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 20 และ 30°C โดยใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 20,000 BTU จำนวน 2 เครื่อง เพื่อควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่มีขนาด 125 m² และสำหรับค่าความชื้นในห้องทดสอบแม้ว่าจะไม่มีการควบคุม แต่ได้มีการบันทึกค่าไว้ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกันหรืออยู่ระหว่าง 42%-45% ในทุกการทดสอบ ตารางที่ 3 แสดงภาพรวมสภาวะการทดสอบต่างๆ โดยที่มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมเครื่องยนต์ เชื้อเพลิงทดสอบ อุปกรณ์ในการวัด และห้องทดสอบให้พร้อม
2. วัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ทั้งในห้องทดสอบ และเครื่องยนต์ต้องมีค่าเท่าหรือต่างกันไม่เกิน 0.5°C
3. เริ่มบันทึกข้อมูลการทดสอบต่างๆ ในโปรแกรม LabVIEW และค่าน้ำหนักเริ่มต้นของน้ำมันเชื้อเพลิง
4. สตาร์ทเครื่องยนต์ จนเครื่องยนต์สตาร์ทติดและเดินเบา (Idle) เป็นระยะเวลา 60 s จึงหยุดบันทึกผลการทดสอบทั้งหมด
5. ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละสภาวะการทดสอบ โดยเริ่มขั้นตอนการทดสอบจากข้อที่ 1-4
6. เปลี่ยนสภาวะการทดสอบ และน้ำมันเชื้อเพลิงจนครบ

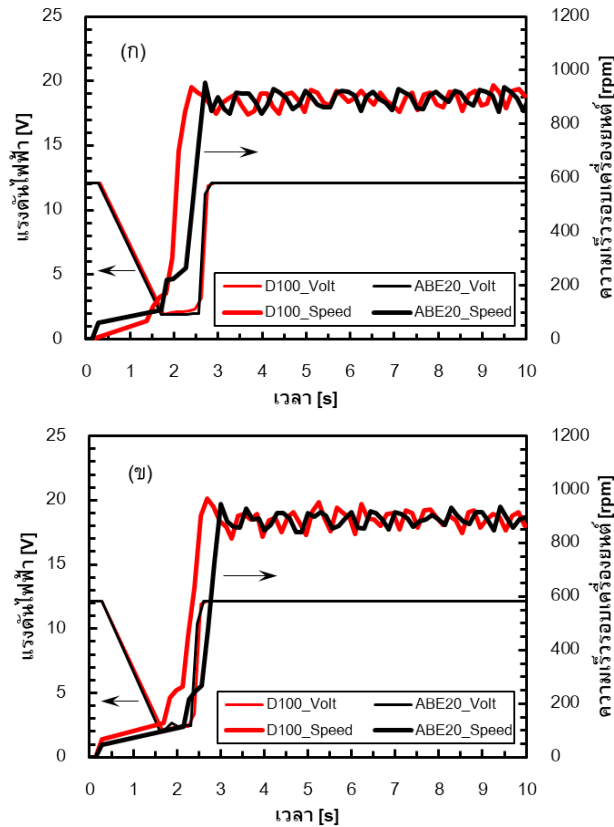
ตารางที่ 3 สรุปสภาวะการทดสอบ

ตัวแปร	ข้อมูลทดสอบ
เชื้อเพลิง	Diesel และ ABE20
อุณหภูมิห้องทดสอบ	20 และ 30°C
ตัวแปรที่วัด	- แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ท - ความเร็วรอบเครื่องยนต์ - อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

3. ผลการทดสอบ

3.1 การสตาร์ทเครื่องยนต์

รูปที่ 3 แสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ขณะทำการสตาร์ทสังเกตได้ว่าในช่วงที่ 1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของทุกสภาวะการทดสอบเริ่มต้นตกลงจาก 12.1 V ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งการเริ่มต้นการสตาร์ทเครื่องยนต์ (ดังที่ได้นิยามไว้ในหัวข้อ 2.1) ในขณะเดียวกันความเร็วรอบของเครื่องยนต์เริ่มเพิ่มขึ้น และเข้าสู่ช่วงที่ 2 (เครื่องยนต์หมุนฟรี) ความเร็วรอบเครื่องยนต์ในทุกสภาวะการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 200 rpm จากการหมุนฟรีหลายรอบในช่วงนี้ เชื้อเพลิงได้ถูกฉีดเข้าไปภายในห้องเผาไหม้จนมีปริมาณมากเพียงพอต่อการเริ่มต้นการจุดระเบิด เมื่ออุณหภูมิและความดันในกระบอกเพิ่มถึงจุดที่เชื้อเพลิงสามารถจุดระเบิดด้วยตนเองได้ การเผาไหม้ในวัฏจักรแรกจึงเริ่มเกิดขึ้น และจากนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ช่วงที่ 3 (การสตาร์ท)



รูปที่ 3 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ขณะทำการสตาร์ทของน้ำมันดีเซล และ ABE20 ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ (ก) 20°C และ (ข) 30°C

ในช่วงนี้พบว่าดีเซลมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่เกิดขึ้นก่อน ABE20 ในทุกสภาวะการทดสอบ และสังเกตได้ว่าความเร็วรอบสูงสุดของดีเซลเกิดขึ้นก่อน ABE20 ในทุกสภาวะการทดสอบเช่นกัน จากนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะตกลงและเข้าสู่การเดินเบา ซึ่งความเร็วรอบเฉลี่ยของแต่ละการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ได้แก่ 895 และ 892 rpm สำหรับน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิห้อง 20°C และ 30°C ตามลำดับ และ 896 และ 893 rpm สำหรับ ABE20 ที่อุณหภูมิห้อง 20°C และ 30°C ตามลำดับ

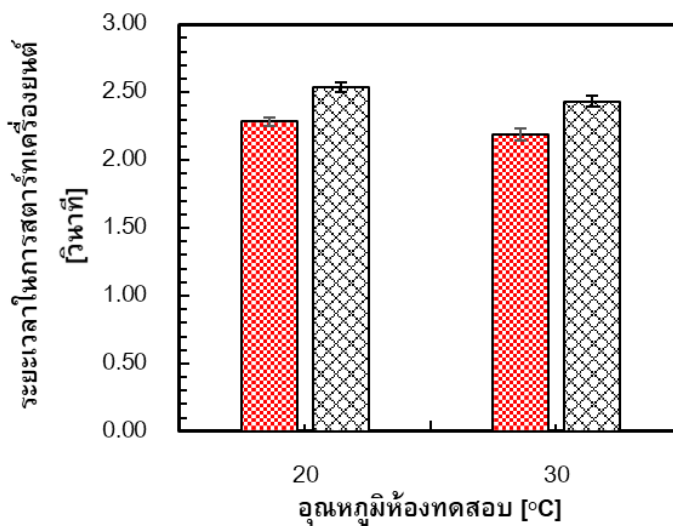
เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 3 มาวิเคราะห์เพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์โดยพิจารณาจากระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4 พบว่า การลดลงของอุณหภูมิห้องทดสอบจาก 30°C เป็น 20°C ส่งผลทำให้ใช้เวลาในการสตาร์ทยาวนานขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือนานขึ้นประมาณ 0.096 และ 0.104 s (4.39% และ 4.28%) สำหรับดีเซลและ ABE20 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramadhas และคณะ [13] ที่พบว่า เมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบต่ำลง 10°C ทำให้ใช้เวลาในการสตาร์ท



ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีช่วงเวลาในการหมุนฟรีของเครื่องยนต์ที่ยาวนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของเครื่องยนต์ต่ำจะส่งผลทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น จึงเพิ่มความเสียดทานในชิ้นส่วนต่างๆที่กำลังเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการสตาร์ท [14] อีกทั้งการลดลงของอุณหภูมิห้องทดสอบทำให้อุณหภูมิกายในกระบอกสูบลดลงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการฉีดเชื้อเพลิง (Fuel Injection) การแตกตัวเป็นฝอยละออง (Atomization) ระเหยตัวของเชื้อเพลิง (Vaporization) และการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Air-fuel Mixture) และส่งผลต่อเนื่องไปจนถึงความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Auto-ignition) ของเชื้อเพลิงในช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ [15]

สำหรับผลกระทบของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิห้องทดสอบเดียวกัน พบว่า ABE20 ใช้เวลาในการสตาร์ท

ยาวนานกว่าดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ หรือนานกว่า 0.253 และ 0.246 s สำหรับอุณหภูมิ 20°C และ 30°C ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุจากการมีค่าซีเทนัมเบอร์ (Cetane Number) ของแอลกอฮอล์ที่ผสมอยู่ใน ABE20 ที่ต่ำกว่าดีเซลดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ความสามารถในการจุดระเบิดของ ABE20 ที่ต่ำกว่าดีเซล ประกอบกับการมีค่าความร้อนแฝงในการระเหยตัวของแอลกอฮอล์ที่ผสมอยู่ใน ABE20 ที่สูงกว่าดีเซล ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิด Cooling Effect ของอุณหภูมิกายในกระบอกสูบ ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของอัตราการระเหยตัวของเชื้อเพลิงและการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ (Vaporization and Mixing Process) [6] ตลอดจนลดอัตราการทำปฏิกิริยาเคมีเผาไหม้ (Chemical Reaction Rate of Combustion) ในช่วงเริ่มต้นการจุดระเบิด (Auto-ignition Process) [7]

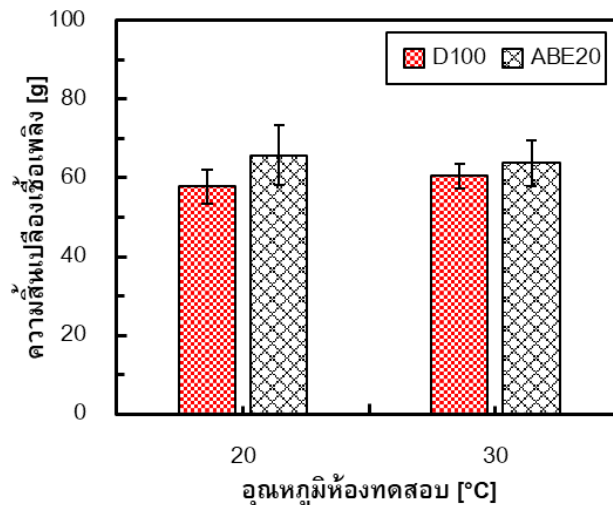


รูปที่ 4 ระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซล และ ABE20 ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20°C และ 30°C

รูปที่ 5 แสดงผลความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างการทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์และเดินเบาต่อเนื่องเป็นเวลา 60 s พบว่าอุณหภูมิห้องไม่มีผลต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน เนื่องจากความแตกต่างของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงทั้ง 2 สภาวะ มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 5% อีกทั้งค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ซึ่งแสดงด้วย Error Bar ของทั้งสองสภาวะอยู่ในช่วงเดียวกัน

ทั้งนี้เนื่องจากความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงส่วนใหญ่มีผลจากการเดินเบาของเครื่องยนต์เป็นหลัก ซึ่งสังเกตได้จากช่วงสตาร์ทการใช้เวลาเพียงแค่ 2.0-2.5 s เท่านั้น ในขณะที่ช่วงการเดินเบาใช้เวลามากถึง 60 s และเป็นที่ยอมรับกันว่าอุณหภูมิบรรยากาศรอบเครื่องยนต์นั้นเป็นตัวแปรสำคัญในการสตาร์ทเครื่องยนต์ดังที่ได้อภิปรายไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม

เมื่อเครื่องยนต์สตาร์ทติดและเริ่มเดินเบาแล้วอุณหภูมิบรรยากาศรอบเครื่องยนต์จะลดความสำคัญต่อสเปรย์และการเผาไหม้ลง เนื่องจากอุณหภูมิต่างๆ ภายในเครื่องยนต์ เช่น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิน้ำมันเครื่องจะลดลงจนอุณหภูมิห้องเผาไหม้จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะสนับสนุนกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิบรรยากาศของห้องทดสอบจึงอาจส่งผลกระทบต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของการทดสอบนี้ ในขณะที่ชนิดของเชื้อเพลิงจะเป็น ตัวแปรหลักที่ผลต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาผลกระทบของเชื้อเพลิงพบว่า ABE20 มีการบริโภคเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่มากกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบราว 16.6% และ 5.5% สำหรับอุณหภูมิห้องทดสอบ 20 และ 30°C ตามลำดับ ทั้งนี้มีผลสอดคล้องกับค่าความร้อนของ ABE20 ที่ค่าน้อยกว่าดีเซลอยู่ราว 8% [3]



รูปที่ 5 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างการทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซลและ ABE20 ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20°C และ 30°C



4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์เมื่อใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20°C และ 30°C สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ABE20 ใช้ระยะเวลาในการสตาร์ทยาวนานกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบ เนื่องจากแอลกอฮอล์ที่ผสมใน ABE มีค่าซีเทนต่ำและค่าความร้อนแฝงของการระเหยตัวสูง ซึ่งส่งผลต่อการลดความสามารถในการระเหยตัวของเชื้อเพลิงและการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ ตลอดจนลดการทำปฏิกิริยาเคมีเผาไหม้ในช่วงเริ่มต้นการจุดระเบิด

2. การลดอุณหภูมิห้องทดสอบลงจาก 30°C เป็น 20°C มีผลกระทบเล็กน้อยต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์ โดยต่างกันไม่เกิน 5%

3. แม้ว่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์และเดินเบาต่อเนื่องเป็นเวลา 60 s ของ ABE20 จะมากกว่าดีเซลเนื่องจากมีค่าความร้อนที่น้อยกว่าดีเซล แต่กลับพบว่าไม่มีผลกระทบของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบต่างกัน 10°C

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าการใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงจะให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจทั้งในด้านสมรรถนะ การเผาไหม้ มลพิษ และเสถียรภาพการทำงาน อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงมีผลต่อความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้เวลาในการสตาร์ทที่ยาวนานกว่าน้ำมันดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้อุปกรณ์ช่วย

ในการสตาร์ท เช่น การใช้หัวเผา และการออกแบบระบบสตาร์ทเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงนี้เป็นต้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเภทโครงการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มก. ประจำปี 2562 รหัสโครงการวิจัย ร-ม 29.62 และ ทุนสนับสนุนงานวิจัยพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา รหัสโครงการวิจัย KUSRC 5010/64

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Wu, K. Nithyanandan, N. Zhou, T.H. Lee, C.F. Lee, and C. Zhang, Impacts of acetone on the spray combustion of acetone-butanol-ethanol (ABE)-diesel blends under low ambient temperature, *Fuel*, 2015, 142, 109–116.
- [2] H. Wu, K. Nithyanandan, T.H. Lee, C.F. Lee, and C. Zhang, Spray and combustion characteristics of neat acetone-butanol-ethanol, n-butanol, and diesel in a constant volume chamber, *Energy Fuels*, 2014, 28, 10, 6380–6391.
- [3] O. Nilaphai, C. Hespel, S. Chanchaona, and C. Mounaïm-Rousselle, Spray and combustion characterizations of ABE / dodecane blend in comparison to alcohol / dodecane blends at high-pressure and high-temperature conditions, *Fuel*, 2018, 225, 542–553.



- [4] H. Wu, K. Nithyanandan, J. Zhang, Y. Lin, T.H. Lee, C.F. Lee, and C. Zhang, Impacts of acetone – butanol – ethanol (ABE) ratio on spray and combustion characteristics of ABE – diesel blends, *Applied Energy*, 2015, 149, 367–378.
- [5] K. Komaneer, S. Chuepeng, and O. Nilaphai, An experimental investigation of ABE-diesel blend on performance, combustion, and emissions in a compression ignition engine, *The 11th International Conference on Mechanical Engineering (ICoME 2020)*, Proceeding, 2020, Art. No. AEC0002.
- [6] A.K. Agarwal, A. Dhar, J.G. Gupta, W.I. Kim, K. Choi, C.S. Lee and S. Park, Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics, *Energy Conversion and Management*, 2015, 91, 302–314.
- [7] O. Nilaphai, The effect of acetone-butanol-ethanol blended diesel fuel on the engine stability of a single cylinder diesel engine, *The Journal of Industrial Technology*, 2020, 16(2), 89–103. (in Thai)
- [8] A. Jamrozik, W. Tutak, R. Gnatowska, and Ł. Nowak, Comparative analysis of the combustion stability of diesel-methanol and diesel-ethanol in a dual fuel engine, *Energies*, 2019, 12, 971.
- [9] G. Hernandez, Combustion studies for high speed direct injection diesel engines under low temperature cold start conditions, Ph.D. Thesis, Departamento de Maquinas y Motores Termicos, Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 2012.
- [10] M. Palanisamy, Characteristics of cold start of a diesel engine using Jp8 and ULSD fuels, Master Thesis, The Graduate School of Wayne State University, Wayne State University, USA, 2013.
- [11] A. Celik, M. Yilmaz, and O.F. Yildiz, Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes, *Energy Reports*, 2020, 6, 17–27.
- [12] R.B. Gupta, Cold starting of IC engines, *Defence Science Journal*, 1988, 38(1), 77–85.
- [13] A.S. Ramadhas and H. Xu, Intake air heating strategy to reduce cold-start emissions from diesel engines, *Biofuels*, 2014, 9(3), 405–414.



- [14] <http://climate.tmd.go.th>. (Accessed on 23 July 2021)
- [15] A.S. Ramadhas, H. Xu, D. Liu, and J. Tian, Reducing cold start emissions from automotive diesel engine at cold ambient temperatures, *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, 16(12), 3330–3337.
- [16] G.F. Xiao, X Q. Qiao, Z. Huang, and Z.P. Chen, Improvement of startability of direct-injection diesel engines by oxygen-enriched intake air, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2007, 221(11), 1453–1465.

การพัฒนาหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลงฐานสีย้อมที่ตรวจสอบได้ด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กานต์พิชชา สุวรรณวัฒนเมธี^{1,2} พิชิตพล พรหมท้าว¹ ธราดล อาษา¹ และ สุรัชชัย ชันแก้ว^{1,2*}

¹ สาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ศูนย์นวัตกรรมออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนซ์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surachai@mutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 27 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 3 กันยายน 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 ตุลาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลงที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยหมึกพิมพ์ชนิดนี้ ประกอบด้วยเกลือโซเดียมเมทา-ครีซอลเพอเฟิลเป็นสารให้สีไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลสเป็นสารยึด นำไประบุเป็นตัวพา กลีเซอรอล และโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง โดยศึกษาวิธีการเตรียมที่เหมาะสมและความเข้มข้นของสารให้สีที่ต่างกัน 3 ระดับ คือ 6, 10, และ 20 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึด ผลพบว่า หมึกพิมพ์แสดงเป็นสีน้ำเงินม่วงโดยมีค่าการดูดกลืนแสงสีสูงสุดที่ 588 นาโนเมตร และจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปเป็นสีเหลืองอย่างต่อเนื่องจนสมบูรณ์ที่ค่าการดูดกลืนแสง 434 นาโนเมตร เมื่อได้รับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 100 โดยปริมาตร (ที่ความดัน 1 บาร์) อย่างต่อเนื่องไม่ต่ำกว่า 60 วินาที (ในสภาวะปิด) โดยหมึกพิมพ์ที่มีส่วนผสมของเกลือโซเดียมเมทา-ครีซอลเพอเฟิล/กลีเซอรอล/ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส ที่ 10/300/100 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึดสามารถเปลี่ยนสีด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ภายในเวลา 30 วินาที ทั้งนี้ เมื่อปล่อยหมึกพิมพ์ไว้ในสภาวะห้องทดลอง (ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนร้อยละ 20.9 โดยปริมาตร และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร) หมึกพิมพ์จะเปลี่ยนแปลงสีกลับจากสีเหลืองไปเป็นสีน้ำเงินม่วงภายในเวลาไม่เกิน 20 วินาที ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นหมึกพิมพ์สำหรับการตรวจสอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ นอกจากนี้ ผลคุณสมบัติบางประการ ได้แก่ ค่าสี ค่าความหนืด และสภาพผิวหน้าชั้นฟิล์มเมื่อแห้งของหมึกพิมพ์ รวมถึงแนวทางการประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์ชนิดนี้ เพื่อการประยุกต์ใช้ในอนาคตยังได้รายงานไว้ในบทความเรื่องนี้ด้วย

คำสำคัญ: ตัวชี้วัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์; สีย้อมพีเอช; เมทา-ครีซอลเพอเฟิล; หมึกพิมพ์ตัวชี้วัด; หมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง

The Development of Dye-based, Anti-counterfeit Printing Ink Detected by CO₂

Kanpicha Suwannawanamatee^{1,2}, Pichitpol Phromtaw¹, Taradol Archa¹ and Surachai Khankaew^{1,2*}

¹ Program of Digital Printing and Packaging Technology, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

² Innovation Design and Convergence Media Center, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

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

Received: 25 July 2021; Revised: 27 August 2021; Accepted: 3 September 2021

Online Published: 13 October 2021

Abstract: The objective of this research was to develop the anti-counterfeit printing Ink that could be detected by CO₂. This ink was consisted of meta cresol purple sodium salt (MCP) as a dye, hydroxyethyl cellulose (HEC) as a blinder, deionized water (DI-water) as a solvent, and glycerol (G) and sodium hydrogen carbonate (NaHCO₃) as additives. The concentration of MCP was studied at 3 different levels which were 6, 10, and 20 parts per hundred resin (phr). The results showed that the ink revealed the original purple-blue color at the highest maximum absorbance (Abs_{max}) of 588 nm. The ink was then gradually changed to yellow color with the Abs_{max} of 434 nm when it was exposed to 100% v/v CO₂ (1 bar) continuously for at least 60 seconds (in the closed conditions). The ink color with the MCP/G/HEC ratio of 10/300/100 phr could be changed by CO₂ within 30 seconds. In addition, when the ink was left in the laboratory conditions (O₂ 20.9% v/v and CO₂ 0.03% v/v), the yellow ink was continuously turned back to its original color, purple-blue, within 20 seconds. The ink could also be applied for CO₂ detection. Moreover, some of the properties which were colors, viscosity, and surface morphology of the ink film thickness, as well as the future possible applications of this ink type were reported in the research.

Keywords: carbon dioxide indicator; pH dye; meta-cresol purple; indicator ink; security ink



1. บทนำ

ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นับเป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่ใช้ประเมินการพัฒนาเศรษฐกิจ และความก้าวหน้าของประเทศ เนื่องจากเป็นการแสดงถึงการสร้างองค์ความรู้และนวัตกรรมใหม่ อันส่งผลต่อการยกระดับคุณภาพชีวิต เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม และนำไปสู่การดำรงชีวิตและความ สะดวกสบายที่ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม หากความรู้และเทคโนโลยีเหล่านั้นถูกนำมาใช้ในทางที่ผิดก็อาจส่งผลให้เกิดโทษ หรือผลกระทบต่อบริษัทต่าง ๆ ที่กล่าวมาได้เช่นเดียวกัน [1]

การปลอมแปลงสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ นับเป็นหนึ่งในตัวอย่างการใช้องค์ความรู้ทางนวัตกรรมและเทคโนโลยีในทางที่ผิด เนื่องจากเป็นปัญหาทางเทคโนโลยีที่นอกจากจะก่อให้เกิดปัญหาทางจริยธรรม และทางกฎหมายแล้ว ยังเป็นปัญหาทางด้านสิทธิมนุษยชน เศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศ รวมถึงการคิดสร้างสรรค์ผลงานใหม่ ๆ [2] ผลิตภัณฑ์ที่ถูกเลียนแบบ หรือถูกปลอมแปลง (Counterfeited Product) โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง (High-value Product, HVP) [3] และผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตและความเป็นอยู่ของทั้ง มนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม อาทิ อาหาร เครื่องสำอาง ยารักษาโรค รวมถึง ปุ๋ย และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วย [2, 3]

จากรายงานฉบับสมบูรณ์การสัมมนาเรื่องการเพิ่มมูลค่าสิ่งพิมพ์กับระบบเทคโนโลยีต่อต้านการปลอมแปลง [4] รายงานว่าตลาดโลกมีการเติบโตของการผลิตสินค้าที่ป้องกันการปลอมแปลงได้ หรือสินค้ากันการปลอมแปลง (Anti-counterfeited Product) อย่าง

ต่อเนื่อง โดยวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ผลิตภัณฑ์ สินค้าที่เป็นของแท้ นั้น สามารถป้องกันการปลอมแปลงหรือละเมิดลิขสิทธิ์ได้ในระดับหนึ่ง หนึ่ง เพื่อสร้างภาพลักษณ์และความน่าเชื่อถือให้ผู้บริโภคสินค้า เนื่องจากผลกระทบด้านการปลอมแปลงในผลิตภัณฑ์ สินค้าทั้งอุปโภคและบริโภค นั้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรุนแรงยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างในรายงานของ Wall Street Journal [5] ในช่วงวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของโรคไวรัสโคโรนา (Covid-19) ที่เจ้าหน้าที่รัฐของประเทศโปแลนด์และเม็กซิโกตรวจพบการใช้วัคซีนปลอมในนามไฟเซอร์ (Pfizer) กับผู้เข้ารับวัคซีนกว่า 80 คน โดยนับเป็นข่าวร้ายแรงระดับโลกในขณะนั้น

ที่ผ่านมา มีผู้ผลิตผลิตภัณฑ์หลายประเภทให้ความสนใจและเริ่มประยุกต์ใช้เทคโนโลยีกันการปลอมแปลงรูปแบบต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาและพยายามรักษาไว้ซึ่งสร้างความเชื่อมั่นและความภักดีในผลิตภัณฑ์ สินค้าของตน (Brand Royalty) เช่น การเลือกใช้วัสดุพิเศษโดยสอดแทรกหรือซ่อนเร้นในผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ โดยการใช้วัสดุต่าง ๆ หรือเทคนิคพิเศษทางการพิมพ์ อาทิ การพิมพ์ผสมผสานหลายระบบ พิมพ์ (Combination Printing) การพิมพ์รหัสลับ (Secret Code) อักษรหรือตัวเลขขนาดไมโครเมตร (Micro Line or Micro Text) และการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์สีพิเศษ หรือหมึกพิมพ์ชนิดพิเศษที่เปลี่ยนแปลงเฉดสีหรือสีสັນได้ เป็นต้น [3, 6]

Mills and Yusufu [7] แห่งมหาวิทยาลัยควีน เบลฟาสต์ (Queen's University Belfast, QUB) ได้พัฒนาฟิล์มพลาสติกที่ใช้สีย้อมไทมอลบลู (Thymol Blue, TB) เป็นสารให้สี และใช้เตทตระบิวทิว



แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetrabutyl Ammonium Hydroxide, TBAH) เป็นสารบัฟเฟอร์ (Buffer) สำหรับตรวจสอบการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในน้ำเกลือ ซึ่งพบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงสีจากสีฟ้าไปเป็นสีเหลืองเมื่อมีความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร [7] ซึ่งนับเป็นการริเริ่มด้านการพัฒนาวัสดุกรรมวัสดุตรวจวัดแก๊ส CO_2 (Gas Indicator Material) เพื่อการใช้งานอย่างเป็นรูปธรรม

งานวิจัยเรื่องนี้จึงมุ่งพัฒนาหมึกพิมพ์ที่สามารถเปลี่ยนสีได้จากแก๊ส CO_2 โดยอาศัยหลักการพื้นฐานจากสีย้อมพีเอช (pH Dye) ซึ่งเลือกใช้เกลือโซเดียมเมทา-ครีซอลเพอเฟิล (Meta Cresol Purple Sodium Salt, MCP) ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงสีที่แคบและมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเป็นสารให้สี ร่วมกับสารบัฟเฟอร์ โดยศึกษากลไก และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสีด้วยแก๊ส CO_2 ทั้งนี้ เพื่อมุ่งหวังการประยุกต์ใช้ในลักษณะของหมึกพิมพ์ที่ปรากฏภายนอกบรรจุภัณฑ์ และสามารถตรวจสอบได้ด้วยแก๊ส CO_2 ความเข้มข้นต่ำจากการหายใจได้ รวมถึงเพื่อมุ่งหวังการพัฒนาใช้งานเชิงพาณิชย์ผ่านระบบการพิมพ์ที่เหมาะสมและสามารถประยุกต์ในลักษณะของการพิมพ์กันการปลอมแปลงในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง

Functions	Chemicals	Volume (g)	Ratio (phr)
Dye	MCP	0.1, 0.05, 0.025	20,10, 5
Plasticizer	G	1.5	300
Binder	5% wt. HEC	10	100
Buffer	0.7 M NaHCO_3	1	-
Solvent	DI-water	2.5	-

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง

เตรียมโดยชั่งสีย้อม เกลือโซเดียมเมทา-ครีซอลเพอเฟิล (Meta Cresol Purple Sodium Salt, MCP, $\text{C}_{21}\text{H}_{17}\text{NaO}_5\text{S}$, CAS No. 62625-31-4, Sigma Aldrich) ผสมกับสารละลาย 0.7 M ของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium Hydrogen Carbonate, NaHCO_3 , CAS No. 144-55-8, Sigma-Aldrich) ตามด้วยกลีเซอรอล (Glycerol, G, $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$, Sigma Aldrich) และน้ำไร้ประจุ (Deionized Water, DI-water) ซึ่งใช้เป็นสารให้สี สารบัฟเฟอร์ สารเสริมสภาพพลาสติก และตัวทำละลาย ตามลำดับ จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer, Yellow Line) อย่างน้อย 10 นาที หรือจนกว่าของผสมจะเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อครบเวลาเติมสารละลายไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส (Hydroxyethyl Cellulose, HEC, CAS No. 9004-62-0, Sigma-Aldrich) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และกวนผสมต่อเนื่องอีกอย่างน้อย 15 นาที จะได้หมึกพิมพ์กันการปลอมแปลงฐานสีย้อมพีเอช (Dye-based, Anti-counterfeit Printing Ink, ACPI) โดยในการเตรียมได้เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างสารให้สีและส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาดังตารางที่ 1 ต่อไปนี้



2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์กับการปลอมแปลง

หยดหมึกพิมพ์ ACPI ลงบนแผ่นกระดาษปิดสไลด์ขนาด 2.2 x 2.2 เซนติเมตร ประมาณ 2-3 หยด แล้วทำการเคลือบเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (VTC-100 Compact Spin Coater, MTI Cooperation, USA) ตามเวลาที่กำหนด เมื่อครบเวลาจะได้แผ่นตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่เคลือบบนกระดาษซึ่งแห้งสมบูรณ์ โดยให้เก็บรักษาไว้ในสภาวะห้องทดลอง ที่ปลอดภัย แสงเย็น และแห้ง (25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 60) ก่อนการใช้งาน

ทั้งนี้ การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบสภาวะการเตรียมหมึกพิมพ์ ให้เตรียมโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและเวลาที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1,500, 1,700 และ 2,000 รอบต่อนาที และที่เวลา 30, 45, 60, 75 และ 90 วินาที

2.3 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงสีของหมึกพิมพ์กับการปลอมแปลง

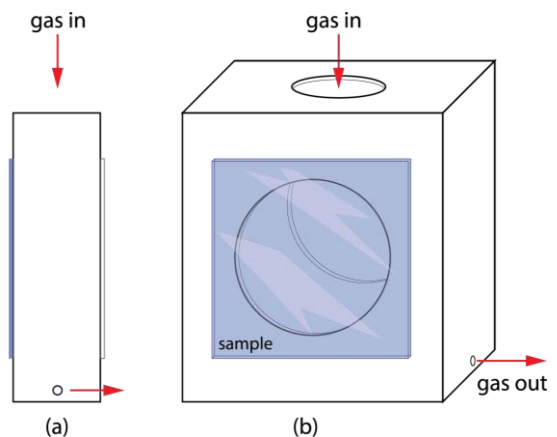
ดำเนินการวัดผลค่าสีโดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectrophotometer, Perkin Elmer, Lambda 365) เพื่อวัดช่วงการดูดกลืนแสงสี (Absorbance Spectra) ของตัวอย่างหมึกพิมพ์ โดยพิจารณาในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-700 นาโนเมตร และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงสีสูงสุด (Maximum Lambda Absorbance, Abs_{max}) เพื่อประเมินลักษณะสีของหมึกพิมพ์

2.4 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์กับการปลอมแปลง

ดำเนินการวัดสเปกตรัมของหมึกพิมพ์ ACPI ขณะเริ่มต้น ($t_0=0$ นาที) แล้วจึงปล่อยแก๊ส CO_2 ที่ความ

เข้มข้นคงที่ร้อยละ 100 โดยปริมาตร ที่ความดัน 1 บาร์ ในสภาวะอุณหภูมิควบคุม 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ให้ไหลผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ด้วยแก๊ส (Gas Cell) ที่มีลักษณะเป็นกล่องระบบปิด มีช่องเปิดสำหรับติดตั้งตัวอย่างโดยหันด้านหมึกพิมพ์สัมผัสกับแก๊สที่อยู่ภายในด้านหนึ่ง และอีกด้านติดตั้งด้วยกระจกใส โดยให้ส่องผ่านได้ด้วยลำแสงของอุปกรณ์วัดได้ ซึ่งประยุกต์จาก Khankaew และคณะ [8] ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1

โดยปล่อยให้แก๊สไหลผ่านอุปกรณ์ทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 60-180 วินาที เพื่อให้หมึกพิมพ์ทำปฏิกิริยากับแก๊สจนสมบูรณ์ (หรือจนเปลี่ยนสีอย่างสมบูรณ์) จากนั้น จึงทำการวัดผลขณะเปลี่ยนสีสมบูรณ์ในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-700 นาโนเมตร วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของจุด Abs_{max}



รูปที่ 1 (a) ลักษณะด้านข้าง และ (b) ลักษณะด้านหน้าอุปกรณ์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ด้วยแก๊ส



2.5 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง

2.5.1 การวิเคราะห์ค่าสีและความแตกต่างสี

เตรียมตัวอย่างหมึกพิมพ์ตามวิธีการเตรียมในข้อที่ 2.2 นำมาวางในตำแหน่งวางตัวอย่างเพื่อวัดค่าสีในหมวด RGB (Red, Green, Blue), CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black), และหมวดสี L^* , a^* , และ b^* โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Spectrophotometer, CM-3700A, Konica Minolta, Japan) เลือกใช้ค่าสี L^* , a^* และ b^* มาพิจารณาความแตกต่างสีรวม (Delta E, ΔE , หรือ Total Color Difference, TCD) ได้ ดังสมการ (1)

$$TCD = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (1)$$

โดยค่า L^* หมายถึงค่าความสว่างสี (Lightness) ค่า a^* หมายถึงความเป็นสีแดง (Redness, $+a^*$) และสีเขียว (Greenness, $-a^*$) และค่า b^* หมายถึงความเป็นสีเหลือง (Yellowness, $+b^*$) และสีน้ำเงิน (Blueness, $-b^*$) [9]

2.5.2 การวิเคราะห์ค่าความหนืดของหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง

เนื่องจากหมึกพิมพ์ ACPI ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ เป็นหมึกพิมพ์เหลว (Liquid Ink) ซึ่งมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวทอนเนียน (Newtonian) ที่ซึ่งค่าความหนืดจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความเค้นเฉือน (Shear Stress) และอัตราเฉือน (Shear Rate) จึงสามารถวัดความหนืดแบบไคเนมาติก (Kinematic Viscosity) ได้ โดยใช้ถ้วยวัดความหนืดของซาร์ห์น (ZAHN Viscosity Cup, EZ®, No. 2, (ASTM) D 4212, GARDCO®, USA) [10]

2.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง

การวิเคราะห์พื้นผิวหน้าชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์เพื่อศึกษาความสม่ำเสมอและลักษณะปรากฏในระดับไมโครเมตร โดยการเตรียมตัวอย่างหมึกพิมพ์ ACPI บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ จากนั้น นำไปเคลือบทองคำบริสุทธิ์ที่มีความหนา 30 Å ต่อด้วยวิเคราะห์และบันทึกภาพด้วยเครื่องกราดอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Scanning Electron Microscope, SEM, JEOL®, JSM 7800F, Japan) ที่ความถี่ 15 กิโลโวลต์

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

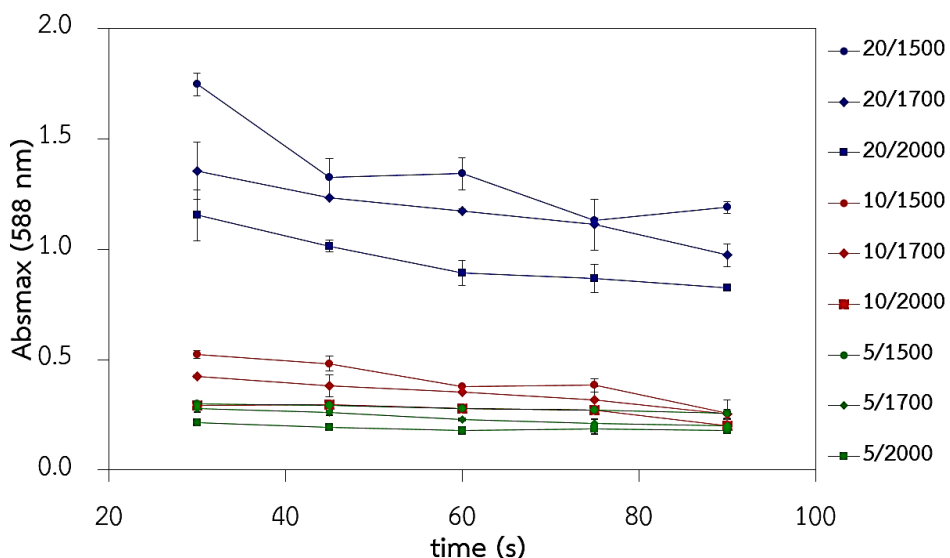
3.1 สภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมหมึกพิมพ์และความสัมพันธ์ต่อการพิมพ์ด้วยระบบเชิงพาณิชย์

การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารให้สี (MCP) ในหมึกพิมพ์ อัตราเร็วและเวลาในการหมุนเหวี่ยง (ซึ่งประมาณการถึงความหนาชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์เมื่อแห้ง (Dried-ink Film Thickness) ได้ [8]) เพื่อศึกษาความเข้มข้นของค่าสีของหมึกพิมพ์ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในระบบพิมพ์ ผลค่าการดูดกลืนแสงสีสูงสุด (Abs_{max}) พบว่า Abs_{max} มีแนวโน้มลดลง แปรผันตามกับตัวแปรทุกตัว กล่าวคือ มีค่าลดลงเมื่อลดความเข้มข้นของ MCP และเพิ่มอัตราเร็วของการหมุนเหวี่ยง รวมทั้งเพิ่มเวลาในการหมุนเหวี่ยงด้วย โดยขณะที่ความเข้มข้นของสารให้สีที่ 10 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึด (Parts Per a Hundred Resin, phr) หมึกพิมพ์ แสดงผลค่า Abs_{max} ที่ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม สำหรับหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง หรือ หมึกพิมพ์ตัวชี้วัด (Indicator Ink) นั้น การเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์จะขึ้นอยู่กับ 1) ความเข้มข้นขององค์ประกอบหลัก และ 2) ความหนาชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์เป็นสำคัญ กล่าวคือ ที่สภาวะเดียวกัน หมึกพิมพ์จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีเร็วขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นขององค์ประกอบในปริมาณต่ำและมีความหนาชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ต่ำด้วย [8] ฉะนั้น จากผลดังรูปที่ 2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ตัวอย่างหมึกพิมพ์มีค่า Abs_{max} สูง-ต่ำ ตามหลักการข้างต้น ซึ่งหมายถึงผลด้านการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อนำไปใช้งานด้วย ในขณะที่การใช้งานต้องการการเปลี่ยนแปลงสีที่เร็วเพื่อตอบสนองต่อการตรวจสอบ (กรณีนำไปใช้งานด้านสิ่งพิมพ์กันการปลอมแปลง) ตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่มีความเข้มข้นของ MCP/G/HEC เป็น 20/300/100 phr จึงมีความเข้มข้น

สูงเกินไป ในขณะที่ตัวอย่างทั้งสามความเข้มข้นนั้นสามารถมองเห็นสีน้ำเงินม่วงได้ด้วยตาเปล่า

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาโดยยึดหลักการข้างต้น โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างสีรวม (Total Color Difference, TCD) ของหมึกพิมพ์ต่อพื้นที่ผิวที่ความเข้มข้นของสารให้สี 5 และ 10 phr และใช้ความเร็วต่ำ (1,500 และ 1,700 รอบต่อนาที) และเวลาน้อย (30 และ 45 วินาที) เพื่อวัตถุประสงค์ในการเตรียมที่เหมาะสม (ตารางที่ 2) จะพบว่า ที่ความเร็วรอบต่อเวลา 1,700/30 และ 1,700/45 เป็นสภาวะที่ค่า TCD แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ 1,700/30 ให้ค่า TCD ที่สูงกว่า 1,700/45 เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของงานที่ดี และเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองนี้ จึงเลือกสภาวะที่ความเร็ว 1,700 รอบต่อนาที ที่เวลา 30 วินาที ในการทดสอบลำดับต่อไป



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงสีสูงสุด (Abs_{max}) ของหมึกพิมพ์ต่อความเร็วและเวลา



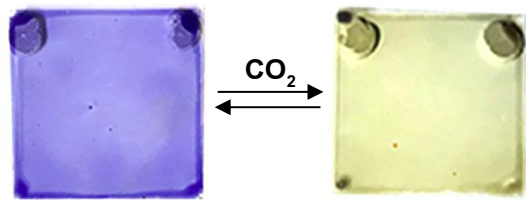
ตารางที่ 2 ความแตกต่างสีรวม (TCD) ของหมึกพิมพ์ ACPI ที่เตรียมด้วยความเร็วและเวลาแตกต่างกัน

Speed (rpm)	Time (s)	MCP/G/HEC (phr)	
		10/300/100	5/300/100
1,500	30	36.12 ±2.05c	15.34 ±3.08d
	45	34.76 ±7.34c	16.45 ±2.94de
1,700	30	27.57 ±2.31a	14.27 ±2.73d
	45	25.09 ±5.62ab	17.45 ±3.50e

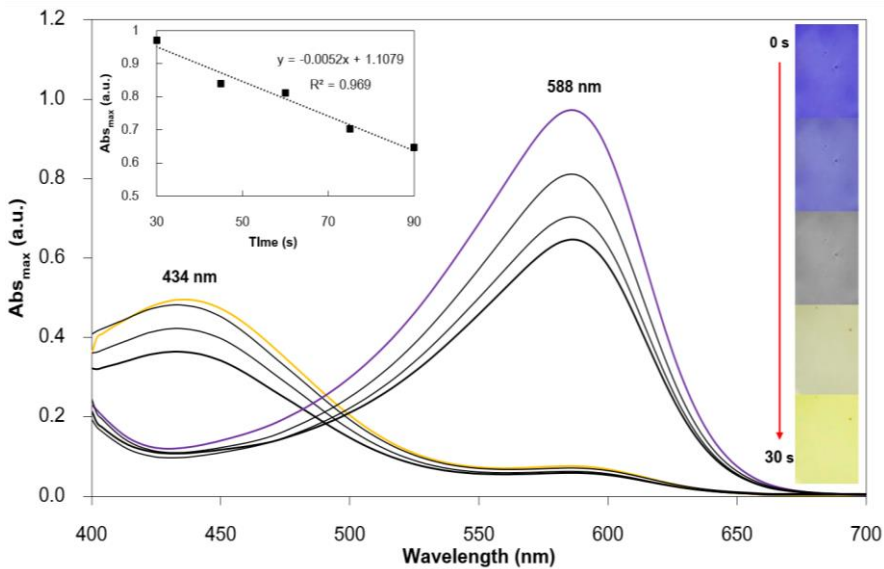
3.2 ลักษณะการดูดกลืนแสงและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์กัณฑ์การปลอมแปลง

เมื่อหมึกพิมพ์ ACPI ที่มีความเข้มข้นของ MCP/G/HEC เป็น 10/300/100 phr มีสีเริ่มต้นเป็นสีน้ำเงินม่วง (Purple Blue) และแสดงตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุด (Abs_{max}) ที่ 588 นาโนเมตร อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อหมึกพิมพ์สัมผัสกับแก๊ส CO₂ ต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน 30 วินาที หมึกพิมพ์จะค่อย ๆ เปลี่ยนสีไปเป็นสีเหลือง (Yellow) (รูปที่ 3) ซึ่งแสดงจุด Abs_{max} ที่ตำแหน่ง 434 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้เคียงกับข้อมูลคุณสมบัติที่รายงานในฐานข้อมูล Sigma-Aldrich® ที่กล่าวว่าสารให้สีชนิด MCP ในตัวทำละลายฐานน้ำมีค่า Abs_{max} ที่ตำแหน่ง 579 และ 434 นาโนเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4)



รูปที่ 3 ตัวอย่างหมึกพิมพ์ ACPI ก่อน-หลังการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดจากการสัมผัสกับแก๊ส CO₂

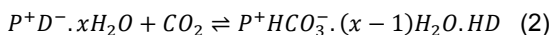


รูปที่ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์กัณฑ์การปลอมแปลง ACPI



ทั้งนี้ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ ACPI เกิดขึ้นโดยที่สีย้อม MCP ซึ่งโดยทั่วไปมีค่า $pK_a = 8.32$ (ณ 25 องศาเซลเซียส, Sigma-Aldrich®) และสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน (รูปเบส หรือ Deprotonated form, MCP^-) ไปเป็นสีเหลือง (รูปกรด หรือ Protonated Form, $HMCP$) ซึ่งเมื่อนำมาเตรียมเป็นหมึกพิมพ์ จะได้หมึกพิมพ์ในรูปโครงสร้าง $NaHCO_3^+ \cdot MCP^- \cdot xH_2O$

ทั้งนี้ เมื่อสารยึด HEC ในหมึกพิมพ์สัมผัสและดูดซับความชื้นในบรรยากาศ โดยมีสารเสริมสภาพพลาสติก G และเกลือ $NaHCO_3$ เป็นสารเร่ง ส่งผลให้ชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์มีความชื้นและดูดซับแก๊ส CO_2 ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำสูง (1.45 กรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส) และเปลี่ยนแปลงสภาพของความชื้นเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) จึงส่งผลให้สีย้อม MCP เปลี่ยนเป็นรูปกรดและแสดงสีเหลืองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจาก $NaHCO_3$ ทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการดูดซับความชื้นในระบบ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของหมึกพิมพ์ระหว่างสภาพของเหลวความหนืดสูงไปเป็นของแข็งในลักษณะกลับไปตามด้วยความชื้น (Phase Transfer Agent) และเมื่อแทนค่าตัวแปรด้วยอักษร P (Phase) และสีย้อม MCP แทนด้วย D (Dye) เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวจะสามารถแสดงดังสมการ (2) ต่อไปนี้



จากสมการจะเห็นว่า ปฏิกิริยาสามารถเปลี่ยนกลับไปได้ และมีองค์ประกอบของน้ำและแก๊ส CO_2 เป็นปัจจัยที่ทำให้รูปของหมึกพิมพ์เปลี่ยนเป็นสภาวะกรด โดยใช้โมเลกุลของน้ำและแก๊สหนึ่งหน่วย

นวัตกรรมนี้จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาให้ตอบสนองต่อการตรวจสอบได้ด้วยไอ้และแก๊ส CO_2 ผ่านลมหายใจ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ CO_2 นั้น มีผลโดยตรงต่ออัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงสี [7, 8, 11, 12] รวมถึงความแตกต่างสีรวม (TCD) ที่เหมาะสมต่อการพิจารณาความแตกต่างด้วยตาด้วย

3.3 สมบัติของหมึกพิมพ์กับการปลอมแปลง

3.3.1 ค่าสีและความแตกต่างสีรวม

หมึกพิมพ์ ACPI ที่พัฒนาขึ้นมีค่าสีในหมวดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 กล่าวคือ หมึกพิมพ์มีสีเริ่มต้นเป็นสีน้ำเงินม่วง ซึ่งแสดงค่า Abs_{max} อย่างชัดเจนในตำแหน่ง 588 นาโนเมตร และสอดคล้องกับค่าสีที่แสดงความเป็นสีน้ำเงินในโหมดต่าง ๆ ได้แก่ $-b^*$, B (Blue), และ C (Cyan) ที่มีค่าค่อนข้างสูง รวมทั้งสี M (Magenta) ซึ่งแสดงความเป็นสีม่วงแดงด้วย ในขณะที่เมื่อหมึกพิมพ์ได้สัมผัสกับแก๊ส CO_2 (ร้อยละ 100 โดยปริมาตร ความดัน 1.0 บาร์ เป็นเวลาอย่างน้อย 60 วินาที) จะแสดงเป็นสีเหลือง (Yellow, Y) ซึ่งมีค่าสี $+b^*$ และ Y ค่อนข้างสูง และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างสีรวม (TCD) จะพบว่า ค่า TCD ระหว่างสีน้ำเงินม่วงและสีเหลืองมีค่าถึง 82.03 ± 6.43 ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนจนสามารถแยกแยะได้ด้วยตาเปล่า [6] ดังตารางที่ 3

3.3.2 ค่าความหนืดของหมึกพิมพ์

หมึกพิมพ์ ACPI ที่มีความเข้มข้นของ MCP/G/HEC เป็น 10/300/100 phr มีค่าความหนืด ซึ่งวัดด้วยถ้วยวัดความหนืดของซาร์ห์น เป็น 31.50 เซนต์ิสโตกส์ (Centistoke, cSt.) ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าความหนืดที่เหมาะสมกับระบบการพิมพ์กราวัวร์ (Gravure)



ตารางที่ 3 สมบัติของหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง (ACPI) ชนิด 10/300/100 phr ที่เตรียมด้วยความเร็ว 1,700 รอบต่อนาที และเวลา 30 วินาที

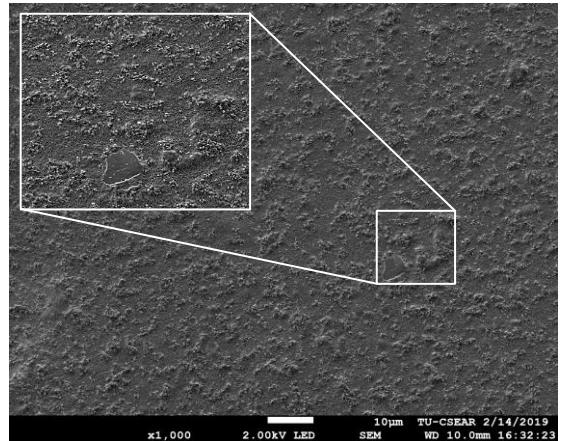
	สีน้ำเงินม่วง (เริ่มต้น)	สีเหลือง (เปลี่ยนสมบูรณ์)
L*, a*, b*	63.00, 18.20, -43.80	93.60, -7.60, 27.80
R, G, B	149.20, 140.00, 233.80	235.60, 239.00, 178.20
C, M, Y, K	44.40, 45.40, 2.00, 2.96	8.60, 1.80, 36.40, 2.40
TCD	27.57 ±2.31	82.03 ±6.43
(L*, a*, b*)	(เทียบกับสีกระดาษ)	(เทียบกับสีเริ่มต้น)
Abs_{max}	588 นาโนเมตร	434 นาโนเมตร

และเฟล็กโซกราฟี (Flexography) [10] อย่างไรก็ตาม ค่าความหนืดของหมึกพิมพ์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบหลักในหมึกพิมพ์เป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้น หากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในงานพิมพ์ระบบอื่น เช่น ระบบพิมพ์ออฟเซต (Offset) หรือระบบพิมพ์สกรีน (Screen) ซึ่งเป็นหมึกพิมพ์ชั้นหนืด (Paste Ink) จึงควรศึกษาและพิจารณาองค์ประกอบที่เหมาะสมใหม่อีกครั้ง

3.3.3 ลักษณะผิวหน้าหมึกพิมพ์

ชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ ACPI มีลักษณะผิวหน้าที่เรียบเมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่า ในขณะที่เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) พบว่า ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า สามารถมองเห็นสภาพผิวหน้าชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ที่แห้งได้อย่างชัดเจน คือมองเห็นการปรากฏของอนุภาคขนาดเล็กประปรายโดยทั่ว คล้ายการติดเกาะ (Adhesion) ของผงหรือฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1.0 ไมโครเมตร (รูปที่ 5) ทั้งนี้อาจ

เกิดขึ้นได้จากการเกิดผลึกของอนุภาคเกลือ NaHCO_3 ที่ถูกใช้เป็นสารบัพเฟอร์ในสูตรหมึกพิมพ์นี้ ทั้งนี้ ผลดังกล่าวแสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวของหมึกพิมพ์เมื่อแห้ง ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของ NaHCO_3 ที่สูงเกินไป เมื่อสภาวะในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลให้เกิดผลึกเกาะตัวขึ้นบนผิวหน้า ในการพัฒนาต่อยอดเพื่อการใช้งานจริงจึงควรศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสม หรืออาจปรับคุณสมบัติของหมึกพิมพ์ด้วยสารเติมแต่งประเภทสารเพิ่มความเป็นเนื้อเดียว (Compatibilizers)



รูปที่ 5 ลักษณะผิวหน้าหมึกพิมพ์กันการปลอมแปลง ACPI

3.4 แนวทางการประยุกต์ใช้งาน

หมึกพิมพ์กันการปลอมแปลงในงานวิจัยนี้ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินม่วงไปเป็นสีเหลืองด้วยปฏิกิริยาของสีย้อม pH กับแก๊ส CO_2 หรือกลไกทางตรงกับสารประกอบจำพวกกรด-ด่าง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนานวัตกรรมที่เกี่ยวข้อง ดังนี้



3.4.1 ด้านเทคโนโลยีการพิมพ์กับการปลอมแปลง

จากผลจะพบว่า ความเข้มข้นของสารให้สี MCP และความหนาชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ที่เกิดจากความเร็วยรอบและเวลาในการหมุนเหวี่ยงนั้น เป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงสี นอกจากนี้ ยังพบว่า ความเข้มข้นและน้ำหนักโมเลกุลของสารยึด (Binder) และความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่น ๆ หรือสารเติมแต่งในหมึกพิมพ์ (Additive) นั้น ล้วนมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสีด้วย [8] ฉะนั้น การพัฒนาให้หมึกพิมพ์มีสภาพความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับแก๊ส CO₂ ที่ความเข้มข้นที่ระดับต่ำจากลมหายใจ (ประมาณร้อยละ 3.8 โดยปริมาตร หรือ 38,000 ส่วนต่อหนึ่งล้านส่วน (Parts per Million, ppm) [13]) เพื่อเร่งอัตราปฏิกิริยาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีในระยะเวลาที่สั้นได้ จะสามารถยกระดับการพัฒนาเป็นหมึกพิมพ์กับการปลอมแปลงที่ตรวจสอบได้ ผ่าน CO₂ ความเข้มข้นต่ำที่ปลดปล่อยจากลมหายใจออกได้ด้วยตนเอง (ผู้บริโภค) และประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ หรือสินค้าที่มีมูลค่าสูง และมีความเสี่ยงต่อการปลอมแปลงได้ อาทิ เครื่องสำอาง เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เซ็ค สลากกินแบ่งรัฐบาล หรือ ยารักษาโรค เป็นต้น

3.4.2 ด้านเทคโนโลยีการบรรจุแบบอินเทลลิเจนต์

แก๊ส CO₂ ซึ่งนับเป็น สารผลผลิตจากกระบวนการเผาผลาญ (Metabolism) ที่เปลี่ยนรูปของพลังงานระดับเซลล์ในการเจริญของจุลินทรีย์ (Microbial) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในอาหารบางชนิดระหว่างการเก็บรักษาและส่งผลให้อาหารนั้นเกิดการเน่าเสียหรือเสื่อมสภาพ (Deterioration) ไปสู่ระดับที่ส่งผลต่อผู้บริโภคได้ ถึงแม้ผู้บริโภคจะยังสัมผัสไม่ได้ก็ตาม

[14] ปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาตัวชี้วัดแก๊ส (Gas Indicator) โดยเฉพาะ แก๊ส CO₂ เพื่อเป็นวัสดุหรือเครื่องมือทางอ้อมสำหรับการประเมินอายุการเก็บรักษา (Shelf-life) ซึ่งนับเป็นเทคโนโลยีการบรรจุแบบอินเทลลิเจนต์ (Intelligent Packaging, IP) [15] อย่างไรก็ตาม ปริมาณแก๊ส CO₂ ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเจริญของจุลินทรีย์นั้นมีความเข้มข้นต่ำมากเทียบกับพื้นที่ภายในบรรจุภัณฑ์ นวัตกรรมนี้จึงยังมีอยู่น้อย เนื่องจากต้องพัฒนาให้ตัวชี้วัดมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

4. บทสรุป

หมึกพิมพ์ ACPI ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยเรื่องนี้มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินม่วงไปเป็นสีเหลืองได้ด้วยแก๊ส CO₂ โดยที่ความเข้มข้นของ MCP/G/HEC เป็น 10/300/100 phr ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ โดยหมึกพิมพ์มีลักษณะเหลว มีค่าสี ค่าความแตกต่างสีรวมต่อพื้นผิววัสดุ และเมื่อเปรียบเทียบก่อน-หลังการสัมผัสกับแก๊สในระดับสูง ซึ่งสามารถมองเห็นความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า รวมถึงมีค่าความหนืดที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้พิมพ์ด้วยระบบการพิมพ์ที่ใช้หมึกเหลวได้ อย่างไรก็ตาม นวัตกรรมหมึกพิมพ์ ACPI นี้ ยังต้องพัฒนาด้านอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้มีสภาพความว่องไวของหมึกพิมพ์ต่อการเกิดปฏิกิริยากับ CO₂ ที่ความเข้มข้นต่ำจึงสามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้งานในด้านเทคโนโลยีกับการปลอมแปลงที่ตรวจสอบได้ด้วยลมหายใจรวมถึงเทคโนโลยีการบรรจุแบบอินเทลลิเจนต์บางประเภทได้



5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากทุนงบประมาณรายได้อุตสาหกรรมเทคโนโลยีสารสนเทศ มทร.ธัญบุรี ประจำปี 2563-2564 ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ และคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มทร.ธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ เครื่องมือ และเอื้อเฟื้อสถานที่ตลอดการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/04/20/these-25-technology-trends-will-define-the-next-decade/?sh=1f54541729e3> (Accessed on 12 March 2021)
- [2] <https://www.pci-mag.com/features/feature-smart-solutions-to-counterfeiting-6895831/> (Accessed on 2 March 2021)
- [3] <https://www.resourcelabel.com/anti-counterfeit-labels-brand-protection/> (Accessed on 18 January 2021)
- [4] P. Pajonklaew, S. Reablerthiran, W. Yamsangsan, Increasing the value of publications with anticounterfeiting technology transform, Report, King's Mongkut University of Technology Thonburi, Thailand. 2014. (in Thai)
- [5] <https://www.wsj.com/articles/pfizer-identifies-fake-covid-19-shots-abroad-as-criminals-exploit-vaccine-demand-11619006403> (Accessed on 28 April 2021)
- [6] S. Khankaew, and A. Pothiratanasangchai, UVA-monitored, cellulose-based binder colorimetric security printing ink, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2021, 31(3), 539-549. (in Thai)
- [7] A. Mills, and D. Yusufu, Extruded colour-based plastic film for the measurement of dissolved CO₂, Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 237, 1076-1084.
- [8] S. Khankaew, A. Mills, D. Yusufu, N. Wells, S. Hodgen, W. Boonsupthip, and P. Suppakul, Multifunctional anthraquinone-based sensors: UV, O₂ and time, Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 238, 76-82.
- [9] F.J. Francis, Colorimetry of food, Physical Properties of Food, The AVI Publishing Company Inc., WSP, USA, 1993.
- [10] J. Izdebska and S. Thomas, Printing on polymers: Fundamentals and applications, William Andrew Applied Science Publishers, London, UK, 2016.
- [11] C. Wang, D. Yusufu, and A. Mills, A smart adhesive 'consume within' (CW) indicator for food packaging, Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22, 100395.
- [12] D. Yusufu, and A. Mills, A general-purpose colourimetric air pressure indicator, Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 22, 127425.



- [13] <https://www.co2meter.com/blogs/news/10709101-what-is-carbon-dioxide> (Accessed on 28 April 2021)
- [14] S. Matindoust, G. Farzi, M.B. Nejad, and M.H. Shahrokhbadi, Polymer-based gas sensors to detect meat spoilage: A review, *Reactive and Functional Polymers*, 2021, 165, 104962.
- [15] T. Janjarasskul, and P. Suppakul, Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(5), 808-831.



การประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีนปรับปรุงกระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมัน รถแทรกเตอร์: กรณีศึกษาบริษัท เอ.บี.ซี จำกัด

สุชาติ อ่างสุข* และ สมชาย เป็รัมย์พรหม

ภาควิชาการบริหารอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ, คณะพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 5 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 22 กันยายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 1 ตุลาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 ตุลาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ (1) เพื่อศึกษากระบวนการทำงาน (2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านกระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน (3) เพื่อลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งพบปัญหาในชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันมีสนิมและกระบวนการในการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันเกินรอบความเร็วในการผลิต โดยวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยหลักการระดมความคิด การวิเคราะห์โดยใช้ Why-Why Analysis จากนั้นปรับปรุงวิธีการทำงานด้วยการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน (Lean) ซึ่งเป็นระบบกำจัดความสูญเสียดังกล่าวและปรับปรุงคุณภาพ โดยการนำหลักการ ECRS และการจัดสมดุลสายการผลิตมาปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น การปรับปรุงปัญหาสนิมพบปัญหาร้อยละ 20.00 ของจำนวนชิ้นงานที่ส่งไปล้าง แก้ไขโดยการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยการชุบสังกะสี หลังทำการเพิ่มกระบวนการชุบสังกะสี พบว่าจำนวนของเสียไม่เกิดขึ้นในกระบวนการ คิดเป็นของเสียลดลงร้อยละ 100 และหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน พบว่ารอบเวลาการผลิตลดลงจากเดิม 89.13 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 51.61 วินาทีต่อชิ้น สามารถลดรอบเวลาการผลิตคิดเป็นร้อยละ 42.10 และลดเวลาการผลิตรวม จากเดิม 289.33 วินาทีต่อชิ้น ลดลงเหลือ 177.14 วินาทีต่อชิ้น ลดลงได้ถึงร้อยละ 38.78 และสามารถลดจำนวนพนักงานจากเดิม 6 คน เหลือเพียง 4 คน ลดขั้นตอนการทำงานจากเดิม 26 ขั้นตอนย่อย เหลือ 18 ขั้นตอนย่อย คิดเป็นร้อยละ 30.77

คำสำคัญ: กระบวนการผลิต; รอบความเร็วในการผลิต; การชุบสังกะสี

Applying the Lean Concept to Improve the Oil Pipelines Processing for Tractor: A Case Study of ABC Company Ltd.

Suchadee Tumrongsuk^{*} and Somchai Preangprom

Department of Manufacturing and Service Industry Management, Faculty of Business and Industrial Development, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

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

Received: 5 August 2021; Revised: 22 September 2021; Accepted: 1 October 2021

Online Published: 24 October 2021

Abstract: The objectives of this research were (1) to study the working processes (2) to increase the efficiency of the oil pipeline parts manufacturing processes and (3) to reduce the amount of waste generated. The company has problems with the oil pipeline parts rusting and requires an increase in the speed of the processes of producing oil pipeline parts. The causes of the problems will be analyzed using brainstorming, Why Why Analysis. Then the working method was improved by applying the Lean concept, which is a system to eliminate wastage and improve quality by applying ECRS principles. The production line was balanced, to improve the problems that arose. After the improvement of the rust problems by coating the workpieces with galvanization, it was found that the original 20.00% of work that was wasted was removed completely – a 100% improvement. Also, after improving the production processes of oil pipeline parts, it was found that the production cycle was reduced from 89.13 to 51.61 seconds per item. The production cycle time was reduced by 42.10% and the total production time was reduced from 289.33 to 177.14 seconds per item, reduced to 38.78%. Also, the number of employees required was reduced from the original 6 people to only 4 people. Finally, the workflow sub-steps were reduced from the original 26 sub-steps to 18 sub-steps, representing a 30.77% reduction.

Keywords: Production Process, Cycle Time, Galvanizing Process



1. บทนำ

ประเทศไทยถือเป็นประเทศของอุตสาหกรรมเกษตร ด้วยปริมาณของเกษตรกรในประเทศไทยที่มีกว่า 30 ล้านคน หรือคิดเป็นเกือบครึ่งหนึ่งของประชากรในประเทศ ดังนั้น การสนับสนุนด้านเกษตร 4.0 จึงถือเป็นนโยบายที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ และอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร เป็นอุตสาหกรรมสนับสนุน (Supporting Industry) ที่ผลิตปัจจัยการผลิตหรือบริการให้กับอุตสาหกรรมเกษตร มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ และสร้างมูลค่าเพิ่มโดยรวมของอุตสาหกรรมให้สูงขึ้น

แนวคิดแบบลีน (Lean) เป็นแนวคิดในการทำธุรกิจที่ได้รับความนิยมและได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากการใช้ระบบกำจัดความสูญเสียดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกิจกรรมหรืองานที่ดำเนินการ ซึ่งเกิดจากความสูญเสียดังกล่าว 8 ประการ ในกระบวนการผลิตมักจะพบความสูญเสียดังกล่าว นั้นแอบแฝงอยู่เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการผลิตต่ำกว่าที่ควรจะเป็น จึงมีแนวคิดในการลดความสูญเสียดังกล่าว เหล่านี้เกิดขึ้นอย่างมากมาย โดยพบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตการกักเลนส์ขึ้นรูปค่าสายตา ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดของลีน โดยใช้ระบบการผลิตแบบดึงและการไหลของงานแบบ 1 ชิ้น (One Piece Flow) เพื่อแก้ไขปัญหาประสิทธิภาพของสายการผลิตค่าหลักการ ECRS ถูกนำมาใช้ในการลดความสูญเปล่าในการผลิต โดยหลังการปรับปรุงพบว่า รอบเวลาการผลิตจากเดิม 68.22 วินาทีลดลงเหลือ 55.66 วินาที คิดเป็น 18.4% จำนวนงานในสายการผลิตจากเดิม

306 งาน ลดลงเหลือ 143 งาน คิดเป็น 53.7% ขั้นตอนการทำงานลดลงจากเดิม 9 ขั้นตอนเหลือ 7 ขั้นตอน จำนวนพนักงานจากเดิม 12 คนลดลงเหลือ 10 คน [1] การจัดสมดุลสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดสมดุลและการลดความสูญเปล่าจากเทคนิคลีน ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตและจัดสมดุลสายการผลิต ทำการคำนวณหาเวลามาตรฐาน คือ 22.87 วินาที และพบว่าประสิทธิภาพของสายการผลิตก่อนปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 84.71 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นใช้เวลามาตรฐานหาจุดคอขวดของกระบวนการผลิตและประยุกต์ใช้เทคนิค ECRS เพื่อลดรอบเวลาการผลิตของจุดคอขวด นำไปปรับปรุงและทดสอบในสายการผลิต พบว่าเวลามาตรฐานของสายการผลิตหลังการปรับปรุงเป็น 19.11 วินาทีสามารถปรับปรุงรอบเวลาการผลิตได้ 16 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพสายการผลิตเป็น 94.19 เปอร์เซ็นต์ [2] การประยุกต์ใช้แผนภูมิสายธารแห่งคุณค่าในการปรับปรุงกระบวนการผลิตของธุรกิจพลาสติกฟิล์ม มีความสูญเปล่าแฝงอยู่ซึ่งส่งผลให้มีเวลานานที่นานและก่อให้เกิดต้นทุนโดยไม่จำเป็น เช่น ความสูญเปล่าจากการรอคอยการผลิตรองานอันเนื่องมาจากปัญหาการขาดวัตถุดิบ โดยสรุปแล้วเมื่อทำการปรับปรุงที่วางไว้ ผลของการปรับปรุงจะแสดงในแผนภูมิสายธารแห่งคุณค่าในสถานการณ์อนาคต พบว่าเวลารวมของกระบวนการทำงานลดลงถึงร้อยละ 6.27 [3] และการลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคทางด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม พบว่าปัญหาหลัก 3 ปัญหาเกิดขึ้น คือ ผ่าท่อฉีก



ชิ้นงานบัพ และเชื่อมทะเล่ ทำการแก้ปัญหาโดยทำการปรับเปลี่ยนแกนตัวหยุดหยุด (Stopper) ที่ตัวแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Mold) สำหรับปัญหาฝาท่อฉีก ปรับปรุงพื้นที่จัดวางโดยเพิ่มอุปกรณ์เสริมกันกระแทกสำหรับปัญหาชิ้นงานบัพ และควบคุมการปฏิบัติงานของพนักงานในการตั้งค่าพารามิเตอร์ หลังการปรับปรุงพบว่าสามารถลดของเสียจาก 10.82% เป็น 4.71% [4]

บริษัท เอ.บี.ซี จำกัด เป็นบริษัทอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร ดำเนินกิจการเกี่ยวกับการขึ้นรูปท่อต่างๆ ที่ใช้ในการประกอบระบบทางเดินน้ำหล่อเย็น น้ำมันในรถยนต์ รถไถ และเครื่องจักรกลอื่นๆ แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของบริษัท มีความหลากหลายในด้านรูปร่าง ทำให้กระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกัน แต่อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตหลักของบริษัท คือ การรับเอาวัสดุจำพวกท่อขนาดต่างๆ และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ เข้ามาผ่านกระบวนการที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ตามแบบ (Drawing) ที่ลูกค้ากำหนด และตรงตามข้อกำหนดด้านคุณภาพ

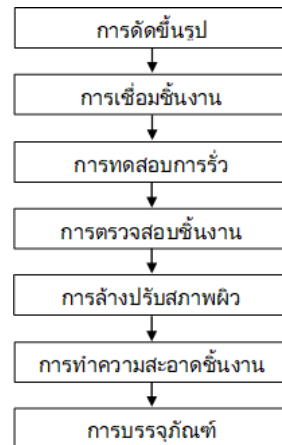
โดยในปัจจุบันกระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมันรถนั้นมีกระบวนการผลิตที่หลากหลายขั้นตอน และบางขั้นตอนได้มีการส่งชิ้นส่วนไปทำกระบวนการผลิตที่บริษัทอื่นด้วย จากการศึกษาสภาพปัจจุบันพบมีปัญหาที่สำคัญ ดังนี้ (1) มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและมีของเสียหลุดไปถึงลูกค้า (2) เวลาในกระบวนการผลิต (Cycle Time) ชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันเกินรอบความเร็วในการผลิต (Takt Time)

ดังนั้นเพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันโดยมุ่งเน้นลดความสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้น

ผู้วิจัยจึงเริ่มจากการทำการศึกษากระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมัน และจัดทำการวิเคราะห์ หาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมันรถแทรกเตอร์โดยการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน ใช้หลักการ ECRS และการจัดสมดุลสายการผลิตมาปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ (1) เพื่อศึกษากระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมันรถแทรกเตอร์ (2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านกระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมันรถแทรกเตอร์ และ (3) เพื่อลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขอบเขตการวิจัย เป็นการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันรถแทรกเตอร์และการจัดการแก้ไขของเสียที่เกิดขึ้น โดยใช้การเปลี่ยนกระบวนการในการผลิตและการใช้หลักการลดความสูญเสียเปล่า (ECRS) และการจัดสมดุลการผลิตมาประยุกต์ใช้ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 1



หมายเหตุ: การล้างปรับสภาพผิวเป็นกระบวนการที่ทางโรงงานส่งชิ้นงานไปทำที่โรงงานอื่น

รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน



2.1 ศึกษาขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน

ผู้วิจัยได้สร้างแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) เพื่อแสดงกระบวนการผลิตท่อส่งน้ำมัน เบื้องต้น 10 ครั้ง คำนวณหารอบจำนวนข้อมูลที่เหมาะสมในการจับเวลา หาค่า R (Range) หรือพิสัย ซึ่งคือค่าสูงสุด (H) – ค่าต่ำสุดของกลุ่ม (L) หาค่าเฉลี่ย \bar{X} ซึ่งได้จากผลรวมของตัวเลขในกลุ่มหารด้วยจำนวนข้อมูล 10 ครั้ง $= \frac{\sum x}{n}$ คำนวณค่า $\frac{R}{\bar{X}}$ อ่านค่า N (จำนวนรอบที่เหมาะสม) จากตาราง Maytag

ทำการจับข้อมูลทั้งสิ้น 35 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเวลาปกติ โดยประเมินค่าอัตราความเร็วของตัวแทนหัวหน้าคนงาน x Rating Factor จากนั้น จึงคำนวณหาค่าเวลามาตรฐาน โดยกำหนดค่าเผื่อ 9% ซึ่งประกอบด้วย เวลาเผื่อส่วนบุคคล 5% ของเวลาทั้งหมด และเวลาเผื่อสำหรับความเครียด ได้กำหนดไว้ที่ 4% (องค์การแรงงานระหว่างประเทศ หรือ International Labour Organization; ILO) สามารถสรุปเวลามาตรฐาน ดังตารางที่ 1 – 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 กระบวนการตัดขึ้นรูป

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต								
กระบวนการ : การตัดขึ้นรูป	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน ○		4	-	-			
	ตรวจสอบ □		-	-	-			
	เคลื่อนที่ ⇨		2	-	-			
<input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย D		-	-	-			
	การเก็บ ▽		-	-	-			
รายการ	เวลา	ระยะทาง	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
	(วินาที)		(เมตร)	○	□	⇨	D	
1.1 ใ้ชิ้นงานเข้าเครื่องตัดขึ้นรูป	4.53	-	●	□	⇨	D	▽	1
1.2 เครื่องตัดขึ้นรูปทำงาน*	18.00	-	●	□	⇨	D	▽	
1.3 เดินไปหยิบชิ้นงานทำความสะอาด	1.69	1.10	○	□	⇨	D	▽	
1.4 เช็ดทำความสะอาดชิ้นงาน	12.37	-	●	□	⇨	D	▽	
1.5 เดินกลับไปไปที่เครื่องตัดขึ้นรูป	1.58	1.10	○	□	⇨	D	▽	
1.6 นำชิ้นงานออกจากเครื่องตัดขึ้นรูป	2.36	-	●	□	⇨	D	▽	
รวม	22.53	2.20						
* กระบวนการนี้จะไม่นำมาบวกรวมในเวลาที่หมดของการทำงาน (การทำงานคู่ขนาน)								



ตารางที่ 2 กระบวนการเชื่อมชิ้นงาน

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต								
กระบวนการ : การเชื่อม	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน	○	4	-	-			
	ตรวจสอบ	□	-	-	-			
	เคลื่อนที่	⇒	-	-	-			
<input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอกคอย		∩	-	-	-		
	การเก็บ		▽	-	-	-		
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	⇒	∩	▽	
2.1 ใ้ชิ้นงานเข้าอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	31.79	-	●	□	⇒	∩	▽	1
2.2 เชื่อมหัวด้านที่ 1	25.15	-	●	□	⇒	∩	▽	
2.3 เชื่อมหัวด้านที่ 2	26.46	-	●	□	⇒	∩	▽	
2.4 นำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	5.73	-	●	□	⇒	∩	▽	
รวม	89.13							



ตารางที่ 3 กระบวนการทดสอบการรื้อ

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต								
	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
กระบวนการ : การทดสอบการรื้อ	ปฏิบัติงาน	○	3	-	-			
	ตรวจสอบ	□	-	-	-			
	เคลื่อนที่	⇒	2	-	-			
<input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย	D	-	-	-			
	การเก็บ	▽	-	-	-			
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	⇒	D	▽	
3.1 เดินถือชิ้นงานไปที่เครื่องทดสอบ	1.49	1.90	○	□	⇒	D	▽	1
3.2 ใ้ชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบการรื้อ	3.51	-	●	□	⇒	D	▽	
3.3 เครื่องทดสอบการรื้อทำงาน	16.00	-	●	□	⇒	D	▽	
3.4 นำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบรื้อ	8.80	-	●	□	⇒	D	▽	
3.5 เดินกลับมาเพื่อหยิบชิ้นงานใหม่	1.58	1.90	○	□	⇒	D	▽	
รวม	31.38	3.80						



ตารางที่ 4 กระบวนการตรวจสอบชิ้นงาน

กระบวนการ : การตรวจสอบชิ้นงาน	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน	○	5	-	-			
ตรวจสอบ	□	1	-	-				
เคลื่อนที่	⇒	2	-	-				
<input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอกอย	D	-	-	-			
	การเก็บ	▽	1	-	-			
รายการ	เวลา	ระยะทาง	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
	(วินาที)		(เมตร)	○	□	⇒	D	
4.1 นำชิ้นงานลงอ่างชุบน้ำยากันสนิม	2.53	-	●	□	⇒	D	▽	1
4.2 หยิบชิ้นงานขึ้นจากอ่างชุบ	1.64	-	●	□	⇒	D	▽	
4.3 เป่าลมให้ชิ้นงานแห้ง	8.29	-	●	□	⇒	D	▽	
4.4 เดินถือชิ้นงานไปยังอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	1.53	1.60	○	□	⇒	D	▽	
4.5 ใส่ชิ้นงานลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	10.05	-	●	□	⇒	D	▽	
4.6 ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา	6.54	-	○	■	⇒	D	▽	
4.7 ชุบน้ำมัน	5.64	-	●	□	⇒	D	▽	
4.8 แฝกชิ้นงานลงบรรจุภัณฑ์	18.31	-	○	□	⇒	D	▽	
4.9 เดินกลับไปยังอ่างชุบน้ำยากันสนิม	1.51	1.60	○	□	⇒	D	▽	
รวม	56.04	3.20						



ตารางที่ 5 กระบวนการทำความสะอาด

กระบวนการ : การทำความสะอาด	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน ○		5	-	-			
ตรวจสอบ □		2	-	-				
เคลื่อนที่ →		2	-	-				
<input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอกอย D		-	-	-			
	การเก็บ ▽		-	-	-			
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	→	D	▽	
5.1 ตรวจสอบสนิม	28.25	-	○	■	→	D	▽	1
5.2 นำชิ้นงานใส่เครื่องทำความสะอาด	3.49	-	●	□	→	D	▽	
5.3 เครื่องทำความสะอาดทำงาน *	10.00	-	●	□	→	D	▽	
5.4 เดินไปยังอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	1.41	1.05	○	□	→	D	▽	
5.5 นำชิ้นงานไปลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	2.61	-	●	□	→	D	▽	
5.6 ใส่ชิ้นงานลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	9.73	-	●	□	→	D	▽	
5.7 ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา	5.51	-	○	■	→	D	▽	
5.8 เดินกลับยังเครื่องทำความสะอาด	1.44	1.05	○	□	→	D	▽	
5.9 นำชิ้นงานออกจากเครื่องทำความสะอาด	2.53	-	●	□	→	D	▽	
รวม	54.97	2.10						
* กระบวนการนี้จะไม่นำมาบวกรวมในเวลาทั้งหมดของการทำงาน (การทำงานคู่ขนาน)								



ตารางที่ 6 กระบวนการบรรจุภัณฑ์ชิ้นงาน

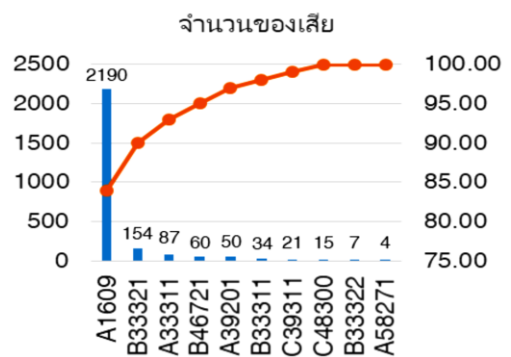
กระบวนการ : การบรรจุภัณฑ์ชิ้นงาน	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน	○		2	-	-		
ตรวจสอบ	□		1	-	-			
เคลื่อนที่	➡		2	-	-			
<input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย	D	-	-	-			
	การเก็บ	▽	-	-	-			
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	➡	D	▽	
6.1 นำชิ้นงานแช่ในน้ำมัน	2.29		●	□	➡	D	▽	1
6.2 นำชิ้นงานขึ้นจากน้ำมัน	5.66		●	□	➡	D	▽	
6.3 เดินถือชิ้นงานไปที่โต๊ะตรวจสอบ	1.54	1.04	○	□	➡	D	▽	
6.4 ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา และแพ็คชิ้นงาน	23.19		○	■	➡	D	▽	
6.5 เดินกลับไปอ่างแช่ในน้ำมัน	2.15	1.04	○	□	➡	D	▽	
รวม	34.83	2.08						

2.2 การวิเคราะห์สภาพปัญหาที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์สภาพปัญหาที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ปัญหา ได้แก่ (1) ปัญหาสนิมที่เกิดขึ้น และ (2) เวลาในกระบวนการผลิต (Cycle Time) ชิ้นส่วนต่อส่งน้ำมันเกินรอบความเร็วในการผลิต (Takt Time)

2.2.1 ปัญหาของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

ผู้วิจัยนำข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นมารวบรวมเพื่อนำมาวิเคราะห์เลือกชิ้นส่วนต่อส่งน้ำมันที่มียอดของเสียมากที่สุดโดยใช้กราฟพาเรโต (Pareto) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟพาเรโตแสดงจำนวนของเสีย

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า Part No. A1609 พบปัญหามากที่สุดร้อยละ 83.52 จากของเสียทั้งหมด ซึ่งปัญหาของเสียส่วนใหญ่เกิดจากปัญหาสนิมที่หลุดไปถึงลูกค้า คิดเป็นร้อยละ 20 จากจำนวนชิ้นงานทั้งหมด ดังรูปที่ 3

การวิเคราะห์ปัญหาของสนิมที่เกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อท่อน้ำมัน ผู้วิจัยจึงนำปัญหาดังกล่าวไปวิเคราะห์หาสาเหตุโดยใช้หลักการ Why Why Analysis ดังนี้ [4]

1. ลักษณะปัญหา: ชิ้นงานเป็นสนิม
2. Why 1: ชิ้นงานมีความชื้น
3. Why 2: มีน้ำยาในการล้างปรับสภาพผิวชิ้นงานตกค้างอยู่ในชิ้นงาน
4. Why 3: พนักงานล้างน้ำยาปรับสภาพผิวออกจากชิ้นงานไม่หมด
5. Why 4: เนื่องจากบริเวณข้อต่อท่อน้ำมันมีพื้นผิวที่ตรวจสอบยาก ทำให้น้ำยาล้างคงเหลือตกค้างอยู่

จากการวิเคราะห์สาเหตุ ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดออกแบบแนวทางในการแก้ไขปัญหาเพื่อไม่ให้ชิ้นงานที่เป็นสนิมหลุดไปถึงมือลูกค้าในหัวข้อถัดไป

2.2.2 กระบวนการผลิตเกินรอบความเร็วในการผลิต เนื่องจากเวลาในการผลิตของแต่ละกระบวนการ มีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4 รอบเวลาการผลิต 89.13 วินาทีต่อชิ้น (จากเวลาที่มากที่สุดของทุกกระบวนการ) แต่อัตราความต้องการของลูกค้า (Takt Time) = 51 วินาทีต่อชิ้น ซึ่งคำนวณมาจากความต้องการลูกค้า 460 ชิ้นต่อวัน โดยที่มีเวลาทำงาน 480 นาทีต่อวัน พักเบรกทั้งหมด 90 นาทีต่อวัน ตามสมการที่ 1

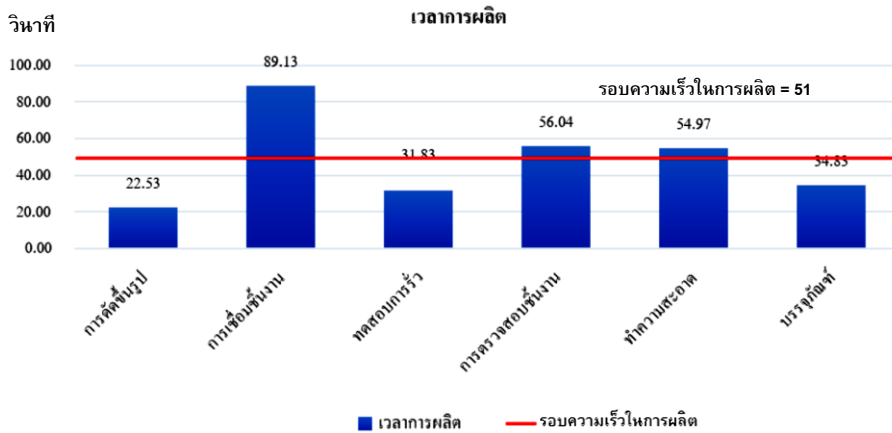
$$\text{Takt Time} = \frac{\text{เวลาทำงาน}}{\text{จำนวนที่สามารถผลิตต่อวัน}} \quad (1)$$

จากการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อน้ำมันพบว่ามี 3 กระบวนการผลิตที่เกินรอบความเร็วในกระบวนการผลิต คือ (1) การเชื่อม (2) การตรวจสอบชิ้นงาน และ (3) การทำความสะอาดชิ้นงาน ดังรูปที่ 4

การวิเคราะห์ปัญหา ผู้วิจัยได้ทำการระดมความคิด ประिक्षาระหว่างผู้จัดการแผนก จำนวน 1 คน หัวหน้าแผนก จำนวน 1 คน วิศวกรจำนวน 1 เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและหาแนวทางแก้ไขต่อไป ดังตารางที่ 7



รูปที่ 3 ปัญหาสนิมที่เกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อท่อน้ำมันของ Part No. A1609



รูปที่ 4 เวลาการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ปัญหาโดยการระดมสมอง

ปัญหา	การวิเคราะห์ปัญหา
1. เวลากระบวนการเชื่อมเกินรอบความเร็วในการผลิต	<ol style="list-style-type: none"> 1. พนักงานการเชื่อมขาดประสบการณ์หรือทักษะในการเชื่อม 2. ในกระบวนการเชื่อมชิ้นงานไม่มีมาตรฐานการผลิตกำหนดว่าต้องเชื่อมชิ้นงานในลักษณะใด 3. การใส่ชิ้นงานในเครื่องจักร ต้องมีการเคาะปรับท่าแหน่งให้งานตรงกับตำแหน่งเชื่อม
2. เวลากระบวนการตรวจสอบชิ้นงานเกินรอบความเร็วในการผลิต	<ol style="list-style-type: none"> 1. พนักงานบางคนขาดทักษะในการตรวจสอบชิ้นงาน 2. ขั้นตอนในกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานมีขั้นตอนที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น 3. วัตถุดิบมีผลต่อการตรวจสอบ เนื่องจากวัตถุดิบมีผิวที่ตรวจสอบยาก พนักงานต้องมีทักษะในการตรวจสอบ
3. เวลากระบวนการทำความสะอาดเกินรอบความเร็วในการผลิต	<ol style="list-style-type: none"> 1. พนักงานในกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานขาดทักษะในการทำงาน 2. ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานมีขั้นตอนหลายขั้นตอนโดยเป็นสัดส่วนของงานที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงาน 3. วัตถุดิบมีผลต่อการตรวจสอบ เพราะว่าวัตถุดิบมีผิวที่ตรวจสอบยาก พนักงานจำเป็นต้องมีทักษะในการตรวจสอบ



2.3 การออกแบบแนวทางในการแก้ไขปัญหา

2.3.1 แนวทางแก้ไขปัญหาสนิมที่ตัวชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ปัญหาสนิมที่เกิดขึ้นกับตัวชิ้นงานผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแนวทางในการแก้ไขปัญหา โดยทำการศึกษามีกระบวนการใดบ้างที่สามารถแก้ไขปัญหาสนิมที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบแนวทางในการแก้ไขปัญหาไว้ 3 แนวทาง

1. การจุ่มน้ำยากันสนิมหลังกระบวนการล้างปรับสภาพผิว
2. การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยการชุบสังกะสี
3. การเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน โดยทำการทดลองใช้ชิ้นงานอย่างละ 50 ชิ้น ทั้ง 3 แนวทาง

2.3.2 แนวทางแก้ไขปัญหาคะบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันเกินรอบเวลาเร็วในการผลิตโดยใช้หลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้ [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สุริยาพรและบุษบา ศึกษาเรื่องการปรับปรุงกระบวนการและการจัดสายสมดุลสายการผลิต โดยใช้เทคนิค ECRS และจัดสมดุลสายการผลิตมาปรับปรุงสายการผลิต ผลจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าสายการผลิตมีอัตราผลผลิตและประสิทธิภาพของการทำงานเพิ่มขึ้น [6] พิเชษฐ และสุกานดา ศึกษาเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ โดยทำการศึกษาการไหลของงานด้วยแผนภูมิการไหล และทำการวิเคราะห์หงานด้วยแผนภาพวิเคราะห์หงาน (Yamazumi Chart) หลังจากนั้นทำการปรับปรุงด้วยหลัก ECRS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการ พบว่าสามารถลดขั้นตอนการทำงาน

และเวลาการทำงานในการผลิตลงได้ [7] และ ธนิตา ศึกษาเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิต โดยประยุกต์ใช้หลักการเคลื่อนไหวและเวลา การปรับสมดุลสายการผลิตและลดความสูญเปล่าด้วย ECRS พบว่ากระบวนการหลังปรับปรุงงานมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและค่าความเท่าเทียมในการกระจายงานดีขึ้นจากกระบวนการทำงานเดิม [8]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคการปรับปรุงงาน ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange and Simplify) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาคะบวนการผลิต เพื่อลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น หรือซ้ำซ้อน รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงาน (Jig & Fixture) เพื่อให้การทำงานสะดวกและพนักงานสามารถทำงานได้แม่นยำมากขึ้น สำหรับขั้นตอนการตัดขึ้นรูปและการเชื่อม ได้นำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้

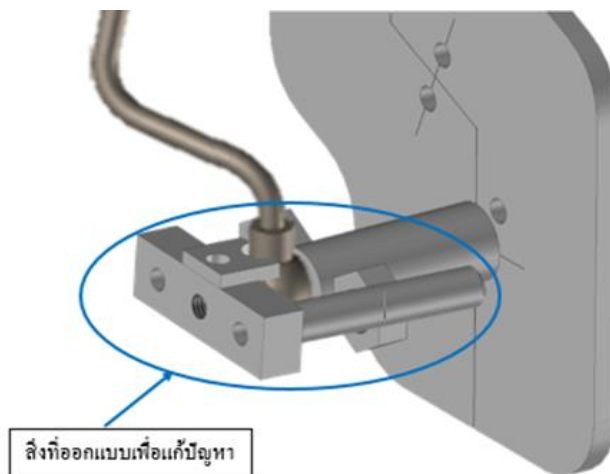
ในตารางที่ 8 ผู้วิจัยนำ ECRS มาประยุกต์ใช้ ดังนี้ (1) Simplify: เนื่องจากพนักงานเชื่อมบางคนขาดประสบการณ์หรือทักษะในการเชื่อมชิ้นงาน ทำให้ต้องมีการเคาะเพื่อปรับหาตำแหน่งให้งานตรงกับตำแหน่งเชื่อม ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบอุปกรณ์เพื่อกำหนดตำแหน่งในการเชื่อม ดังรูปที่ 5

การออกแบบอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งหรืออุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงาน (Jig & Fixture) เป็น การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อลดเวลาในกระบวนการเชื่อมและช่วยจับยึดชิ้นงานในขั้นตอนการเชื่อมท่อส่งน้ำมันเข้ากับฐานยึดปลายท่อ (แป้นยึด) โดยตำแหน่งของการเชื่อมต้องการความแม่นยำของตำแหน่งการเชื่อมทั้งแนวแกน X, Y และ Z รวมถึงความแม่นยำขององศาการวางตำแหน่งแนวท่อส่งน้ำมัน



ตารางที่ 8 ขั้นตอนการตัดชิ้นรูปและการเชื่อมโดยนำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้

ก่อนการปรับปรุง		วิธีการปรับปรุง	แนวทางการแก้ไข	
ลำดับ	ลักษณะงาน		ลำดับ	ลักษณะงาน
1.1	ใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องตัดชิ้นรูป	-	1.1	ใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องตัดชิ้นรูป
1.2	เครื่องตัดชิ้นรูปทำงาน	-	1.2	เครื่องตัดชิ้นรูปทำงาน
1.3	เช็ดทำความสะอาดชิ้นงาน	-	1.3	เช็ด ทำ ความ สะอาด ชิ้นงาน
1.4	นำชิ้นงานออกจากเครื่องตัดชิ้นรูป	-	1.4	นำชิ้นงานออกจากเครื่องตัดชิ้นรูป
2.1	ใส่ชิ้นงานเข้าอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	S	2.1	ใส่ชิ้นงานเข้าอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง
2.2	เชื่อมหัวชิ้นงานด้านที่ 1	-	2.2	เชื่อมหัวชิ้นงานด้านที่ 1
2.3	เชื่อมหัวชิ้นงานด้านที่ 2	-	2.3	เชื่อมหัวชิ้นงานด้านที่ 2
2.4	นำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	S	2.4	นำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง



รูปที่ 5 การออกแบบแก้ไขอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง



สำหรับ ขั้นตอน การทดสอบ ร้ว และ การตรวจสอบชิ้นงานได้นำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้ ดังตารางที่ 9 และตารางที่ 10

จากตารางที่ 9 ผู้วิจัยนำ ECRS มาใช้ดังนี้ (1) Combine: ผู้วิจัยได้ทำการยุบรวมขั้นตอนที่ 4.1 ใส่ลงในน้ำของเครื่องทดสอบการร้ว เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่สามารถทำพร้อมกันได้ ไม่ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ (2) Eliminate: ขจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในขั้นตอน 4.2 เป่าลมชิ้นงาน เพราะเมื่อรวมขั้นตอนที่ 4.1 เข้ากับ 3.2 ส่งผลให้ชิ้นงานไม่จำเป็นต้องทำการเป่าลมแห้ง (3) Simplify: เนื่องจากพนักงานบางคนขาดทักษะในการตรวจสอบชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบบรรจุภัณฑ์ใหม่ เพื่อให้พนักงานสามารถนับ

ผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น โดยการออกแบบบรรจุภัณฑ์ใหม่จะมีช่องสำหรับชิ้นงานไม่เกิด 10 ชั้น/บรรจุภัณฑ์ ดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

จากตารางที่ 10 ผู้วิจัยนำ ECRS มาใช้ดังนี้ (1) Eliminate: ผู้วิจัยได้ทำการการขจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในขั้นตอน 5.1, 5.6, 6.1, 6.2 ออก เนื่องจากหลังจากการเพิ่มกระบวนการชุบสังกะสีที่ชิ้นงาน ทำให้สามารถลดขั้นตอนดังกล่าวได้ (2) Simplify: ผู้วิจัยได้ทำการสร้างอุปกรณ์อย่างง่ายเพื่อให้พนักงานทำงานได้ง่ายขึ้น โดยการเปลี่ยนวิธีการนับบรรจุภัณฑ์ใหม่ ดังรูปที่ 7 โดยระยะเวลาการผลิต หลังปรับปรุงโดยหลักการ ECRS แสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 9 ขั้นตอนการทดสอบการร้วและการตรวจสอบชิ้นงาน

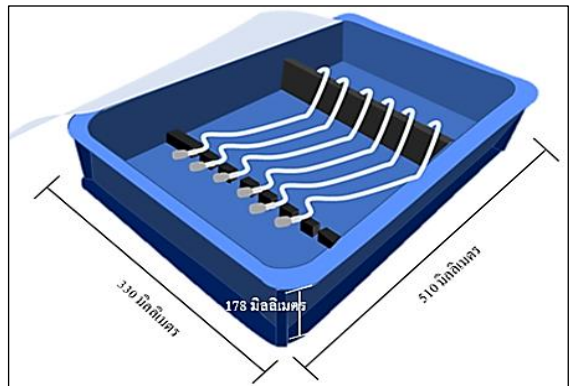
ก่อนการปรับปรุง		วิธีการปรับปรุง	แนวทางการแก้ไข	
ลำดับ	ลักษณะงาน		ลำดับ	ลักษณะงาน
3.1	ใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบการร้ว	-	3.1	ใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบการร้ว
3.2	เครื่องทดสอบการร้วทำงาน	C	3.2, 4.1	เครื่องทดสอบการร้วทำงาน
3.3	นำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบการร้ว	-	3.3	นำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบการร้ว
4.1	นำชิ้นงานชุบน้ำยากันสนิม	C		
4.2	เป่าลมชิ้นงาน	E		
4.3	ใส่ชิ้นงานลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	-	3.4	ใส่ชิ้นงานลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง
4.4	ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา	-	3.5	ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา
4.5	นำชิ้นงานชุบน้ำมัน	E		
4.6	การแพ็คสินค้าลงบรรจุภัณฑ์	S	3.6	การแพ็คสินค้าลงบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 10 ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงาน

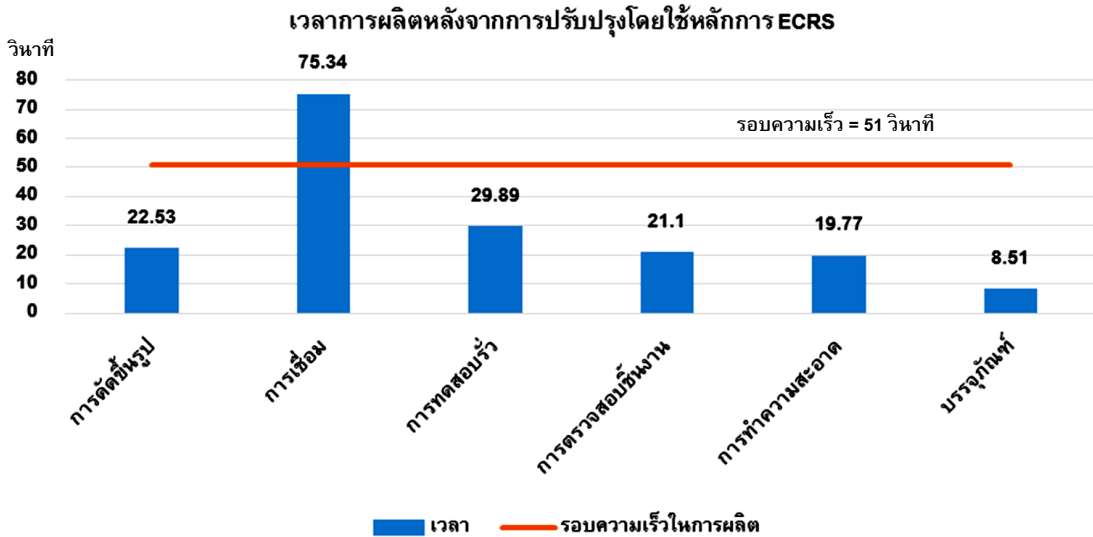
ก่อนการปรับปรุง		วิธีการปรับปรุง	แนวทางการแก้ไข	
ลำดับ	ลักษณะงาน		ลำดับ	ลักษณะงาน
5.1	ตรวจสอบสนิมที่ชิ้นงาน	E		
5.2	ใส่ชิ้นงานในเครื่องทำความสะอาด	-	5.1	ใส่ชิ้นงานในเครื่องทำความสะอาด
5.3	เครื่องทำความสะอาดทำงาน	-	5.2	เครื่องทำความสะอาดทำงาน
5.4	นำชิ้นงานออกจากเครื่องทำความสะอาด	-	5.3	นำชิ้นงานออกจากเครื่องทำความสะอาด
5.5	นำชิ้นงานใส่ลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	-	5.4	นำชิ้นงานใส่ลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง
5.6	ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา	E		
6.1	แช่ชิ้นงานในน้ำมัน	E		
6.2	นำชิ้นงานขึ้นจากน้ำมัน	E		
6.3	ตรวจสอบด้วยสายตาและแพ็คชิ้นงาน	S	5.5	ตรวจสอบด้วยสายตาและแพ็คชิ้นงาน



รูปที่ 6 การบรรจุภัณฑ์ก่อนแก้ไข



รูปที่ 7 การออกแบบบรรจุภัณฑ์ใหม่



รูปที่ 8 เวลาการผลิตหลังปรับปรุงโดยหลักการ ECRS

หลังจากการใช้หลักการ ECRS ปรับปรุงการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน พบว่ามีกระบวนการที่ลดลงทำให้สายการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันไม่มีความสมดุลในปริมาณงาน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการจัดสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน

2.3.3 การจัดสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน

2.3.3.1 การจัดสมดุลสายการผลิตของกระบวนการตัดชิ้นรูปและการเชื่อม

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันหลังการปรับปรุง ECRS ในกระบวนการตัดชิ้นรูปจะมีเวลาที่ว่างขณะรอเครื่องจักรทำงาน และในส่วนกระบวนการเชื่อมชิ้นงานจะมีเวลาที่เกินรอบความเร็วในการผลิต ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการย้ายงานในส่วนของขั้นตอน (เดิม) ที่ 2.1 การใส่ชิ้นงานลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง (หลังการออกแบบแก้ไขอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง)

และขั้นตอน (เดิม) ที่ 2.4 การถอดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง ออกจากกระบวนการเชื่อมชิ้นงาน เพื่อลดเวลาในกระบวนการเชื่อมให้น้อยกว่ารอบเวลาในการผลิต และส่งผลให้กระบวนการตัดชิ้นรูปพนักงานประจำเครื่องไม่ต้องรอเครื่องจักร

2.3.3.2 การจัดสมดุลสายการผลิตของกระบวนการทดสอบการร้วและการตรวจสอบชิ้นงาน

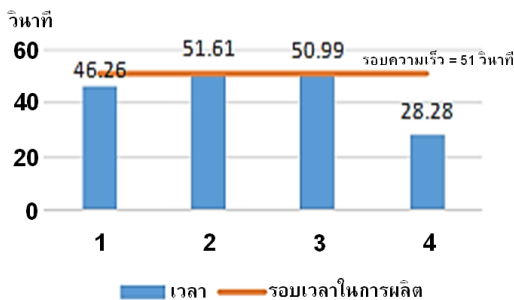
กระบวนการทดสอบการร้วและการตรวจสอบชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันหลังการปรับปรุง ECRS โดยกระบวนการทดสอบการร้วและกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานยังมีเวลาที่น้อยกว่ารอบความเร็วในการผลิต และต้องการจัดสมดุลสายการผลิต จึงทำการย้ายกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานไปรวมกับกระบวนการทดสอบการร้วของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดความสมดุลในการผลิตและยังสามารถลดพนักงานในกระบวนการทำงาน



2.3.3.3 กระบวนการทำความสะอาดและบรรจุภัณฑ์ ชั้นส่วนทอส่งน้ำมัน

กระบวนการทำความสะอาดและการบรรจุ
ภัณฑ์ชั้นส่วนทอส่งน้ำมันหลังการปรับปรุง ECRS ใน
ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดชั้นส่วนทอส่ง
น้ำมันมีเวลาที่น้อยกว่าความเร็วในการผลิตและ
กระบวนการบรรจุภัณฑ์ชิ้นงานที่ใช้เวลาน้อย ดังนั้น
ผู้วิจัยจึงทำการจัดสมดุลสายการผลิตโดยการย้าย
กระบวนการบรรจุภัณฑ์ชิ้นงานไปรวมกับขั้นตอนการ
ทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อสร้างสมดุลในสายการผลิต
และยังสามารถลดพนักงานในกระบวนการทำงานได้

การจัดสมดุลสายการผลิตโดยใช้เทคนิคการจัด
สมดุลของปริมาณงาน คือ การจัดสมดุลสายการผลิต
ของพนักงานแต่ละคน โดยอาศัยเวลาจากรอบเวลาใน
การผลิต หลังจากจัดสมดุลสายการผลิตแล้วสามารถ
นำมาทำเป็นแผนภูมิได้ ดังรูปที่ 9



- หมายเหตุ**
- 1 คือ กระบวนการติดตั้งรูปและการเชื่อม
 - 2 คือ การเชื่อมชิ้นงาน
 - 3 คือ กระบวนการทดสอบการรั่วและการตรวจสอบชิ้นงาน
 - 4 คือ กระบวนการทำความสะอาดและบรรจุภัณฑ์ชั้นส่วน
ทอส่งน้ำมัน

รูปที่ 9 เวลาการผลิตหลังจากการปรับปรุงโดยใช้
เทคนิคการจัดสมดุลของปริมาณงาน

3. ผลการวิจัย

3.1 การวิจัยด้านจำนวนของเสียหลังปรับปรุง

จากผลวิจัยด้านจำนวนของเสียหลังปรับปรุงพบว่า
แนวทางที่ 2 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยการชุบสังกะสี
เพิ่ม จะทำให้ชิ้นงานไม่เกิดสนิมและทำการติดตามผล
จากยอดของเสียที่เกิดขึ้น พบว่าจากเดิมพบปัญหาหรือระยะ
20.00 ของจำนวนชิ้นงานที่ส่งไปล้าง หลังทำการเพิ่ม
กระบวนการชุบสังกะสี พบว่าจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น
ลดลงเหลือร้อยละ 0.00

3.2 กระบวนการผลิตชั้นส่วนทอส่งน้ำมันรถ แทรกเตอร์หลังปรับปรุง

กระบวนการผลิตชั้นส่วนทอส่งน้ำมันรถ
แทรกเตอร์หลังปรับปรุง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบ
แผนภูมิการไหลดังตารางที่ 11 – 14 ตามลำดับ ซึ่งมี
รายละเอียดดังนี้

การวิจัยด้านกระบวนการผลิตชั้นส่วนทอส่งน้ำมัน
รถแทรกเตอร์หลังปรับปรุง โดยพิจารณาหา
กระบวนการผลิตโดยการขจัดบางกิจกรรมที่ไม่เกิด
คุณค่าของขั้นตอนการทำงานรวมทั้งแนวทางในการ
ปรับปรุงเพื่อลดขั้นตอนการผลิตชั้นส่วนทอส่ง
น้ำมัน และกำหนดมาตรฐานการทำงานใหม่ ส่งผลให้
สามารถลดขั้นตอนการทำงานจากเดิม 26 ขั้นตอน
ย่อยเหลือ 18 ขั้นตอนย่อย สามารถลดขั้นตอนการ
ผลิตย่อยคิดเป็นร้อยละ 30.77

การวิจัยด้านเวลาหลังการปรับปรุง พบว่าการลด
ความสูญเปล่า (ECRS) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต
ชั้นส่วนทอส่งน้ำมัน โดยการขจัดกิจกรรมที่ไม่เกิด
คุณค่าของการผลิตชั้นส่วนทอส่งน้ำมันจากขั้นตอน
การทำงานพร้อมทั้งปรับปรุงเพื่อลดรอบเวลาการ
ทำงาน และกำหนดมาตรฐานการทำงานใหม่เพื่อให้



พนักงานทำงานง่ายขึ้น ส่งผลให้สามารถลดรอบเวลาการผลิตลงจากเดิม 89.13 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 51.61 วินาทีต่อชิ้น (เนื่องจากกระบวนการที่ 2 การเชื่อมชิ้นงานนั้นเป็นทักษะเฉพาะ จึงทำให้ไม่สามารถย้ายงานออกไปยังสถานีอื่นได้ ส่งผลทำให้เวลาในกระบวนการผลิต (Cycle Time) เกินรอบความเร็วในการผลิต (Takt Time) อยู่ประมาณ 1 วินาที) คิดเป็นร้อยละ 42.10 และลดเวลาการผลิตรวม จากเดิม 289.33 วินาทีต่อชิ้น ลดลงเหลือ 177.14 วินาทีต่อชิ้น

ลดลงได้ถึงร้อยละ 38.78 และยังสามารถลดจำนวนพนักงานจากเดิม 6 คน เหลือเพียง 4 คน (จากเทคนิคการจัดสมดุลของปริมาณงาน คือ (1) กระบวนการตัดขึ้นรูปและการเชื่อม ใช้พนักงาน 1 คน (2) การเชื่อมชิ้นงานใช้พนักงาน 1 คน (3) กระบวนการทดสอบการรั่วและการตรวจสอบชิ้นงานใช้พนักงาน 1 คน และ (4) กระบวนการทำความสะอาดและบรรจุภัณฑ์ชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันใช้พนักงาน 1 คน)

ตารางที่ 11 แผนภูมิการไหลของกระบวนการตัดขึ้นรูปและการเชื่อม

กระบวนการ : ตัดขึ้นรูปและการเชื่อม	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน ○		6	6	-			
ตรวจสอบ □		-	-	-				
เคลื่อนที่ ⇨		2	3	-				
<input type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย ⊙		-	-	-			
	การเก็บ ▽		-	-	-			
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	⇨	⊙	▽	
1.1 นำชิ้นงานออกจากเครื่องตัดรูป	3.63	-	●	□	⇨	⊙	▽	1
1.2 ใ้ชิ้นงานเข้าเครื่องตัดขึ้นรูป	4.09	-	●	□	⇨	⊙	▽	
1.3 เครื่องตัดขึ้นรูปทำงาน*	18.00	-	●	□	⇨	⊙	▽	
1.4เดินถือชิ้นงานไปทำความสะอาด	1.69	1.10	○	□	⇨	⊙	▽	
1.5 เช็ดทำความสะอาดชิ้นงาน	11.46	-	●	□	⇨	⊙	▽	
1.6เดิน ไปยังอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	1.74	1.64	○	□	⇨	⊙	▽	
1.7 นำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	5.73	-	●	□	⇨	⊙	▽	
1.8ใ้ชิ้นงานเข้าอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	15.38	-	●	□	⇨	⊙	▽	
1.9 เดินกลับไปไปยังเครื่องตัดขึ้นรูป	2.54	2.74	○	□	⇨	⊙	▽	
รวม	46.26	5.48						
* กระบวนการนี้จะไม่นำมาบวกรวมในเวลาทั้งหมดของการทำงาน (การทำงานคู่ขนาน)								



ตารางที่ 12 แผนภูมิการไหลของกระบวนการเชื่อม

กระบวนการ : การเชื่อมชิ้นงาน	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน ○		4	2	2			
ตรวจสอบ □		-	-	-				
เคลื่อนที่ ⇨		-	-	-				
<input type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย D		-	-	-			
	การเก็บ ▽		-	-	-			
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	⇨	D	▽	
2.2 เชื่อมหัวชิ้นงานด้านที่ 1	25.15	-	●	□	⇨	D	▽	1 (คน)
2.3 เชื่อมหัวชิ้นงานด้านที่ 2	26.46	-	●	□	⇨	D	▽	
รวม	51.61	-						

ตารางที่ 13 แผนภูมิการไหลของกระบวนการทดสอบการรั่วและการตรวจสอบชิ้นงาน

กระบวนการ : การทดสอบการรั่วและการตรวจสอบชิ้นงาน	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง			
	ปฏิบัติงาน ○		8	4	4			
ตรวจสอบ □		1	1	-				
เคลื่อนที่ ⇨		4	3	1				
<input type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย D		-	-	-			
	การเก็บ ▽		1	1	-			
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	⇨	D	▽	
3.1 เดินถือชิ้นงานไปที่เครื่องทดสอบ	1.76	1.90	○	□	⇨	D	▽	1
3.2 ใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบรั่ว	3.26	-	●	□	⇨	D	▽	
3.3 เครื่องทดสอบรั่วทำงาน	16.00	-	●	□	⇨	D	▽	
3.4 นำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบรั่ว	7.71	-	●	□	⇨	D	▽	
3.5 เดินไปยังอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	1.71	1.60	○	□	⇨	D	▽	
3.6 ใส่ชิ้นงานลงอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	9.34	-	●	□	⇨	D	▽	
3.7 ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา	5.02	-	○	■	⇨	D	▽	
3.8 ใส่ชิ้นงานลงกล่องบรรจุภัณฑ์	3.23	-	○	□	⇨	D	▽	
3.9 เดินกลับไปยังจุดทดสอบรั่ว	2.96	3.50	○	□	⇨	D	▽	
รวม	50.99	7.00						

ตารางที่ 14 แผนภูมิการไหลของกระบวนการทำความสะอาดและบรรจุภัณฑ์ชิ้นงาน

กระบวนการ : การทำความสะอาดและบรรจุภัณฑ์ชิ้นงาน	สัญลักษณ์							
	ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง					
ปฏิบัติงาน ○	7	4	3					
ตรวจสอบ □	3	1	2					
เคลื่อนที่ ⇨	4	2	2					
<input type="checkbox"/> วิธีการปัจจุบัน <input checked="" type="checkbox"/> วิธีการปรับปรุง	การรอคอย ⊖	-	-	-				
	การเก็บ ▽	-	1	-				
รายการ	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					พนักงาน (คน)
			○	□	⇨	⊖	▽	
4.1 นำชิ้นงานออกจากเครื่องทำความสะอาด	2.17	-	●	□	⇨	⊖	▽	1
4.2 ใส่งานเข้าเครื่องทำความสะอาด	3.3	-	●	□	⇨	⊖	▽	
4.3 เครื่องทำความสะอาดทำงาน*	10.00	-	●	□	⇨	⊖	▽	
4.4 เดินถือชิ้นงานไปยังโต๊ะตรวจสอบ	1.54	1.05	○	□	⇨	⊖	▽	
4.5 นำชิ้นงานใส่ลงบนอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง	8.73	-	●	□	⇨	⊖	▽	
4.6 ตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา	5.77	-	○	■	⇨	⊖	▽	
4.7 ใส่งานลงกล่องบรรจุภัณฑ์	5.23	-	○	□	⇨	⊖	▽	
4.8 เดินไปยังเครื่องทำความสะอาด	1.54	1.04	○	□	⇨	⊖	▽	
รวม	28.28	2.08						
* กระบวนการนี้จะไม่นำมาบวกรวมในเวลาทั้งหมดของการทำงาน (การทำงานดูจนาน)								

4. บทสรุป

การศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันเป็น การศึกษาขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันตั้งแต่ ขั้นตอนการตัดขึ้นรูปชิ้นงานจนถึงขั้นตอนการ ตรวจสอบชิ้นงานและบรรจุภัณฑ์ชิ้นงาน ซึ่งในเป็น การศึกษาแบ่งเป็นสองส่วนคือ การศึกษากระบวนการ ผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันนอกโรงงาน และการศึกษา กระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันภายในโรงงาน

การผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันนอกโรงงานที่ศึกษา คือกระบวนการปรับสภาพผิวชิ้นงาน ซึ่งจาก

การศึกษากระบวนการปรับสภาพชิ้นงานมีชิ้นงานที่ เกิดปัญหาสนิม ผู้วิจัยจึงใช้หลักการ Why-Why Analysis เพื่อวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งทำ การหาแนวทางแก้ไข ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้น สอดคล้อง กับงานวิจัยของสุพัฒตรา (2555) [9] ที่ศึกษาวิธีการ ลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อ ไอเสียรถจักรยานยนต์ โดยผู้วิจัยได้เพิ่มกระบวนการ ชุบน้ำเกลือเพื่อแก้ไขปัญหามาจากเดิมพบปัญหาที่ร้อยละ 20 หลังการปรับปรุงแก้ไขไม่พบปัญหาของเสีย สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้



กระบวนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมันภายในโรงงานปัญหาที่พบคือเวลาการผลิต (Cycle Time) เกินรอบความเร็วในการผลิต (Takt Time) ทางผู้วิจัยจึงทำการระดมสมองวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น ร่วมกับพนักงานที่เกี่ยวข้อง พบว่าสาเหตุเกิดจากมีบางขั้นตอนที่มากเกินไปจนความจำเป็น วัตถุประสงค์มีผลต่อการตรวจสอบ สัดส่วนของงานที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงาน ส่งผลให้เวลาการผลิต (Cycle Time) เกินรอบความเร็วในการผลิต (Takt Time) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐนนท์ (2555) [10] และภาวิณี (2551) [11] คือการศึกษาเกี่ยวกับการลดต้นทุนและการมุ่งเน้นการลดต้นทุนของสินค้าที่เกิดจากกระบวนการผลิต หลังจากทราบสาเหตุของปัญหา ผู้วิจัยได้นำหลักการลดความสูญเปล่าด้วยหลักการ ECRS มาใช้ในเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหา และสอดคล้องกับงานวิจัยรัตนพงษ์ (2561) [12] และศุภฤกษ์ (2559) [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิต ลดขั้นตอนการปฏิบัติงาน กำหนดเวลามาตรฐาน และพัฒนามาตรฐานการปฏิบัติงานของกระบวนการผลิตโดยการประยุกต์ใช้การปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยหลักการลดความสูญเปล่า ECRS ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการลดและปรับขั้นตอนการทำงานตามหลักการลดความสูญเปล่า ECRS โดยสามารถลดขั้นตอนการทำงานจากเดิม 26 ขั้นตอนย่อย เหลือ 18 ขั้นตอนย่อยคิดเป็นร้อยละ 30.77 และสามารถลดเวลาการผลิตจากเดิม 89.13 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 51.61 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นร้อยละ 42.10 และลดเวลาการผลิตรวม จากเดิม 289.33 วินาทีต่อชิ้น ลดลงเหลือ 177.14 วินาทีต่อชิ้น ลดลงร้อยละ 38.78

5. ข้อเสนอแนะ

1. กำหนดแนวทางในการทำงานใหม่ให้เป็นลายลักษณ์อักษรเพื่อจัดทำเป็นคู่มือการทำงาน
2. การศึกษารั้งนี้เป็นการศึกษาเฉพาะการปรับปรุงขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนท่อส่งน้ำมัน A1609 เท่านั้น ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงกระบวนการทำงานร่วมกับชิ้นงานชนิดอื่นๆ ด้วยเป็นเรื่องที่นำให้ความสนใจในการดำเนินการศึกษาต่อไปในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Klinmon, Production efficiency improvement in lens surface grinding process, Thesis, Burapha University, Thailand, 2016. (in Thai)
- [2] R. Musikapong, Application of value stream mapping to improve the production process in plastic film industry: A case study of TPK company, Thesis, Burapha University, Thailand, 2015. (in Thai)
- [3] S. Vanhaku, Line balancing of 4 heads 2 platters head disk head assembly line, Thesis, Thailand, 2015. (in Thai)
- [4] R. Kanjanapanyakom, Industrial work study, Top Publishing Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2009. (in Thai).
- [5] J. Santos, R. Wysk and J.M. Torres, Improving production with lean thinking. John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 2015.



- [6] S. Panthong and B. Phruksaphanrat, Process improvement and line balancing for heat pipe production line by computer simulation, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2020. (in Thai)
- [7] P. Pukasorn and S. Sriaram, Efficiency increase in a production process of wooden furniture a case study: Indexinterfern company limited, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2012. (in Thai)
- [8] T. Sunarak, Production line efficiency improvement: A case of stator D frame model production line, Thesis, Mahanakorn University of Technology, Thailand, 2012. (in Thai)
- [9] S. Ketsarapong, Defect reduction in process of motorcycle exhaust parts, Thesis, Kasetsart University Si Racha Campus, Thailand, 2012. (in Thai).
- [10] N.Jivapaisarnpong, Efficiency improvement in supply chain operation of plastic packaging factory, Thesis, Dhurakij Pundit University, Thailand, 2012. (in Thai)
- [11] P. Ardparu, Loss reduction in circuit breaker factory, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 2008. (in Thai)
- [12] R. Pongsuwan, Efficiency improvement work in process applying of production, the principle of ECRS case study in P.C. Takashima Co., LTD., Thesis, Rajabhat Rajanagarindra University, Thailand, 2018. (in Thai)

การปรับปรุงกระบวนการป้อนชิ้นรูปในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์

นพมณี วัฒนสังสุทธิ์* และ วรพจน์ มีถม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: nopmanee_w@hotmail.com

วันที่รับบทความ: 19 กุมภาพันธ์ 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 19 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 7 กันยายน 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 ตุลาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการป้อนชิ้นรูปในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ โดยศึกษาชิ้นงาน BRACE-FR PLR UPR HINGE ในสายการผลิต H ซึ่งพบว่า กระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์ใช้เวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องป้อนเฉลี่ย 8.18 นาทีต่อครั้ง และใช้เวลาในกระบวนการผลิตป้อนชิ้นรูปเฉลี่ย 0.81 นาทีต่อชิ้น ทำให้ได้ปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลาเฉลี่ย เท่ากับ 422 ชิ้นต่อชั่วโมง ซึ่งไม่เป็นไปตามแผนที่ได้กำหนดไว้คือ 450 ชิ้นต่อชั่วโมง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์และเพิ่มปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลา โดยใช้การศึกษางานด้วยเทคนิคตั้งคำถาม 5W1H หลักการ ECRS และหลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหว ซึ่งจะออกแบบวิธีการทำงานใหม่ในกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์และสร้างอุปกรณ์ขนถ่ายเศษชิ้นงานในขั้นตอนที่ 2 ของกระบวนการผลิตป้อนชิ้นรูป รวมไปถึงการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของปุ่มกดแฮนด์สวีตซ์ใหม่ ผลการปรับปรุง พบว่า สามารถลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ได้ จากเดิมเฉลี่ย 8.18 นาทีต่อครั้ง เป็น 5.51 นาทีต่อครั้ง คิดเป็นร้อยละ 32.64 และปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้นจากเดิมเฉลี่ย 422 ชิ้นต่อชั่วโมง เป็น 474 ชิ้นต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 12.32

คำสำคัญ: อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์; การปรับปรุงกระบวนการ; เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H; หลักการ ECRS; หลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหว

Improvement of Pressing Process in Automotive Industry

Nopmanee Wattanasungsuth* and Warapoj Meethom

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

* Corresponding author, E-mail: nopmanee_w@hotmail.com

Received: 19 February 2021; Revised 19 July 2021; Accepted: 7 September 2021

Online Published: 30 October 2021

Abstract: This research was the improvement of pressing process in the automotive industry that studied BRACE-FR PLR UPR HINGE part in H production line. Which found that the average time of the die setting process was 8.18 minutes per time and the average time of pressing process was 0.81 minutes per piece. Resulting the average production rate was 422 pieces per hour which did not achieve the production plan at 450 pieces per hour. Therefore, this research aimed to improve the working method to decrease the time of the die setting process and increase the production rate by using the work-study with 5W1H question technique, ECRS principle, and the principle of motion economy. Which designed the new working method for the die setting process and made the scrap conveyor in process 2 for the pressing process, including changing the new location of hand switches. The results of improvement showed that the average time for die setting decreased from 8.18 minutes per time to 5.51 minutes per time or 32.64% and the average production rate increased from 422 pieces per hour to 474 pieces per hour or 12.32%.

Keywords: Automotive Industry, Improvement of Process, 5W1H Question Technique, ECRS Principle, Principle of Motion Economy



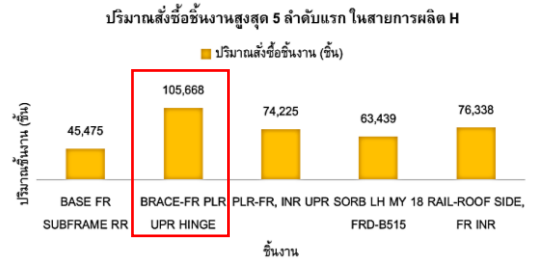
1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์และการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการพัฒนาเศรษฐกิจภายในประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมเครื่องหนัง และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงถือเป็นสาขาในการผลิตที่สร้างรายได้หลักให้กับประเทศและเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการแข่งขันกันอย่างมาก บริษัทจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงกระบวนการ โดยมุ่งไปที่การปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ ต้นทุนในการผลิตลดลง และสร้างความน่าเชื่อถือให้กับบริษัท เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทที่ทำการป้อนชิ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์ให้กับบริษัทชั้นนำทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ จากการศึกษาสายการผลิต H ซึ่งมีปริมาณสั่งซื้อชิ้นงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับสายการผลิตอื่น ดังแสดงในรูปที่ 1 ในสายการผลิต H มีชิ้นงานที่มีปริมาณสั่งซื้อสูงสุด 5 ลำดับแรก ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาข้อมูลในรูปที่ 2 จะพบว่าชิ้นงาน BRACE-FR PLR UPR HINGE เป็นชิ้นงานที่มีปริมาณสั่งซื้อมากที่สุดในสายการผลิตนี้ แสดงตัวอย่างชิ้นงานได้ดังรูปที่ 3 ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาชิ้นงาน BRACE-FR PLR UPR HINGE สำหรับกระบวนการป้อนชิ้นรูปชิ้นงาน จะประกอบไปด้วย 2 กระบวนการหลักด้วยกัน คือ กระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตป้อนชิ้นรูป



รูปที่ 1 กราฟแสดงปริมาณสั่งซื้อชิ้นงานทั้งหมดของแต่ละสายการผลิต



รูปที่ 2 กราฟแสดงปริมาณสั่งซื้อชิ้นงานสูงสุด 5 ลำดับแรก ในสายการผลิต H



รูปที่ 3 ชิ้นงาน BRACE-FR PLR UPR HINGE



เมื่อทำการศึกษา พบว่า ในกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์นั้นมีการใช้เวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊มเฉลี่ย 8.18 นาทีต่อครั้ง และใช้เวลาในกระบวนการผลิตปั๊มชิ้นรูปเฉลี่ย 0.81 นาทีต่อชิ้น ทำให้ได้ปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลาเฉลี่ย เท่ากับ 422 ชิ้นต่อชั่วโมง ซึ่งไม่เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ คือ 450 ชิ้นต่อชั่วโมง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์และเพิ่มปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลา

กฤตกร [1] ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตลูกกลิ้งสายพานลำเลียงเพื่อลดรอบเวลาและเพิ่มผลผลิตในสายการผลิต จึงใช้เทคนิค 5W1H และหลักการ ECRS โดยออกแบบปรับปรุงอุปกรณ์ทำงานและจัดสมดุลสายการผลิต ซึ่งพบว่า รอบเวลาในการผลิตลดลง จากเดิม 75.62 วินาที เหลือ 57.94 วินาที และผลผลิตเพิ่มขึ้น จากเดิม 376 ชิ้นต่อวัน เป็น 495 ชิ้นต่อวัน

พิชญ์ [2] ทำการเพิ่มผลผลิตในสายการผลิตเครื่องทำน้ำอุ่นให้กับเครื่องทำน้ำอุ่นรุ่น Super Slim อย่างน้อยร้อยละ 10 โดยใช้การศึกษางาน (Work Study) และการศึกษาการเคลื่อนไหวแบบไมโคร (Micromotion Study) ผลการปรับปรุง พบว่า รอบเวลาการผลิตจาก 164.07 วินาที เหลือ 105.80 วินาที และสามารถเพิ่มผลผลิตของเครื่องทำน้ำอุ่นจาก 168 เครื่องต่อวัน เป็น 260 เครื่องต่อวัน

เมธินี [3] ทำการศึกษากิจการจัดสมดุลสายการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการประกอบเครื่องล้างจานอัตโนมัติ โดยใช้หลักการ ECRS และการจัดสมดุลสายการผลิต พบว่า รอบเวลาการผลิต

ลดลงจาก 261.7 วินาที เหลือ 200.6 วินาที ทำให้เพิ่มผลผลิตจาก 110 ชิ้นต่อวัน เป็น 143 ชิ้นต่อวัน

สุนันท์ [4] ทำการเพิ่มผลผลิตสำหรับเครื่องจักรทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งพบว่า เครื่องจักรมีเวลาสูญเสียไปจากการรอคอยขณะที่พนักงานตรวจสอบชิ้นงาน จึงใช้หลักการ ECRS โดยออกแบบวิธีการทำงานใหม่ พบว่า อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 122 ชิ้นต่อชั่วโมง เป็น 163 ชิ้นต่อชั่วโมง

Moktadir และคณะ [5] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการศึกษาในงานในอุตสาหกรรมเครื่องหนัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระเป๋าสตรี โดยประยุกต์ใช้การศึกษางานเพื่อหาเวลาที่เป็นมาตรฐานในการทำงาน ผลที่เกิดขึ้นคือ ผลผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 240 ชิ้นต่อวัน เป็น 582 ชิ้นต่อวัน และเมื่อจัดสมดุลสายการผลิต พบว่า ผลผลิตสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกเป็น 656 ชิ้นต่อวัน และมีประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.71

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าว ทำให้สามารถนำทฤษฎีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม โดยนำเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษางานอย่างเทคนิคตั้งคำถาม 5W1H มาวิเคราะห์ปัญหาหาอย่างมีเหตุมีผลกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เพื่อหาแนวทางแก้ปัญหาในขั้นตอนของการกำหนดปัญหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ใช้หลักการ ECRS วิเคราะห์แต่ละขั้นตอนเพื่อหาแนวทางการปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ และหลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหวเพื่อปรับสภาพสถานงานให้เหมาะสมกับพนักงานในขั้นตอนของการกำหนดแนวทางการปรับปรุง นอกจากนี้ยังใช้



การจัดสมดุลสายการผลิตเพื่อให้เวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละสถานีงานเกิดความสมดุลในขั้นตอนของการศึกษากระบวนการป้อนขึ้นรูป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การศึกษางาน (Work Study)

วันชัย [6] กล่าวว่า การศึกษางานนั้นพัฒนาต่อเนื่องมาจากวิชาการศึกษาการเคลื่อนที่และเวลา (Motion and Time Study) ตามแนวคิดและหลักการของ Frank B. Gilbreth และ Federick W. Taylor ต่อมากลายเป็นการศึกษาวิธี (Method Study) โดยเป็นการศึกษาการทำงานที่มีอยู่เดิมและใช้หลักการปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่

ส่วนการศึกษาเวลา (Time Study) เป็นกระบวนการวัดเวลาเพื่อกำหนดเวลามาตรฐาน (Standard Time) และเก็บข้อมูลการทำงาน ใช้เป็นการวัดผลงานส่วนหนึ่ง คมสัน [7] กล่าวว่า การศึกษาเวลา คือการหาเวลาที่เป็นมาตรฐานในการทำงาน ซึ่งสามารถคำนวณหาเวลามาตรฐานได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\text{เวลาปกติ (Normal Time)} = \text{เวลาที่ตัวแทน (Selected Time)} \times \text{ค่าปรับความเร็ว (Rating Factor)} \quad (1)$$

$$\text{เวลามาตรฐาน (Standard Time)} = \text{เวลาปกติ (Normal Time)} \left(\begin{matrix} 1+\% \text{ เวลาเผื่อ} \\ (\% \text{ Allowance}) \end{matrix} \right) \quad (2)$$

รัชต์วรรณ [8] ได้อธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษางานไว้ดังนี้

1. เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H เป็นเทคนิคในการตั้งคำถามเพื่อให้ทราบถึงต้นเหตุของปัญหาและนำไปสู่การพัฒนาวิธีการทำงานที่ดีกว่า แสดงดังตารางที่ 1

2. หลักการ ECRS เป็นหลักการในการลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบด้วย 4 ประการ คือ การกำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) การรวมขั้นตอนเข้าด้วยกัน (Combine) การเปลี่ยนลำดับขั้นตอนใหม่ (Rearrange) และการปรับปรุงขั้นตอนให้ง่ายขึ้น (Simplify)

3. หลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหว [9] เป็นหลักการเคลื่อนไหวอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดความเครียดของพนักงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ การใช้โครงสร้างของมนุษย์ การจัดตำแหน่งของสถานที่ปฏิบัติงาน และการออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์

ตารางที่ 1 การใช้เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H

หัวข้อ	5W1H	
เป้าหมาย	What	ทำอะไร
	Why	ทำไมต้องทำ จำเป็นไหม
สถานที่	Where	ทำที่ไหน
	Why	ทำไมต้องทำที่ นั้น
ลำดับ	When	ทำเมื่อไร
	Why	ทำไมต้องทำ ตอนนี้
ผู้ปฏิบัติ	Who	ใครเป็นคนทำ
	Why	ทำไมต้องเป็นคน นี้
วิธีการ	How	ทำอย่างไร
	Why	ทำไมต้องใช้วิธี นี้
สามารถเปลี่ยนวิธีการทำงานได้หรือไม่		



2.1.2 การจัดสมดุลสายการผลิต (Production Line Balancing)

พิชิต [10] กล่าวว่า การจัดสมดุลสายการผลิต คือ การลดเวลาว่างงานของพนักงานในสถานีงานของสายการผลิต โดยมุ่งเน้นให้เวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละสถานีงานนั้นเท่าๆ กันหรือเกิดความสมดุลกันให้ได้มากที่สุด

จังหวะความต้องการของลูกค้า (Takt Time) คือ ความเร็วในการผลิตหรือการผลิตให้ทันต่อความต้องการของลูกค้า เพื่อกำหนดจังหวะในการผลิตชิ้นงานต่อชิ้น ซึ่งพนักงานทุกคนต้องควบคุมจังหวะในการผลิตหนึ่งสถานีการผลิตไม่ให้นานเกินเวลา โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$\text{จังหวะความต้องการของลูกค้า} = \frac{\text{เวลาทำงานสุทธิในหนึ่งวัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานที่ต้องการต่อวัน}} \quad (3)$$

กำลังการผลิต (Capacity) คือ ความสามารถสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้ในหนึ่งช่วงเวลาที่กำหนด โดยจะถูกกำหนดด้วยเวลาที่มากที่สุดในการทำงานย่อยใดงานย่อยหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$\text{กำลังการผลิต} = \frac{\text{เวลาทำงานสุทธิในหนึ่งวัน}}{\text{รอบเวลาการทำงาน}} \quad (4)$$

2.2 ศึกษากระบวนการปั๊มขึ้นรูป

กระบวนการปั๊มขึ้นรูปชิ้นงาน ประกอบไปด้วย 2 กระบวนการหลักด้วยกัน คือ กระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป โดยกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์นั้น จะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การนำแผ่นขึ้นงานเข้าสู่กระบวนการ การเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์ และการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊ม แต่จะ

ทำการศึกษาเฉพาะในขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊ม เนื่องจากทั้ง 2 ขั้นตอนนั้นจะมีการเตรียมไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะมีการผลิต ซึ่งดำเนินการโดยหัวหน้างานและพนักงานคลัง 2 คน จึงไม่มีผลต่อเวลาในการปั๊มขึ้นรูป โดยการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊มจะใช้พนักงาน 8 คน ประจำที่เครื่องปั๊ม 4 เครื่อง เครื่องละ 2 คน ซึ่งพนักงานแต่ละเครื่องจะมีภาระงานที่เหมือนกันและดำเนินการไปพร้อมกัน โดยหัวหน้างานได้เลือกพนักงานจากเครื่องปั๊มที่ 1 มาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ภาระงานของพนักงานและการจับเวลา เนื่องจากมีความชำนาญในการทำงานและมีอัตราการการทำงานคงที่ สามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์เป็นแผนภูมิการปฏิบัติงานของกลุ่มพนักงาน (Gang Process Chart) แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขั้นตอนของกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์

พนักงาน			
พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
1. ปรับค่าส่งของเครื่องปั๊มให้ประกบกัน	1.54		
2. เดินไปที่ปั๊มแฮนด์สวิตช์	2.78		
3. กดปุ่มแฮนด์สวิตช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	6.42	3. กดปุ่มแฮนด์สวิตช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	6.42
4. เดินไปกดปุ่มคลายออโตแคลมป์	2.84		
		5. เดินไปที่แท่นวาง ซึ่งมีแม่พิมพ์ที่ผลิตเสร็จแล้วอยู่ แล้วปลดออโตแคลมป์ออกทั้งหมด	65.90



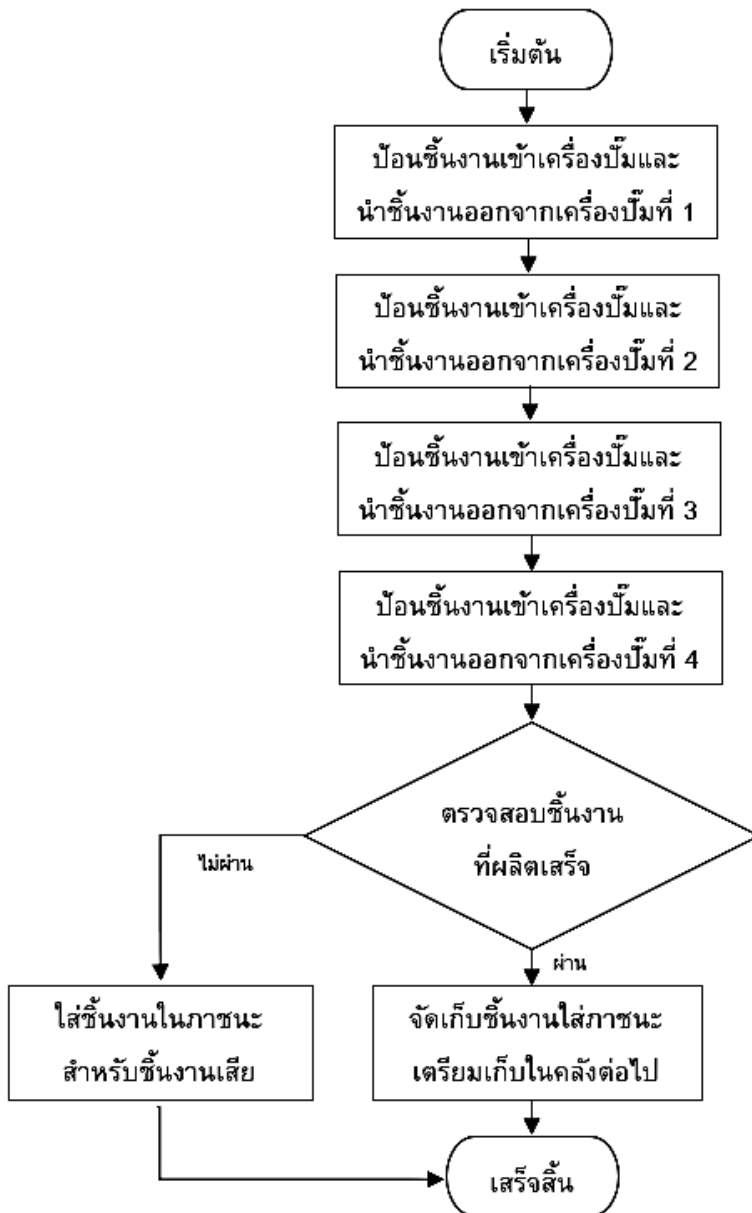
ตารางที่ 2 (ต่อ)

พนักงาน			
พนักงานประจำ เครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำ เครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
6. ปรับคำสั่งของ เครื่องบี้มให้ แยกกัน	1.53		
7. เดินไปที่ปุ่ม แฮนด์สวิตช์	2.86		
8. รอกดปุ่มแฮนด์ สวิตช์	7.44		
9. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์ให้เครื่องบี้ม แยกกัน	6.40	9. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์ให้เครื่องบี้ม แยกกัน	6.40
10. เดินไปที่หน้า ประตูของเครื่อง บี้ม	5.32		
11. เปิดประตู เพื่อให้แท่นวาง เลื่อนออก	5.57		
12. เดินไปปรับ คำสั่งให้แท่นวาง เลื่อนออก	7.92		
13. เลื่อนแท่นวาง ออกไปจนสุด	91.96		
14. ใช้ผ้าเช็ดทำ ความสะอาดใต้ เครื่องบี้ม	59.61		
15. เดินไปปรับ คำสั่งให้แท่นวาง ซึ่งมีแม่พิมพ์ที่จะ ผลิตเลื่อนเข้าไป	3.81		
16. เลื่อนแท่นวาง เข้าไปจนสุด	91.31		
17. เดินไปที่หน้า ประตูของเครื่อง บี้ม	5.16		
18. ปิดประตูด้าน ที่แท่นวางเลื่อน เข้า	5.52		
19. เดินไปปรับ คำสั่งของเครื่องบี้ม ให้ประกบกัน	8.12		

ตารางที่ 2 (ต่อ)

พนักงาน			
พนักงานประจำ เครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำ เครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
20. เดินไปที่ปุ่ม แฮนด์สวิตช์	2.83		
21. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์ให้เครื่องบี้ม ประกบกัน	6.42	21. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์ให้เครื่องบี้ม ประกบกัน	6.42
		22. เดินไปที่แท่น วาง แล้วทำการใส่ ออโตแคลมป์ ทั้งหมดตาม ตำแหน่งให้ครบ	65.81
23. เดินไปกดปุ่ม ล็อคออโตแคลมป์	2.82		
24. ปรับคำสั่งของ เครื่องบี้มให้ แยกกัน	2.01		
25. เดินไปที่ปุ่ม แฮนด์สวิตช์	2.86		
26. รอกดปุ่มแฮนด์ สวิตช์	4.37		
27. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์ให้เครื่องบี้ม แยกกัน	6.52	27. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์ให้เครื่องบี้ม แยกกัน	6.52
28. เดินไปปรับค่า ตามที่ต้องการ	5.74		
29. เดินไปที่ปุ่ม แฮนด์สวิตช์	2.86		
30. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์เพื่อทดสอบ การบี้ม	6.67	30. กดปุ่มแฮนด์ สวิตช์เพื่อทดสอบ การบี้ม	6.67
รวม		490.91 วินาที หรือ 8.18 นาที	

หลังจากที่พนักงานประจำเครื่องทั้ง 8 คน ได้ทำการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องบี้มแล้วนั้น ภาระงานต่อไปจะเป็นการเข้าสู่กระบวนการผลิตบี้มขึ้นรูปตั้งรูปที่ 4 ซึ่งพนักงานประจำเครื่องแต่ละเครื่องจะทำการป้อนชิ้นงานเข้าเครื่องบี้มและนำชิ้นงานออกจากเครื่องบี้ม โดยมีขั้นตอนแสดงเป็นแผนภูมิการปฏิบัติงานของกลุ่มพนักงานได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 ผังงาน (Flowchart) ของกระบวนการผลิตปั๊มชิ้นรูป



บทความวิจัย

ตารางที่ 3 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป
สำหรับพนักงานประจำเครื่อง

พนักงาน			
พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
1. บ้อนชิ้นงานเข้าเครื่องปั๊มและนำชิ้นงานออกจากเครื่องปั๊มที่ 1	5.19		
1.1 หยิบชิ้นงานจากแท่นวาง			
1.2 วางชิ้นงานบนเครื่อง			
1.3 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน		1.3 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	
		1.4 หยิบชิ้นงานออกจากเครื่อง	
		1.5 วางชิ้นงานบนสายพานที่ 1	
2. บ้อนชิ้นงานเข้าเครื่องปั๊มและนำชิ้นงานออกจากเครื่องปั๊มที่ 2	8.35		
2.1 หยิบชิ้นงานจากสายพานที่ 1			
2.2 วางชิ้นงานบนเครื่อง			
		2.3 ทาน้ำมันบนแม่พิมพ์	
2.4 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน		2.4 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	
2.5 กวาดเศษชิ้นงานลงถัง			
		2.6 หยิบชิ้นงานออกจากเครื่อง	
		2.7 วางชิ้นงานบนสายพานที่ 2	
		2.8 กวาดเศษชิ้นงานลงถัง	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

พนักงาน			
พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
3. บ้อนชิ้นงานเข้าเครื่องปั๊มและนำชิ้นงานออกจากเครื่องปั๊มที่ 3	5.49		
3.1 หยิบชิ้นงานจากสายพานที่ 2			
3.2 วางชิ้นงานบนเครื่อง			
		3.3 ทาน้ำมันบนแม่พิมพ์	
3.4 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน		3.4 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	
		3.5 หยิบชิ้นงานออกจากเครื่อง	
		3.6 วางชิ้นงานบนสายพานที่ 3	
4. บ้อนชิ้นงานเข้าเครื่องปั๊มและนำชิ้นงานออกจากเครื่องปั๊มที่ 4	5.40		
4.1 หยิบชิ้นงานจากสายพานที่ 3			
4.2 วางชิ้นงานบนเครื่อง			
		4.3 ทาน้ำมันบนแม่พิมพ์	
4.4 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน		4.4 กดปุ่มแอสต์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	
		4.5 หยิบชิ้นงานออกจากเครื่อง	
		4.6 วางชิ้นงานบนลูกกลิ้งลำเลียง	
รวม		24.43 วินาที	



ส่วนสองขั้นตอนสุดท้าย คือ การตรวจสอบชิ้นงานที่ผลิตเสร็จและการจัดเก็บชิ้นงานใส่ภาชนะ จะเป็นภาระงานของพนักงานท้ายสายการผลิตอีก 2 คน คือ พนักงานตรวจสอบและพนักงานจัดเก็บ ซึ่งมีขั้นตอนแสดงเป็นแผนภูมิการปฏิบัติงานของกลุ่มพนักงานได้ดังตารางที่ 4

หลังจากนั้นทำการบันทึกเวลาแต่ละขั้นตอนโดยจะบันทึกเวลาไว้เบื้องต้นที่ 10 ครั้ง แล้วทำการหาเวลาเฉลี่ยแต่ละขั้นตอน พร้อมคำนวณหาจำนวนครั้งในการจับเวลาที่เหมาะสม ณ ระดับความเชื่อมั่น 95% ความคลาดเคลื่อน 5% โดยเวลาเฉลี่ยแต่ละขั้นตอนของกระบวนการบี้มขึ้นรูปสรุปได้ดังตารางที่ 5

ทำการหาจังหวัดความต้องการของลูกค้า โดยมีการคำนวณดังสมการที่ (3) โดยที่ 1 วัน ทำงาน 8 ชั่วโมง และปริมาณการผลิตที่กำหนด เท่ากับ 450 ชิ้นต่อชั่วโมง ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จังหวัดความต้องการ} &= \frac{8 \times 60 \times 60}{\text{ของลูกค้า}} \\ &= \frac{8 \times 450}{8 \times 450} \\ &= 8 \text{ วินาทีต่อชิ้น} \end{aligned}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจังหวัดความต้องการของลูกค้ากับเวลาแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตบี้มขึ้นรูปดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเวลาในการบี้มขึ้นรูปของเครื่องบี้มที่ 2 ใช้เวลาเฉลี่ย เท่ากับ 8.35 วินาทีต่อชิ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนเดียวในกระบวนการที่เวลานั้นมากกว่า จังหวัดความต้องการของลูกค้า ดังนั้น จึงจะทำการกำหนดปัญหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการต่อไป

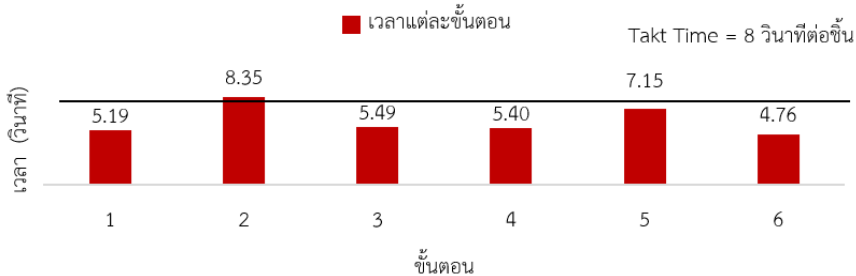
ตารางที่ 4 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตบี้มขึ้นรูปสำหรับพนักงานท้ายสายการผลิต

พนักงาน			
พนักงานตรวจสอบ	เวลา (วินาที)	พนักงานจัดเก็บ	เวลา (วินาที)
5. ตรวจสอบชิ้นงานที่ผลิตเสร็จ	7.15		
5.1 หยิบชิ้นงานจากลูกกลิ้งลำเลียง			
5.2 ตรวจสอบชิ้นงานที่ผลิตเสร็จ			
5.3 ทำการส่งต่อชิ้นงาน			
6. จัดเก็บชิ้นงานใส่ภาชนะ	4.76		
		6.1 หยิบชิ้นงาน	
		6.2 เก็บชิ้นงานลงในภาชนะ	
รวม		11.91 วินาที	

ตารางที่ 5 เวลาเฉลี่ยแต่ละขั้นตอนของกระบวนการบี้มขึ้นรูป

เวลาเฉลี่ยแต่ละขั้นตอนของกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์ (วินาที)					
1	2	3	4	5	6
1.54	2.78	6.42	2.84	65.90	1.53
7	8	9	10	11	12
2.86	7.44	6.40	5.32	5.57	7.92
13	14	15	16	17	18
96.96	59.61	3.81	97.31	5.16	5.52
19	20	21	22	23	24
8.12	2.83	6.42	65.81	2.82	2.01
25	26	27	28	29	30
2.86	4.37	6.52	5.74	2.86	6.67
รวม 490.91 วินาที หรือ 8.18 นาที					
เวลาเฉลี่ยแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตบี้มขึ้นรูป (วินาที)					
1	2	3	4	5	6
5.19	8.35	5.49	5.40	7.15	4.76
รวม 48.34 วินาที หรือ 0.81 นาที (รวมเวลาของชิ้นงานบนสายพานและลูกกลิ้งลำเลียงแล้ว ซึ่งมีเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 3 วินาที รวม 12 วินาที)					

การเปรียบเทียบจังหวะความต้องการของลูกค้ากับเวลาแต่ละขั้นตอน
ในกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบจังหวะความต้องการของลูกค้ากับเวลาแต่ละขั้นตอน
ในกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปก่อนการปรับปรุง

2.3 กำหนดปัญหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการศึกษากระบวนการปั๊มขึ้นรูปสามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นจากทั้งกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปแสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปัญหาที่เกิดขึ้นของกระบวนการปั๊มขึ้นรูป

ขั้นตอน	ปัญหา
กระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์	
5 และ 22	ภาระงานเป็นของพนักงานคนใดคนหนึ่ง ในขณะที่พนักงานอีกคนว่างงาน
10-11, 14 และ 17-18	ภาระงานเป็นของพนักงานที่จะต้องมีการทำงานในขั้นตอนต่อไป
12, 14, 17 และ 19	ต้องรอให้ขั้นตอนก่อนหน้าเสร็จสิ้น จึงจะเริ่มทำขั้นตอนเหล่านี้
กระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป	
กดปุ่มแฮนด์ สวิตซ์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	พนักงานจะต้องท้าวหลังเพื่อกดปุ่ม
กวาดเศษชิ้นงานลงถัง	พนักงานจะใช้มือกวาดเศษชิ้นงานลงถัง

สำหรับปัญหาของกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์นั้น มีสาเหตุมาจากบริษัทไม่มีการจัดการะงานของพนักงาน และการกำหนดขั้นตอนการทำงานที่เหมาะสม จึงใช้เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ในการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ของตารางที่ 7 คือ ขั้นตอนที่ 5 และ 22 ส่วนตารางที่ 8 คือ ขั้นตอนที่ 10-11 และ 17-18 และตารางที่ 9 คือ ขั้นตอนที่ 14

ส่วนปัญหาของกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปนั้นมีสาเหตุมาจากการที่พนักงานไม่มีวิธีการทำงานอย่างเหมาะสมจึงได้ใช้เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H เช่นเดียวกับกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์ โดยเทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ของตารางที่ 10 คือ ขั้นตอนกดปุ่มแฮนด์สวิตซ์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน และตารางที่ 11 คือ ขั้นตอนกวาดเศษชิ้นงานลงถัง

2.4 กำหนดแนวทางการปรับปรุง

จากปัญหาที่เกิดขึ้น จึงใช้การศึกษาริธีในการหาแนวทางการปรับปรุงโดยประยุกต์ใช้หลักการ ECRS สำหรับกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 12



ตารางที่ 7 เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ในขั้นตอนที่ 5, 22

5W1H	คำตอบ
What	ปลดหรือใส่โอโตแคลมป์ให้กับแม่พิมพ์
Why	เพื่อนำแม่พิมพ์ที่ผลิตเสร็จแล้วไปเก็บ (ขั้นตอนที่ 5) และเพื่อล๊อคแม่พิมพ์ไม่ให้มีการขยับระหว่างที่ทำการปั๊มขึ้นรูป (ขั้นตอนที่ 22)
Where	เครื่องปั๊ม
Why	เพราะใกล้ที่จัดเก็บแม่พิมพ์ แผ่นชิ้นงาน และคลัง
When	หลังจากกดปุ่มคลายโอโตแคลมป์ (ขั้นตอนที่ 5) และหลังจากที่กดปุ่มแฮนด์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน (ขั้นตอนที่ 22)
Why	เพราะโอโตแคลมป์ล๊อคอยู่ ต้องกดปุ่มคลายเสียก่อน (ขั้นตอนที่ 5) และเพราะแม่พิมพ์ต้องประกบกัน จึงจะใส่โอโตแคลมป์ได้ (ขั้นตอนที่ 22)
Who	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 2
Why	เพราะได้รับการฝึกฝนจนเกิดความชำนาญ
How	พนักงานใช้มือปลดหรือใส่โอโตแคลมป์ทางฝั่งท้ายเครื่อง 4 ตัว และเดินไปฝั่งหัวเครื่องอีก 4 ตัว
Why	-
เปลี่ยนวิธีได้หรือไม่	ได้ โดยให้พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 ช่วยปลดหรือใส่โอโตแคลมป์ทางฝั่งหัวเครื่อง 4 ตัว

ตารางที่ 9 เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ในขั้นตอนที่ 14

5W1H	คำตอบ
What	ใช้ผ้าเช็ดใต้เครื่องปั๊มให้สะอาด
Why	เพื่อไม่ให้แท่นวางเกิดความเสียหาย เนื่องจากเศษชิ้นงานที่หล่นอยู่ตามพื้น
Where	เครื่องปั๊ม
Why	เพราะใกล้ที่จัดเก็บแม่พิมพ์ แผ่นชิ้นงาน และคลัง
When	หลังจากเคลื่อนแท่นวางออกไปแล้ว
Why	เพราะเป็นช่วงเวลาที่ได้เครื่องปั๊มโล่ง ไม่มีแท่นวาง
Who	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1
Why	เพราะได้รับการฝึกฝนจนเกิดความชำนาญ
How	พนักงานใช้ผ้าเช็ดใต้เครื่องปั๊มให้สะอาด
Why	-
เปลี่ยนวิธีได้หรือไม่	ได้ โดยให้เป็นหน้าที่ของพนักงานประจำเครื่องคนที่ 2 เพื่อช่วยแบ่งภาระงานของพนักงานประจำเครื่องคนที่ 1

ตารางที่ 8 เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ในขั้นตอนที่ 10-11, 17-18

5W1H	คำตอบ
What	เดินไปหน้าประตูเครื่องปั๊ม แล้วเปิดหรือปิดประตู
Why	เพื่อให้แท่นวางเลื่อนออก (ขั้นตอนที่ 10-11) และเพื่อป้องกันอันตรายจากการปั๊มขึ้นรูป (ขั้นตอนที่ 17-18)
Where	เครื่องปั๊ม
Why	เพราะใกล้ที่จัดเก็บแม่พิมพ์ แผ่นชิ้นงาน และคลัง
When	ก่อนเคลื่อนแท่นวางออก (ขั้นตอนที่ 10-11) และหลังจากที่แท่นวางเลื่อนเข้ามาจนสุด (ขั้นตอนที่ 17-18)
Why	เพื่อไม่ให้แท่นวางชนประตู (ขั้นตอนที่ 10-11) และเพื่อป้องกันพนักงานลื่น (ขั้นตอนที่ 17-18)
Who	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1
Why	เพราะได้รับการฝึกฝนจนเกิดความชำนาญ
How	พนักงานเดินไปหน้าประตูเครื่องปั๊ม แล้วใช้มือปลดสลักเลื่อนประตูเพื่อเปิดหรือเลื่อนประตูเพื่อปิดแล้วทำการล๊อคสลัก
Why	-
เปลี่ยนวิธีได้หรือไม่	ได้ โดยให้เป็นหน้าที่ของพนักงานประจำเครื่องคนที่ 2 เพื่อช่วยแบ่งภาระงานของพนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 ที่จะต้องมีหน้าที่ต่อไป

ตารางที่ 10 เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ในขั้นตอนกดปุ่มแฮนด์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน

5W1H	คำตอบ
What	กดปุ่มแฮนด์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน
Why	จำเป็น เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการปั๊มขึ้นรูป
Where	เครื่องปั๊ม
Why	เพราะใกล้ที่จัดเก็บแม่พิมพ์ แผ่นชิ้นงาน และคลัง
When	หลังจากวางชิ้นงานลงบนเครื่อง
Why	เพื่อให้เกิดการปั๊มขึ้นรูปชิ้นงาน
Who	พนักงานประจำเครื่องทั้ง 2 คน
Why	เพราะได้รับการฝึกฝนจนเกิดความชำนาญ
How	พนักงานใช้มือสองข้างก้าวหลังกดปุ่มแฮนด์สวิทช์
Why	เพราะตำแหน่งของปุ่มแฮนด์สวิทช์ไม่เหมาะสม
เปลี่ยนวิธีได้หรือไม่	ได้ โดยจัดตำแหน่งของปุ่มแฮนด์สวิทช์ให้กดปุ่มได้สะดวกขึ้น



ตารางที่ 11 เทคนิคตั้งคำถาม 5W1H ในขั้นตอน กวาดเศษชิ้นงานลงถัง

5W1H	คำตอบ
What	กวาดเศษชิ้นงานลงถัง
Why	จำเป็น เพราะเศษชิ้นงานที่เหลือจากกระบวนการ ตัดชิ้นงานไม่สามารถไหลลงมาถึงถังได้
Where	เครื่องปั๊ม
Why	เพราะใกล้ที่จัดเก็บแม่พิมพ์ แผ่นชิ้นงาน และคลัง
When	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 จะทำหลังจากกดปุ่ม แชนด์สวิทช์ ส่วนพนักงานประจำเครื่องคนที่ 2 จะทำหลังจากวางชิ้นงานบนสายพานแล้ว
Why	เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการปั๊มขึ้นรูปและส่งชิ้นงาน ไปยังขั้นตอนต่อไปก่อน ป้องกันไม่ให้พนักงาน เข้าใจผิดว่าชิ้นงานนั้นมีการปั๊มขึ้นรูปแล้ว
Who	พนักงานประจำเครื่องทั้ง 2 คน
Why	เพราะได้รับการฝึกฝนจนเกิดความชำนาญ
How	พนักงานใช้มือกวาดเศษชิ้นงานลงในถังจนหมด
Why	เพราะอุปกรณ์ขนถ่ายไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ เศษชิ้นงานไหลลงมาถึงถัง
เปลี่ยนวิธี ได้หรือไม่	ได้ โดยการออกแบบอุปกรณ์ขนถ่ายให้เศษชิ้นงาน สามารถไหลลงมาถึงถังได้เอง

ส่วนกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป นอกจาก ประยุกต์ใช้หลักการ ECRS แล้ว ยังใช้หลักการ เศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหวในการปรับสภาพสถานีงาน ให้เหมาะสม เพื่อให้พนักงานปฏิบัติงานได้ง่ายและ สะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แนวทางการปรับปรุงของกระบวนการผลิต ปั๊มขึ้นรูป

ขั้นตอน	การปรับปรุง	ECRS	เศรษฐศาสตร์ การเคลื่อนไหว
กดปุ่ม แชนด์สวิทช์	จัดตำแหน่งของปุ่ม แชนด์สวิทช์ให้กดปุ่ม สะดวกขึ้น	-	/
กวาดเศษ ชิ้นงานลงถัง	ออกแบบอุปกรณ์ ขนถ่ายให้เศษชิ้นงาน ไหลลงถังได้เอง	S	/

ตารางที่ 12 แนวทางการปรับปรุงของกระบวนการ ติดตั้งแม่พิมพ์

ขั้นตอน	การปรับปรุง	ECRS
5	ให้พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 ช่วยปลด ออโตแคลมป์ทางฝั่งหัวเครื่อง 4 ตัว	S
10-11	ให้เป็นหน้าที่ของพนักงานประจำเครื่องคนที่ 2 เพื่อช่วยแบ่งภาระงานของพนักงานประจำเครื่อง คนที่ 1 ที่จะต้องมีหน้าที่ในขั้นตอนต่อไป	S
12	ให้พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 เดินไป ปรับค้ำส่งได้ทันทีหลังจากเสร็จขั้นตอนที่ 9 ไม่ต้องรอทำงานหลังจากขั้นตอนที่ 11	R
14	1. ให้เป็นหน้าที่ของพนักงานประจำเครื่อง คนที่ 2 เพื่อช่วยแบ่งภาระงานของ พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 2. เมื่อแท่นวางเลื่อนออกพ้นประตูไปแล้ว ให้พนักงานทำการขีดได้ทันที	R, S
17-18	1. ให้เป็นหน้าที่ของพนักงานประจำเครื่อง คนที่ 2 เพื่อช่วยแบ่งภาระงานของ พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 ที่จะต้องมี หน้าที่ในขั้นตอนต่อไป 2. เมื่อแท่นวางเลื่อนเข้าพ้นประตูไปให้ พนักงานเดินไปปิดประตูได้ทันที	R, S
19	ให้พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 เดินไป ปรับค้ำส่งได้ทันทีหลังจากเสร็จขั้นตอนที่ 16 ไม่ต้องรอทำงานหลังจากขั้นตอนที่ 18	R
22	ให้พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 ช่วยใส่ ออโตแคลมป์ทางฝั่งหัวเครื่อง 4 ตัว	S

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 การปรับปรุงวิธีการทำงาน

3.1.1 การปรับปรุงกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์

เพื่อลดเวลาการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊ม จึงได้ ปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ ซึ่งกล่าวไว้แล้วในตารางที่ 12

3.1.2 การปรับปรุงกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป

1. การกดปุ่ม แชนด์สวิทช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน โดยใช้หลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหวเกี่ยวกับ



การใช้โครงร่างมนุษย์และการจัดตำแหน่งสถานที่ปฏิบัติงาน เพื่อให้พนักงานทำงานได้อย่างสะดวก เดิมตำแหน่งของปัมนั้นจะวางอยู่ด้านหลังของพนักงาน ทำให้พนักงานต้องใช้มือสองข้างทำหลังกดปั๊ม ดังแสดงในรูปที่ 6

จากนั้น ปรับตำแหน่งของปั๊มใหม่โดยวางไว้ด้านหน้าของพนักงาน ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อลดอาการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อบริเวณแขนทั้งสองข้างที่เกิดอาการตึงและลดความเมื่อยล้าของพนักงาน เพราะเป็นตำแหน่งที่พนักงานใช้พื้นที่ในการเคลื่อนไหวน้อยที่สุด

2. การกวาดเศษชิ้นงานลงถัง โดยใช้หลักการ ECRS คือ การทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify) และหลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหวเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ เพื่อให้พนักงานมีวิธีการทำงานที่ง่ายและสะดวก เมื่อชิ้นงานผ่านการบ่มขึ้นรูป เศษชิ้นงานนั้นจะไหลลงมายังถาดขนาดใหญ่ที่รองรับเศษชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 8 หลังจากนั้นพนักงานจะใช้มือกวาดเศษชิ้นงานให้ลงถัง

นอกจากพนักงานจะเกิดความเมื่อยล้าแล้ว ยังสูญเสียชิ้นงานไปโดยเปล่าประโยชน์ เนื่องจากจะต้องหยุดการผลิต จึงปรับปรุงโดยการออกแบบอุปกรณ์ขนถ่ายเพื่อให้เศษชิ้นงานไหลลงมาถึงถังได้เอง ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 โดยสร้างอุปกรณ์ขนถ่าย 1 เครื่องเพื่อเป็นแบบอย่างให้กับบริษัท แต่ในความเป็นจริงจะมีการกวาดเศษชิ้นงานทั้ง 2 ด้านของแม่พิมพ์ ซึ่งในการสร้างอุปกรณ์ขนถ่าย 1 เครื่องนี้ จะลดการสูญเสียชิ้นงานในการผลิตได้ 20 ชิ้นต่อชั่วโมง



รูปที่ 6 ตำแหน่งของปั๊มแฮนด์สวิตช์ก่อนปรับปรุง



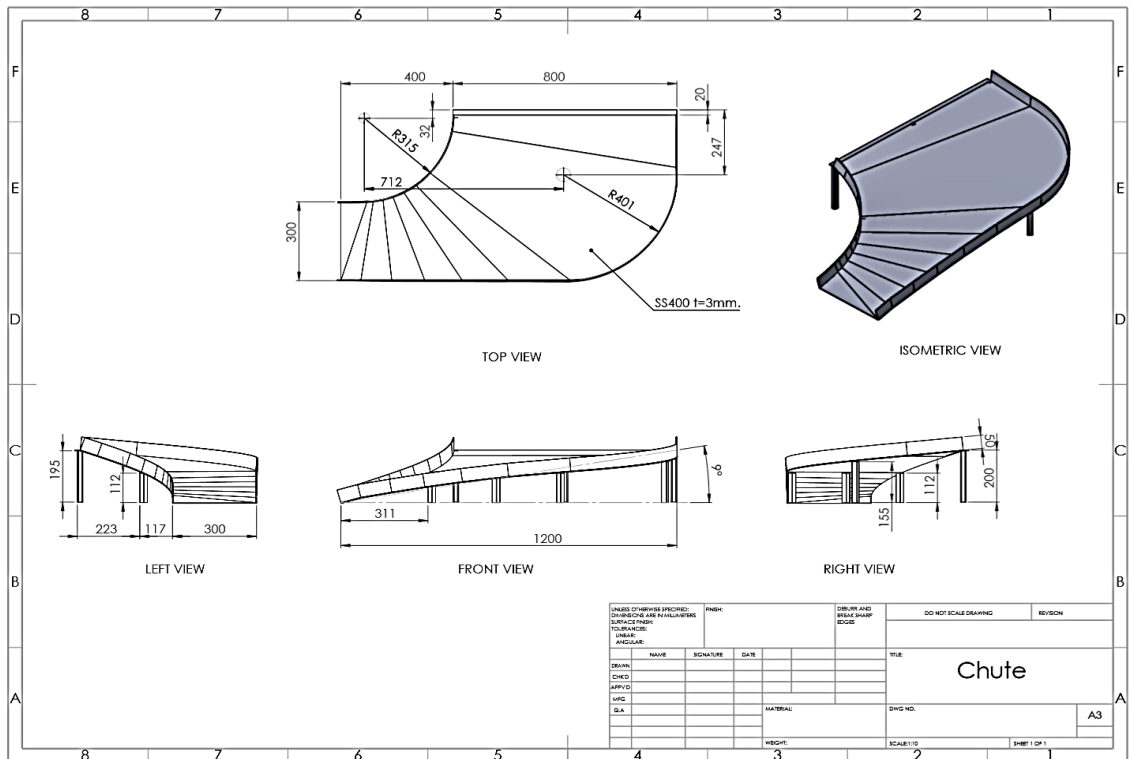
รูปที่ 7 ตำแหน่งของปั๊มแฮนด์สวิตช์หลังปรับปรุง



รูปที่ 8 ถาดขนาดใหญ่สำหรับรองรับเศษชิ้นงาน



รูปที่ 9 อุปกรณ์ขึ้นถ้ายเศษชิ้นงาน



รูปที่ 10 แบบของอุปกรณ์ขึ้นถ้ายเศษชิ้นงาน



3.2 ผลการวิจัย

หลังจากทำการปรับปรุงวิธีการทำงานของพนักงาน ทำให้พนักงานมีขั้นตอนการทำงานใหม่และมีภาระงานใหม่ โดยขั้นตอนใหม่ของกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์แสดงได้ดังตารางที่ 14 ส่วนขั้นตอนของกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปนั้นยังคงเดิม แต่เครื่องปั๊มที่ 2 จะไม่มีขั้นตอนของการกวาดเศษชิ้นงานลงถังของพนักงานประจำเครื่องคนที่ 1 จากนั้นทำการบันทึกเวลาในแต่ละขั้นตอนเช่นเดิม แล้วทำการหาเวลามาตรฐาน เพื่อหาเวลาที่เป็นมาตรฐานในการทำงานของพนักงานดังสมการที่ (1) และ (2) ซึ่งสามารถหาเวลามาตรฐานได้ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 14 ขั้นตอนใหม่ของกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์

พนักงาน			
พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
1. ปรับคำสั่งของเครื่องปั๊มให้ประกบกัน	1.65		
2. เดินไปที่ปั๊มแอนด์สวิตช์	3.07		
3. กดปุ่มแอนด์สวิตช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	6.95	3. กดปุ่มแอนด์สวิตช์ให้เครื่องปั๊มประกบกัน	6.95
4. เดินไปกดปุ่มคลายออโตแคลมป์	3.10		
5. เดินไปที่แท่นวาง ซึ่งมีแม่พิมพ์ที่ผลิตเสร็จแล้วอยู่ แล้วปลดออโตแคลมป์ออกทั้งหมด	20.16	5. เดินไปที่แท่นวาง ซึ่งมีแม่พิมพ์ที่ผลิตเสร็จแล้วอยู่ แล้วปลดออโตแคลมป์ออกทั้งหมด	20.16

ตารางที่ 14 (ต่อ)

พนักงาน			
พนักงานประจำเครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำเครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
6. ปรับคำสั่งของเครื่องปั๊มให้แยกกัน	1.63		
7. เดินไปที่ปั๊มแอนด์สวิตช์	3.13		
8. กดปุ่มแอนด์สวิตช์ให้เครื่องปั๊มแยกกัน	6.97	8. กดปุ่มแอนด์สวิตช์ให้เครื่องปั๊มแยกกัน	6.97
9.1 เดินไปปรับคำสั่งให้แท่นวางเลื่อนออก	4.19	9.2 เดินไปที่หน้าประตูของเครื่องปั๊ม	5.54
		10. เปิดประตูเพื่อให้แท่นวางเลื่อนออก	5.87
11.1 เลื่อนแท่นวางออกไปจนสุด	98.94	11.2 ใช้ผ้าเช็ดทำความสะอาดใต้เครื่องปั๊มเมื่อแท่นวางเลื่อนพ้นประตูออกไป	64.99
12. ปรับคำสั่งให้แท่นวางเลื่อนเข้าไป	1.63		
13.1 เลื่อนแท่นวางเข้าไปจนพ้นประตูของเครื่องปั๊ม	93.64		
		13.2 เดินไปที่หน้าประตูของเครื่องปั๊ม	5.49
13.4 ปรับคำสั่งของเครื่องปั๊มให้ประกบกันเมื่อแท่นวางเลื่อนเข้าไปจนสุด	1.61	13.3 ปิดประตูด้านที่แท่นวางเลื่อนเข้าไป	5.85
13.5 เดินไปที่ปั๊มแอนด์สวิตช์	3.11		



ตารางที่ 14 (ต่อ)

พนักงาน			
พนักงานประจำ เครื่องคนที่ 1	เวลา (วินาที)	พนักงานประจำ เครื่องคนที่ 2	เวลา (วินาที)
14. รอกดปุ่ม แฮนด์สวิทช์	7.02	(เดินกลับไปยัง ปุ่มแฮนด์สวิทช์)	5.89
15. กดปุ่มแฮนด์ สวิทช์ให้เครื่องบ่ม ประกบกัน	7.06	15. กดปุ่มแฮนด์ สวิทช์ให้เครื่องบ่ม ประกบกัน	7.06
16. เดินไปที่แทน วาง แล้วทำการใส่ ออโตแคลมป์ ทั้งหมดตาม ตำแหน่งให้ครบ	20.98	16. เดินไปที่แทน วาง แล้วทำการใส่ ออโตแคลมป์ ทั้งหมดตาม ตำแหน่งให้ครบ	20.98
17. เดินไปกดปุ่ม ลือคออโตแคลมป์	3.11		
18. ปรับคำสั่ง ของเครื่องบ่มให้ แยกกัน	2.08		
19. เดินไปที่ปุ่ม แฮนด์สวิทช์	3.14		
20. กดปุ่มแฮนด์ สวิทช์ให้เครื่องบ่ม แยกกัน	7.10	20. กดปุ่มแฮนด์ สวิทช์ให้เครื่องบ่ม แยกกัน	7.10
21. เดินไปปรับ ค่าตามที่ต้องการ	6.30		
22. เดินไปที่ปุ่ม แฮนด์สวิทช์	3.18		
23. กดปุ่มแฮนด์ สวิทช์เพื่อทดสอบ การบ่ม	7.16	23. กดปุ่มแฮนด์ สวิทช์เพื่อทดสอบ การบ่ม	7.16
รวม		330.72 วินาที หรือ 5.51 นาที	

ตารางที่ 15 เวลามาตรฐานของกระบวนการบ่มขึ้นรูป
หลังการปรับปรุง

กระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์					
ขั้น ตอน	เวลา ตัวแทน (Selected Time)	ค่าปรับ ความเร็ว (Rating Factor)	เวลา ปกติ (Normal Time)	%เวลาเผื่อ (%Allowance Time)	เวลา มาตรฐาน (Standard Time)
1	1.51	1.00	1.51	9	1.65
2	2.82	1.00	2.82	9	3.07
3	6.37	1.00	6.37	9	6.95
4	2.84	1.00	2.84	9	3.10
5	19.32	0.94	18.16	11	20.16
6	1.49	1.00	1.49	9	1.63
7	2.87	1.00	2.87	9	3.13
8	6.39	1.00	6.39	9	6.97
9.1	3.84	1.00	3.84	9	4.19
9.2	5.29	0.96	5.08	9	5.54
10	5.51	0.96	5.29	11	5.87
11.1	90.77	1.00	90.77	9	98.94
11.2	21.37	1.02	21.80	11	24.20
12	1.50	1.00	1.50	9	1.63
13.1	85.91	1.00	85.91	9	93.64
13.2	5.25	0.96	5.04	9	5.49
13.3	5.49	0.96	5.27	11	5.85
13.4	1.48	1.00	1.48	9	1.61
13.5	2.85	1.00	2.85	9	3.11
14	6.44	1.00	6.44	9	7.02
15	6.47	1.00	6.47	9	7.06
16	20.11	0.94	18.90	11	20.98
17	2.86	1.00	2.86	9	3.11
18	1.91	1.00	1.91	9	2.08
19	2.88	1.00	2.88	9	3.14
20	6.51	1.00	6.51	9	7.10
21	5.78	1.00	5.78	9	6.30
22	2.92	1.00	2.92	9	3.18
23	6.57	1.00	6.57	9	7.16
รวม			330.72 วินาที หรือ 5.51 นาที		



ตารางที่ 15 (ต่อ)

กระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป					
ขั้นตอน	เวลาดำเนินการ (Selected Time)	ค่าปรับความเร็ว (Rating Factor)	เวลาปกติ (Normal Time)	% เวลาเผื่อ (% Allowance Time)	เวลามาตรฐาน (Standard Time)
1	4.30	1.00	4.30	14	4.90
2	6.65	1.00	6.65	14	7.58
3	4.57	1.00	4.57	14	5.21
4	4.50	1.00	4.50	14	5.13
5	6.94	1.00	6.94	9	7.56
6	4.62	1.00	4.62	11	5.13
รวม			47.51 วินาที หรือ 0.79 นาที (รวมเวลาของชิ้นงานบนสายพานและลูกกลิ้งลำเลียงแล้ว ซึ่งมีเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 3 วินาที รวม 12 วินาที)		

จากนั้น เปรียบเทียบเวลาแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปหลังการปรับปรุงกับจังหวัดความต้องการของลูกค้า ซึ่งเท่ากับ 8 วินาทีต่อชิ้น ดังรูปที่ 11 พบว่า หลังจากที่ทำกรปรับปรุง จะไม่มีขั้นตอนใดที่เวลามากกว่าจังหวัดความต้องการของลูกค้าเลย หมายความว่ากระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปนี้

สามารถผลิตได้ตามแผนที่กำหนด คือ 450 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยกำลังการผลิตคำนวณได้ดังนี้

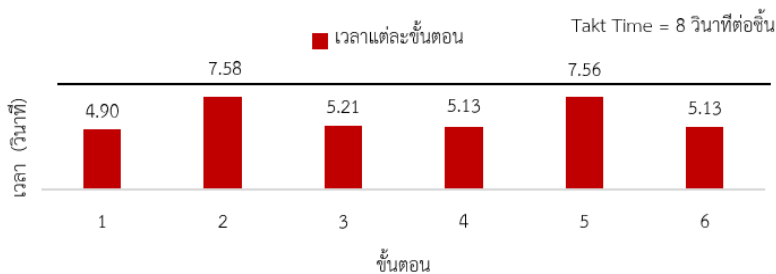
$$\begin{aligned} \text{กำลังการผลิต} &= \frac{8 \times 60 \times 60}{7.58} \\ &= 3,799 \text{ ชิ้นต่อวัน} \\ &\text{หรือ } 474 \text{ ชิ้นต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเป็นก่อนและหลังการปรับปรุง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 16 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การนำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้ทำให้เวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ลดลง อีกทั้งยังมีหลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหว ซึ่งทำให้ปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง

ตารางที่ 16 ผลที่ได้จากการปรับปรุงกระบวนการปั๊มขึ้นรูป

รายการ	ก่อน	หลัง	ผล
เวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ (นาทีต่อครั้ง)	8.18	5.51	-2.67
ปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลา (ชิ้นต่อชั่วโมง)	422	474	+52

การเปรียบเทียบจังหวัดความต้องการกับเวลาแต่ละขั้นตอน ในกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูป



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบจังหวัดความต้องการของลูกค้ากับเวลาแต่ละขั้นตอน ในกระบวนการผลิตปั๊มขึ้นรูปหลังการปรับปรุง



4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการบ่มขึ้นรูปในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ โดยทำการศึกษากระบวนการบ่มขึ้นรูปของชิ้นงาน BRACE-FR PLR UPR HINGE ในสายการผลิต H ซึ่งพบว่า กระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์มีการใช้เวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องบ่มเฉลี่ย 8.18 นาทีต่อครั้ง และใช้เวลาในกระบวนการผลิตบ่มขึ้นรูปเฉลี่ย 0.81 นาทีต่อชิ้น ทำให้ได้ปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลาเฉลี่ย เท่ากับ 422 ชิ้นต่อชั่วโมง ซึ่งไม่เป็นไปตามแผนที่ได้กำหนดไว้ คือ 450 ชิ้นต่อชั่วโมง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์และเพิ่มปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลา โดยใช้การศึกษางานด้วยเทคนิคตั้งคำถาม 5W1H หลักการ ECRS และหลักการเศรษฐศาสตร์การเคลื่อนไหว ซึ่งพบว่าสามารถลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ได้ จากเดิม 8.18 นาทีต่อครั้ง เป็น 5.51 นาทีต่อครั้ง คิดเป็นร้อยละ 32.64 และปริมาณการผลิตต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น จากเดิม 422 ชิ้นต่อชั่วโมง เป็น 474 ชิ้นต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 12.32

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sangthong, Productivity improvement of roller conveyor production line, The 5th National Conference of Industrial Operations Development, Proceeding, 2014, 570-576. (in Thai)
- [2] P. Sermuwan, Productivity improvement for water heater production line, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2017. (in Thai)
- [3] M. Ninkham, The line balancing for reduce waste in dish washer assembly process, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2010. (in Thai)
- [4] S. Rerksirathai, Work study for through-put improvement of head gimbals assembly tester, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2009. (in Thai)
- [5] M.A. Moktadir, S. Ahmed, Fatema-Tuj-Zohra and R. Sultana, Productivity improvement by work study technique: A case on leather products industry of Bangladesh. *Industrial Engineering & Management*, 2017, 6(1), 1000207.
- [6] V. Rijiravanich, Work study, 2nd Ed., Chulalongkorn University Press, Bangkok, Thailand, 2000. (in Thai)
- [7] K. Jirapatarasilp, Industrial work study, PTE391, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2002. (in Thai)



บทความวิจัย

- [8] R. Kanjanapanyakom, Industrial work study, 1st Ed., Top Publishing Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2009. (in Thai)
- [9] http://pirun.ku.ac.th/~fengcsr/courses/2008_01/206341/ch12.pdf. (Accessed on 9 Aug 2019)
- [10] P. Sukcharoenpong, Production engineering management, H.N. Group Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 1995. (in Thai)



การศึกษสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กจากการใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใ้ปลาเป็นเชื้อเพลิง

เนรมิตร กระแสร์ลม^{1*} ชัยยศ ดำรงกิจโกศล¹ และ ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

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

วันที่รับบทความ: 14 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 22 กันยายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 1 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 6 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้้นำใ้ปลามาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน หลังจากนั้นนำไบโอดีเซลที่ผลิตมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันใ้ปลาร้อยละ 5%, 10% และ 20% โดยปริมาตรในน้ำมันดีเซล ในบริบทนี้เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและอัตราส่วนผสมที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กแบบห้องเผาไหม้ฉัดตรงที่มีกำลัง 6.6 kW การทดลองได้เน้นในด้านแรงบิด, กำลัง, อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและควันท้า ผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนผสมที่ทดสอบทั้งหมดสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงใ้กับเครื่องยนต์ใ้ตามปกติเช่นเดียวกับน้ำมันดีเซลทั่วไป การเพิ่มอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันใ้ปลาส่งผลใ้ค่าพลังงานความร้อนลดลง ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้เครื่องยนต์ยังมีแรงบิด, กำลัง, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและควันท้าลดลง แต่อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงขึ้น ผลการทดลองของ BF20 มีแรงบิด, กำลัง, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและปริมาณควันท้าต่ำกว่า D100 อยู่ประมาณ 1.5%, 1.3%, 27% และ 13% ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงใ้ให้อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงกว่า D100 ประมาณ 30% เนื่องจากค่าความร้อนต่ำลง ค่าความหนืดสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันใ้ปลา

คำสำคัญ: สมรรถนะเครื่องยนต์; เครื่องยนต์ดีเซล; น้ำมันใ้ปลา

Study on the Performance of Small Size Diesel Engine Using Fish Oil Blended with Biodiesel as Fuel

Neramit Krasaelom^{1*}, Chaiyot Damrongkijkosol¹ and Channarong Trakunsaranakom²

¹ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

* Corresponding author, E-mail: neramit.k@cit.kmutnb.ac.th

Received: 14 July 2021; Revised 22 September 2021; Accepted: 1 October 2021

Online Published: 6 November 2021

Abstract: This research brought fish oil to produce biodiesel oil with the transesterification reaction process. After that, the biodiesel produced blends with diesel fuel at the ratio of 5%, 10% and 20% biodiesel blend by volume in diesel fuel. In this context, to study the physical properties and blends ratios affecting the performance of a small direct injection diesel engine with a power of 6.6 kW. The experiments focused on torque, power, brake specific fuel consumption, brake thermal efficiency and smoke. The results showed that all tested blends ratios can be used as normal engine fuel as with conventional diesel. Increasing the biodiesel blends ratio from fish oil results in lower calorific value, higher specific gravity and viscosity values. In addition, the engine has decreased torque, power, brake thermal efficiency and smoke but the brake specific fuel consumption is higher. The results of the experiment, the BF20's torque, power, brake thermal efficiency and smoke content are approximately 1.5%, 1.3%, 27% and 13% lower than the D100, respectively. As a result, the brake-specific fuel consumption is approximately 30% higher than the D100 due to lower calorific value, higher viscosity when increasing biodiesel blends from fish oil.

Keywords: Engine Performance; Diesel Engine; Fish Oil



1. บทนำ

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาทั่วโลกมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เท่า โดยพลังงานที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้มาจากแหล่งปิโตรเคมี, ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ และคาดว่าจะหมดลงภายในประมาณ 50-100 ปีข้างหน้า [1] ซึ่งเชื้อเพลิงจากปิโตรเคมีถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในยานยนต์ทุกภาคส่วน จึงก่อให้เกิดปัญหาหากการปล่อยมลพิษต่างๆ จากยานยนต์เป็นจำนวนมาก เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x), ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และฝุ่นละออง (PM) สูบรยากาศและทำลายสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกส่งผลกระทบต่อชีวิตมนุษย์ จึงมีการศึกษาหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่างๆ จากหลายแหล่ง ซึ่งเชื้อเพลิงประเภทไบโอดีเซลถือเป็นพลังงานหมุนเวียนและเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล [2] โดยเฉพาะไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ [3-4] ที่มีความเป็นพิษต่ำเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและแทบไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ [5-7] นอกจากนี้ ไบโอดีเซลยังสามารถลดการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และฝุ่นละออง (PM) ได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่เพิ่มการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เล็กน้อยเมื่อเทียบกับดีเซล [2, 8-9] ซึ่งประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้จากหลายแหล่งแต่มีหนึ่งแหล่งที่น่าสนใจคือ สะพานปลา ประเทศไทยมีสะพานปลา 4 แห่ง และมีท่าเทียบเรือประมง 14 แห่ง [10] ดำเนินกิจกรรม

เกี่ยวกับตลาดสินค้าสัตว์น้ำและเรือประมงมีใส่ปลาที่เหลือจากการชำแหละและแปรรูปปลาเป็นจำนวนมาก หากมีการจัดการใส่ปลาเหล่านี้ไม่ดีจะก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นเป็นแหล่งพาหะนำโรคหรือหากถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ ซึ่งใส่ปลาประกอบไปด้วยไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตสามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้จึงมีประโยชน์อย่างมากต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

ผู้วิจัยหลายคนได้ทำการวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับสมรรถนะและการวิเคราะห์การปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ที่ใช้ส่วนผสมของไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา S. Prakashet และคณะวิจัย [11] นำน้ำมันปลา 20, 40, 60, 80 และ 100% ผสมกับน้ำมันดีเซลพบว่าความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นเล็กน้อยและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีส่วนผสมเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเขม่า (Soot) ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล A. Ghareghani และคณะวิจัย [12] ใช้ น้ำมันปลาเหลือทิ้ง (WFO) ส่วนผสม 25, 50, 75 พบว่า ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นร่วมกับอัตราการปล่อยความร้อนที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B. Kathirveluet และคณะวิจัย [13] ใช้ส่วนผสมน้ำมันปลา 20 และ 100% พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน เบรกด ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเขม่า (Soot) ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย อุณหภูมิไอเสียและไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สูงกว่าดีเซล

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กล่าวมาได้มีการกล่าวถึงสมรรถนะและมลพิษจากการใช้น้ำมันปลา



เป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่มีการกล่าวถึงขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากไส้ปลาร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำไส้ปลามาทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน หลังจากนั้น นำน้ำมันไส้ปลามาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนผสม 5, 10 และ 20% โดยปริมาตร และนำไปทดสอบหาสมบัติทางกายภาพและผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กสูบเดี่ยวในด้านแรงบิด กำลัง และความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจากการใช้น้ำมันไส้ปลาเป็นเชื้อเพลิง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อ YANMAR รุ่น TF90DI-L ซึ่งรายละเอียดของเครื่องยนต์แสดงอยู่ในตารางที่ 1
2. อุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ เป็นเครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก สิบเดี่ยว 4 จังหวะ ยี่ห้อ ANAKA - STYLE DYNAMOMETER รุ่น P-1.5 ใช้สำหรับทดสอบเครื่องยนต์ที่มีกำลัง แรงบิดและความเร็วรอบสูงสุดไม่เกิน 44 kW, 140 N.m และ 3500 rpm ตามลำดับ มีความยาวแขน 0.716 ม. โดยเครื่องทดสอบเป็นแบบ Water Brake Dynamometer ต่อพลาเข้ากับเครื่องยนต์โดยตรงใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเพิ่มหรือลดภาระ (Load) ให้กับเครื่องยนต์ด้วยการปรับโรลด์วาล์ว (Load Valve) ซึ่งแรงบิดที่เกิดขึ้นจากเพลลาจะถูกส่งไปยังแขนที่ต่ออยู่กับชุดเข็มแสดงค่าแรงบิดที่หน้าปัด ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะและหน้าปัด และรูปที่ 2 เป็นไดอะแกรมชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กสูบเดี่ยว

ตารางที่ 1 รายละเอียดเครื่องยนต์ดีเซล YANMAR

รุ่นเครื่องยนต์	หน่วย	TF 90 DI-L
แบบ		เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ สูบนอน
ระบบห้องเผาไหม้		Direct injection
จำนวนสูบ		1
กระบอกสูบXระยะชัก	มม.	85X87
ปริมาตร	ซีซี(ลิตร)	493(0.493)
กำลังม้าสูงสุด	แรงม้า(PS)	9.0/2400
/ที่ความเร็วรอบ	กิโลวัตต์	6.6/2400
ความสิ้นเปลือง	กรัม/แรงม้า- ชั่วโมง	177(240)
อัตราส่วนการอัด		16.6:1
องศาการฉีด		20 BTDC
แรงดันการฉีดน้ำมัน	กก/ตร.ซม.	200
หัวฉีดน้ำมัน		แบบเข็ม(เดี่ยว)
ปั๊มฉีดน้ำมัน		ปั๊มบีอช
ระบบหล่อลื่น		หล่อลื่นด้วยปั๊ม
ระบายความร้อน		หม้อน้ำรังผึ้ง



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะและหน้าปัด



3. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นแบบ Thermocouple Type K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. รุ่น TSK-03 ยี่ห้อ PRIMUS วัดอุณหภูมิได้สูงสุด 800 °C ใช้วัดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น, น้ำมันหล่อลื่น, ไอเสียและอากาศ

4. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบแบบ Proximity Sensor ยี่ห้อ ONO SOKKI รุ่น HM-640 ใช้วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์วัดความเร็วรอบได้สูงสุด 5000 rpm

5. อุปกรณ์วัดความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงยี่ห้อ CST รุ่น CDR-15 เป็นอุปกรณ์วัดน้ำหนักของน้ำมันเชื้อเพลิง วัดได้สูงสุด 15000 กรัม

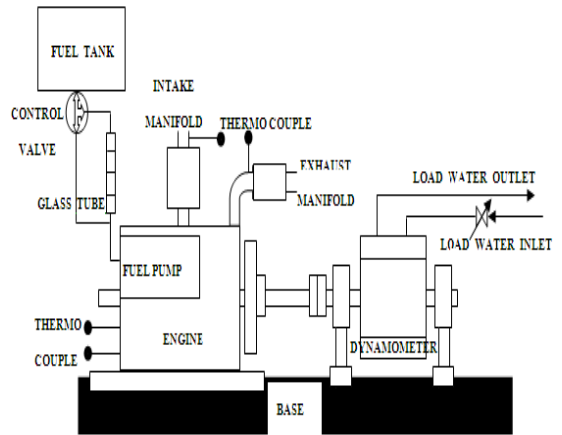
6. เครื่องวัดควันดำ ยี่ห้อ Bosch รุ่น RTT 100 เป็นระบบวัดความทึบแสงแบบไหลผ่านบางส่วน (Partial Flow Opacity)

2.2 การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลา

ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ด้วยกัน

2.2.1 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันจากไส้ปลา

ในขั้นตอนการสกัดน้ำมันให้ออกจากไส้ปลาทำได้โดยการนำไส้ปลามาเจียวในกระทะเพื่อแยกน้ำมันออกจากไส้ปลาซึ่งความร้อนจะช่วยไล่ความชื้นออกจากไส้ปลา การเจียวสกัดน้ำมันในกระทะแต่ละครั้งใช้ไส้ปลา 20 กิโลกรัม เวลาประมาณ 60 นาที ระดับไฟปานกลาง ซึ่งน้ำมันจากไส้ปลาที่ได้จากขั้นตอนนี้ยังไม่สามารถนำไปผลิตไบโอดีเซลได้ เนื่องจากยังมีความสกปรกในน้ำมัน ต้องนำน้ำมันไปผ่านขั้นตอนการทำความสะอาด รูปที่ 3 เป็นน้ำมันไส้ปลาที่ได้จากการเจียว



รูปที่ 2 ไดอะแกรมชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

2.2.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดน้ำมัน

ขั้นตอนการทำความสะอาดน้ำมันมี 2 ขั้นตอนคือขั้นตอนการแยกกลีเซอรอลและขั้นตอนการล้างทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลา

2.2.2.1 การแยกกลีเซอรอล

ขั้นตอนเริ่มต้นการใช้ปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยต้มน้ำมันไส้ปลาปริมาณ 10 ลิตร ให้ได้อุณหภูมิ 50-60 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงเติมสารเร่งปฏิกิริยาลงในหม้อต้มโดยใช้เมทานอล (CH₃OH) ปริมาณ 1 ลิตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ปริมาณ 60 กรัมแล้วต้มน้ำมันไส้ปลาต่อเป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของกลีเซอรอลและสิ่งสกปรกจนเกิดการแยกชั้นดังรูปที่ 4 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเทแยกน้ำมันออกจากกลีเซอรอล ซึ่งจะได้น้ำมันไส้ปลาประมาณ 80% และกลีเซอรอล 20%



รูปที่ 3 น้ำมันใส่ปลาที่ได้จากการเจียว



รูปที่ 4 การแยกชั้นของน้ำมันและกลีเซอรไรด์

2.2.2.2 การล้างทำความสะอาดน้ำมันใส่ปลา

การนำน้ำมันใส่ปลาล้างทำความสะอาดโดยการต้มน้ำมันผสมกับน้ำสะอาดในถังที่อัตราส่วน 1:1 และทำการกวนน้ำมันกับน้ำให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปล่อยให้ไขมันกับน้ำแยกชั้นออกจากกัน

และจึงปล่อยน้ำออกจากถัง ทำซ้ำเช่นนี้อีกประมาณ 2-3 ครั้ง เพื่อให้ไขมันสะอาดมากขึ้น ต่อจากนั้นนำน้ำมันที่ได้จากการล้างไปต้มให้ได้อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่น้ำออกจากน้ำมันแล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้น นำน้ำมันใส่ปลาตรวจวัดค่าต่างๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซล

2.2.3 การเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาผสมกับน้ำมันดีเซล

2.2.3.1 นำไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาผสมกับน้ำมันดีเซล (โดยปริมาตร) ในอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลา (BF) ต่อน้ำมันดีเซล (D) (BF5:D95), (BF10:D90), (BF20:D80), และ (BF0:D100) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกอัตราส่วนผสมเหล่านี้ว่า BF5, BF10, BF20 และ D100

2.2.3.2 นำน้ำมันใส่ปลาที่ผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนผสมต่างๆ ไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2

หมายเหตุ น้ำมันดีเซลที่ใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้เป็นน้ำมันดีเซลที่หาซื้อได้จากสถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบทางกายภาพของน้ำมันใส่ปลาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนผสมต่างๆ

รายการ	วิธีทดสอบ	เกณฑ์กำหนดของไบโอดีเซล	ผลการวิเคราะห์				
			D100	BF5	BF10	BF20	B100
1. Specific Gravity @15 °C kg/ m ³	ASTM D1298	860 - 900	831	839	844	868	918
2. API	ASTM D1298	-	38.78	37.15	36.15	31.52	25.37
3. Viscosity @40 °C St	ASTM D445	1.9 - 8-0	3.06	3.64	4.75	5.11	13.41
4. Flash Point °C	ASTM D93	Min 120	68	90	92	94	152
5. Color	ASTM D1500	-	1.5	4.5	6.5	7	-
6. Heating Value kJ/kg	ASTM D240	-	46800	45418	44790	43241	38848

* เกณฑ์การกำหนดเทียบเคียงจากประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549



2.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

การทดสอบหาสมรรถนะเครื่องยนต์จะทำการทดสอบ D100 ก่อน แล้วจึงทำการทดสอบ BF5, BF10 และ BF20 ซึ่งการทดสอบหาสมรรถนะเครื่องยนต์มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการติดเครื่องยนต์เพื่อให้เครื่องยนต์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงการทำงานพร้อมที่จะทำการทดสอบ โดยทำการติดเครื่องยนต์ที่รอบเดินเบา 800 rpm ประมาณ 20 นาที จากนั้นเร่งรอบเครื่องยนต์ขึ้นไป 1500 rpm เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงเร่งรอบเครื่องยนต์ขึ้นไปสุดคันเร่งที่รอบ 2550 rpm

2. ทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์แบบภาระเต็ม ที่ รอบเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลง [14] โดยใช้เงื่อนไขในการทดสอบที่ความเร็วรอบ 2450 rpm ลงมาถึง 1200 rpm ปรับคันเร่งอยู่ในตำแหน่งเร่งเต็มที่ และปรับเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ลดลงตามต้องการ ซึ่งการทดสอบในแต่ละช่วงความเร็วรอบยินยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 10 rpm และใช้เวลาในการวัดความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นเวลา 1 นาที (60 วินาที) จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้ (1) ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (2) น้ำหนักบนหน้าปัดเครื่องทดสอบสมรรถนะ (3) ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (4) อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น (5) อุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่น (6) อุณหภูมิ อากาศ และ (7) อุณหภูมิไอเสีย

3. นำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณหาค่าต่างๆ และเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับความเร็วรอบเครื่องยนต์

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 แรงบิดเครื่องยนต์

แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ได้ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล โดยแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาทุกอัตราส่วนผสม มีแรงบิดสูงสุดต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล เนื่องจากค่าความหนืดของเชื้อเพลิงสูงขึ้น จึงทำให้มุมกรวยสเปรย์ลดลงส่งผลให้ฝอยละอองสเปรย์มีขนาดใหญ่ขึ้น การทำให้เป็นฝอยละอองและการระเหยของละอองลดลงในระหว่างกระบวนการฉีด จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลง รวมถึงค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ลดลง [15] ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและให้แรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบเท่ากันคือ 1440 rpm โดยเครื่องยนต์ที่ใช้อัตราส่วนผสม D100 ให้แรงบิดสูงสุด 34.06 N.m และตามด้วย BF5, BF10 และ BF20 ซึ่งมีแรงบิด 33.85 N.m และ 33.57 N.m ตามลำดับ ดังรูปที่ 5

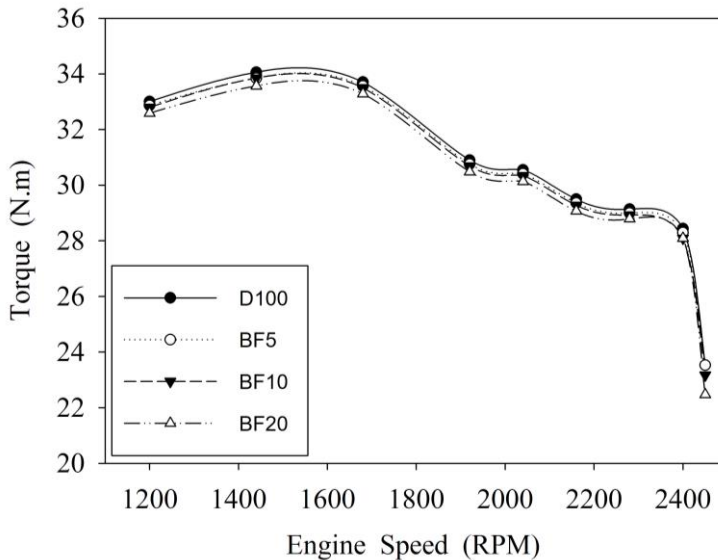
3.2 กำลังงานเบรกเครื่องยนต์

กำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ได้ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซลโดยกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาทุกอัตราส่วนผสม มีกำลังสูงสุดต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันให้กำลังสูงสุดที่ความเร็วรอบเท่ากันคือ 2400 rpm ซึ่งเครื่องยนต์ที่ใช้อัตราส่วนผสม D100 ให้กำลังงานเบรกสูงสุด 7.14 kW และอัตราส่วนผสม BF5, BF10 และ BF20 ให้กำลังงานเบรก 7.10 kW และ 7.05 kW ตามลำดับ ดังรูปที่ 6

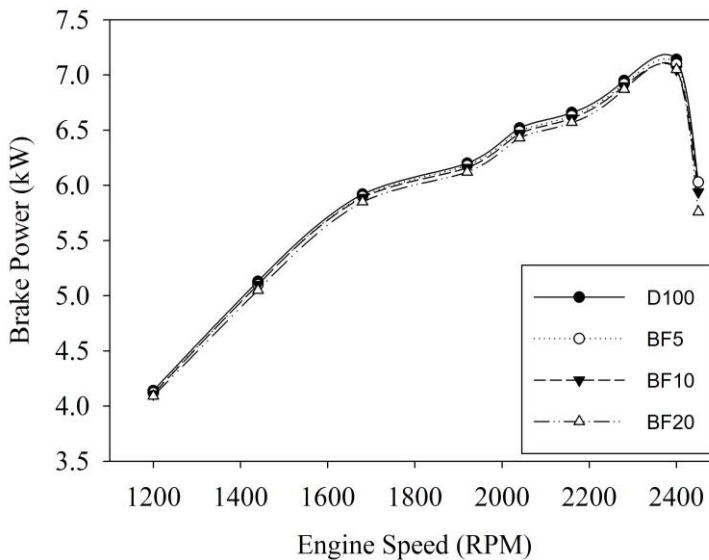


สาเหตุที่ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลา เนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ลดลง

และค่าความหนืดที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการระเหยตัวของเชื้อเพลิงลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย [15]



รูปที่ 5 เปรียบเทียบแรงบิดเครื่องยนต์



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังงานเบรกเครื่องยนต์



3.3 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล และตามภาระที่เครื่องยนต์ได้รับในแต่ละความเร็รรอบ ซึ่งอัตราส่วนผสม BF20 มีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงสุดและตามด้วย BF10, BF5 และ D100 โดย BF20 มีค่าเท่ากับ 0.306 kg/kW.hr ซึ่งสูงกว่า D100 อยู่ประมาณ 30% ที่ 2400 rpm (รูปที่ 7) สาเหตุเนื่องจากค่าพลังงานทางความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงและค่าความหนืดที่สูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการระเหยตัวของเชื้อเพลิงลดลง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย [15] รวมถึงค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ส่งผลให้การฉีดเชื้อเพลิงโดยมวลต่อปริมาตรเพิ่มมากขึ้นตามความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น [16]

3.4 อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก

รูปที่ 8 แสดงอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล สาเหตุมาจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ต่ำลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้ได้งานออกมาเท่ากัน [16] และค่าความหนืดที่สูงขึ้น ส่งผลให้การระเหยเป็นไอและการกระจายตัวของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ไม่ดีเท่าที่ควร [11, 13] ซึ่งอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกเป็นตัวบอกค่าจำนวนพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นงาน หรืออาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นงานได้ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้พลังงานความร้อนที่น้อยกว่าในการเปลี่ยนให้เป็นงานที่เท่ากันย่อมดีกว่า ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 8

พบว่า D100 มีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกต่ำกว่าทุกอัตราส่วนผสม ในทุกๆความเร็รรอบ แสดงว่า D100 สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นงานได้มากกว่าอัตราส่วนผสมอื่น จึงส่งผลให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกสูงกว่าอัตราส่วนผสม BF5, BF10 และ BF20 ตามลำดับ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 9 ประกอบ

3.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

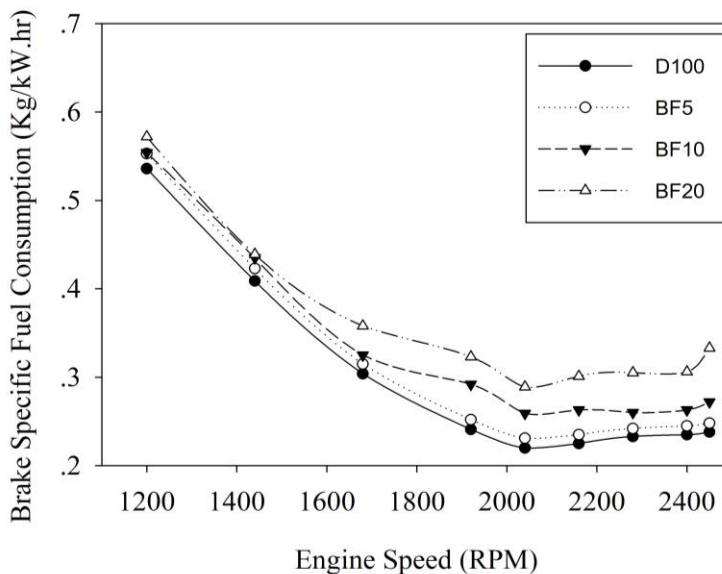
รูปที่ 9 แสดงผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกซึ่งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล และจะเปลี่ยนแปลงตามภาระที่เครื่องยนต์ได้รับในแต่ละความเร็รรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งจะมีค่าต่ำที่ความเร็รรอบต่ำและมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็รรอบสูงขึ้น สาเหตุมาจากการสูญเสียความร้อนที่ลดลงและกำลังที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของไบโอดีเซลยังทำให้ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกลดลง [15, 16] นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยกลุ่มอื่นให้สาเหตุไว้ว่าเกิดจากค่าความหนืดที่สูงขึ้นของเชื้อเพลิงผสมไบโอดีเซลทุกอัตราส่วนผสม ส่งผลให้การระเหยเป็นไอและการเป็นฝอยละอองกระจายในห้องเผาไหม้ไม่ดี ค่าความร้อนที่ต่ำลง ส่งผลให้อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราสิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกลดลง [11, 13] หากพิจารณาจากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนผสม D100 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกสูงสุด และตามด้วย BF5, BF10 และ BF20 ตามลำดับ ซึ่ง BF20 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกต่ำกว่า D100 อยู่ประมาณ 27% ที่ 2040 rpm



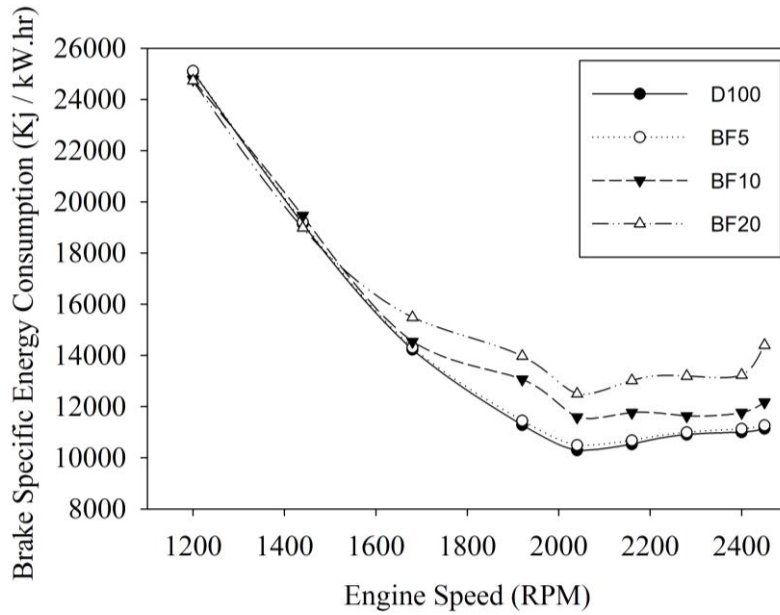
3.6 ปริมาณควันดำ

รูปที่ 10 แสดงผลของปริมาณควันดำซึ่งพบว่า จะเปลี่ยนแปลงตามภาระที่เครื่องยนต์ได้รับในแต่ละ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และจะลดลงตามการ เพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล ซึ่งจะพบว่าที่ ความเร็วรอบ 1200 rpm หรือความเร็วรอบต่ำสุดจะมี ปริมาณควันดำสูงสุดและจะลดลงเมื่อความเร็วรอบ เพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากในขณะที่เครื่องยนต์มีภาระสูง เชื้อเพลิงจะถูกฉีดและเผาไหม้มากขึ้น ทำให้ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของ ไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิง ในทางกลับกันปริมาณ ควันดำที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญอาจเกิดจากการผสม ออกซิเจน ซึ่งเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีโมเลกุลของ ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงนำไปสู่การปรับปรุง

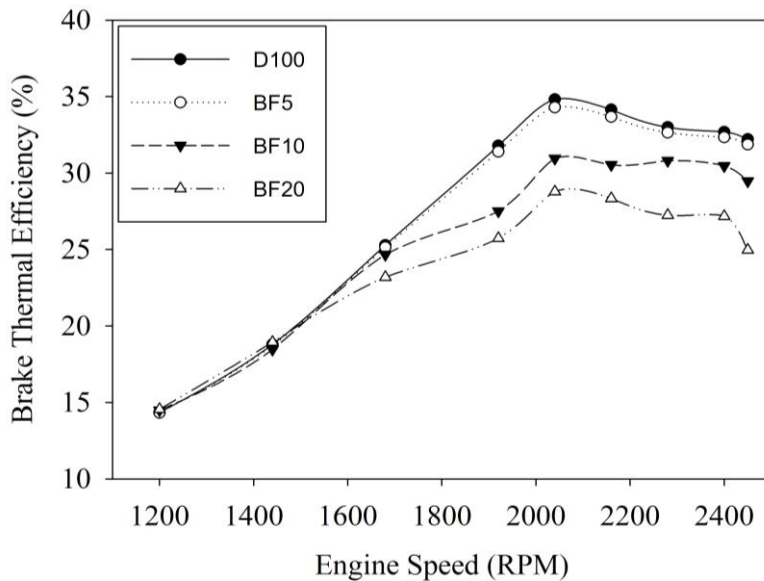
การเผาไหม้ที่ดีขึ้น [15] นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจน และค่าซีเทนที่เพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ เปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลา จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซในห้องเผาไหม้สูงขึ้นและความล่าช้า ในการจุดระเบิดสั้นลง จึงส่งเสริมการเผาไหม้ที่ไม่ สมบูรณ์ลดลง อีกทั้งไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาไม่มี สารประกอบอะโรมาติก จึงช่วยลดการปล่อยปริมาณ ควันดำเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันของเชื้อเพลิง สมบูรณ์ยิ่งขึ้น [11-13], [17] หากพิจารณาจากรูปจะ เห็นได้ว่าอัตราส่วนผสม BF20 มีปริมาณควันดำต่ำสุด ถึงแม้ว่าจะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในปริมาณที่ มากกว่า โดย BF20 มีปริมาณควันดำต่ำกว่า D100 ประมาณร้อยละ 13% ที่ 1200 rpm



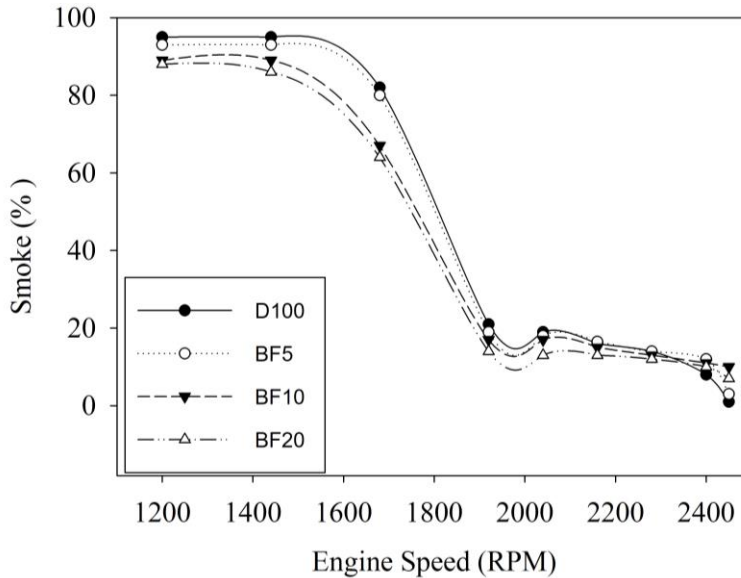
รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลืองพลังงาน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน



รูปที่ 10 ปริมาณควันดำเครื่องยนต์

4. สรุปผลการวิจัย

1. เครื่องยนต์ที่ใช้อัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาทุกอัตราส่วนผสมสามารถทำงานได้ปกติ เช่นเดียวกับน้ำมันดีเซล
2. ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลา โดย BF20 มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำสุดและต่ำกว่า D100 อยู่ 7.6%
3. เครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาทุกอัตราส่วนผสมให้แรงบิดสูงสุดและกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดย BF20 มีแรงบิดสูงสุดและกำลังสูงสุดต่ำกว่า D100 ประมาณ 1.5% ที่ 1440 rpm และ 1.3% ที่ 2400 rpm ตามลำดับ
4. เครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาทุกอัตราส่วนผสมมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

สูงกว่าน้ำมันดีเซล โดย BF20 มีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงกว่า D100 ประมาณ 30% ที่ 2400 rpm

5. เครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาทุกอัตราส่วนผสมมีค่าควันดำลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมน้ำมันใส่ปลาเพิ่มขึ้น โดย BF20 มีค่าควันดำต่ำกว่า D100 ประมาณ 13% ที่ 1200 rpm

6. งานวิจัยที่ดำเนินการในครั้งนี้เป็นการศึกษาทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์แบบกำลังงานเบรก (Brake Horsepower) ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในกระบอกสูบได้ จึงควรวิจัยเพิ่มเติมด้วยการวิเคราะห์ความดันในกระบอกสูบด้วยวิธีทดสอบสมรรถนะแบบแรงม้าบังชี้ (Indicated Horsepower)

7. ควรมีการศึกษาผลกระทบต่ออาการสึกหรอของชิ้นส่วน และสารหล่อลื่นเครื่องยนต์จากการใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาเป็นเชื้อเพลิง



5. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (Accessed on 28 July 2021)
- [2] E. Jiaqiang, M. Pham, D. Zhao, Y. Deng, D. Le, W. Zuo, H. Zhu, T. Liu, Q. Peng and Z. Zhang, Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80, 620–647.
- [3] E. Jiaqiang, M. Pham, Y. Deng, T. Nguyen, V. Duy, D. Le, W. Zuo, Q. Peng and Z. Zhang, Effects of injection timing and injection pressure on performance and exhaust emissions of a common rail diesel engine fueled by various concentrations of fish-oil biodiesel blends, *Energy*, 2018, 149, 979–989.
- [4] E. Jiaqiang, T. Liu, W.M. Yang, J. Li, J. Gong and Y. Deng, Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 2016, 117, 410–419.
- [5] B.G. Şanlı, E. Uludamar and M. Özcanlı, Evaluation of energetic-exergetic and sustainability parameters of biodiesel fuels produced from palm oil and opium poppy oil as alternative fuels in diesel engines, *Fuel*, 2019, 258, 116116.
- [6] B.A. Oni and D. Oluwatosin, Emission characteristics and performance of Neem seed (*Azadirachta indica*) and Camelina (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine, *Renewable Energy*, 2019, 149, 725-734.
- [7] A.K. Agarwal, J.G. Gupta and A. Dhar, Potential and challenges for large-scale application of biodiesel in automotive sector, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 61, 113–149.
- [8] Z. Zhang, E. Jiaqiang, Y. Deng, M. Pham, W. Zuo, Q. Peng and Z. Yin, Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled marine diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 2018, 159, 244–253.
- [9] J.N. Nair, A.K. Kaviti and A.K. Daram, Analysis of performance and emission on compression ignition engine fuelled with blends of Neem biodiesel, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017, 26(4), 927–931.
- [10] www.fishmarket.co.th (Accessed on 30 June 2021)
- [11] S. Prakash, M. Prabhakar, S. Sendilvelan, R. Venkatesh, S. Singh and K. Bhaskar, Experimental studies on the performance and emission characteristics of an automobile engine fueled with fish oil methyl ester to reduce environmental pollution, *Energy Procedia*, 2019, 160, 412–419.



- [12] A. Gharehghani, M. Mirsalim and R. Hosseini, Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission, *Renewable Energy*, 2017, 101, 930–936.
- [13] B. Kathirvelu, S. Subramanian, N. Govindan and S. Santhanam, Emission characteristics of biodiesel obtained from Jatropha seed and fish wastes in a diesel engine, *Sustainable Environment Research*, 2017, 27(6), 283-290.
- [14] JISB 8018, Japanese Industrial Standard Test Method of Performance of Small Size Diesel Engine of Land Use, 1998.
- [15] T. Nguyen, M. Pham and T.L. Anh, Spray, combustion, performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled by fish-oil biodiesel blends, *Fuel*, 2020, 269, 117108.
- [16] S. Godiganur, C.S. Murthy and R.P. Reddy, Performance and emission characteristics of a Kirloskar HA394 diesel engine operated on fish oil methyl esters, *Renewable Energy*, 35(2), 2010, 355-359.
- [17] S. Ushakov, H. Valland and V. Æsøy, Combustion and emissions characteristics of fish oil fuel in a heavy-duty diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 2013, 65, 228-238.

Coating of Nano-film Cr₂O₃ on Welded 304L Stainless Steel and Its Surface Resistance Properties

Nattapong Dussadeeworrarak¹, Pocharapon Silakoo², Attaphon Kaewvilai¹ and Thammanoon Thawechai^{3*}

¹ Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Thai-German Pre-Engineering School, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ School of Integrated Science, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: sistnt@ku.ac.th

Received: 5 October 2021; Revised 18 November 2021; Accepted: 19 November 2021

Online Published: 24 November 2021

Abstract: This research presented the Cr₂O₃ coating and surface properties of welded stainless steel pipe grade 304L. For the welding, process, the 304L specimen was prepared with a single V-butt joint and welded by the tungsten inert gas (TIG) welding process. The weld quality was investigated by visual test (VT), penetrant test (PT) and radiographic test (RT), respectively. After that, the welded specimen was coated with colored-oxide film by chromic reduction. The structural phase and crystallite size of the coated film on welded 304L (C-304L) were analyzed by X-ray diffractometer (XRD) and calculated by Scherrer's equation. The atomic force microscope (AFM) was used for measuring the thickness of the Cr₂O₃ film. In addition, the surface properties such as hardness and electrical resistance of the coated specimens were tested by Vickers hardness tester and digital multi-meter. Finally, the corrosion resistance of specimens before and after surface coating was determined in extremely corrosive condition such as chlorinated sulfuric acid. The results showed that the C-304L has excellent surface resistance properties for erosion-corrosion applications.

Keywords: Nano-film Cr₂O₃, Welded stainless steel; Oxidation; Surface resistance



1. Introduction

Stainless steel pipe-based ASME SA312 TP304L (304L) is austenitic steel consisting of chromium (Cr), nickel (Ni) and low carbon (C) contents with many excellent abilities such as mechanical properties, lightweight, and thermal-corrosion resistances [1-4]. It has been widely used in piping industrial applications such as chemical tanks, steam pipe for power generation, fluid transportation, etc [4-6]. It is easy for welding and fabrication by various welding processes such as friction stir welding (FSW), plasma arc welding (PAW), etc [5-10]. Among the various welding processes, gas tungsten arc welding (GTAW) also known as tungsten inert gas (TIG), is an efficient welding process for 304L which results in welding with high-quality and high penetration [5-8]. However, the welded stainless steel has been affected by welding heat and surface finishing which destroyed the passive film (stable film of chromium oxide) and decreased corrosion resistance property [11-13]. Especially, when those exposed to chloride ions and acid cause corrosion with uniform and pitting formations [6, 14-16]. Therefore, the surface properties of the welded 304L need to be improved before being used in applications under corrosive-erosive conditions.

Chromic oxidation is a kind of method for producing chromium oxide film coated on the

surface of stainless steel [16-18]. The chromium oxide film in different thicknesses can be grown on the surface of stainless steel and affect the stainless steel resulting in several film colors [16-18]. In addition, the coated film can also protect the stainless steel substrate from environmental damages [19-22]. Based on its color form and resistance properties, the surface coating of stainless steel by chromic oxidation has also been interested in a wide range of applications [16-22].

In this work, we have an idea of the coating of chromium oxide on welded 304L pipe (C-304L) by chemical reduction process of Cr^{+6} to Cr^{+3} as a Cr_2O_3 film to improve surface resistant properties. The coated film on the C-304L surface was analyzed by X-ray diffractometer (XRD) and atomic force microscope (AFM). In addition, the surface properties such as hardness, electrical resistance and corrosion resistance of the C-304L were investigated for considering the possibility of using C-304L in erosion-corrosion resistant applications.

2. Experimental Process

2.1 Materials

Stainless steel pipe (ASME SA312, TP304L) with thickness 2.8 mm were supported by KMUTNB. The thoriated tungsten electrode (EWTh-2, the diameter of 2.4 mm) and filler rod (AWS class ER308, the diameter of 2.4 mm)



were purchased from WELDMAX. Argon 99% product from Pacs Machanic System Co., LTD. was used as shielding and backing gasses for the tungsten inert gas welding process (TIG). The chemical agents purchased from Nabakem Mega Check were used for penetrant inspection. ASTM Type I water (ASTM D1193-06) [23] was used for all experiments. All chemicals such as sulfuric acid (H_2SO_4) dichromic acid ($H_2Cr_2O_7$), zinc sulfate ($ZnSO_4$), manganese sulfate mono hydrate ($MnSO_4 \cdot H_2O$), Sodium hydroxide (NaOH), Sodium Chloride (NaCl), acetone (C_3H_6O) and ammonium molybdate tetrahydrate ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) were analytical grade from CARLO ERBA Reagents.

2.2 Instruments

TIG welding machine was obtained from LONGWELL as TIG215S model. Actual current, voltage and welding temperature were measured by multi-meter (UNI-T, UT200) and infrared thermo-sensor (PROSKIT, MT-4612). The visual test (VT; Weld gauge, Metric) and radiographic test (RT; X-ray radiographic tester, General Electric Corporation) were inspected as standard methods.

Table 1 Welding parameter for 304L

Welds	Polarity	Current	Voltage	Speed	Interpass Temp.	Heat Input	Gas Flow Rate
Root	DCEN	110 A	11 V	45 mm/min	30°C	1.7 kJ/mm	15 L/min
Hot	DCEN	120 A	12 V	90 mm/min	65°C	0.9 kJ/mm	15 L/min
Cover	DCEN	130 A	13 V	70 mm/min	85°C	1.5 kJ/mm	15 L/min

For the chemical reduction process and corrosion testing, the autolab series, PGSTAT302N model, was used as a potentiostat instrument. The phase component of the 304L after chromic reduction process welded 304L pipe (C-304L) was characterized by X-ray diffraction (XRD; a Philips X-Pert-MPD X-ray diffractometer) using $Cu-K\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) at the 2-theta of 30° to 80° with a scanning rate of 0.2 s^{-1} . The microstructure of the oxidized S304 was characterized by an atomic force microscope (AFM: ARMFP-3D). The hardness properties of the prepared specimens were measured by the Vickers microhardness tester (Wolpert Wilson Instruments).

2.3 Welding and Inspection

The joint of the 304L specimen was prepared as a single V-butt joint with a groove angle of 60° . The distances of root face and root opening were controlled at 2.0 mm 3.0 mm, respectively. The 304L was welded by the TIG welding process with the weaving technique, at a flat position. The numbers of weld passes (root, hot and cover), as well as the welding parameters with heating inputs, are summarized in Table 1.



The welded specimen was observed for the weld quality at the surface by VT and PT inspections. After that, the inside weld was inspected by RT with the double-wall technique using phosphate film (D7 class) and the exposure parameters of 140 kV, 6 mA, 30 seconds at the focus to film distance (FFD) of 700 mm. The RT image was developed by a computed scan.

2.4 Coating, Characterization, and Testing

The welded 304L was cut in the size of 20 x 50 mm for 4 specimens and polished by sandpaper at 1200 grit. The polished specimen was clean by acetone and dried at 60°C. The original passive film on S304L was eliminated by the immerse specimen in hot base solution (3N NaOH at 60°C) for 30 min, then cleaned by acetone and dried at 60°C. For surface oxidation, an oxidizing aqueous solution was prepared from the mixing of H₂SO₄ (490 g/L) and H₂Cr₂O₇ (250 g/L). The ZnSO₄ (5.0 g/L) and MnSO₄·H₂O (4.0 g/L) were dissolved in the mixed solution for accelerating and stabilizing the oxide film [17]. An (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O (7.0 g/L) was further added into the solution for enhancing the adherence [17, 18] of oxide film on welded 304L surface. After that, the pretreated specimen was immersed in an oxidizing solution. Each specimen was prepared at different times of 4, 8 and 12 min. The obtained specimen was cleaned with de-ionized water and acetone.

The surface oxidized film on the welded specimen was analyzed by XRD to determine the phase structure and lattice parameters [24]. The crystallite size of the oxide structure was calculated by Scherrer's equation as followed: $D = \kappa \lambda / \beta \cos \theta$ where D is the crystallite size; K is a dimensionless shape factor (0.89); λ is the X-ray wavelength of Cu-K α radiation source (1.5406 Å); β is the full width at half maximum of diffraction peak in radians obtained from the peak fitting by Pearson 7 function in Fityk, a data processing software. This quantity is also denoted as $\Delta(2\theta)$ where θ is the Bragg angle [25, 26]. The morphologies of the C-304L at different oxidation times were also analyzed by AFM.

Furthermore, the correlation of film thickness with hardness and electrical properties of C-304L was analyzed. The corrosion of C-304L was tested in mixed solutions of 2M of H₂SO₄ and 5% NaCl [16] by using a potentiostat instrument according to ASTM: G5-14 standard method [27]. The probes of the working electrode (WE) and the counter electrode (CE) were graphite rods while the reference electrode (RE) was Ag/AgCl. The testing temperature was controlled at 25±1 °C. After completing the testing process, Tafel's plot was applied for analyzing the corrosion rate from the polarization curve.

3. Results and Discussion

3.1 Welding and Inspection

From visual and penetrant inspections, the welded pipe from TIG exhibited a good weld without defect and discontinued at the surface as shown in Fig. 1 (a) and (b). The weld dimension of the welded pipe was found approximately 10.0 mm width and 4.0 mm convex which was in the range according to ASME section VIII Div.1 [28]. From the radiographic test, the X-ray images of the welded specimen showed the two contrast zones, dark and brighten grey, which was assigned as the areas of base and weld, respectively (Fig. 1 (c)).

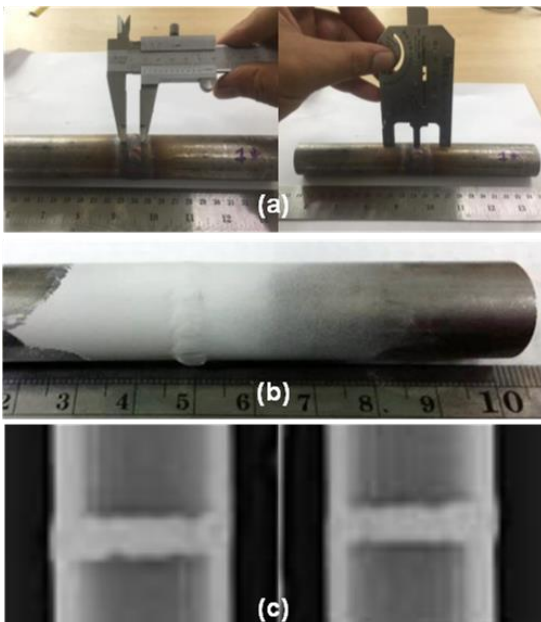


Fig. 1 Inspections of welded 304L:

(a) VT, (b) PT and (c) RT

The RT image of the welded specimen showed the completed weld and penetration without any defect observed at all of the areas. Form inspection testing results (VT, PT, and RT), indicated that the parameters of TIG (Table 1) could control the quality of 304L weld.

3.2 Oxidation, Characterization, and Testing

All surfaces (base and weld zones) of the obtained specimens after oxidation (C-304L) appeared as yellow, brown and blue colors for reaction times of 4, 8 and 12 min, (Fig. 2). It indicated that the oxide was coated on the welded 304L as coated oxide product (C-304L). In addition, it was found that the color of the specimen had not changed after oxidation over 12 min which might indicate that the thickness of oxide film on the specimen eventually reached a steady-state [16-18].

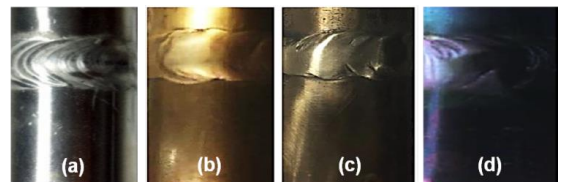


Fig. 2 The welded 304L (a) before and after oxidation at (b) 4, (c) 8 and (d) 12 min

By XRD characterization, the XRD patterns of C-304L (Fig. 3) showed the main peaks of austenitic stainless steel at 2θ of 44.69° , 50.97° and 75.87° according to the crystal structure of



face centered cubic (FCC) [18]. Moreover, the XRD spectrum of the C-304L also exhibited both peaks at 2θ of 36.53° and 46.91° which were implied to the peaks of chromium oxide in form Cr_2O_3 corresponded to the rhombohedral structure with JCPDS No. 72-3533 [24]. The lattice parameters were calculated and found a , b = 4.69 \AA and c = 13.50 \AA which was related to the kinds of literature [24, 29]. The crystallite size of Cr_2O_3 was analyzed at 2θ of 36.53° and 46.91° by Scherrer's equation and found to be 4.82 and 29.70 nm , respectively. According to the changing color on specimens and XRD results, it clearly confirmed that the surface of welded 304L was oxidation into the form of nano- Cr_2O_3 .

The morphological surface (average of thickness and roughness) of the C-304L at different times of chromic reduction was analyzed by AFM analysis as shown in Fig. 4. The results from AFM exhibited that all the specimens of C-304L consisted of surface roughness around $0.10 \pm 0.01 \text{ \mu m}$. This implied that the increased time of oxidation had no effects on the surface morphologies of the C-304L, or in another word, it could be suggested that the oxide films of different oxidation times should exist in the same structural phases. However, the oxidation time influenced the thickness of the Cr_2O_3 film on the C-304L specimen significantly.

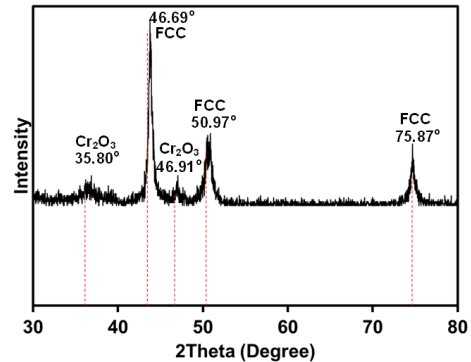


Fig. 3 XRD of welded 304L (a) before and (b) after oxidation at 12 min

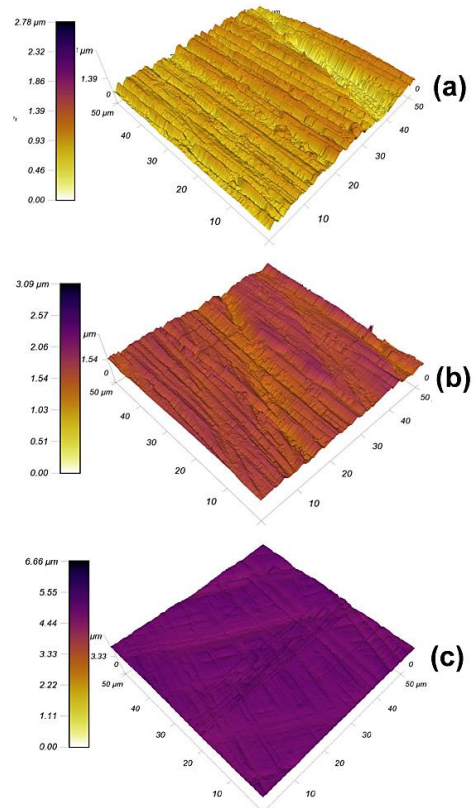


Fig. 4 AFM of welded 304L after oxidation at (a) 4, (b) 8 and (c) 12 min

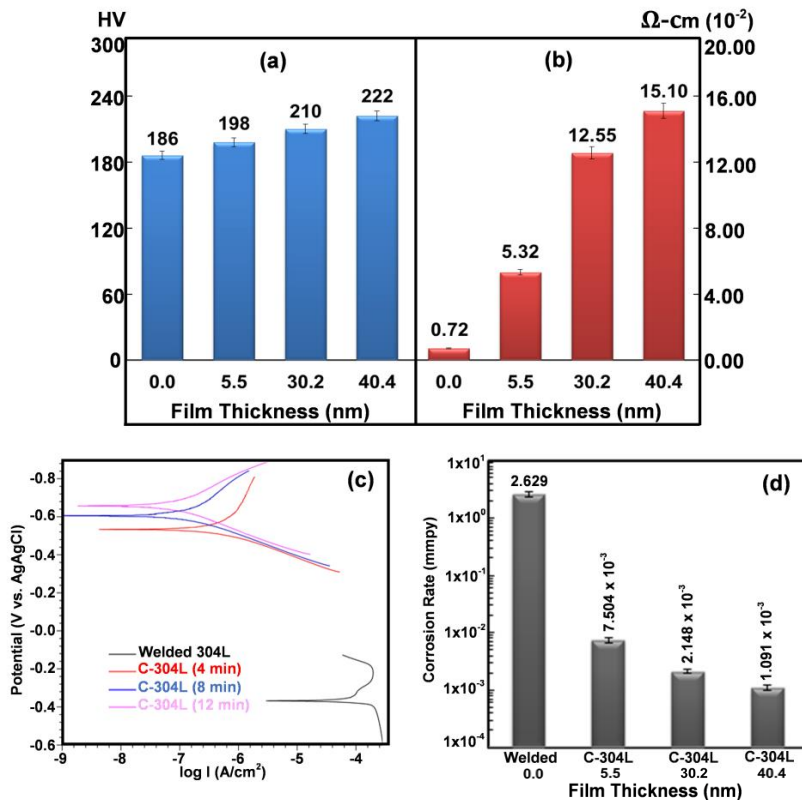


Fig. 5. The testing results of welded 304L and C-304L with various film thicknesses: (a) Hardness, (b) electrical resistivity, (c) polarization curves and (d) corrosion rate

The thickness of the Cr_2O_3 film increased with the increase of reaction time. The results exhibited that the film from the chromic reduction time of 4, 8 and 12 min consisted of the thickness around 5.5, 30.2 and 40.4 nm, respectively.

Fig. 5 (a) and (b) showed the results of hardness and electrical resistivity of 304L and C-304L with different thicknesses of oxide film. The hardness of 304L and C-304L with thickness film of 3.5, 29.0 and 40.3 nm was measured as

186, 198, 210 and 222 HV, respectively indicating that the hardness values of 304L surface were enhanced by the Cr_2O_3 film from the reduction of Cr^{+6} to Cr^{+3} . The electrical resistivity of 304L and C-304L with thickness film of 5.5, 30.2 and 40.4 nm was measured as 0.72×10^{-2} , 5.32×10^{-2} , 12.55×10^{-2} and $15.10 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$, respectively. The result suggested the increase of electrical resistivity of C-304L when the oxide film was grown up on the surface of welded 304L.



For corrosion testing of welded 304L and C-304L, the polarization curves obtained from the electrochemical test in NaCl mixed H_2SO_4 solution are shown in Fig. 5 (c). The corrosion rate was measured by Tafel's plot and further calculated by the corrosion penetration rate (CPR) formula [30]. From corrosion rate (Fig. 5 (d)), the welded 304L exhibited high corrosion rate (2.629 mmpy) than those of C-304L specimens with thickness film of 5.5 nm (7.504×10^{-3} mmpy), 30.2 nm (2.148×10^{-3} mmpy) and 40.4 nm (1.091×10^{-3} mmpy), respectively.

4. Conclusion

The stainless steel pipe 304L was welded by the tungsten inert gas (TIG) welding process. The inspection results showed the completed weld of the welded specimen (welded 304L) without any defect and discontinue. By chromic reaction, the surface of welded 304L was successfully oxidation to obtain colored film coated on the surface of the specimen. The XRD pattern of the specimen after oxidation (C-304L) showed mixed phases of austenitic steel and Cr_2O_3 . The crystallite size of chromium oxide was found to be 5 to 30 nm. The results from AFM showed that the increased oxidative time resulted in the increased Cr_2O_3 thickness on the C-304L surface. From surface oxidation, the Cr_2O_3 could improve

the surface properties of welded 304L such as hardness, electrical resistivity, and corrosion resistance. All the results concluded that the C-304L from surface oxidation showed excellent surface resistance for applications related to erosion-corrosion.

5. Acknowledgment

This research was funded by KMUTNB (RES-CIT 0524/2021)

6. References

- [1] ASTM A312/A312M-18, Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes, 2015.
- [2] M. Naeem, J. Iqbal, M. Zakauallah, M. Shafiq, Z.I. Mujahid, J.C. Díaz-Guillén, C.M. Lopez-Badillo, R.R.M. Sousa, and M.A. Khan, Enhanced wear and corrosion resistance of AISI-304 steel by duplex cathodic cage plasma treatment, *Surface and Coatings Technology*, 2019, 375, 34–45.
- [3] Y. L. He, and Z. B. Xing, Investigations on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of SUS 304 austenitic stainless steel welded joints by pulsed current gas tungsten arc welding, *Materials Research Express*, 2019, 6, 088001, 1–15.



- [4] X. Wang, Z. Yang, Z. Wang, Q. Shi, B. Xu, C. Zhou, and L. Zhang, The influence of copper on the stress corrosion cracking of 304 stainless steel, *Applied Surface Science*, 2019, 478, 492–498.
- [5] K.S. Prasad, C.S. Rao, and D.N. Rao, A review on welding of AISI 304L austenitic stainless steel, *Journal for Manufacturing Science and Production*, 2014, 14(1), 1–11.
- [6] G.R. Mirshekari, E. Tavakoli, M. Atapour, and B. Sadeghian, Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel, *Materials and Design*, 2014, 55, 905–911.
- [7] P.K. Giridharan, and N. Murugan, Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40, 478–489.
- [8] S. Kumar, and A.S. Shahi, Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints, *Materials and Design*, 2011, 32, 3617–23.
- [9] X.K. Zhu, and Y.J. Chao, Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146, 263–272.
- [10] W.S. Lee, C.F. Lin, C.Y. Liu and C.W. Cheng, The effects of strain rate and welding current mode on the dynamic impact behavior of plasma-arc-welded 304L stainless steel weldments, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35A, 1501–1515.
- [11] T.G. Gooch, Corrosion behavior of welded stainless steel, *Welding Journal*, 1996, 135s–154s.
- [12] A. Wahid, D.L. Olson, and D.K. Matlock, Corrosion of weldments, *ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering*, 1993, 6, 1065–1069.
- [13] V. Gopalakrishnan, V. BaluSamy, and S.O. Mohammed Rafi, Corrosion study on weldments of austenitic stainless steel, *International Journal of Scientific Research Engineering and Technology*, 2014, 3(5), 897–901.
- [14] M. Aparicio, A. Jitianu, G. Rodriguez, K. Al-Marzoki, M. Jitianu, J. Mosa, and L.C. Klein, Thickness-properties synergy in organic–inorganic consolidated melting-gel coatings for protection of 304 stainless steel in NaCl solutions, *Surface and Coatings Technology*, 2017, 315, 426–435.



- [15] R.T. Loto, C.A. Loto, A.P.I. Popoola, and M. Ranyaoa, Corrosion resistance of austenitic stainless steel in sulphuric acid, *International Journal of Physical Sciences*, 2012, 7(10), 1677–1688.
- [16] E. Kikuti, R. Conrado, N. Bocchi, S.R. Biaggio, and R.C. Rocha-Filho, Chemical and electrochemical coloration of stainless steel and pitting corrosion resistance studies, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2004, 15, 4, 472–480.
- [17] Z. Cheng, Y. Xue, Z. Tang, L. An and Y. Tian, A one-step process for chemical coloring on stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202, 4102–4106.
- [18] C. Tippyasam, J. Palomas, P. Wiman and A. Kaewvilai, Welded stainless steel: Surface oxidation, characterization, hardness and corrosion resistance, *Key Engineering Materials*, 2020, 856, 106-111.
- [19] Z.B. Zheng, and Y.G. Zheng, Effects of surface treatments on the corrosion and erosion-corrosion of 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution, *Corrosion Science*, 2016, 112, 657–668.
- [20] J.E. Qu, C. Yu, R. Cui, J. Qin, H. Wang, and Z. Cao, Preparation of super-hydrophobic and corrosion resistant colored films on chemically etched 304 stainless steel substrate, *Surface and Coatings Technology*, 2018, 354, 236–245.
- [21] L.V. Taveira, G. Frank, H.P. Strunk, and L.F.P. Dick, The influence of surface treatments in hot acid solutions on the corrosion resistance and oxide structure of stainless steels, *Corrosion Science*, 2005, 47, 757–769.
- [22] E. Kikuti, N. Bocchi, J.L. Pastol, M.G. Ferreira, M.F. Montemor, M.D.C. Belo, and A.M. Simoes, Composition and structure of coloured oxide films on stainless steel formed by triangular current scan and cathodic hardening treatment, *Corrosion Science*, 2007, 49 2303–2314.
- [23] ASTM D1193-06, Standard Specification for Reagent Water, 2011.
- [24] M.M. Abdullah, F.M. Rajab, and S.M. Al-Abbas, Structural and optical characterization of Cr₂O₃ nanostructures: Evaluation of its dielectric properties, *AIP Advances*, 2014, 4, 027121,1–11.



- [25] N. Srisuwan, N. Kumsri, T. Yingsamphancharoen, and A. Kaewvilai, Hardfacing welded ASTM A572-based, high-strength, low-alloy steel: welding, characterization, and surface properties related to the wear resistance, *Metals*, 2019, 9(2), 244.
- [26] C. Tippayasam, and A. Kaewvilai, Steel reinforced polyethylene corrugated pipe: Extrusion welding, investigation and mechanical testing, *Welding Journal*, 2020, 99(2), 52s-58s.
- [27] ASTM G5-14, Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, 2014.
- [28] ASME Section V, Nondestructive Examination, 2017.
- [29] S.E. Ziemniak, L.M. Anovitz, R.A. Castelli, and W.D. Porter, Thermodynamics of Cr_2O_3 , FeCr_2O_4 , ZnCr_2O_4 , and CoCr_2O_4 , *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, 39(11), 1474–1492.
- [30] T. Yingsamphancharoen, N. Srisuwan, and A. Rodchanarowan, The electrochemical investigation of the corrosion rates of welded pipe ASTM A106 grade B, *Metals*, 2016, 6, 207.

Queuing System Analysis: A Case Study of Fast Fashion Business

Ratchadakorn Poohoi*, Choosak Pornsing and Prachuab Klomjit

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

* Corresponding author, E-mail: ratchadakorn1077@gmail.com

Received: 13 June 2021; Revised 14 August 2021; Accepted: 13 October 2021

Online Published: 13 December 2021

Abstract: The purpose of this research paper is to study the theory of queuing to be used to analyze the appropriate number of the service unit, and the sufficient number of customers for the retail store in the shopping mall. Today, the retail selling in the case of study found the problem that the store has too many customers. They must be waited in a long line for cashier. This might affect customers satisfaction. The study explains the examples that is more suitable to use are Model queuing length and who use services to receive services indefinitely ($M/M/s: FCFS/\infty/\infty$). The result of the study shows that the pattern of customers coming in service and explained in detail by Poisson Distribution with the rate of service 0.30 persons per minute. The pattern of service for customer at the counter 3 units with the average number of customers waiting in line are 0.75 persons per minute. The average number of customers in the queuing system are 2.75 persons per minute. The average time a customer spends in line are 1.26 minutes per person, and average time a customer spends in the system are 4.57 minutes per person. The analysis data of waiting time for customers, the average customers that satisfy are 0.59 minutes per person. If changed the counter from 3 service units to 4 service units and relevant to model $M/M/4: FCFS/\infty/\infty$ which the average time a customer spends in line decrease to 0.26 minutes per person, and average time a customer spends in the system decrease to 3.57 minutes per person. This showed that if increased the number of counter service from 3 service units to 4 service units will affect the customer to be able to decrease the waiting time and more satisfied with the service.

Keywords: Queuing Theory; $M/M/s$ Queuing Model; Fast Fashion Business; Customer; Service Unit



1. Introduction

The glowing of the textile industry and clothes are very important to Thailand structure of economy because they are classified as basics necessary life support. It has a value added for the products all included as the 4th in the country. It's below the other industries such as food and drink industry, machinery industry, and automotive industry. In 2554 calculated value to 245 billion bath or 2.2 percent of all GDP and still improving.

The clothes business is one of the end chain of the clothing and textile industry. The number of business registered from 2559 to 2560 increased to 64% value as 281 million baths [1]. It showed the possibility of growth in the industry. The strategic used to improve the clothing business is brand loyalty for that business which the important strategy is to impress the customer with the speed of service, and less waiting time. If the waiting time is too long it will affect the opportunity to selling the service.

Waiting in line is a part of everyday life because every processes have several important functions. Queuing theory is a branch of mathematics that studies and models the act of waiting in lines. This system based on the theory of the probability which the number of the customers entering the service and the performance of the system. The results of this system showed the performance measure or the

performance measurement of the queuing system, and it will be used to support decision making to improve the service system or reduce the work process in the system to be more appropriate and efficient. It's able to find suitable services units and make the customer satisfied for the service.

Today, the retail selling in the case of study found the problem that has too many customers. They must be waited in a long line for cashier. This might affect the customers satisfaction. This problem leads into the case of study to initiate the customer or retail store satisfaction. The researcher uses and applies Queuing theory to analyze the appropriate and sufficiency number of services to match the incoming customers in the retail store at one of the shopping malls.

In the literature review studied, the theory and the case study for guideline of the research found that they use the theory of Queuing theory to learn the process, the work environment, and the problem with the service to use it to resolve the problem.

Jarupong Banthao et al., [2] were analyzed alternatives based on the results of simulation technique to provide for servicing patients, and to reduce the waiting time of patients and their relatives. The results of simulating those three alternative showed that the second alternative, which is adding one more pharmacist for medicine verification during 10:30 a.m. - 2:30 p.m. provided



the optimum: the average time of the queuing system is equal to 557.13 seconds, which decreases from the current step by 14.68%, and average time of queuing is equal to 463.97 seconds, which decreases from the current step by 25.93%. Therefore, it can be concluded that simulation can be used to develop alternatives suitable for real situations under the given employee condition of the case study.

Thaniya Chanapia and Piriya Putthasri [3] were studied research aimed to know about the present working status and queuing system of Bank for Agriculture and Agricultural Co-operatives. The analysis results of the working conditions in the current system shows that if the service counters increase from 3 service units to 4 service units and according to queuing model $M/M/4: FCFS/\infty/\infty$, the waiting period time in the queue will be 0.2891 minutes/person which less than the customer's satisfied period. Therefore, Increase the service counters will make the customers more satisfied.

Nithipat Kamolsuk [4] was studied to analyze the queuing system at the 7-Eleven branch, Muangthai - Patthara, with computer simulation to indicate the optimal server for a daily lot of customers. The results show there were many customers during 7:30 – 9:30 a.m. The distribution of the number of customer is Poisson with the average arrival rate of 2.42 persons per

minute; the distribution of service time was exponential with the average service time being 1.72 persons per minute and the optimum number of server units is two.

N. Itsaraphong, W. Jitmongkol, A. Malikan, P. Toaon, P. Kamlar and A. Chalaingratchai [5] were studied to analyze the working conditions and study the waiting system. The current postal service system and analyzing the number of service channels that are appropriate for the number of people receiving services according to the satisfaction of the service recipients. The results found that the service arrival pattern of service recipients is poisson distribution with an average access rate of 0.3083 people per minute. There is an exponential distribution with an average service rate of 0.4062 per person. Minutes to add service units from the original 4 units to 5 units which correspond to the waiting line model. $M/M/5: FCFS/\infty/\infty$ will reduce the waiting time for the average service in the waiting line to 0.4078 minutes, less than the time that the service provider is satisfied with the waiting queue equal to 1.4750 minutes.

Mana Promrueng et al., [6] were studied to analyze queuing systems of a banking case study and develop a queuing system of services at different times of a banking case study. The results showed that the queuing system for the banking deposit-withdrawal service of the case



study is a queuing model $M / M / 1$. It was reported that the arrival rate of the customer and the service rate offered by staff are 7.81 and 15.20 person per hour respectively. The service recipients provide information about the average desired waiting time to receive services to be equal to 11.25 minutes.

Nattapol Chairwut et al., [7] were explained about ideas Queuing basic model is Model $M/M/1$ and Model $M/M/S$ will suggest which to choose Queuing model to apply to their system and will show their statistics and explained their results which are information from Queuing system to make a discussion to increase more convenient to their customers for their company system.

Inthawadee Chantaksinopas et al., [8] were studied to reduce the service of the public health services at government hospitals with application. The application is tested at Ban Phaeo Hospital RAMA II branch, which found that it may reduce unnecessary cases by 60% . The relationship between dropping in unnecessary cases and the health service time reduction is indicated by using a queueing model of the hospital, which showed the health service time decrease from 33 minutes/person to 6 minutes/person. Thus, it is

possible to apply this application to improve the health services in the hospital where the queue model is similar to the Ban Phaeo Hospital.

2. Materials and Methods

2.1 Queuing Theory

Queuing theory refers to the mathematical study of the formation, function, and congestion of waiting lines, or queues. Queuing is happening as in the waiting stage for the service usually referred to as the customer, job, or request. The service request is more than the service could do usually referred to as the server. The classification of the queuing and the number of customers are very important to use to calculate [9]. There are another effects such as the behave of the customer is the system etc. the 3 basic structures of queuing in Fig. 1 are (1) Customers (2) Queuing (3) Service facility or Server unit.

2. 1. 1 Model queuing length and who use services to receive services indefinitely ($M/M/s: FCFS/\infty/\infty$)

The rate of service system average λ_n is constantly equal to λ for the number of customers n persons. It's used for the problem of Multiple-channel, Single-phase with the equation [10] .

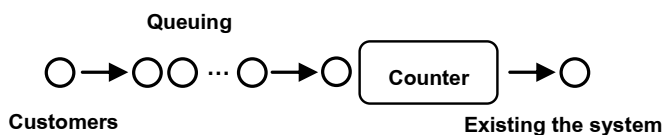


Fig. 1 Queuing System

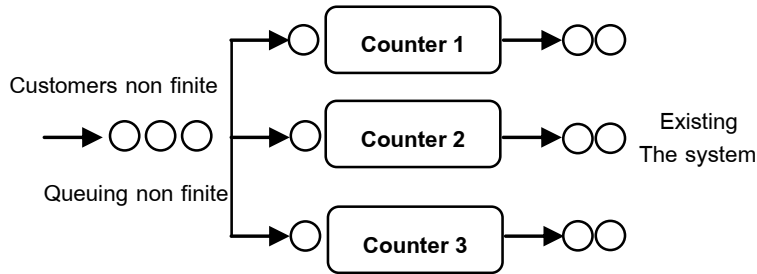


Fig. 2 Multiple-channel, Single-phase

Fig. 2 shows Multiple-channel, Single-phase model.

Probability with no customer in the queuing system in equation (1)

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} \right] + \left[\frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \frac{1}{1 - (\lambda/s\mu)} \right]} \quad (1)$$

Probability with customer in the queuing system n person, $n = 0, 1, 2, 3...$ in equation (2)

$$P_n \begin{cases} = \frac{(\lambda/\mu)^n P_0}{n!} & ; 0 < n < s \\ = \frac{(\lambda/\mu)^n P_0}{s! s^{n-s}} & ; n \geq s \end{cases} \quad (2)$$

Ratio time of each services provider works or the utilization measure of the service unit in equation (3)

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (3)$$

2.1.2 Performance measure or the performance measurement of the queuing system

The average number of customers present in the queuing system in equation (4)

$$L = \lambda W = \lambda \left(W_q + \frac{1}{\mu} \right) = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \text{ (unit/time)} \quad (4)$$

Average number of customers waiting in line in equation (5)

$$L_q = \frac{P_0 (\lambda/\mu)^s}{s!} \left(\frac{\rho}{(1-\rho)^2} \right) \text{ (unit/time)} \quad (5)$$

Average time a customer spends in the system in equation (6)

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \text{ (time/unit)} \quad (6)$$

Average time a customer spends in line with equation (7)

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \text{ (time/unit)} \quad (7)$$

2.2 Methodology

The purpose of the study on the retail store, business in one of the shopping mall, has the purpose to analyze the appropriate and sufficient service system related to the number of incoming customers in the retail store in one of the shopping mall.

Studying and analyzing the service system used in that store, studied from the field, survey,



observations, and interviews from service staffs about the service system, found that there were 3 service units already and can also be another one.

Collecting the information of the customers, the customer arrives in the counter service, and time spend at the counter service. Collecting the data for 30 customer satisfactions in service.

Analyze the collected data according to the queuing theory from the store which is the distribution model, the data of the customers and time spending of service. Therefore, choosing the appropriate queuing model that corresponds to the service system and analyzed for various statistics.

Example of model (M/M/s: FCFS ∞/∞)

M = Poisson arrival distribution

M = Exponential interarrival distribution

s = Number of servers

FCFS = First come first served

∞ = Queuing non-finite or finite

∞ = Customers non-finite or finite

Parameters

λ = Average number of arrivals entering the system per unit time (service unit/time)

μ = Rate of service (unit/time)

L_q = Average number of customers waiting in line (unit/time)

L = Average number of customers present in the queuing system (unit/time)

W_q = Average time a customer spends in line (time/unit)

W = Average time a customer spends in the system (time/unit)

P_0 = Probability with no customer in the queuing system

Fig. 3 shows the flow chart of a system simulation with 1 service unit and Fig. 4 shows the flow chart of simulation of a system with more than one service unit.

3. Results

From the survey site, found the model to use in the study M/M/s: FCFS ∞/∞ . Today the retail store in the case study has model M/ M/ 3: FCFS ∞/∞ and 3 units service. It is a first come first serve. The system supports the unlimited number of customer. From the analyses of the average waiting time for customers that is satisfaction at 0.59 minutes per person.

Table 1 showed that model M/ M/ 3: FCFS ∞/∞ has average time a customer spends in line 1.26 minutes per person and average time a customer spends in the system 4.57 minutes per person.

Table 2 showed that model M/ M/ 4: FCFS ∞/∞ has average time a customer spends in line 0.26 minutes per person and average time a customer spends in the system 3.57 minutes per person.

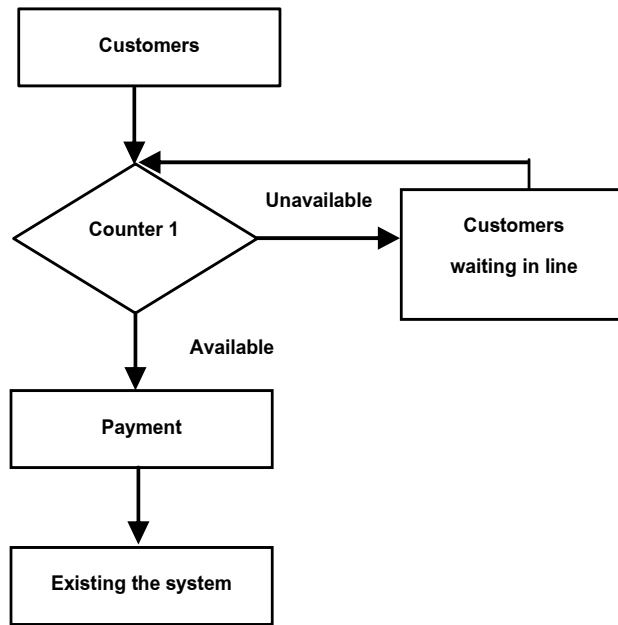


Fig. 3 Flow chart of a system simulation with 1 service unit

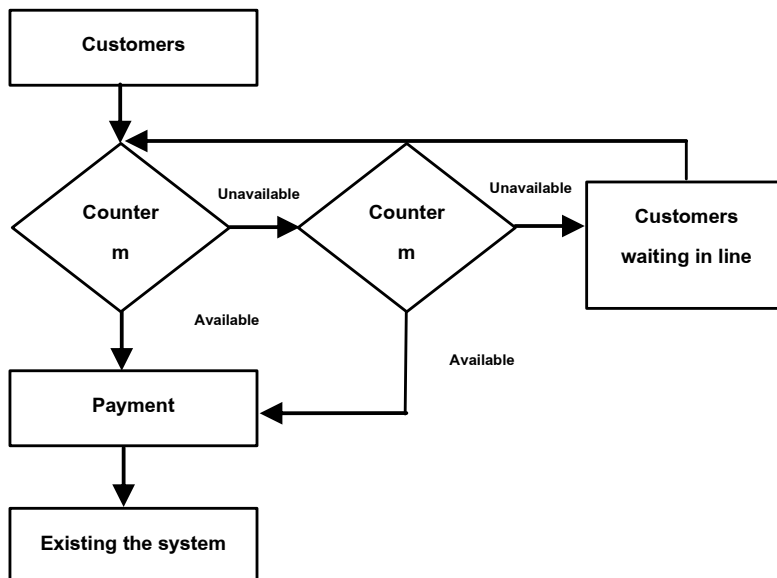


Fig. 4 Flow chart of simulation of a system with more than one service unit

**Table 1** Analysis results from the collected data with model M/M/3: FCFS/ ∞ / ∞

Model	M/M/3: FCFS/ ∞ / ∞
Number of service unit	3
Service unit	Counter
Average number of arrivals entering the system per unit time (person/minute)	0.60
Rate of service (person/minute)	0.30
Average number of customers waiting in line (person/minute)	0.75
Average number of customers present in the queuing system (person/minute)	2.75
Average time a customer spends in line (minute/person)	1.26
Average time a customer spends in the system (minute/person)	4.57
Probability with no customer in the queuing system	0.10

Table 2 Analysis results from the data when increased the counter with model M/M/4: FCFS/ ∞ / ∞

Model	M/M/4: FCFS/ ∞ / ∞
Number of service unit	4
Service unit	Counter
Average number of arrivals entering the system per unit time (person/minute)	0.60
Rate of service (person/minute)	0.30
Average number of customers waiting in line (person/minute)	0.16
Average number of customers present in the queuing system (person/minute)	2.15
Average time a customer spends in line (minute/person)	0.26
Average time a customer spends in the system (minute/person)	3.57
Probability with no customer in the queuing system	0.12



Servicing of the counter service in detail:

1. Time starts as zero seconds with no customer in the service system.
2. Customer entering the system. If the system is unavailable, the customer will be waiting in line.

3. The customer gets service, payment and exits the system.

Fig. 5 shows servicing of the counter service in detail.

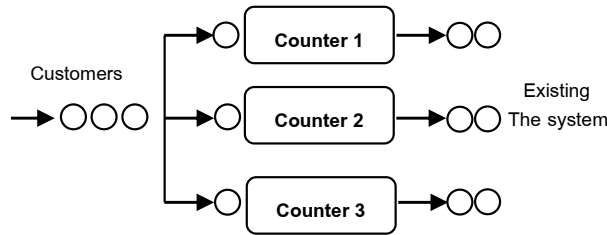


Fig.5 Service of the payment counter

4. Conclusion and Discussion

The study of the theory and the research that applied Queuing theory in the services, there was an unrelated between the unit for service and the unit of being serviced. This created queuing. This research is supported the strong point of the business in one of the retail store in the shopping malls with elevated a better service. Improving queuing system to support the activity and elevated the limit of the sale commercial is the important benefits in decision making in increase-decrease to match the appropriate unit of service to the waiting time for the customer. To change the strategy to responds to the requirement and customer satisfaction which is the important policy to focus.

This research is the queuing analysis. Case study of the retail store in one of the shopping malls. The research study the queuing system

rate of service and rate of being serviced that appropriate and satisfaction for the customer. This research uses M/M/s queuing model to improve in the business in the shopping mall. Found that the model queuing length and who use services to receive services indefinitely (M/M/s: FCFS/ ∞ / ∞) relevant to model M/M/3: FCFS/ ∞ / ∞ with average time a customer spends in line 1.26 minutes per person. The analysis data of waiting time with customer, the average customer that satisfy is 0.59 minutes per person. When increased the counter from 3 service units to 4 service units it's matched with model M/M/4: FCFS/ ∞ / ∞ found that the averages time a customer spends in line decrease 0.26 minutes per person with 79.37% . The opener of all 4 service units will create more customer satisfaction.



5. References

- [1] www.dbd.go.th/index.php.
(Accessed on 29 October 2020)
- [2] J. Banthao, R. Kaewhlang and R. Klaenkratoke, An analysis of queuing system with simulation model at a drug dispensing: A case study of chok chai hospital, Thai Industrial Engineering Network Journal, 2018, 4(1) 17-23. (in Thai)
- [3] T. Chanapia and P. Putthasri, The queuing system by using the queuing theory case study: Bank for agriculture and agricultural co-operatives, Khon Kaen Branch, Thesis, Khonkaen University, Thailand, 2014.
- [4] N. Kamolsuk, Queuing system analysis: The study of 7-Eleven at Muangthai-Patthara Branch, MIS Journal of Naresuan University, 2012, 7(1), 66-78. (in Thai)
- [5] N. Itsaraphong, W. Jitmongkol, A. Malikan, P. Toaon, P. Kamlar and A. Chalaingratchai, Queuing system analysis: Postal service system, The First National and International Conference of Kalasin University, Proceeding, 2019, 129-143.
- [6] M. Promrueng, K. Papan and S. Siritongthaworn, Developing the queuing system for the deposit-withdrawal banking service over the counter, The Second FIT SSRU Conference, Proceeding, 2019, 99-105.
- [7] N. Chairwut, Th. Kannida and Y. Thongprasit, Application of queuing model to solve the waiting problem of service users in the organization, Thesis, Khonkaen University, Thailand. 2017.
- [8] I. Chantaksinopas, T. Chokaumnuy, S. Sampaotong and A. Chungtragarn, ETT medic: An application for minimizing service times and waiting queues of medical services in hospitals, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2) 1-18. (in Thai)
- [9] W. Thongchan, A. Khamchan, and S. Ruangsuwan, The application of queuing theory for deposit counter of The banks, Thesis, Khonkaen University, Thailand. 2017.
- [10] P. Chaichompoo, S. Pongsena, and P. Srinoi, Application of M/M/s queuing model to the hospital, Department of Statistics, Thesis, Khonkaen University, Thailand. 2017.



การปรับปรุงวงจรถูกไหมดกระแสวิกวดแรนที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำ และค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงมาก

ธวัชชัย ทองเหลี่ยม*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thawatchait@webmail.npru.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 29 กันยายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 13 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: วงจรถูกไหมดแวนะลือกไหมดกระแสวิกวดแรนไปใช้ในวงจรมอดูเลเตอร์ วงจรความถี่ดับเบิล วงจรปรับอัตราขยาย และวงจรถรวจวัดค่าแอมพลิจูดเนื่องด้วยคุณลักษณะของวงจรรวมไหมดกระแสวิกวดแรนดีวิตสูง วงจรถูกไหมดกระแสวิกวดแรนที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำและค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง งานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้ออกแบบให้วงจรมีค่าอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ตามคุณลักษณะของวงจรถูกไหมดกระแสวิกวดแรน บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงวงจรถูกไหมดกระแสวิกวดแรนที่ วงจรที่นำเสนอถูกออกแบบด้วยวงจรถูกไหมดแรนกำลังสองแบบแคสโคดซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำด้วยวิธีการป้อนกลับแบบลบ วิธีการนี้จะทำให้วงจรถูกไหมดแรนได้รับกระแสอินพุตได้ดี วงจรถูกไหมดแรนถูกออกแบบให้มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงมากด้วยวงจรถูกไหมดแรนแคสโคดมอสทรานซิสเตอร์ ส่งผลให้ภาคเอาต์พุตสามารถจ่ายกระแสให้กับวงจรถูกไหมดแรนได้อย่างถูกต้อง วงจรถูกไหมดกระแสวิกวดแรนที่ ถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีซีมอสของ TSMC ขนาด $0.18 \mu\text{m}$ วงจรที่นำเสนอใช้แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ 1.5 V ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยนี้ทำการออกแบบให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานย่านอิมิตัว ผลการจำลองแสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $106.93 \Omega (f \leq 1 \text{ MHz})$ ซึ่งน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมา ส่งผลให้วงจรถูกไหมดแรนรับกระแสอินพุตได้ดี ผลการจำลองแสดงค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $4.45 \text{ G}\Omega (f \leq 1 \text{ kHz})$ ซึ่งสูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมา วงจรถูกไหมดแรนสามารถจ่ายกระแสไปที่วงจรถูกไหมดแรนไปได้ดี

คำสำคัญ: วงจรถูกไหมดกระแสวิกวดแรน; วงจรถูกไหมดแรน; ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำ; ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงมาก; ซุปเปอร์แคสโคดมอสทรานซิสเตอร์

Improvement Current-Mode Four-Quadrant Multiplier Low input Impedance and Very High Output Impedance

Thawatchai Thongleam*

Program in Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology,
Nakhon Pathom Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: thawatchait@webmail.npru.ac.th

Received: 1 July 2021; Revised 29 September 2021; Accepted: 13 October 2021

Online Published: 20 December 2021

Abstract: The analog current-mode multiplier is used in the modulator, frequency double, variable gain amplifier, and peak detector since the characteristic of the current mode integrated circuit is high bandwidth. In addition, the current mode multiplier must have a low input impedance and the high output impedance. The previous studies are not designed so that circuit has input and output impedance following to characteristics of the current mode multiplier. This paper presents the improvement of the current mode four-quadrant multiplier. The proposed circuit is designed based on the cascade current squarer circuits. The current mode four-quadrant multiplier is designed that input impedance is low value with negative feedback. In this technique, the circuit receives the proper input current. Furthermore, the current multiplier is designed to have high output impedance with a super-cascode MOS transistor. As a result, the output stage pushes the current to the next stage correctly. Therefore, the current mode four-quadrant multiplier circuit is designed using 0.18 μm TSMC CMOS technology. The supply voltage of the proposed circuit is 1.5 V which is lower than previous research. This research is designed in order to that the MOS transistors are operated in the saturation region. The simulation results show that input impedance is equal to 106.93 Ω ($f \leq 1$ MHz), thus ultra-lower than other research papers. The simulation results show that output impedance is equal to 4.45 $\text{G}\Omega$ ($f \leq 1$ kHz) which is higher than previous studies. Also, the output stage can push the source current to the next state effectively.

Keywords: Current-Mode Multiplier; Four-Quadrant Multiplier; Low Input Impedance; Very High Output Impedance, Super-Cascode MOS Transistor



1. บทนำ

วงจรคุณแบบแอนะล็อกเป็นวงจรที่สำคัญซึ่งถูกที่ใช้ในงานประมวลผลสัญญาณ เช่น วงจรมอดูเลเตอร์ (Modulator) [1, 2] วงจรความถี่ดับเบิล (Frequency Doubler) [3] วงจรปรับอัตราขยาย (Variable Gain Amplifier) [4] วงจรควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Automatic Gain Control) [5] วงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูด (Peak Detector) [6] วงจรโครงข่ายประสาทแบบแอนะล็อก (Analog Neural Network) [7] และวงจรควบคุมลอจิกฟัซซี (Fuzzy Logic Controller) [8] เป็นต้น การนำวงจรคุณไปใช้งานในวงจรต่าง ๆ ต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน เช่น ย่านความถี่ที่ใช้งาน ขนาดแหล่งจ่ายไฟวงจร ระดับสัญญาณอินพุต ความผิดเพี้ยนจากการคูณสัญญาณ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำมาก และค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่สูงมาก เป็นต้น วงจรคุณแบบแอนะล็อกถูกแบ่งออกเป็นสองโหมดการทำงาน ดังนี้ (1) วงจรคุณโหมดแรงดัน และ (2) วงจรคุณโหมดกระแส เนื่องจากปัจจุบัน ขนาดของเทคโนโลยีซีมอสลดลงอย่างมาก และแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรต้องลดลงตาม ด้วยเหตุนี้ วงจรคุณโหมดแรงดันจึงมีย่านการสวิงของสัญญาณลดลงตามด้วย ซึ่งเป็นผลให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนลดลง (Signal to Noise Ratio) ขณะที่วงจรถูกคูณกระแสไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของย่านการสวิงของสัญญาณ เนื่องจากปริมาณสัญญาณกระแสอินพุต และเอาต์พุตไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟเลี้ยง ดังนั้น วงจรคุณโหมดกระแสมีข้อดีกว่าวงจรถูกคูณโหมดแรงดัน [9]

วงจรถูกคูณโหมดกระแสถูกออกแบบให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านอ่อนแอ (Weak Inversion Region) หรือย่านแข็งแรง (Strong

inversion Region) (ย่านเชิงเส้น หรือย่านอิมิตัว หรือทำงานทั้งสองย่าน) [10-19] มอสทรานซิสเตอร์ทำงานย่านแข็งแรงมีข้อดีกว่ามอสทรานซิสเตอร์ทำงานย่านอ่อนแอได้แก่ วงจรมีแบนด์วิดท์สูง ย่านของกระแสอินพุตสูง ความผิดเพี้ยนต่ำ และความเป็นเชิงเส้นสูง อย่างไรก็ตาม มอสทรานซิสเตอร์ทำงานย่านแข็งแรงก็มีข้อด้วยได้แก่ วงจรใช้แรงดันไฟเลี้ยงสูง และผลรวมของกำลังสูง วงจรคุณกระแสสี่ควอดแรนท์ถูกออกแบบอาศัยโครงสร้างของวงจรถานส์ลิเนียร์ [11-12] งานวิจัย [11] ได้นำหลักการของวงจรถานส์ลิเนียร์พื้นฐานมากออกแบบเป็นวงจรถะแสกำลังสอง วงจรประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและชนิดพี ส่งผลให้วงจรไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี และวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ใช้แรงดันไฟเลี้ยงสูง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $1/g_{m17,19}$ และค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ r_{o37} ซึ่งมีค่าไม่สูงมาก งานวิจัย [12] ได้นำเสนองจรกระแสกำลังสอง 2 วงจร ซึ่งออกแบบด้วยวงจรถานส์ลิเนียร์พื้นฐานมาออกแบบวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ วงจรถะแสกำลังสองใช้แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ $2V_{GS} + V_{Dsat}$ ภาคอินพุตของวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นต่อลักษณะไดโอดแคสโคด ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $1/2g_{mR1,5}$ ภาคเอาต์พุตของวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์เท่ากับ $r_{o11(25)}$ นอกจากนี้ วงจรมีแบนด์วิดท์ไม่สูงมาก วงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ถูกนำเสนอในงานวิจัย [13-14] ได้นำวงจรถะแสกำลังสองพื้นฐานหรือวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ (Squarer Circuit) มาออกแบบเป็นวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ ภาคอินพุตของวงจรถะแสสี่ควอดแรนท์ใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นต่อลักษณะไดโอดแล้วต่อแคสโคดกับมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $1/g_m$ และภาคเอาต์พุตมีค่าอินพุต



อิมพีแดนซ์เท่ากับ r_o ซึ่งไม่สูงมาก วงจรดังกล่าวใช้แรงดันไฟเลี้ยงสูง ($V_{DD} = 2V_{GS} + V_{Dsat}$)

งานวิจัย [10] [15-19] นำเสนอวงจรกระแสสี่ควอดแรนท์อาศัยวงจรกระแสกำลังสอง หรือวงจรไบควอดราติก (Biquadratic Cell) 4 วงจร วงจรกระแสถูกนำเสนอในงานวิจัย [15] มีการออกแบบให้อินพุตของวงจรกระแสกำลังสองใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น 2 ตัว ต่อกันและแคสโคดที่เพื่อให่วงจรมีแบนด์วิดท์สูง วงจรใช้แรงดันไฟเลี้ยงสูง ($V_{DD} = 2V_{GS}$) วงจรที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $1/2g_{m1a-c}(2a-c)$ และวงจรมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $g_{m4}r_{o4}/2g_{m5}$ งานวิจัย [16] นำเสนอวงจรกระแสกำลังด้วยการไบอัสให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานย่านเชิงเส้น กระแสอินพุตถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์เอาต์พุต อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ ($R_{in} = r_{N(p),lin}/2$) และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่สูง ซึ่งเท่ากับ r_{oc} มอสทรานซิสเตอร์เสมือนเกตลอยถูกนำมาใช้ในภาคเอาต์พุตของวงจรกระแสกำลังในงานวิจัย [10] ซึ่งวงจรถ้ากำลังสองใช้หลักการเดียวกับ [16] กล่าวคือ ด้านอินพุตใช้ตัวต้านทาน $R_{1,2}$ ต่อกันระหว่างอินพุตและตัวเก็บประจุเพื่อเปลี่ยนกระแสอินพุตเป็นแรงดันไบอัส มอสทรานซิสเตอร์ด้านเอาต์พุต ส่งผลให่วงจรใช้พื้นที่ในการสร้างตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาก วงจรทำงานที่ความถี่สูงได้ไม่ดี อินพุตอิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับ $R_{1,2}$ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $r_{o1,2}$ งานวิจัย [17] ใช้หลักการเปลี่ยนกระแสอินพุตเป็นแรงดันลักษณะเดียวกับงานวิจัย [10] และ [16] ด้านอินพุตใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นต่อลักษณะไดโอดแคสโคด วงจรไม่สามารถทำงานความถี่สูงได้ และค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุตไม่สูงมาก วงจรคุณสมบัติกระแสถูกออกแบบ

ด้วยวงจรกระแสกำลังสองตามแรงดันแบบพบบอกนำเสนอในงานวิจัย [18] วงจรถูกออกแบบให้อาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง ($R_{out} = g_{m5}r_{o2}r_{o5}$) แต่ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ R_2 ซึ่งใช้พื้นที่ในการสร้างวงจรมาก วงจรที่นำเสนอไม่ได้ถูกออกแบบด้วยวงจรสะท้อนกระแสพื้นฐานจึงทำให้กระแสเอาต์พุตไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแสอินพุต งานวิจัย [19] นำเสนอวงจรกระแสสี่ควอดแรนท์และหนึ่งควอดแรนท์ ซึ่งทำการปรับปรุงวงจรถ้ากำลังสองพื้นฐานให้มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงด้วยวงจรแคสโคดตัวเอง เนื่องจากภาคอินพุตถูกออกแบบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ต่อลักษณะไดโอดและต่อแคสโคดกับมอสทรานซิสเตอร์ถูกไบอัสให้ทำงานในย่านเชิงเส้นจึงทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์ไม่ต่ำมาก นอกจากนี้มอสทรานซิสเตอร์คู่กลางของวงจรถ้ากำลังสองไม่สมพงษ์กันจึงส่งผลให้กระแสเอาต์พุตไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแสอินพุต

เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการออกแบบวงจรให้มีความถี่อินพุตอิมพีแดนซ์ ($R_{in(eff)}$) ไม่ต่ำมาก จึงทำให่วงจรตั้งกระแสอินพุตเข้ามาที่วงจรได้ไม่ดี นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมา มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ($R_{out(eff)}$) ไม่สูงมาก ซึ่งทำให่วงจรจ่ายกระแสไปวงจรลบกระแสได้ไม่ดี งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการปรับปรุงวงจรถ้ากำลังสองและสี่ควอดแรนท์ให้มีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำมากด้วยวงจรรขยายไม่กลับเฟส ซึ่งผลการจำลองแสดงถึงค่า $R_{in(eff)}$ ที่นำเสนอต่ำกว่าวงจรถ้ากำลังสองพื้นฐาน 9 เท่า งานวิจัยนี้ นำชุปเปอร์แคสโคดมอสทรานซิสเตอร์มาออกแบบให่วงจรมีค่า $R_{out(eff)}$ สูงมาก ซึ่งวงจรถ้ากำลังสองมีการจำลองแสดงค่า $R_{out(eff)}$ ที่สูงกว่าวงจรถ้ากำลังสองพื้นฐาน 186 เท่า



2. การปรับปรุงค่าอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

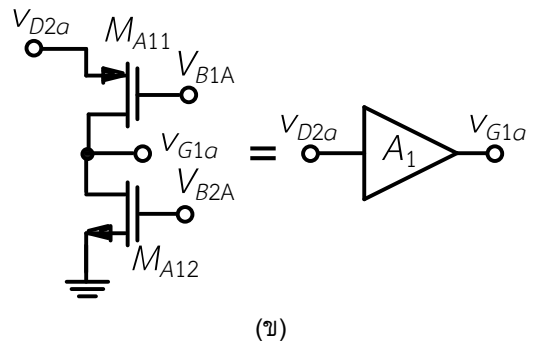
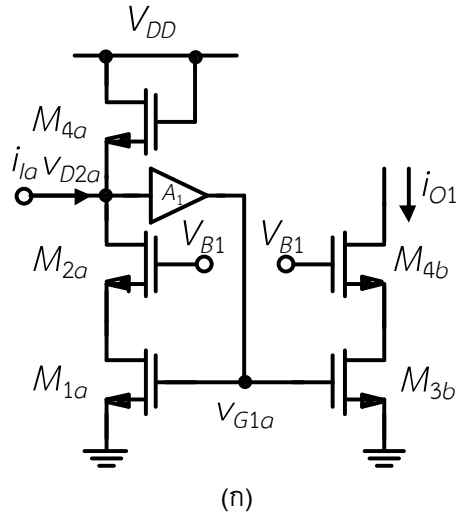
งานวิจัยวงจรรวมทรานซิสเตอร์และสี่ควอดแรนท์ [15] มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (R_{in}) ไม่ต่ำมาก ซึ่งจะทำให้กระแสอินพุตไหลเข้าวงจรได้ไม่เต็มที่ ในส่วนของค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (R_{out}) จะมีค่าไม่สูงมาก ส่งผลให้วงจรรวมทรานซิสเตอร์และสี่ควอดแรนท์ไปให้วงจรภาคถัดไปได้ไม่เต็มที่ วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้ด้วยการต่อวงจรลักษณะป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ที่ภาคอินพุต เพื่อลดค่า $R_{in(eff)}$ ให้ต่ำลงมากได้ และต่อวงจรลักษณะป้อนกลับแบบลบที่ภาคเอาต์พุตเพื่อเพิ่มค่า $R_{out(eff)}$ ให้สูงมากขึ้น

2.1 การปรับปรุงวงจรรวมทรานซิสเตอร์สองแบบแคสโคด

วงจรรวมทรานซิสเตอร์สองแบบแคสโคดถูกออกแบบให้มีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) ด้วยการเพิ่มวงจรรวมทรานซิสเตอร์แบบแคสโคดถูกต่อลักษณะป้อนกลับแบบลบ [20] ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$R_{in(eff)} \cong \frac{1}{g_{m4a} + g_{m1a}g_{mA1}(r_{OA1} \parallel r_{OA2})} \quad (1)$$

เมื่อ $R_{in(eff)}$ คือค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตของวงจรรวมทรานซิสเตอร์ $g_{m1a(4a)}$ คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของ $M_{1(a)}$ และ M_{4a} g_{mA1} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของ M_{A1} r_{OA1} คือค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal resistance) ด้านเอาต์พุตของ M_{A1} ของวงจรรวมทรานซิสเตอร์แบบแคสโคด A_1 และ r_{OA2} คือค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็กด้านเอาต์พุตของ M_{A2}



รูปที่ 1 (ก) วงจรรวมทรานซิสเตอร์สองแบบแคสโคดและ (ข) วงจรรวมทรานซิสเตอร์แบบแคสโคด

ค่า $R_{in(eff)}$ ของวงจรรวมทรานซิสเตอร์สองแบบแคสโคดมีค่าลดลงด้วยอัตราขยายของวงจรรวมทรานซิสเตอร์แบบแคสโคด $[g_{mA1}(r_{OA1} \parallel r_{OA2})]$ วงจรรวมทรานซิสเตอร์แบบแคสโคดที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 1 (ก) ถูกนำมาออกแบบวงจรรวมทรานซิสเตอร์และสี่ควอดแรนท์เพื่อให้มีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำมากได้



2.2 วงจรซัพเปอร์มอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 2 (ก) แสดงซัพเปอร์แคสโคดมอสทรานซิสเตอร์ที่ถูกลำเสนอโดย [21] กรณีสภาวะของซัพเปอร์แคสโคดมอสทรานซิสเตอร์ต่อกับตัวต้านทาน (R_S) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ซัพเปอร์มอสมีการต่อลักษณะป้อนกลับแบบลบทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ ($r_{D,ST1}$) ขาดเรนสูง ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (2)

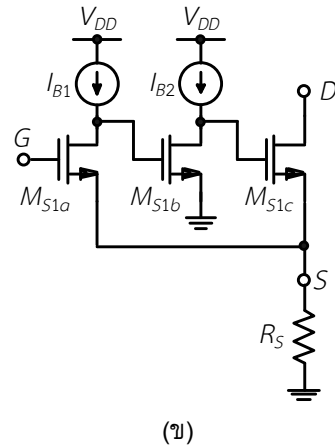
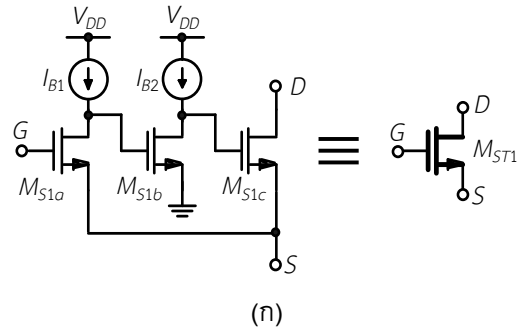
$$r_{D,ST1} \cong g_{mS1b}g_{mS1c} (r_{OS1b} \square r_{OB2})r_{OB1}r_{OS1c} \quad (2)$$

เมื่อ $r_{D,ST1}$ คือค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็ก ขาดเรนของ M_{ST1} $g_{mS1a-1c}$ คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของ M_{S1a} ถึง M_{S1c} g_{mA1} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของ M_{A1} r_{OS1a-c} คือค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็กด้านเอาต์พุตของ M_{A1} $r_{OB1,2}$ คือค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็กด้านเอาต์พุตของ $I_{B1,2}$ และ R_S คือตัวต้านทานต่อที่ขาซอร์ส

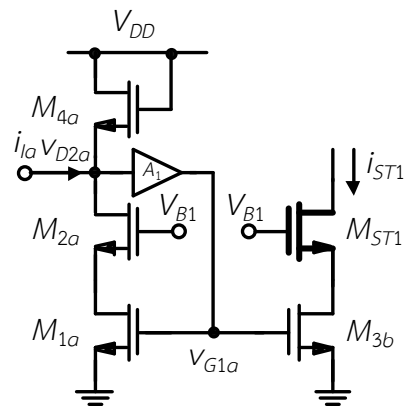
จากข้อดีของวงจรซัพเปอร์แคสโคดมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งมีค่า $r_{D,ST1}$ สูง วิธีการนี้ถูกนำมาใช้ออกแบบวงจรคุณกระแสวิชิตวอดแรนท์ให้มีค่า $R_{out(eff)}$ สูงมากได้

3. วงจรคุณโหมตกระแสวิชิตวอดแรนท์ที่นำเสนอ

รูปที่ 3 แสดงวงจรกระแสกำลังสองแบบแคสโคดที่นำเสนอ วงจรประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ M_{1a} ถึง M_{4a} A_1 และ M_{ST1} วงจรดังกล่าวเป็นการนำวงจรกระแสกำลังสอง (M_{1a} ถึง M_{4a} และ A_1) แสดงในรูปที่ 1(ก) และทรานซิสเตอร์ M_{ST1} ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) มาออกแบบเพื่อให้อิมพีแดนซ์มีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำมากและมีค่า $R_{out(eff)}$ ($r_{D,ST1-4}$) สูงมาก



รูปที่ 2 (ก) ซัพเปอร์มอสทรานซิสเตอร์ และ (ข) ซัพเปอร์แคสโคดมอสทรานซิสเตอร์ [21]



รูปที่ 3 วงจรกระแสกำลังสองแบบแคสโคดที่นำเสนอ



วงจรรวม CMOS ที่ควอดแรนท์ที่นำเสนอตั้งแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ M_{1a} ถึง M_{4d} M_{ST1-4} และ M_5 ถึง M_8 วงจรที่นำเสนอถูกออกแบบด้วยวงจรรวมกำลังสองแบบเดสโคดตั้งแสดงในรูปที่ 3 ทรานซิสเตอร์ $i_x + i_y$ สวิตช์เข้าที่โหนด X_1 และทรานซิสเตอร์ $i_x + i_y$ สวิตช์เข้าที่โหนด Y_1 ขณะที่ทรานซิสเตอร์ $i_x - i_y$ สวิตช์เข้าที่โหนด X_2 และทรานซิสเตอร์ $i_x - i_y$ สวิตช์เข้าที่โหนด Y_2 ทรานซิสเตอร์ $i_x - i_y$ และ $i_x - i_y$ ถูกสะท้อนไปที่ M_{2a-d} แล้วไหลผ่าน M_{ST1-4} ซึ่งทรานซิสเตอร์ i_{ST1-4} ซึ่งเขียนสมการกระแส (3) – (6) ได้ดังต่อไปนี้

$$i_{ST1} = K [b + a(i_x + i_y)]^2 \quad (3)$$

$$i_{ST2} = K [b - a(i_x + i_y)]^2 \quad (4)$$

$$i_{ST3} = K [b + a(i_x - i_y)]^2 \quad (5)$$

$$i_{ST4} = K [b - a(i_x - i_y)]^2 \quad (6)$$

เมื่อ i_x คือค่ากระแส X i_y คือค่ากระแส Y i_{ST1-4} คือค่ากระแสเอาต์พุตของ M_{ST1-4} a มีค่าเท่ากับ $[1/2K(V_{DD} - 2V_{TH})]$ b มีค่าเท่ากับ $(V_{DD} - 2V_{TH})/2$ และ K มีค่าเท่ากับ $\mu_n C_{ox} W/2L$ ซึ่ง V_{DD} คือแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรรวม V_{TH} คือแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) μ_n คือค่าความคล่องตัวของโฮลหรืออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ C_{ox} คือค่าความจุระหว่างเกต W คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส และ L คือความยาวของช่องทางเดินกระแส

จากสมการ (3) ถึง (6) สังเกตเห็นได้ว่ากระแส i_{ST1-4} เป็นฟังก์ชันกำลังสองของกระแสอินพุต กระแส i_{ST1-4} ถูกนำไปสร้างกระแส i_{O1} และ i_{O2} ซึ่งกระแส i_{O1} มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างกระแส i_{ST1} และ i_{ST2} กรณีนี้กระแส i_{O2} มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างกระแส i_{ST3} และ i_{ST4} ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$i_{O1} = 2K [b^2 + a^2(i_x + i_y)^2] \quad (7)$$

$$i_{O2} = 2K [b^2 + a^2(i_x - i_y)^2] \quad (8)$$

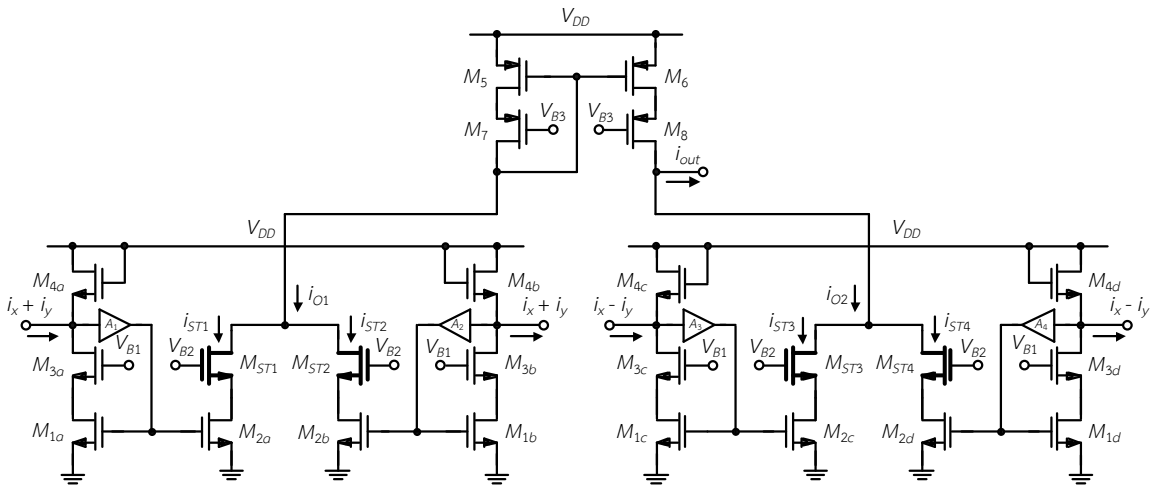
กระแสเอาต์พุต (i_{out}) ของวงจรมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างกระแส i_{O1} และ i_{O2} ซึ่งเขียนสมการที่ (9) ได้ดังต่อไปนี้

$$i_{out} = i_{O1} - i_{O2} = 8Ka^2 i_x i_y \quad (9)$$

เมื่อ i_{O1} คือผลรวมของกระแส i_{ST1} และ i_{ST2} i_{O2} คือผลรวมของกระแส i_{ST3} และ i_{ST4} และ i_{out} คือผลต่างระหว่างกระแส i_{O1} และ i_{O2}

4. การจำลอง ผลการจำลอง และการวิจารณ์ผลการจำลอง

เพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรรวมที่ควอดแรนท์ที่นำเสนอ งานวิจัยฉบับนี้ใช้โปรแกรม HSPICE เพื่อจำลองการทำงานของวงจรรวม เทคโนโลยีที่ใช้เป็นแบบซีมอสที่มีขนาดเท่ากับ $0.18 \mu m$ ของบริษัทไต้หวัน เซมิคอนดักเตอร์ เมนูเฟกเจอร์ริง จำกัด (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited; TSMC) ตารางที่ 1 แสดงขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 4 วงจรคูลนกระแสแบบสี่ควอดแรนท์ที่ถูกปรับปรุง

วงจรถ่ายงานภายใต้ไฟเลี้ยง (V_{DD}) เท่ากับ 1.5 V กระแสไบอัส กระแส I_{DM1a-d} มีค่าเท่ากับ 50 μA I_{DM2a-d} มีค่าเท่ากับ 35 μA และ $I_{D,ST1-4}$ มีค่าเท่ากับ 25 μA ตารางที่ 2 แสดงขนาดมอสทรานซิสเตอร์ของวงจรถ่ายโอนโหมดกระแสที่นำเสนอ

รูปที่ 5 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของค่า $R_{in(eff)}$ ของวงจรถ่ายโอนโหมดกระแสที่นำเสนอ กรณี

ความถี่น้อยกว่า 1 MHz ผลของการจำลองแสดงค่า $R_{in(eff)}$ เท่ากับ 106.93 Ω ซึ่งน้อยกว่าวงจรถ่ายโอน [15] ประมาณ 9 เท่า กรณีความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 1 MHz $R_{in(eff)}$ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยกว่าค่า $R_{in(eff)}$ ของวงจรถ่ายโอน [15] เนื่องจากมอสทรานซิสเตอร์มีตัวเก็บประจุแฝงจึงทำให้เกิดความถี่ซีโรที่อินพุตของวงจรถ่ายโอน ค่า $R_{in(eff)}$ แปรผันตรงกับความถี่ซีโร กรณีความถี่เพิ่มมากขึ้น $R_{in(eff)}$ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 1 แรงดัน และกระแสของวงจรถ่ายโอนโหมดกระแสที่นำเสนอ

แรงดัน (V)		แรงดัน (V)	
V_{DD}	1.5 V	V_{B3}	0.2 V
V_{B1}	1.2 V	V_{B1A}	0 V
V_{B2}	1 V	V_{B2A}	0.5 V
กระแส (μA)		กระแส (μA)	
$I_{D,M1a-d}, I_{D,M3a-d}$	40 μA	$I_{D,M4a-d}$	50 μA
$I_{D,M2a-d}$	35 μA	$I_{D,M5-8}$	25 μA
I_{ST1-4}	25 μA	I_{B1-2}	10 μA

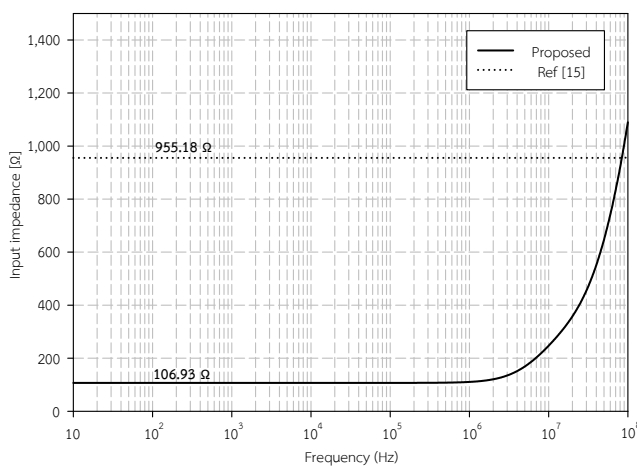


ตารางที่ 2 ขนาดมอสทรานซิสเตอร์ของวงจรคูณโหมดกระแสที่นำเสนอ

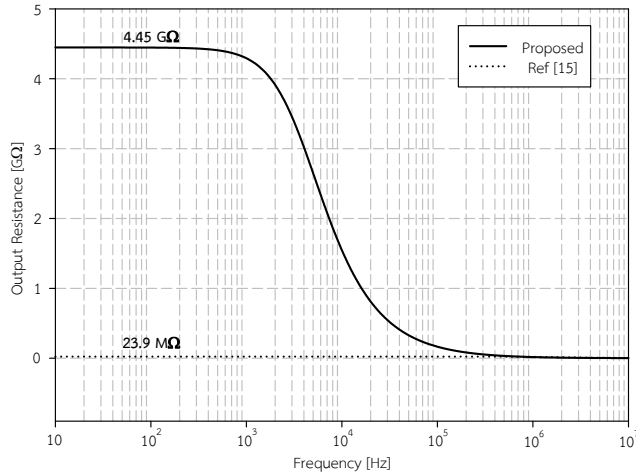
วงจรมอดกระแสสี่ควอดแรนท์			
ทรานซิสเตอร์	W/L	ทรานซิสเตอร์	W/L
M_{1a-d}, M_{3a-d}	1.25 $\mu\text{m}/0.2 \mu\text{m}$	M_{5-8}	8 $\mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$
M_{2a-d}	0.9 $\mu\text{m}/0.2 \mu\text{m}$	M_{A11-41}	17 $\mu\text{m}/1 \mu\text{m}$
M_{4a-d}	6 $\mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$	M_{A12-42}	10 $\mu\text{m}/1 \mu\text{m}$
ซูปเปอร์มอสทรานซิสเตอร์			
M_{S1a-4a}	0.3 $\mu\text{m}/0.3 \mu\text{m}$	M_{S1c-4c}	0.8 $\mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$
M_{S1b-4b}	0.18 $\mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$		

ผลการตอบสนองทางความถี่ของค่า $R_{out(eff)}$ ของวงจรมอดกระแสที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 6 กรณีความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 kHz ค่า $R_{out(eff)}$ มีค่าเท่ากับ 4.45 G Ω ซึ่งมากกว่า $R_{out(eff)}$ ของวงจรมอด [15] ประมาณ 186 เท่า กรณีความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 1 kHz ค่า $R_{out(eff)}$ ลดลง จนกระทั่งประมาณเท่ากับ 23.9 M Ω ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า $R_{out(eff)}$ ของวงจรมอด [15] เนื่องจากมอสทรานซิสเตอร์มีตัวเก็บประจุแฝงดั่งที่กล่าวไว้ ซึ่งทำให้เกิดความถี่โพลที่เอาต์พุตของวงจร เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น $R_{out(eff)}$ จึงมีค่าลดลง ซึ่งคล้ายกับผลตอบสนองความถี่ของวงจรมอดซอร์สร่วมแบบแคสโคด

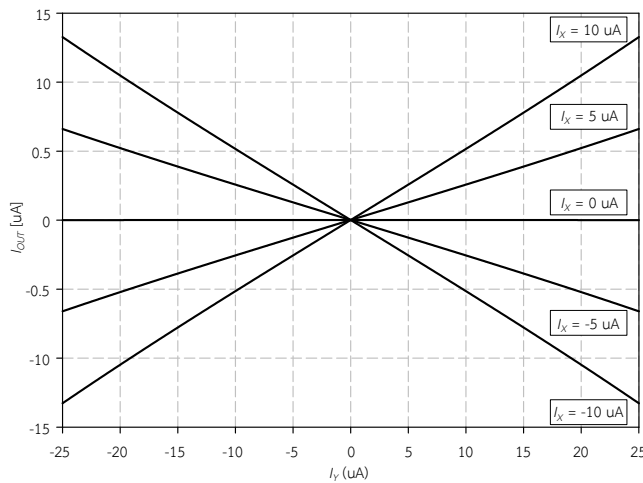
รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองเพื่อหาคุณลักษณะทางดีซีของวงจรมอดกระแสด้วยการกำหนดให้กระแสอินพุต i_x เท่ากับ -10 μA ถึง 10 μA ซึ่งเพิ่มกระแสครั้งละ 5 μA แล้วทำการปรับค่ากระแสอินพุต i_y ตั้งแต่ -25 μA ถึง 25 μA ซึ่งเพิ่มกระแสครั้งละ 1 μA จากผลการจำลองพบว่ากระแสอินพุต i_y มีลักษณะเชิงเส้นในช่วงกระแส i_y ตั้งแต่ -10 μA ถึง 10 μA นอกจากนี้ ผลการจำลองผลการตอบสนองความถี่ของวงจรมอดพบว่าวงจรมอดมีความถี่คัทออฟเท่ากับ 124 MHz ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 5 ค่า $R_{in(eff)}$ ของวงจรมอดกระแส



รูปที่ 6 ค่า $R_{out(eff)}$ ของวงจรถูกกระแส

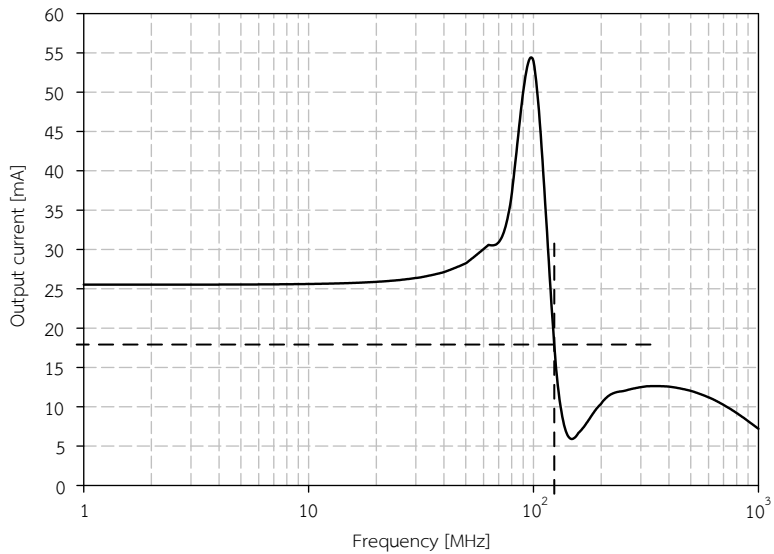


รูปที่ 7 กราฟคุณลักษณะทางดีซี

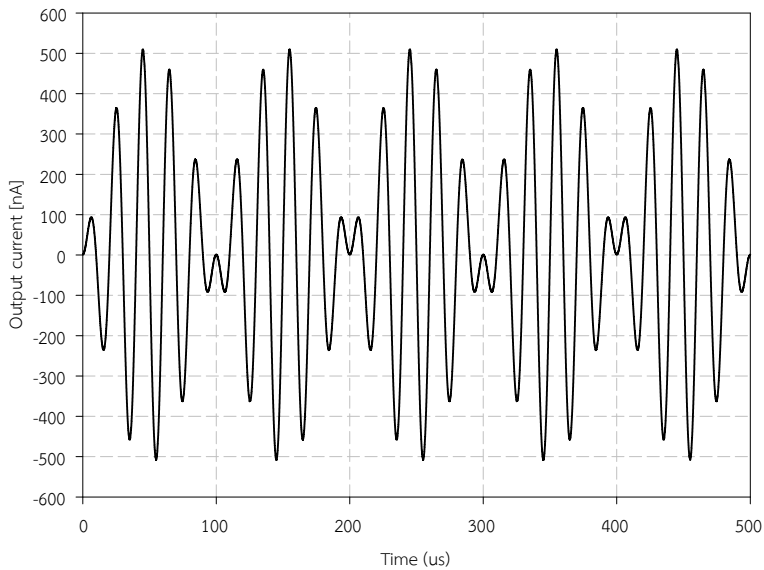
รูปที่ 9 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของจรรยา ซึ่งกระแส i_x เท่ากับ 10 μA ความถี่เท่ากับ 50 kHz และกระแส i_y เท่ากับ 10 μA ความถี่เท่ากับ 5 kHz ผลการจำลอง แสดงผลการมอดูเลตของกระแส i_x และกระแส i_y

บทความนี้ได้มีการวิเคราะห์หาค่าสมการ $R_{in(eff)}$ และ $R_{out(eff)}$ ของวงจรถูกนำเสนอมือเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า $R_{in(eff)}$ มีค่าต่ำ

กว่า R_n ของงานวิจัยที่ผ่านมา และ $R_{out(eff)}$ มีค่าสูงกว่า R_{out} ของงานวิจัยที่นำเสนอในอดีต เมื่อเปรียบเทียบ ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรุ่นใหม่ตกระแสสี่ควอดแรนท์ที่ถูกปรับปรุง และวงจรรุ่นใหม่ตกระแสในอดีต วงจรที่นำเสนอใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมา



รูปที่ 8 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรถูกค้น



รูปที่ 9 ผลคุณกระแส i_x และ i_y ของวงจรถูกค้น



ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรวมโหมดกระแสที่ควอดแรนท์ที่นำเสนอ และงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัย	พารามิเตอร์	
	ความต้านทานอินพุต (Ω)	ความต้านทานเอาต์พุต (Ω)
[10]	R_i	r_{O1}
[11]	$1/g_{m17}$	r_{O37}
[12]	$1/2g_{mR1}$	r_{O11}
[13]	$1/g_{m9}$	r_{O14}
[14]	$2/(g_{m1} + 2g_{m2})$	r_{OT5}
[15]	$1/2g_{m1a,2a}$	r_{O3a}
[16]	$R_{1N(P),lin}/2$	r_{OC1}
[17]	$1/2g_{m1,2}$	r_{O10}
[18]	R_2	$g_{m5}r_{O2}r_{O5}$
[19]	$(1/g_{m1A}) + R_{1B}$	$g_{mD1}r_{OD1}R_{S1}$
[22]	$1/g_{m1A}$	$g_{m4A}r_{O2A}r_{O4A}$
[23]	$1/(g_{mn}g_{mnr}r_{Opf})$	$g_{mpf}r_{Opf}r_{Op}$
นำเสนอ	$1/[g_{m4a} + g_{m1a}g_{mA11}(r_{OA11} \square r_{OA12})]$	$g_{mS1b}g_{mS1c}(r_{OS1b} \square r_{OB2})r_{OB1}r_{OS1c}$

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรวมโหมดกระแสที่ควอดแรนท์ที่นำเสนอ และงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัย	พารามิเตอร์			
	แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (V)	ความถี่ที่ออฟ (MHz)	กำลังสูญเสีย (μW)	เทคโนโลยี (μm)
[10]	1	635	40.4	0.18
[11]	2.8	137	521	0.35
[12]	1.2	32.2	630	0.18
[13]	1.5	300	150	0.18
[14]	1.8	104	180	0.18
[15]	3	413	450	0.5
[16]	2	1,740	850	0.35
[17]	1.5	460	800	0.18
[18]	1.5	1,130	470	0.18
[19]	1.4	178	340	0.18
[22]	1.8	62	144	0.18
[23]	2	260	7,000	0.5
นำเสนอ	1.5	124	550	0.18



5. บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการปรับปรุงวงจรคูณโหมตกระแสสี่ควอดแรนท์ให้มีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำ และมีค่า $R_{out(eff)}$ สูง วงจรที่นำเสนอถูกออกแบบด้วยวงจรสะท้อนกระแสกำลังสองแบบแคสโคด ซึ่งมีการปรับปรุงด้วยวิธีการป้อนกลับแบบลบเพื่อให้ค่าความต้านทานเสมือนอินพุตต่ำ กรณีความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 MHz วงจรมีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำมาก อย่างไรก็ตาม กรณีความถี่มากกว่า 1 MHz วงจรมีค่า $R_{in(eff)}$ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะมากกว่าวงจรที่นำเสนอในอดีต วงจรซูปเปอร์มอสทรานซิสเตอร์ถูกนำมาออกแบบวงจรสะท้อนกระแสกำลังสองมีค่า $R_{out(eff)}$ สูง กรณีความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 kHz วงจรมีค่า $R_{out(eff)}$ สูงมาก สำหรับกรณีความถี่มากกว่า 1 kHz วงจรมีค่า $R_{out(eff)}$ ลดลง ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับวงจรที่นำเสนอในอดีต การพัฒนาวงจรคูณโหมตกระแสที่นำเสนอสามารถทำได้โดยการออกแบบวงจรป้อนกลับแบบลบภาคอินพุตและภาคเอาต์พุตเพื่อให้ภาคอินพุตมีค่า $R_{in(eff)}$ ต่ำ และภาคเอาต์พุตมีค่า $R_{out(eff)}$ สูง ขณะเดียวกัน วงจรมีผลตอบสนองความถี่สูงมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สนับสนุนทุนวิจัย โครงการวิจัยสู่ความเป็นเลิศเพื่อพัฒนาศักยภาพอาจารย์เข้าสู่ตำแหน่งทางวิชาการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.O. Pederson and K. Mayaram, Analog multipliers, mixers, modulators, Analog Integrated Circuits for Communication, Principles, Simulation and Design, 2nd Ed., Springer, Boston, MA, USA, 2008.
- [2] S. Faruque, Radio frequency modulation made easy, Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering, 1st Ed., Springer International Publishing AG, Switzerland, 2017.
- [3] A.J. Lopez-Martin and A. Carlosena, Current-mode multiplier/divider circuits based on the MOS translinear principle, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2001, 28, 265–278.
- [4] T. Arthansiri and V. Kasemsuwan, Current-mode pseudo-exponential-control variable-gain amplifier using fourth-order Taylor's series approximation, Electronics letters, 2006, 379-380.
- [5] V. Kasemsuwan and T. Arthansiri, Current mode automatic gain control, Frequenz, 2008, 62(1-2), 25-29.
- [6] P. Prommee, Integrable CMOS-based current-mode sinusoidal frequency and peak detector, Circuits System Signal Processing, 2017, 36(12), 4937-4962.



- [7] N. Saxena and J.J. Clark, A four-quadrant CMOS analog multiplier for analog neural networks, *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 1994, 29(6), 746-749.
- [8] N. Beyraghi and A. Khoei, CMOS implementation of a novel analog multiplier/divider to realize centroid strategy in defuzzifier block, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2015, 29, 2029-2038.
- [9] C. Toumarzou, F.J. Lidgey and D.G. Haigh, analogue IC design: the current-mode approach, The Institution of Engineering and Technology, London, England, 1990.
- [10] M.M. Maryan, S.J. Azhari and A. Ghanaatian, Low power FGMOS-based four-quadrant current multiplier circuits, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2018, 95, 115-125.
- [11] A.N. Saatlo and S.S. Ozoguz, Design of a high-linear, high-precision analog multiplier, free from body effect, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2016, 24, 820-832.
- [12] I. Aloui, N. Hassen and K. Besbes, Low-voltage low-power four-quadrant analog multiplier in current-mode, 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA 2017), Proceeding, 163-167.
- [13] I. Aloui, N. Hassen and K. Besbes, A CMOS current mode four quadrant analog multiplier free from mobility reduction, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 82, 119-126.
- [14] T. Aghaei and A.N. Saatlo, On realization of a new high-precision and low-power CMOS analog multiplier circuit, *Elektrotehniški Vestnik*, 2018, 85(5), 248-254.
- [15] T. Arthansiri, V. Kasemsuwan and H.K. Ahn, A ± 1.5 V high frequency four quadrant current multiplier, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2005)*, Proceeding, 2005, 1016-1019.
- [16] B. Ghanavati and A. Nowbakht, ± 1 V high frequency four quadrant current multiplier, *Electronics letters*, 2010, 46(14), 1-2.
- [17] I. Aloui, N. Hassen and K. Besbes, ± 0.75 V Four-quadrant analog multiplier in current mode, 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD 2018), Proceeding, 2018, 1045-1050.
- [18] U. Bansal, P. Masiwal, M. Yadav, M. Mohlia and N. Raj, Four-quadrant CMOS analog current multiplier using frequency compensation and 1.5 V supply, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46, 9849–9865.



- [19] R.B. dos Santos, G.A.F. Souza and L.A. Faria, A novel four-quadrant/one-quadrant multiplier circuit, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2021, 138, 153865.
- [20] A.J. Lopez-Martin, J. Ramirez-Angulo, R.G. Carvajal and J.M. Algueta, Compact class AB CMOS current mirror, *Electronics letters*, 2008, 44, 1335-1336.
- [21] J.M. Martinez-Heredia and A. Torralba, Enhanced source-degenerated CMOS differential transconductor, *Microelectronics Journal*, 2011, 42, 396-402.
- [22] C.A. De La Cruz-Blas, G. Thomas-Erviti, J.M. Algueta-Miguel and A. López-Martín, CMOS analogue current-mode multiplier/divider circuit operating in triode-saturation with bulk-driven techniques, *Integration*, 2017, 59, 243-246.
- [23] A. Diaz-Sanchez, J.C. Mateus-Ardila, G. Zamora-Mejia, A. Diaz-Armendariz, J.M. Rocha-Perez and L.A. Moreno-Coria, A four quadrant high-speed CMOS analog multiplier based on the flipped voltage follower cell, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2021, 130, 153582.

ผลกระทบของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ: สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง

ธนวิชญ์ ภาคอรธร¹ มนต์วิมล แก้วทิพย์¹ ยศวีร์ พูนจันทร์¹ และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา^{1,2,3*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ศูนย์วิจัยการออกแบบและวิศวกรรมสำหรับระบบรางและระบบการขนส่งสมัยใหม่, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: siriorn.i@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 14 กันยายน 2564 ; วันที่ตอบรับบทความ: 20 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุล และสารทำให้เกิดฟองในปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัว ของยางธรรมชาติ เพื่อทำเป็นชั้นยางกันรั่วของถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดกันรั่วได้ด้วยตัวเอง โดยนำยางมาผสมกับสารเชื่อมโยงโมเลกุล (0.5 และ 1.5 phr) และสารทำให้เกิดฟอง (0 4 8 และ 12 phr) ที่สัดส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง นำยางที่ได้มาหาระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้ว จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานยางด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อน นำชิ้นงานที่ได้มาหาปริมาณรูพรุนและทดสอบสมบัติเชิงกล (ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส) ทั้งก่อนและหลังการบวมตัว ด้วยกล้องจุลทรรศน์และเครื่องทดสอบแรงดึงยึดอเนกประสงค์ ตามลำดับ จากการทดลองสรุปได้ว่าการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง จากผลการทดลองสรุปได้ว่ายางสูตร NR2 ที่เติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณ 1.5 และ 4 phr ตามลำดับ เป็นยางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำเป็นชั้นยางกันรั่วดังกล่าว เพราะมีสัดส่วนของเนื้อยางและรูพรุนที่เหมาะสม ทำให้มีอัตราการบวมตัวเร็วที่สุด และมีความแข็งแรงสูงสุดทั้งก่อนและหลังการบวมตัว

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ; การบวมตัว; สารเชื่อมโยงโมเลกุล; สารทำให้เกิดฟอง; รูพรุน

Effect of Crosslinking Agent and Blowing Agent on the Properties of Natural rubber: Morphology and Mechanical Properties - Before and After Fuel Swelling

Tanawit Park-aut¹, Manussawin Kaewtip¹, Yotsawee Poonchan¹ and Siriorn Isarankura Na Ayutthaya^{1,2,3*}

¹ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

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

³ Center for Design and Engineering for Railway and Modern Transport System, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author, E-mail: siriorn.i@cit.kmutnb.ac.th

Received: 14 July 2021; Revised 14 September 2021; Accepted: 20 October 2021

Online Published: 22 December 2021

Abstract: This research work studies the effect of crosslinking agent and blowing agent at various concentrations, on morphology and mechanical properties, as before and after fuel swelling, of the natural rubbers which applied as the self-sealing layer of the fuel tank. The rubbers were blended with the crosslinking agent (0.5 and 1.5 phr), and the blowing agent (0, 4, 8 and 12 phr) at various concentrations, by using a two-roll mill machine. The curing time (t_{c90}) of each rubber was measured by using an oscillating disk rheometer. The rubbers were fabricated by using a hot-press compression molding machine. Then, the rubbers were measured the porous content and the mechanical properties (such as ultimate tensile strength, elongation at break and modulus), as before and after fuel swelling, by using an optical microscope and a universal testing machine, respectively. It was found that the crosslinking agent and the blowing agent affected to morphology and mechanical properties of the rubbers, as before and after fuel swelling. From these results, it can be concluded that the best formula that proper to use as self-sealing materials was NR2, which was the rubber that blended with the crosslinking agent and the blowing agent at 1.5 and 4 phr, respectively. Because this rubber has a proper ratio of the rubber matrix and the porous, as a result, it has the highest rate of swelling and strength, as before and after fuel swelling.

Keywords: Natural rubber; Swelling; Crosslinking agent; Blowing agent; Porous



1. บทนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยของอากาศยานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่ช่วยทำให้อากาศยานมีความปลอดภัยมากขึ้น ได้แก่ ถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดกันรั่วได้ด้วยตัวเอง หรือ “Self-sealing Fuel Tank” โดยถังน้ำมันนี้ถูกใช้เพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงขณะใช้งาน [1-3]

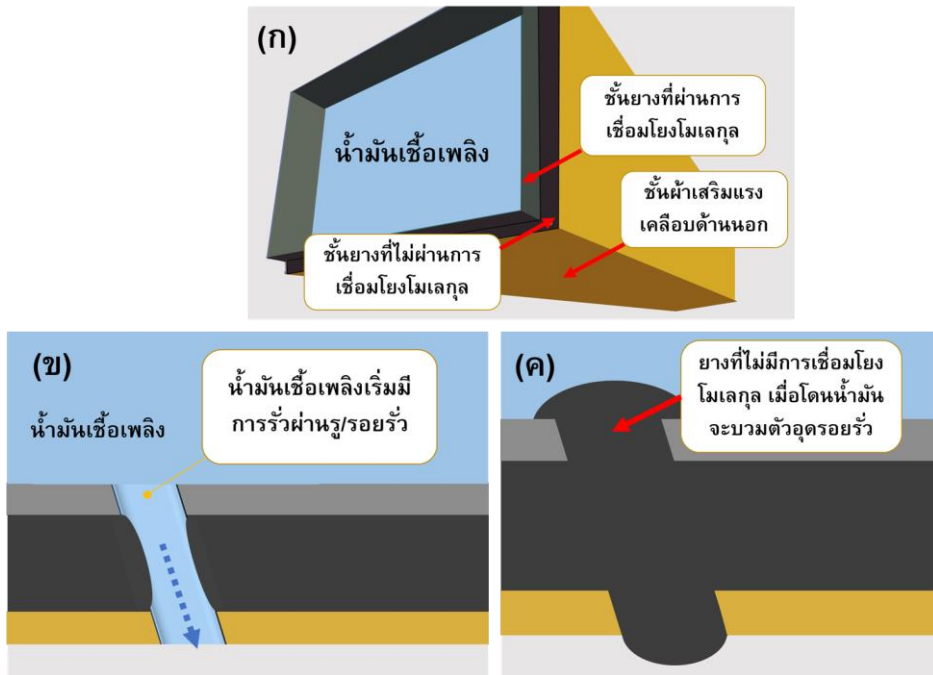
ถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดนี้ เริ่มมีการนำมาใช้งานทางทหารในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 และสงครามเกาหลี [1, 4] เมื่อถังน้ำมันเชื้อเพลิงของอากาศยานเกิดรอยรั่วหรือถูกยิงด้วยกระสุนปืน ถังน้ำมันชนิดนี้จะมีชั้นของวัสดุที่เกิดการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำมัน ทำให้สามารถอุดรอยรั่วได้ [1, 5-7]

รูปที่ 1 แสดงหลักการของถังน้ำมันกันรั่ว เมื่อถังน้ำมันเชื้อเพลิงถูกเจาะหรือเกิดรอยรั่ว (รูปที่ 1 ข) น้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลออกมาสัมผัสกับชั้นยาง ทำให้ยางบวมตัวจนปิดรูรั่วได้ (รูปที่ 1 ค) จึงช่วยลดการสูญเสียน้ำมันเชื้อเพลิง ลดความเสี่ยงต่อการติดไฟและระเบิด เพิ่มโอกาสในการนำอากาศยานลงจอดได้อย่างปลอดภัย [1, 3]

โดยทั่วไปถังน้ำมันดังกล่าวจะมีส่วนประกอบสำคัญคือชั้นของแผ่นยางและผ้าเสริมแรงหลายชั้น โดยชั้นในสุดที่ติดกับตัวถังน้ำมันเป็นชั้นของวัสดุยางที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (Untreated Natural Rubber) ชั้นถัดมาเป็นชั้นของยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized Rubber) และชั้นนอกสุดเป็นชั้นของผ้าเสริมแรง (Reinforced Fabric) (รูปที่ 1 ก) [4-5] โดยวัสดุชั้นในสุด

มักทำจากวัสดุที่ดูดซับน้ำมันเชื้อเพลิง (แก๊สโซลีนและเบนซิน) ได้อย่างรวดเร็ว มีการบวมตัวได้ดีเมื่อสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง และบวมตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เพราะอากาศยานนั้นบินที่เพดานบินสูงซึ่งมีอากาศเย็นจัด โดยวัสดุที่บวมตัวดีในน้ำมันเชื้อเพลิงที่สภาวะดังกล่าวได้ดีที่สุด ได้แก่ ยางธรรมชาติ [4] แต่ในบางประเทศอาจมีข้อจำกัดในการผลิตยางธรรมชาติ ก็อาจใช้ยางสังเคราะห์ที่มีราคาสูงกว่า (เช่น ยางบิวตะไดอีน ยางพอลิยูรีเทน และยาง ไอโซพรีน ไอโซพรีน เป็นต้น) แทนได้ แม้ว่าจะมีอัตราการบวมตัวที่ช้ากว่ายางธรรมชาติ และใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ไม่ดีเท่ายางธรรมชาติก็ตาม [4, 8]

ในช่วงเวลาต่อมา มีบริษัทเอกชนได้ทำการปรับปรุงรูปแบบของวัสดุกันรั่วให้มีการบวมตัวได้เร็วขึ้น โดยทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดโฟมพอลิยูรีเทน (ที่ถูกประกบด้วยแผ่นพอลิยูรีเทน) เพราะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้มีการบวมตัวเร็วขึ้น แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียที่น้ำหนักวลคือ หากเม็ดโฟมหลุดเข้าไปในถังน้ำมันและเคลื่อนตัวไปสู่ระบบท่อส่งน้ำมันที่มีขนาดเล็กและความกดเคี้ยว อาจทำให้ท่อส่งน้ำมันอุดตัน และไม่สามารถส่งน้ำมันไปยังเครื่องยนต์ได้ ทำให้เครื่องยนต์ดับขณะทำการบิน เป็นอันตรายต่อชีวิตนักบินและลูกเรือ [9] ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงควรมีการออกแบบให้ชั้นยางมีความเป็นรูพรุนแทน ซึ่งจะช่วยให้ยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเพียงพอ (บวมตัวได้เร็ว) แต่ก็ยังความต่อเนื่องและความแข็งแรงขณะบวมตัวได้อย่างเพียงพอที่จะไม่เกิดการขาดและหลุดเข้าไปในระบบท่อของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ง่าย



รูปที่ 1 โครงสร้างถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดกันรั่วได้ด้วยตัวเอง (ก) น้ำมันรั่วไหลผ่านรู (ข) และยางกับน้ำมันเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากันทำให้ยางเกิดการบวมตัวอุดรูร้าว (ค)

งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาถึงความสามารถในการบวมตัวของยางในสารอินทรีย์ และพบว่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล ปริมาณความเป็นรูพรุน รวมถึงชนิดและความหนืดของสารอินทรีย์ [8, 10-13] โดยในกรณีที่ยางไม่มีรูพรุน พบว่าการบวมตัวของยางแปรผกผันกับปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลในเนื้อยาง [10-11] แต่ในกรณีที่ยางมีรูพรุนกลับพบว่าการบวมตัวของยางในสารอินทรีย์ไม่ได้แปรผกผันกับปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลในเนื้อยางเพียงอย่างเดียว แต่จะมีส่วนผสมที่เหมาะสมที่ทำให้ยางมีการบวมตัวได้ดีที่สุด [13] ซึ่งหากมีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลที่มากเกินไป สายโซ่ที่เป็นร่างแหจำนวนมากจะทำให้

สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนตัวได้ยาก ทำให้ขนาดของรูพรุนในชิ้นงานมีขนาดเล็กลง และมีการดูดซับสารอินทรีย์ได้น้อยลง จึงบวมตัวลดลงด้วย แต่หากมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยเกินไป ยางจะยุบตัวไม่เกิดการทรงตัวเป็นรูปทรงที่ต้องการ เพราะความแข็งแรงของยางขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุล (Crosslinking Agent) โดยจะมีแนวโน้มที่แข็งแรงขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ หากมีปริมาณรูพรุนมากเกินไป ก็จะยิ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของยางมากขึ้นด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานตามขอบเขตที่ต้องการ [8, 12] แต่อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ได้กล่าวถึง



ทั้งหมดข้างต้น ชิ้นงานยางถูกนำมาทดสอบความแข็งแรงแบบทั่วไปเท่านั้น ไม่ได้มีการหาความแข็งแรงขณะยางบวมตัว เพราะงานวิจัยส่วนมากนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุดซับน้ำมันในท้องทะเล ซึ่งขอบเขตของงานต่างกับงานวิจัยนี้

จากข้อมูลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะใช้ยางธรรมชาติมาทำการพัฒนาเป็นชั้นยางกันรั่ว เพื่อต้องการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติของประเทศไทยให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลายมากขึ้น โดยต้องการปรับปรุงให้ยางมีความเป็นรูพรุนที่เหมาะสมเพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำนวนมากและบวมตัวได้เร็ว อีกทั้งยังต้องมีความแข็งแรงทั้งก่อนและหลังการบวมตัว โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้ คือศึกษาหาปริมาณรูพรุนและความแข็งแรงที่เหมาะสมของเนื้อยาง โดยการเติมสารทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent) และเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ยางบวมตัวหลังการสัมผัสน้ำมันเชื้อเพลิงได้อย่างรวดเร็วและยังคงไว้ซึ่งความแข็งแรงทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ยางธรรมชาติ (เกรด STR 5L) แบบยางก้อน สารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) สารไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลลิ้นไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine; 6PPD) สารโทลูอีนซัลโฟนิลไฮไดรไรด์ (Toluenesulfonyl Hydrazide)

สารไดเบนโซไทโอะซิลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl Disulfide; MBTS) สารเตตระเมทริลไธยูรามโมโนซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram Monosulfide, TMTM) สารซัลเฟอร์ (Sulphur) และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน 95

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) บริษัท ชัยเจริญการช่าง จำกัด (ประเทศไทย) เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Hot Press Compression Molding) รุ่น MT80 บริษัท Labtech Engineering (ประเทศไทย) เครื่องทดสอบแรงดึงยืดอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น AG-1 บริษัท SHIMADZU (ประเทศญี่ปุ่น) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disc- Rheometer, ODR) รุ่น GT-7070-S2 บริษัท GOTECH (ประเทศไทย) กล้องจุลทรรศน์แบบซุมสเตอริโอไมโครสโคป (Stereo Microscope Zoom, SMZ) รุ่น 745T บริษัท NIKON (ประเทศญี่ปุ่น) เครื่องชั่งแบบดิจิทัลอล (3 ตำแหน่ง) (Precision Balance) รุ่น ML204 บริษัท Mettler Toledo (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์)

2.2 การเตรียมยางคอมปาวด์

การเตรียมยางคอมปาวด์ทำได้โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับสารเคมี ตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 ทำการผสมในเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง โดยไม่ต้องควบคุมอุณหภูมิ (ทั้งนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของเครื่องผสมเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส) ความเร็วรอบในการหมุนของลูกกลิ้งเท่ากับ 40 รอบต่อนาที โดยทำการผสมสารเคมีชนิดต่าง ๆ ตามลำดับจากบนลงล่าง ตามตารางที่ 1



ตารางที่ 1 สูตรการผสมสารเคมียาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)							
	STD1	STD2	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	NR6
ยางธรรมชาติ (SRT 5L)	100	100	100	100	100	100	100	100
สารกระตุ้นปฏิกิริยวัลคาไนซ์ (White Seal)	4	4	4	4	4	4	4	4
สารกระตุ้นสำหรับตัวเร่ง (Stearic Acid)	2	2	2	2	2	2	2	2
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (6PPD)	1	1	1	1	1	1	1	1
สารทำให้เกิดฟอง (Sulfonyl Hydrazide)	0	0	4	4	8	8	12	12
สารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนซ์ (MBTS)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
สารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนซ์ (TMTM)	1	1	1	1	1	1	1	1
สารเชื่อมโยงโมเลกุล (Sulphur)	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5

2.3 การหาสภาวะที่ทำให้ยางเกิดการคงรูป

นำยางคอมปาวด์สูตรต่าง ๆ ไปหาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch Time, ts_2) ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิด (MH-ML) โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่งในการทดสอบ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 จากนั้น นำอุณหภูมิและระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป tc_{90} ไปใช้ในการคงรูปยาง

2.4 การผลิตชิ้นรูปชิ้นงานยาง

นำยางคอมปาวด์ที่ได้ ไปทำการคงรูปให้เป็นชิ้นงานให้มีขนาด กว้างxยาวxหนา เท่ากับ 15x15x3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป tc_{90} ตามที่ได้จากข้อ 2.3

2.5 การหาค่าร้อยละการบวมตัวของยาง

นำยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปที่ได้ในแต่ละสูตร มาทดสอบการบวมตัวของชิ้นงาน โดยนำแผ่นยางมาตัดให้เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร

จำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร ทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่ในน้ำมันเบนซิน (แก๊สโซลีน) ที่บรรจุในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดที่ปริมาณน้ำมัน 100 มิลลิลิตร (รูปที่ 7 (ก)) เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดยในช่วง 3 ชั่วโมงแรก จะชั่งน้ำหนักห้ำงกันทุก 15 นาที และในช่วง 6 ชั่วโมงหลัง จะชั่งน้ำหนักห้ำงกันทุก 30 นาที และนำมาคำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการที่ (1)

$$Q_t = \left(\frac{\left(\frac{w_t - w_0}{w_0} \right) \times 100}{M_w} \right) \quad (1)$$

โดย Q_t คือ ร้อยละการบวมตัว

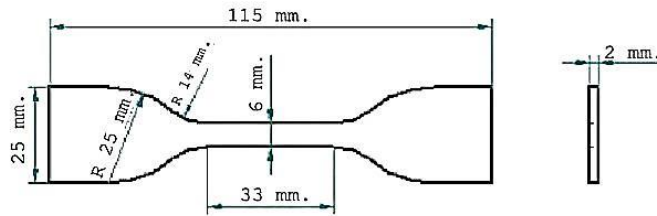
w_t คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

w_0 คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

M_w คือ มวลโมเลกุลของน้ำมันเบนซิน ($114.23 \text{ g mol}^{-1}$)

2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปได้จากข้อ 2.4 มาทำการเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) (รูปที่ 2) จากนั้น นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบ



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบตาม ASTM D412 (Die C)

โดยทำการดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยืดอเนกประสงค์ ใช้ความเร็วการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการดึงจนชิ้นงานแยกขาดออกจากกัน สมบัติที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) และค่ามอดุลัส (Modulus)

2.7 การศึกษาหาปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุนในเนื้อยาง

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุนในเนื้อยาง โดยนำยางคอมปาวด์ที่ผ่านการขึ้นรูปมาตัดขวาง เพื่อมาส่องดูพื้นที่บริเวณหน้าตัดเพื่อสังเกตการกระจายตัวและหาปริมาณของรูพรุนในเนื้อยางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบซุมสเตอร์ไอไมโครสโคป ที่กำลังขยาย 300 เท่า จากนั้นทำการบันทึกภาพชิ้นงาน และใช้โปรแกรม Image J ในการคำนวณหาปริมาณร้อยละพื้นที่ของรูพรุน

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มี 2 ส่วน ส่วนแรกคือการหาสภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปยางคอมปาวด์ ส่วนถัดมาคือการศึกษสมบัติต่าง ๆ ของยาง ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ร้อยละการบวมตัว สมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การหาสภาวะที่ใช้ในการคงรูปยาง

นำยางคอมปาวด์จากตารางที่ 1 มาหาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_2) ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิด (MH-ML) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้ว ที่ 160 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการคงรูปยาง โดยตารางที่ 2 คือสภาวะที่ได้จากยางสูตรต่าง ๆ

จากนั้น นำข้อมูลระยะเวลาในการคงรูปยางในตารางที่ 2 มาทำการคงรูปยางคอมปาวด์สูตรต่าง ๆ ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน ให้ได้เป็นแผ่นชิ้นงานที่มีขนาดตามรายละเอียดในข้อ 2.4

ตารางที่ 2 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_2) ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิดของยางสูตรต่าง ๆ

สูตร	สารเชื่อมโยงโมเลกุล (phr)	สารทำให้เกิดฟอง (phr)	ts_2 (นาที)	tc_{90} (นาที)	MH-ML* (dN-m)
STD1	0.5	0	0.43	8.22	37.97
STD2	1.5	0	1.26	5.26	66.75
NR1	0.5	4	0.46	9.45	23.91
NR2	1.5	4	0.37	5.24	27.03
NR3	0.5	8	0.12	9.64	15.24
NR4	1.5	8	0.13	10.23	18.90
NR5	0.5	12	0.12	9.49	10.64
NR6	1.5	12	0.18	13.18	20.29

* MH-ML คือ ค่าผลต่างแรงบิด = แรงบิดสูงสุด - แรงบิดต่ำสุด



จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาในส่วนที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 0.5 phr พบว่าแม้ว่าจะมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่ต่างกัน กลับพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีปริมาณไม่มากจนเกินไปจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ในช่วงเวลาพร้อมๆ กัน

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาในส่วนที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 1.5 phr ซึ่งมากกว่าเดิมถึงสามเท่า พบว่าการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายความว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะที่การทดสอบจะรบกวนปฏิกิริยาการคงรูปของยาง ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีความเป็นฉนวนจึงให้ความร้อนโดยรวมลดลง ประกอบกับปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีปริมาณมาก จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการคงรูปมากขึ้น ตามปริมาณแก๊สหรือรูพรุนที่มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในส่วนค่าผลต่างแรงบิด พบว่าสูตรที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 0.5 และ 1.5 phr มีแนวโน้มค่าผลต่างแรงบิดที่ลดลง เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากแก๊สหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ จะลดความต่อเนื่องของเนื้อยางทำให้ค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อยางมีรูพรุนมากขึ้น

3.2 ลักษณะทางกายภาพของยางสูตรต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ได้ในข้อ 3.1 พบว่ายางแต่ละสูตรมีลักษณะรูพรุนในเนื้อยางแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพและรูพรุนของยางสูตรต่าง ๆ

สูตร	ลักษณะทางกายภาพภายนอก ^(ก)	ลักษณะรูพรุน ^(ข)	ร้อยละพื้นที่ของรูพรุน ^(ค)
STD1			0
STD2			0
NR1			7.04
NR2			10.66
NR3			13.05
NR4			15.20
NR5			47.34
NR6			19.93

หมายเหตุ:

- (ก) ภาพถ่ายลักษณะทางกายภาพภายนอกของยางสูตรต่างๆ
- (ข) โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางสูตรต่าง ๆ ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์จุลทรรศน์อิเล็กตรอน
- (ค) ปริมาณร้อยละพื้นที่ของรูพรุนคำนวณได้จากการนำรูปในข้อ (ข) ไปคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ



ยางสูตร NR1 เป็นยางที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลและมีปริมาณสารทำให้เกิดฟองเท่ากับ 0.5 และ 4 phr ตามลำดับ โดยเนื้อยางมีลักษณะเรียบเนียนและมีฟองอากาศภายในเนื้อยางเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 7.04 ส่วนยางสูตร NR2 เป็นยางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลมากขึ้น คือ เท่ากับ 1.5 phr ซึ่งพบว่าเนื้อยางมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนภายในเนื้อยางเท่ากับ 10.66 ซึ่งมากกว่ายางสูตร NR1 แม้ว่าจะมีปริมาณสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากยางสูตร NR2 มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่ายางสูตร NR1 จึงทำให้ยางมีอัตราการเชื่อมโยงโมเลกุลเร็วกว่าสอดคล้องกับผลของระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของยางสูตร NR2 ที่ลดลง และมีค่าผลต่างแรงบิดที่มากขึ้น (ตารางที่ 2) เมื่อเทียบกับของยางสูตร NR1 จึงทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในยางขณะขึ้นรูปเคลื่อนตัวออกจากเนื้อยางได้น้อยกว่า จึงทำให้มีปริมาณรูพรุนมากกว่ายางสูตร NR1

ยางสูตร NR3 และ NR4 เป็นยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองเพิ่มมากขึ้น โดยเติมที่ปริมาณ 8 phr แต่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเช่นเดียวกับยาง NR1 และ NR2 คือ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ พบว่าเนื้อยางสูตร NR3 และ NR4 มีลักษณะรูพรุนกระจายอยู่ในเนื้อยางที่ปริมาณร้อยละ 13.05 และ 15.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ายาง NR4 จะมีปริมาณรูพรุนมากกว่า NR3 เล็กน้อย เนื่องจากมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่าจะทำให้เนื้อยางมีการเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่มากกว่า ทำให้มีความความแข็งแรงขณะขึ้นรูปมากกว่า สอดคล้องกับผลของค่าผลต่างแรงบิด

(MH-ML) ของ NR4 มีค่ามากกว่า NR3 เล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2 ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเนื้อยางสูตร NR4 ขณะทำการขึ้นรูปเคลื่อนตัวออกจากเนื้อยางยากกว่า จึงทำให้มีปริมาณรูพรุนมากกว่ายางสูตร NR3 เล็กน้อย [8]

ในส่วนยางสูตร NR5 และ NR6 เป็นยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่มากขึ้นอีก โดยเติมที่ปริมาณ 12 phr และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลเหมือนกับการทดลองข้างต้น ซึ่งเติมที่ปริมาณ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเนื้อยางสูตร NR5 จะมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ในเนื้อยางมากกว่ายางสูตร NR6 เมื่อคำนวณออกมาพบว่ายางสูตร NR5 จะมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 47.34 ในขณะที่ยางสูตร NR6 จะมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 19.93 ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องจากยางสูตร NR5 มีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่มากถึง 12 phr แต่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเพียง 0.5 phr จึงทำให้เนื้อยางขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงต่ำกว่า ในขณะที่ยางสูตร NR6 มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากถึง 1.5 phr จึงทำให้เนื้อยางขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงมากกว่ามาก สอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดในตารางที่ 2 ที่พบว่า NR5 มีค่าผลต่างแรงบิดน้อยกว่า NR6 เป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ เมื่อมีแก๊สจำนวนมากเกิดขึ้นในชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ยางสูตร NR5 จึงต้านทานแรงดันจากแก๊สที่อยู่ภายในเนื้อยางได้น้อยกว่ายางสูตร NR6 ทำให้ยางสูตร NR5 มีฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนในเนื้อยางมากกว่ายางสูตร NR6 อย่างเห็นได้ชัด

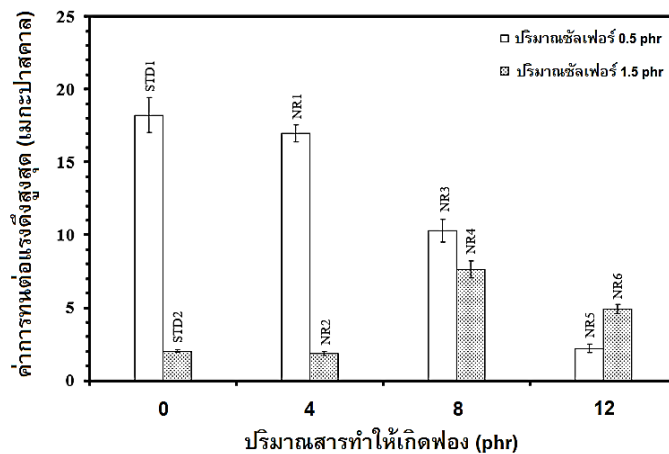


เมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่น้อย (0.5 phr) และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณไม่มาก คือ 4 และ 8 phr พบว่าเนื้อยางจะมีปริมาณรูพรุนไม่มากนัก ซึ่งมีค่าร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 7.04 และ 13.05 ตามลำดับ แต่หากเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณมากขึ้นที่ปริมาณ 12 phr จะทำให้เนื้อยางมีปริมาณรูพรุนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 47.34 นั้นหมายความว่าที่สัดส่วนนี้ แก๊สหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลมากกว่าความแข็งแรงของเนื้อยางอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในมุมมองของยางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่มาก (1.5 phr) และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณ 4, 8 และ 12 phr พบว่ามีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 10.66, 15.20 และ 19.93 ตามลำดับ

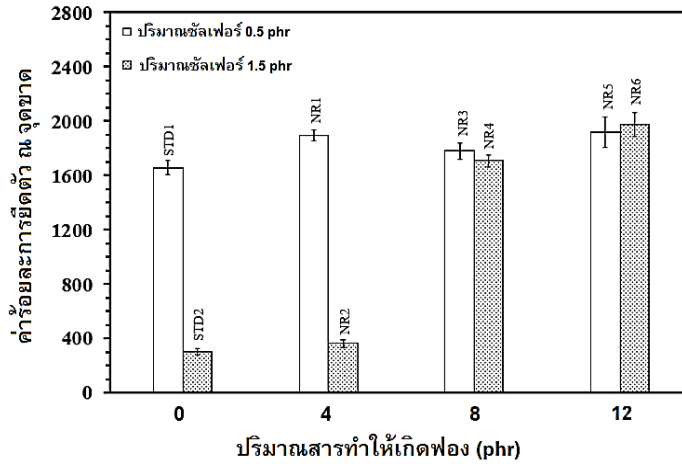
โดยลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานทั้งหมดจะมีขนาดเล็ก นั้นหมายความว่า การเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากขึ้น [8] จะทำให้เนื้อยางขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงขึ้น จึงช่วยควบคุมขนาดของรูพรุนให้มีขนาดเล็กได้ทั่วทั้งชิ้นงานยาง หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาณของสารเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

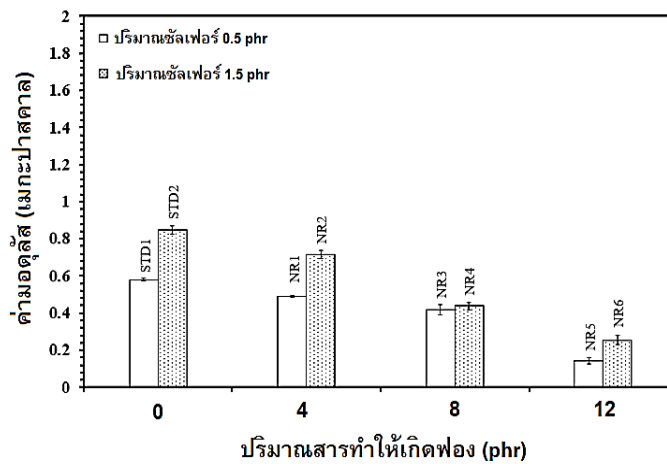
ในส่วนนี้จะอภิปรายผลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของยางสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการขึ้นรูปในหัวข้อ 3.1 โดยค่าสมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 ถึง 5 และสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่ามอดูลัส

เมื่อพิจารณาภาพรวมของสมบัติเชิงกลของยางทุกสูตรเปรียบเทียบกัน พบว่าแนวโน้มของค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส มีแนวโน้มลดลง และค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารทำให้เกิดฟอง ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่ายางมีแนวโน้มของค่าร้อยละพื้นที่ของรูพรุนในเนื้อยางเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเติมสารทำ

ให้เกิดฟองที่มากขึ้น ทำให้ชิ้นงานยางมีปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง ทั้งนี้ หากพิจารณาในส่วนของสมบัติเชิงกลโดยละเอียด สามารถอธิบายได้ดังนี้

ในส่วนของยางสูตร STD1 และ STD2 เป็นสูตรยางที่ไม่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง แต่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเท่ากับ 0.5 และ 1.5 phr



ตามลำดับ จากกราฟยางสูตร STD1 และ STD2 จะเห็นได้ว่ามีค่าการทนต่อทนแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 18.22 ± 1.19 และ 2.02 ± 0.10 เมกะปาสคาล ตามลำดับ มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ ร้อยละ 1657.53 ± 50.06 และ 301.90 ± 21.62 ตามลำดับ มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 0.58 ± 0.01 และ 0.85 ± 0.02 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่า ยางสูตร STD1 มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มากกว่ายางสูตร STD2 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากยางสูตร STD1 มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่า ยางสูตร STD2 จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางสูตร STD1 ไม่ถูกยืดมากนัก ทำให้ขณะทำการดึงสายโซ่โมเลกุลมีโอกาสในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น จึงทำให้มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ได้มากกว่า [8, 14]

แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของความแข็งของยาง ซึ่งพิจารณาจากค่ามอดูลัส จะเห็นได้ว่ายางสูตร STD2 มีค่าความแข็งมากกว่ายางสูตร STD1 เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางสูตร STD2 ถูกคงรูปด้วยสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่า ทำให้มีความหนาแน่นของโครงข่ายสามมิติมากกว่า จึงส่งผลให้ยางเกิดการคงรูปมากกว่า ทำให้สามารถทนต่อแรงดึงในช่วงต้นได้ดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการดึงมากขึ้น ยางสูตร STD2 (ที่มีการคงรูปมากกว่า) จะไม่สามารถยืดตัวและจัดระเบียบเพิ่มเติมได้มากนัก จึงทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าน้อยกว่า STD1 [8, 15-16] สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่พบว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสสูงจะเป็นชิ้นงานที่มีความแข็ง ซึ่งเกิด

จากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยสายโซ่ซัลฟิดิก ที่มีขนาดสั้น [8, 17-19]

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลจากกราฟในรูปที่ 3 ถึง 5 ของยางสูตร NR1 และ NR2 แล้วทำการเปรียบเทียบกัน ทั้งในส่วน of ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเปรียบเทียบกันของยางสูตร STD1 และ STD2 อันเนื่องมาจากพฤติกรรมของโครงสร้างการจัดเรียงโมเลกุลที่มีลักษณะเช่นเดียวกัน

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบยาง NR1 และ NR2 กับยางสูตร STD1 และ STD2 พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส ของยางสูตร NR1 และ NR2 จะมีค่าน้อยกว่ายางสูตร STD1 และ STD2 เล็กน้อย และมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มากกว่ายางสูตร STD1 และ STD2 เล็กน้อย นั้นเนื่องมาจากยางสูตร NR1 และ NR2 มีรูพรุนอยู่ในเนื้อเยื่อเล็กน้อย (มีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 7.04 และ 10.66) ทำให้มีสัดส่วนของเนื้อเยื่อลดลง ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมข้างต้นจึงมีค่าลดลง

ยางสูตร NR3 และ NR4 เป็นสูตรยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองปริมาณ 8 phr และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเท่ากับ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ โดยทั้งสองสูตรมีร้อยละการเกิดฟองอากาศภายในเนื้อเยื่อใกล้เคียงกัน จากกราฟในรูปที่ 3 ถึง 5 พบว่ายางทั้งสองสูตรมีสมบัติเชิงกลโดยรวมใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีปริมาณฟองอากาศในเนื้อเยื่อที่ใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกล



อย่างมีนัยสำคัญ หากมีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณ 8 phr ที่เป็นเช่นนี้เพราะขณะทำการดึงชิ้นงาน สายโซโม่เลกุลของยางสูตร NR3 จะมีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จนใกล้เคียงกับยางสูตร NR4 ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่า จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลโดยรวมใกล้เคียงกัน [8, 14]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบยางสูตร NR5 และ NR6 พบว่ายางสูตร NR5 มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด น้อยกว่ายางสูตร NR6 โดยปัจจัยหลักที่ทำให้เป็นเช่นนี้ เนื่องจากยางสูตร NR5 มีปริมาณฟองอากาศมากกว่ายางสูตร NR6 อย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ยาง NR5 มีปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า นอกจากนี้ยาง NR5 ยังมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่ายางสูตร NR6 ด้วย จึงส่งผลให้มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด น้อยกว่ายางสูตร NR6

แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของค่ามอดุลัส จะเห็นได้ว่ายางสูตร NR6 มีค่าความแข็งแรงมากกว่ายางสูตร NR5 ทั้งนี้ เนื่องจากสายโซโม่เลกุลของยางสูตร NR6 ถูกคงรูปด้วยสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่า ทำให้มีความหนาแน่นของโครงข่ายสามมิติมากกว่ายางจึงเกิดการคงรูปมากกว่า ส่งผลให้สามารถทนแรงดึงในช่วงต้นได้ดีกว่า จึงมีค่ามอดุลัสสูงกว่า แต่เมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการดึงมากขึ้น ยางสูตร NR6 จะยืดตัวได้น้อยกว่า NR5 ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดน้อยกว่า NR5 [8, 15-19]

3.4 การศึกษาร้อยละการบวมตัว

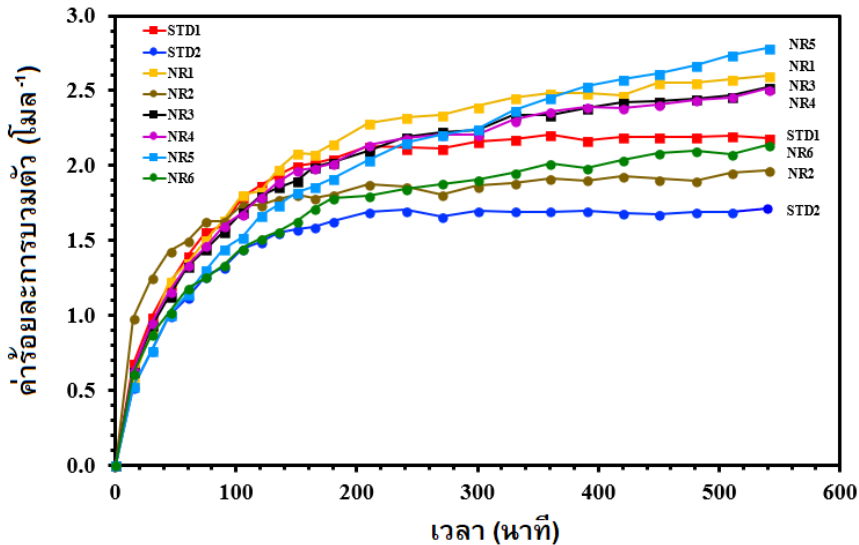
นำยางที่ผ่านกระบวนการทำให้ยางคงรูปมาทำการศึกษาร้อยละการบวมตัวเพื่อเปรียบเทียบ

การบวมตัวของยางแต่ละสูตรในน้ำมันเชื้อเพลิงที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยลักษณะชิ้นงานที่นำมาทำการทดลองนี้ ได้มาจากการกดตัดแม่พิมพ์กลมลงบนแผ่นยางที่ขึ้นรูปได้จากข้อ 2.4 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ชิ้นงานที่เตรียมได้จึงมีผิวหน้าด้านบน-ล่าง ที่เรียบ ส่วนด้านข้างจะมีลักษณะเหมือนด้านในแผ่นยาง ซึ่งอาจมีความเรียบหรือมีรูพรุน ขึ้นกับสูตรของยางนั้น

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบวมตัวของยางในน้ำมัน พบว่าการดูดซับน้ำมันเข้าสู่ยางมี 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการดูดซับน้ำมันผ่านกลไกการเติมเต็มเข้าไปในรูพรุนของชิ้นงาน และอีกส่วนคือการดูดซับน้ำมันเข้าไปในเนื้อยางโดยตรง โดยดูดซับเข้าไปยังช่องว่างระหว่างสายโซโม่เลกุลของยาง [8, 20]

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงของยางสูตร STD1 และ STD2 ซึ่งเป็นยางที่ไม่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองและมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ ซึ่งพบว่ายางสูตร STD1 และ STD2 มีค่าร้อยละการบวมตัวช่วง 15 นาทีแรก เท่ากับ 1.24 ± 0.60 และ 0.99 ± 0.49 โดยโมล ตามลำดับ จากนั้นเมื่อครบ 9 ชั่วโมง ยางสูตร STD1 และ STD2 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.18 ± 0.08 และ 1.73 ± 0.05 โดยโมล ตามลำดับ

หมายความว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีผลต่อการบวมตัวของยาง ทำให้ยางสูตร STD1 บวมตัวมากกว่า ยางสูตร STD2 เนื่องจากมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่ายางสูตร STD2 จึงมีช่องว่างระหว่างสายโซโม่เลกุลที่มากกว่ายางสูตร STD2 [8, 20] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 (ข-1)



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลร้อยละการบวมตัวของยางสูตรต่าง ๆ ในน้ำมันแก๊สโซลีน

เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงของยางสูตร NR1 และ NR2 โดยทั้งสองสูตรมีการเติมสารทำให้เกิดฟองปริมาณ 4 phr เท่ากัน และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ พบว่ายางสูตร NR2 จะมีค่าร้อยละการบวมตัวในช่วง 15 นาทีแรก มากกว่ายาง NR1 เนื่องจากยาง NR2 มีความเป็นรูพรุนมากกว่ายาง NR1 จึงทำให้มีพื้นที่ผิวบริเวณรอบชิ้นงานด้านข้างสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่า จึงเกิดการบวมตัวในช่วงแรกได้เร็วกว่ายาง NR1 [8, 20] แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR2 กับยางสูตร NR3 NR4 NR5 และ NR6 พบว่า ถึงแม้ว่ายาง NR2 จะมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าสูตรดังกล่าว กลับพบว่ายาง NR2 มีอัตราเร็วในการบวมตัวในช่วง 15 นาทีแรกที่เร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ เนื่องจากยาง NR2 มีปริมาณเนื้อยางมากกว่า NR3 NR4 NR5 แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ก็ยังมีรูพรุนอยู่บ้าง จึงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง

ได้ดีขึ้น ดังนั้น เมื่อสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิงจึงเกิดการบวมตัวในช่วงแรกได้เร็วกว่าชิ้นงานยางทั้งหมด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 (ข-2)

นั่นหมายความว่าปัจจัยของการบวมตัวในช่วง 15 นาทีแรกของยาง NR2 คือ ปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่ และปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง (ปริมาณรูพรุน) ต้องมีอย่างเหมาะสม กล่าวคือ ปริมาณรูพรุนจะต้องไม่มากเกินไป ทั้งนี้ จะเห็นว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่มากขึ้นในยาง NR2 จะไม่ส่งผลต่อการบวมตัวในช่วงแรก อันเนื่องมาจากปัจจัยสนับสนุนทั้งสองที่ได้กล่าวมา

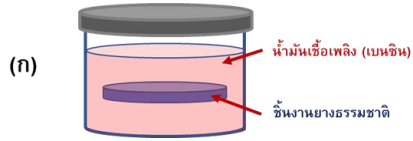
แต่เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วงหลังที่ครบ 9 ชั่วโมง พบว่ายางสูตร NR1 และ NR2 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.60 ± 0.2 และ 1.97 ± 0.06 โดยโมล ตามลำดับ ซึ่งยาง NR1 จะมีการบวมตัวได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีผลต่อ



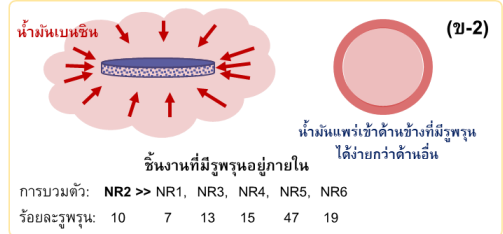
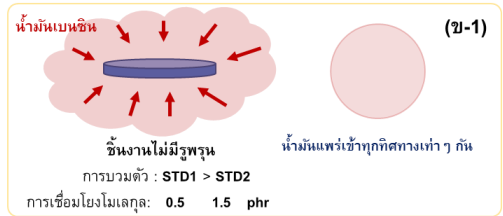
การบวมตัวของยางในช่วงทำย กล่าวคือหากมีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่น้อย ยางจะมีการบวมตัวอย่างต่อเนื่องได้นานกว่าและอิมตัวช้ากว่า [8, 20-21] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 (ค-1) รูปบน

เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงในส่วนของยางสูตร NR3 และ NR4 พบว่ายางทั้งสองสูตรมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณ 8 phr เท่ากัน และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณ 0.5 phr และ 1.5 phr ตามลำดับ (โดยยาง NR3 และ NR4 มีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนใกล้เคียงกันคือ 13.05 และ 15.20 ตามลำดับ) พบว่ายางจะมีการบวมตัวเท่าๆ กัน ทั้งช่วงต้นและช่วงทำย กล่าวคือ เมื่อยางผ่านการแช่ในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ยางสูตร NR3 และ NR4 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 1.17 ± 0.57 และ 1.18 ± 0.57 โดยโมล ตามลำดับ จากนั้นเมื่อครบ 9 ชั่วโมง ยางสูตร NR3 และ NR4 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.52 ± 0.21 และ 2.51 ± 0.2 โดยโมล ตามลำดับ

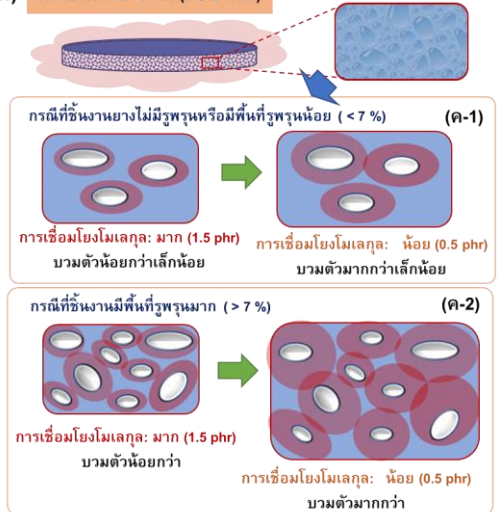
จะเห็นได้ว่ายางสูตร NR3 และ NR4 มีค่าร้อยละการบวมตัวช่วงต้นที่ค่อนข้างสูงและบวมตัวใกล้เคียงกันในช่วงทำย เพราะมีปริมาณรูพรุนใกล้เคียงกัน (มากกว่าร้อยละ 7) จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสและปริมาณรูพรุนที่ดูดซับน้ำมันเชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกัน ทำให้มีร้อยละการบวมตัวเท่ากัน แต่จุดที่น่าสังเกตคือ ทั้งสองสูตรมีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลต่างกัน แต่กลับไม่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการบวมตัวและอัตราเร็วในการบวมตัวของยาง อาจเป็นเพราะปัจจัยโดยรวม (ที่เกิดจากปัจจัยช่วงต้นและช่วงทำยรวมกัน) มีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมการบวมตัวของยาง NR3 และ NR4 แสดงไว้ในรูปที่ 7 (ข-2)



(ข) การบวมตัวช่วงแรก (15 นาทีแรก)



(ค) การบวมตัวช่วงหลัง (2-9 ชั่วโมง)



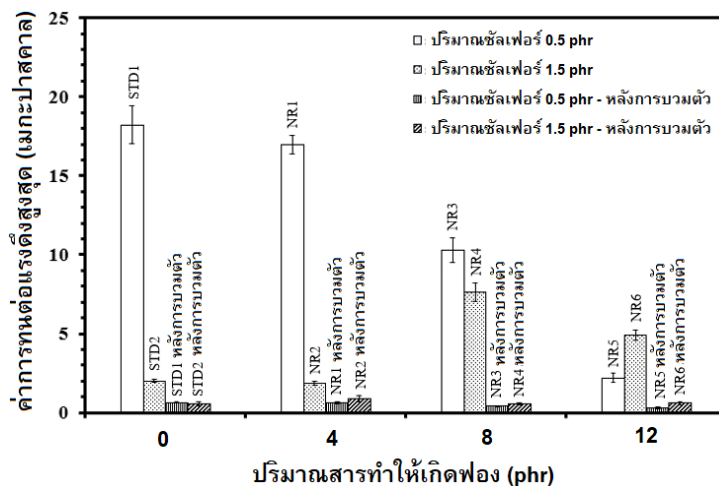
รูปที่ 7 ภาพประกอบการอธิบาย (ก) การแช่ชิ้นงานในน้ำมันเบนซิน (ข) พฤติกรรมการบวมตัวช่วงแรก และ (ค) พฤติกรรมการบวมตัวช่วงหลัง

ถัดมา เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง ในส่วนของยางสูตร NR5 และ NR6 ซึ่งยางทั้งสองสูตรมีการเติมสารทำให้เกิดฟองปริมาณเท่ากัน คือ 12 phr และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ ในช่วงระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรก ยางสูตร NR5 และ NR6 มีค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 1.04 ± 0.53 และ 1.03 ± 0.48 โดยโมล ตามลำดับ จากนั้นเมื่อครบ 9 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.78 ± 0.35 และ 2.14 ± 0.17 โดยโมล ตามลำดับ นั่นคือยาง NR5 จะมีการบวมตัวช่วงท้ายๆ มากกว่ายาง NR6 โดยปัจจัยหลักที่ทำให้มีพฤติกรรมบวมตัวเช่นนี้เพราะว่าปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง NR5 มีน้อยกว่า NR6 จึงทำให้ยาง NR5 มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากกว่ายาง NR6 [8, 21] โดยพฤติกรรมบวมตัวของยาง NR5 และ NR6 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 (ค-2)

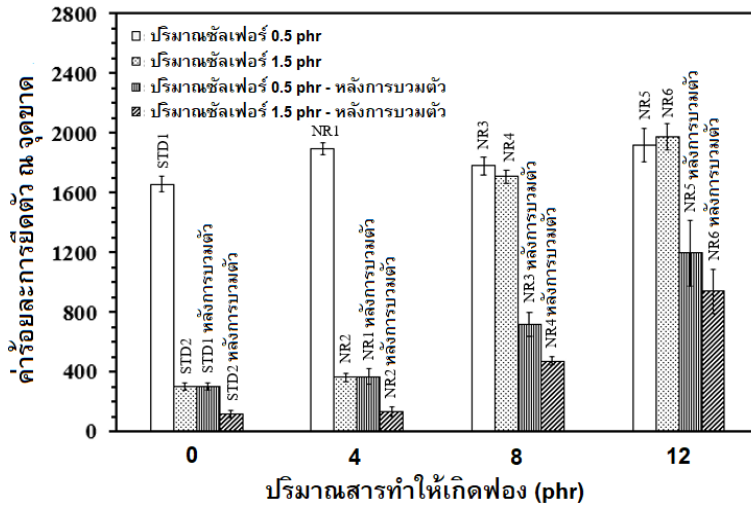
เมื่อพิจารณาอย่างสูตร NR4 เทียบกับ NR6 พบว่า ยางสูตร NR6 มีค่าร้อยละการบวมตัวช่วงท้ายน้อยกว่าอย่างสูตร NR4 ทั้งที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลปริมาณเท่ากัน (1.5 phr) ซึ่งเป็นผลมาจากยาง NR6 มีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่มากกว่ายาง NR4 จึงทำให้ยาง NR6 มีปริมาณรูพรุนที่มากกว่า ส่งผลให้มีเนื้อยางต่อหน่วยพื้นที่ในปริมาณที่น้อยกว่า [8, 21] ทำให้ยาง NR6 บวมตัวเร็วและเกิดสถานะการอิมิตัวต่อพื้นที่เร็วกว่าอย่างสูตร NR4 (รูปที่ 7 (ค-2))

3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางหลังการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซลีน

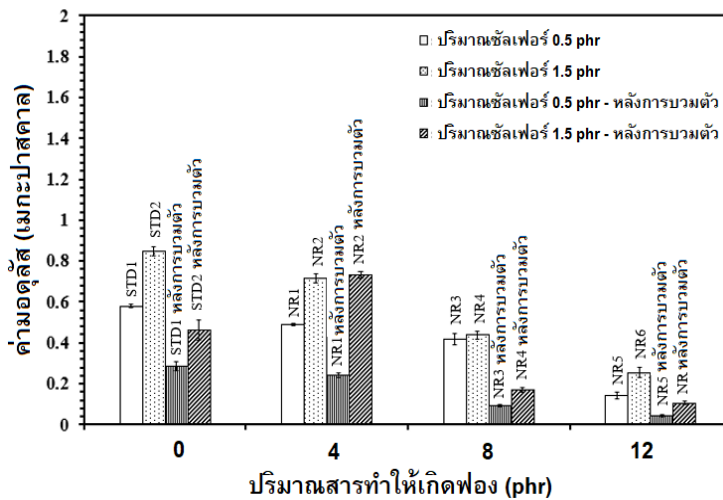
ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส ของยางสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการบวมตัว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 8 ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดของยางสูตรต่างๆ ทั้งก่อนและหลังยางบวมตัว



รูปที่ 9 ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด ของยางสูตรต่างๆ ทั้งก่อนและหลังยางบวมตัว



รูปที่ 10 ค่ามอดุลัส ของยางสูตรต่างๆ ทั้งก่อนและหลังยางบวมตัว

จากรูปที่ 8 ถึง 10 พบว่าสมบัติเชิงกลหลังการบวมของยางสูตร STD1 STD2 NR1 NR2 NR3 NR4 NR5 และ NR6 ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส มีค่าต่ำกว่าก่อนการบวมตัว โดยสาเหตุที่ทำให้มีสมบัติเชิงกลดังกล่าวลดลงนั้น เกิดจากเมื่อยางสัมผัสกับ

น้ำมันเชื้อเพลิง โครงสร้างโมเลกุลของยางจะเกิดการดูดซับน้ำมันและเกิดการบวมตัว จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางที่มีการเกี่ยวพันกันเกิดการคลายตัวออก จึงทำให้ยางหลังการบวมตัวมีค่าสมบัติเชิงกลน้อยกว่าก่อนการบวมตัว



ยางสูตร NR2 เป็นยางที่มีความน่าสนใจ เพราะมีอัตราการบวมตัวเร็วสุด (พิจารณาได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 6) เมื่อเทียบกับยางสูตรอื่น และมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสสูงที่สุด โดยปัจจัยที่ทำให้ยาง NR2 บวมตัวได้เร็วสุด เพราะยางสูตรนี้มีปริมาณเนื้อยางค่อนข้างมากแต่ก็มีปริมาณรูพรุนในเนื้อยางน้อย (มากกว่า NR1) ดังนั้นเมื่อยางสัมผัสกับน้ำมัน จะขยายตัวได้ง่ายและอิสระกว่ายาง NR1 ในขณะที่สูตรอื่นๆ ที่มีปริมาณรูพรุนมากกว่าจะมีการบวมตัวน้อยกว่า เพราะมีสัดส่วนของเนื้อยางน้อยกว่า

ในส่วนของค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส หลังการบวมตัวของยางสูตร NR2 พบว่ามีค่าสูงสุด นั้นเป็นเพราะว่ายางสูตร NR2 มีสัดส่วนของเนื้อยางมากกว่า และมีรูพรุนน้อยกว่ายางสูตรอื่น

4. บทสรุป

จากการทดลองพบว่าสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองมีผลกระทบต่อสัญญาณวิทยาลักษณะการบวมตัว และสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัว

เมื่อพิจารณายางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณน้อย พบว่าสารทำให้เกิดฟองที่เติมลงในยางจะไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป แต่จะส่งผลต่อค่าผลต่างแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะทดสอบ แต่หากมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณมากขึ้น พบว่าสารทำให้เกิดฟองจะส่งผลต่อระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูปและค่าผลต่างแรงบิด

เมื่อพิจารณาในส่วนของรูพรุนของชิ้นงานยางที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่น้อย และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณไม่มาก พบว่า

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อยาง สอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดของยางที่มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในมุมมองของยางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่มาก และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณต่าง ๆ พบว่าสารเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมให้ยางมีรูพรุนขนาดเล็ก

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางทุกสูตร (ก่อนบวมตัว) พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารทำให้เกิดฟอง เพราะยางจะมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้ยางมีปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง

การบวมตัวของยางในน้ำมัน เกิดจากการดูดซับน้ำมันเข้าสู่ยาง 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการดูดซับน้ำมันผ่านกลไกการเติมเต็มไปในรูพรุนของชิ้นงาน อีกส่วนคือการดูดซับน้ำมันเข้าไปในเนื้อยางโดยตรง โดยดูดซับเข้าไปยังช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล

ปัจจัยหลักที่ควบคุมการบวมตัวของชิ้นงานยางที่ไม่มีรูพรุนคือสารเชื่อมโยงโมเลกุล แต่หากเป็นชิ้นงานยางที่มีรูพรุน พบว่าปัจจัยหลักที่ควบคุมการบวมตัวช่วง 15 นาทีแรก คือปริมาณรูพรุน ส่วนการบวมตัวในช่วงท้าย พบว่าทั้งปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลและปริมาณรูพรุนมีผลต่อการบวมตัวของยางทั้งสิ้น โดยยางที่มีการบวมตัวได้ดีที่สุด จะมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้ ความแข็งแรงก่อนและหลังการบวมตัวยังขึ้นอยู่กับปัจจัยของสารทั้งสองด้วยเช่นกัน



งานวิจัยนี้พบว่ายางสูตร NR2 เป็นยางที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำถังน้ำมันเชื้อเพลิงกันรั่วได้ด้วยตัวเอง เพราะมีอัตราการบวมตัวเร็วสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น อีกทั้งยังมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสมากที่สุดเมื่อเทียบกับยางสูตรอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามหนังสือสัญญาเลขที่ Res-CIT603/2021

ที่มงานวิจัยขอขอบคุณ บริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด ที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย และกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Polymer Processing and Flow Research Group) มจร. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.A. Underwood, W.S. Wickersham Jr. and R.W. Sutton, Self-sealing fuel cell wall, United State Patent, US3509016DA.
- [2] P.J. Dasher, Self-sealing fuel tank, United State Patent, US41778741A.
- [3] T.S. Ohnstad, R.A. Monk, Sealing-reaction, layer-effective, stealth liner for synthetic fuel container, United States Patent Application, US2009/0050629 A1.
- [4] L. Spenadel, Synthetic rubber for self-sealing fuel tanks, Applied Science Research Laboratory, 1959, 51(8), 935-936.
- [5] www.atltd.com/industries/defence-security/self-sealing-tanks. (Accessed on 14 February 2020)
- [6] R.A.Crawford, Self-sealing fuel tank construction, United State Patent, US47784843A.
- [7] www.hutchinsoninc.com/protected-fuel-tank/. (Accessed on 11 January 2020)
- [8] C.C. Chin, N.D.L. Musbah, I. Abdullah and A.M. Lazim, Characterization and evaluation of prudent liquid natural rubber-based foam for oil spill control application, Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43, 6097–6108.
- [9] www.dsiac.org/articles/advances-in-self-sealing-fuel-tank-technology/. (Accessed on 25 January 2020)
- [10] M. Barkani and C. Hepburn, Determination of crosslink density by swelling in the castable polyurethane elastomer based on 1/4-cyclohexane diisocyanate and para-phenylene diisocyanate. Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 1992, 1(1), 1–5.
- [11] A. Khalaf, A. Yehia, M. Ismail and H. El-Sabbagh, High performance oil resistant rubber, Open Journal of Organic Polymer Materials, 2012, 2(04), 88-93.



- [12] R. Maharsia, N. Gupta and H.D. Jerro, Investigation of flexural strength properties of rubber and nanoclay reinforced hybrid syntactic foams, *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 417(1), 249-258.
- [13] O. Okay, S. Durmaz and B. Erman, Solution cross-linked poly (isobutylene) gels: synthesis and swelling behavior, *Macromolecules*, 2000, 33(13), 4822-4827.
- [14] L.J. Gibson, *Biomechanics of cellular solids*, *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(3), 377-399.
- [15] M. Krumova, D. Lopez, R. Benavente, C. Mijangos and J. Perena, Effect of crosslinking on the mechanical and thermal properties of poly (vinyl alcohol). *Polymer*, 2000, 41(26), 9265-9272.
- [16] J. He, Z. Zhang, H. Kristiansen, K. Redford, G. Fonnum and G. Modahl, Crosslinking effect on the deformation and fracture of monodisperse polystyrene-co-divinylbenzene particles. *Express Polymer Letters*, 2013, 7(4), 365-374.
- [17] G.R. Hamed, *Materials and compounds*. In: *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 3rd Ed., Hanser Books, OH, USA, 1992.
- [18] J. Bras, M.L. Hassan, C. Bruzesse, E.A. Hassan, N.A. El-Wakil and A. Dufresne, Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites, *Industrial Crops and Products*, 2010, 32(3), 627-633.
- [19] H. Ismail, H.D. Rozman, R.M. Jaffri and Z.A.M. Ishak, Oil palm wood flour reinforced epoxidized natural rubber composites: the effect of filler content and size. *European Polymer Journal*, 1997, 33(10), 1627-1632.
- [20] D. Ceylan, S. Dogu, B. Karacik, S. D. Yakan, O. S. Okay and O. Okay, Evaluation of butyl rubber as sorbent material for the removal of oil and polycyclic aromatic hydrocarbons from seawater, *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(10), 3846-3852.
- [21] H. Li, L. Liu, F. Yang, Hydrophobic modification of polyurethane foam for oil spill cleanup. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(8), 1648-1653.



การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน

วีระ ศรีอริยะกุล*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกรรมการทำความเย็นและการปรับอากาศ, ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง,
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 5 ตุลาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 20 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน และประเมินคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้ง โดยอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 332% Dry Basic และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16-20°Brix ด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และใช้ความเร็วอากาศร้อน 0.3 m/s จนกระทั่งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกมีความชื้นสุดท้ายที่ 16% Dry Basic ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาอบแห้งที่ใช้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งนี้คือ การแช่มะม่วงน้ำดอกไม้สุกในสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 350 นาที จะได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 68.84 MJ/kg_{evap} ส่วนการทดสอบคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้ง พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีแดงลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีความแข็งเฉลี่ย 3.46 N นอกจากนี้ยังพบว่า สมการอบแห้งชั้นบางของ Modilli สามารถทำนายผลการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และค่าไคสแควร์เท่ากับ 0.9995, 0.0061 และ 4.15×10^{-5} ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้ง; มะม่วงน้ำดอกไม้; การแผ่รังสีอินฟราเรดไกล



Drying of Nam Dok Mai Mango Using Far-Infrared Radiation in Combination with Hot-Air

Weera Sriariyakul*

Division of Refrigeration and Air Conditioning Engineering Technology,
Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's
University of Technology North Bangkok

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

Received: 7 August 2021; Revised 5 October 2021; Accepted: 20 October 2021

Online Published: 13 December 2021

Abstract: This research aimed to study the optimal condition of ripe Nam Dok Mai mangoes drying using far-infrared radiation combined with hot air technique and evaluate the qualities in terms of color and hardness of dried ripe Nam Dok Mai mangoes. Ripe Nam Dok Mai mangoes were dried with an initial moisture content of 332% dry basis, and the total soluble solid of 16-20°Brix using far-infrared radiation combined with hot air technique at temperatures of 50, 60 and 70°C and a hot air velocity of 0.3 m/s until the ripe Nam Dok Mai mangoes had the final moisture content at 16% dry basis. From the experimental results, it was found that the drying time decreased when the drying temperature increased. The optimum condition for this drying was soaking the ripe Nam Dok Mai mangoes in a browning inhibitor and drying the ripe Nam Dok Mai mangoes at 70°C for 350 min to obtain a specific energy consumption of 68.84 MJ/kg_{evap}. From the color and hardness evaluation of dried ripe Nam Dok Mai mangoes, it was found that dried ripe Nam Dok Mai mangoes had higher lightness (L*-value) and yellowness (b*-value) but had lower redness (a*-value) when the drying temperature increased. In addition, the thin-layer drying equation of Modilli provided the best prediction of drying of ripe Nam Dok Mai mangoes using far-infrared radiation combined with hot air technique with the decision coefficient, the square root of the mean square error and the chi-squared of 0.9995, 0.0061 and 4.15x10⁻⁵, respectively.

Keywords: Drying; Nam Dok Mai Mango; Far-Infrared Radiation



1. บทนำ

มะม่วงน้ำดอกไม้ (Mangifera indica L. 'Nam Dork Mai') เป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีประวัติการผลิต การเพาะปลูก และการค้ามายาวนานโดยส่วนใหญ่ มีแหล่งเพาะปลูกในพื้นที่เขตร้อนแถบประเทศเอเชีย เช่น ไทย เมียนมาร์ เวียดนาม อินเดีย และฟิลิปปินส์ เป็นต้น จากสถิติข้อมูลขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations : FAO) ปัจจุบันทั่วโลกมีจำนวน 103 ประเทศ ที่มีการเพาะปลูก มะม่วง ซึ่งมะม่วงน้ำดอกไม้ถือเป็นผลไม้ที่มี คุณประโยชน์และสรรพคุณที่หลากหลายเช่น สามารถ ช่วยสร้างภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย ดีต่อตับและไต และยังสามารถช่วยลดอาการคลื่นไส้ วิงเวียนศีรษะได้อีก ด้วยตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ จีน เกาหลี ไต้หวัน ในปี 2564 เดือนมกราคม-มีนาคม ประเทศไทยส่งมี ปริมาณการส่งออกให้กับประเทศจีน 917 ตัน เพิ่มขึ้น ร้อยละ 78.92 มีมูลค่าการนำเข้า 2.02 ล้านเหรียญ สหรัฐฯ เพิ่มขึ้นร้อยละ 15.22 เมื่อเทียบกับช่วงเวลา เดียวกันปี 2563 [1]

การอบแห้งหรือกระบวนการลดความชื้น ส่วนมาก ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ เพื่อไล่ ความชื้นออกโดยการระเหย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่าน กระบวนการอบแห้งเก็บรักษายาวนาน โดยทั่วไป สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยอากาศ ร้อน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การ อบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยความ ร้อน ซึ่งการอบแห้งในแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่าง กันไป [2] การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล

(Far-infrared radiation: FIR) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมอย่างมาก เนื่องจากประหยัดพลังงาน โดย พลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุล ของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งการ สั่นสะเทือนดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วง 25-100 μm [3] ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ จำนวนมาก ดังนั้นการที่น้ำดูดกลืนรังสีอินฟราเรดไว้ จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และหากพิจารณา กลไกการสั่นสะเทือนของน้ำใน ผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนก็จะพบว่า มักเกิดที่ความยาวคลื่นของการแผ่รังสีที่มากกว่า 25 μm ซึ่งอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรดไกล เนื่องจาก ความยาวคลื่นสูงทำให้สามารถทะลุผ่านเข้าไปใน ผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด และผลิตภัณฑ์ จะมี ส่วนประกอบหลักคือ น้ำ แป้ง และโปรตีน ซึ่ง ส่วนประกอบเหล่านี้มักจะดูดซับพลังงานการแผ่รังสี ของรังสีอินฟราเรดไกลได้ดี [4] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การ ใช้รังสีอินฟราเรดไกลหรือ FIR มีความเหมาะสมใน การอบแห้งผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้มี วัตถุประสงค์ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการ อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรด ไกลร่วมกับอากาศร้อน เพื่อประหยัดพลังงาน โดย อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 332% Dry Basic และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16-20°Brix ด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และใช้ ความเร็วอากาศร้อน 0.3 m/s จนกระทั่งมะม่วง น้ำดอกไม้สุกมีความชื้นสุดท้ายที่ 16% Dry Basic และประเมินคุณภาพหลังการอบแห้ง ได้แก่ ค่าสีและ ความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้ง



ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

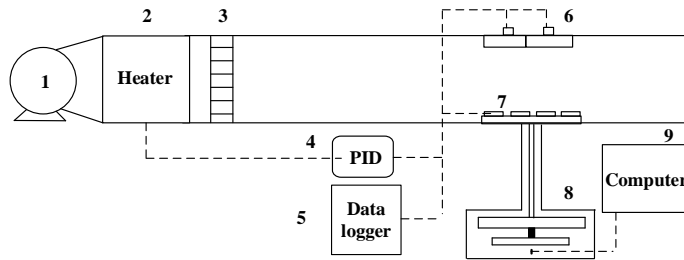
2. วิธีการดำเนินงานทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย 1.พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบพัดชนิดโค้งหลัง โดยใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 kW ความเร็วลมถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมความเร็วรอบ (Fuji, FRN1.5E1S-4A, Tokyo, Japan) ที่ต่อกับมอเตอร์ แหล่งให้ความร้อนของห้องอบแห้งได้จากฮีตเตอร์ไฟฟ้า 5 ชุด (ชุดละ 2 kW) โดยมีท่อรังผึ้งใช้สำหรับปรับความเร็วลมให้สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดท่อติดตั้งด้านหลังฮีตเตอร์ไฟฟ้าเครื่องทำความร้อนหลอดรังสีอินฟราเรดไกล (Infrapara, A-2-400, Selangor, Malaysia) ขนาด 0.4 kW จำนวน 2 หลอดติดตั้งไว้ด้านบนของห้องอบแห้ง เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Shinko, JCS-33A-A/M, Osaka, Japan) ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Yokogawa, FX-100, Tokyo, Japan) ใช้สำหรับบันทึกผลของอุณหภูมิของอากาศทางเข้าทางออกห้องอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุ ถูกวัดอย่างต่อเนื่องโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ค่าความถูกต้อง $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ เครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot-wire (TSI, 8388-M-GB, Shoreview, MN) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.02\text{ m/s}$ ใช้ในการวัดความเร็วของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงมวลของวัสดุถูกวัดอย่างต่อเนื่องโดยใช้โวลต์เซลล์ (TedeA-Huntleigh, 1022, Taipei, Taiwan) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.2\text{ g}$

2.2 วิธีการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ มะม่วงน้ำดอกไม้สุก ทำการเลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความยาวประมาณ 15-18 cm น้ำหนักของผลประมาณ 350-500 g หลังจากนั้นนำมะม่วงน้ำดอกไม้มาล้างน้ำ เพื่อทำความสะอาดในเบื้องต้น และปอกเปลือกด้วยมีด ปอกผลไม้โดยจะปอกเปลือกลงไปพอประมาณ เพื่อลดความต้านทานการสูญเสียน้ำบริเวณผิวของมะม่วง ซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้ง มะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่นำมาทดลองจะวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำโดยใช้เครื่อง Refractometer (TLEAD, RHB-32ATC, Shenzhen, China) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.2\%$ ได้ค่าอยู่ในช่วง 16-20°Brix [5] หลังจากนั้นนำมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เตรียมไว้มาหั่นให้มีขนาดความกว้าง 3 cm ยาว 3 cm และความหนา 1 cm และนำมาแช่ด้วยสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยจะทำการเตรียมน้ำกลั่น 1 ลิตร ผสมด้วยกรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก และแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น (1%CA+1%AA+1%CC) ใช้เวลาแช่ทั้งหมด 5 นาที เช่นเดียวกับกับวิธีของ Raikham *et al.* [6] หลังจากนั้นนำมะม่วงที่แช่ขึ้นมาวางบนตะแกรงเพื่อให้หน้าที่เกาะบริเวณชั้นมะม่วงลดลงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำชั้นมะม่วงบางส่วนมาหาค่าความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบแห้งโดยการอบแห้งในตามมาตรฐาน AOAC [7] สำหรับผลไม้แห้ง ที่อุณหภูมิอบแห้ง $\pm 70^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง อบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศที่ 13.3 kPa โดยใช้ตัวอย่าง 5 g Raikham *et al.*, [6] หลังจากนั้นนำชั้นมะม่วงใส่ถาด เพื่ออบแห้งปริมาณ 70 g ที่มีความชื้นเริ่มต้นของมะม่วง 332 % Dry Basic ทำการอบแห้งจนกระทั่ง



รูปที่ 1 แผนภูมิชุดทดสอบการอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (3) ท่อรังผึ้ง (4) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (5) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (6) หลอดรังสีอินฟราเรดไกล (7) วัสดุ (8) อุปกรณ์วัดน้ำหนัก และ (9) คอมพิวเตอร์

ความชื้นสุดท้าย 16 % Dry Basic โดยเงื่อนไขการทดลองคือ แบบไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Untreated) และแบบแช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Treated) และอุณหภูมิอบแห้งที่ 50, 60 และ 70°C ในระหว่างการทดลองมีการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอุณหภูมิมอบแห้งทุกๆ 10 นาที

$$MC = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุ (% Dry Basic)
 W_w คือ มวลของวัสดุชื้น (g)
 W_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (g)

2.3 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่ความชื้นเริ่มต้น 332 % Dry Basic จนกระทั่งความชื้นสุดท้าย 16 % Dry Basic โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_i - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 M_i คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (% Dry Basic)
 M_0 คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (% Dry Basic)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (% Dry Basic)

การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งนอกจากค่าความชื้น ยังมีค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปที่เวลาใดๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)



2.4 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้ง

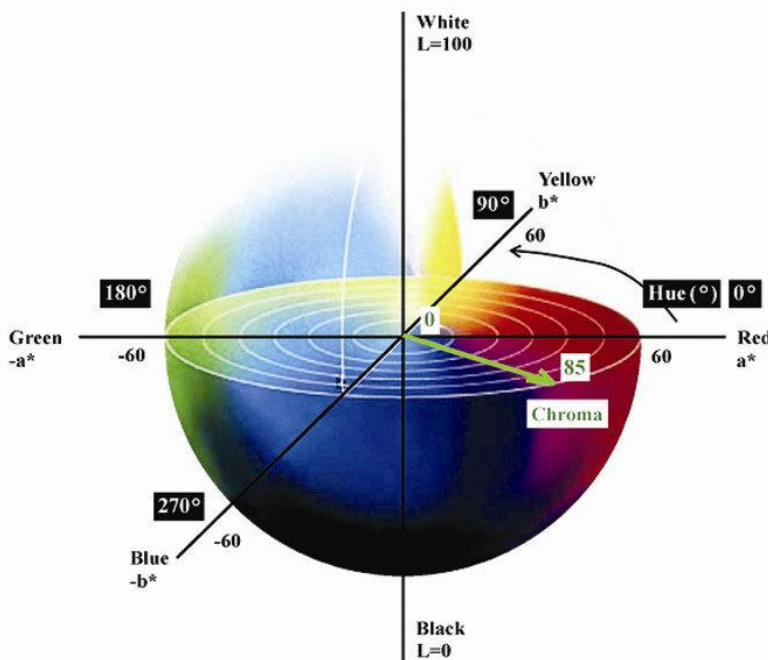
ค่าสีของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการอบแห้งสามารถตรวจได้จากเครื่องวัดสีอาหาร Hunter Lab รุ่น ColorFlex การวัดจะใช้ระบบการวัดสีของ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยค่าของสีจะแสดงในรูปแบบของตัวแปร L^* , a^* และ b^* โดยค่าตัวแปร L^* มีค่าเป็นหนึ่งในร้อยแสดงถึงสีขาว ค่าตัวแปร a^* แสดงค่าสีแดง ($+a^*$) หรือสีเขียว ($-a^*$) และค่าตัวแปร b^* แสดงค่าสีเหลือง ($+b^*$) หรือสีน้ำเงิน ($-b^*$) ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนค่าคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็ง ทำได้โดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.Plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc., UK)

2.5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง [9] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$SEC = \frac{E_{heater} + E_{FIR}}{M_W} \quad (3)$$

- เมื่อ SEC คือ ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ระเหยน้ำ (MJ/kg_{evap})
- E_{heater} คือ พลังงานที่ใช้กับฮีตเตอร์ (MJ)
- E_{FIR} คือ พลังงานที่ใช้กับหลอดรังสีอินฟราเรดไกล (MJ)
- M_W คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg_{evap})



รูปที่ 2 ระบบการวัดสีของ CIE [8]



2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้งของวัสดุ จากการสำรวจเอกสารรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ คือ แบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปเอมไพริคอล (Empirical Model) ซึ่งในการศึกษานี้จะคัดเลือกมาทำการศึกษจำนวน 10 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Modilli, Logarithmic, Wang and Singh, Verma et al., Modified Henderson and Pabis, และ Jena and Das [10-16]

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งซึ่งบางที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการแบบกึ่งทฤษฎี (Semi Theoretical Drying Equation) ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งซึ่งบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square, χ^2) [10-16] ดังสมการที่ (4)-(5) โดยสมการที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-p} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ

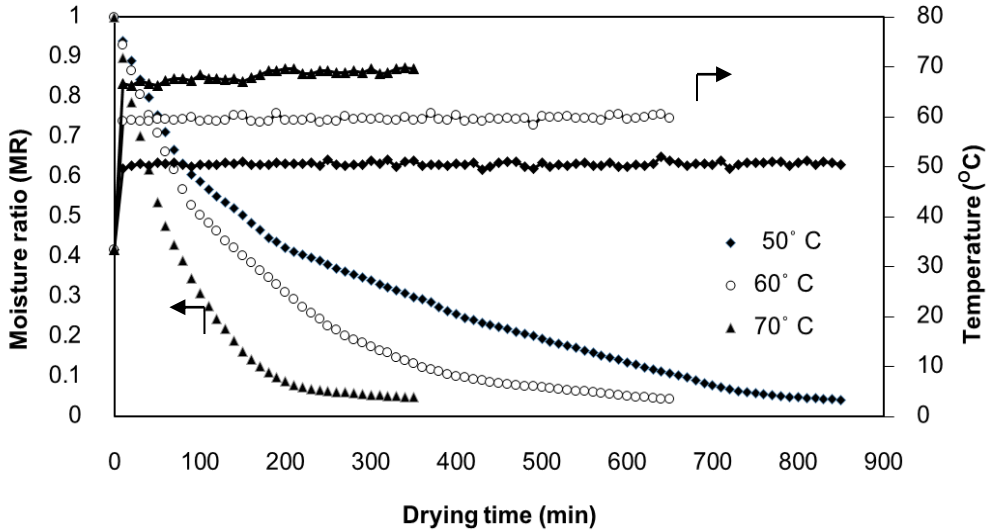
N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละสมการ

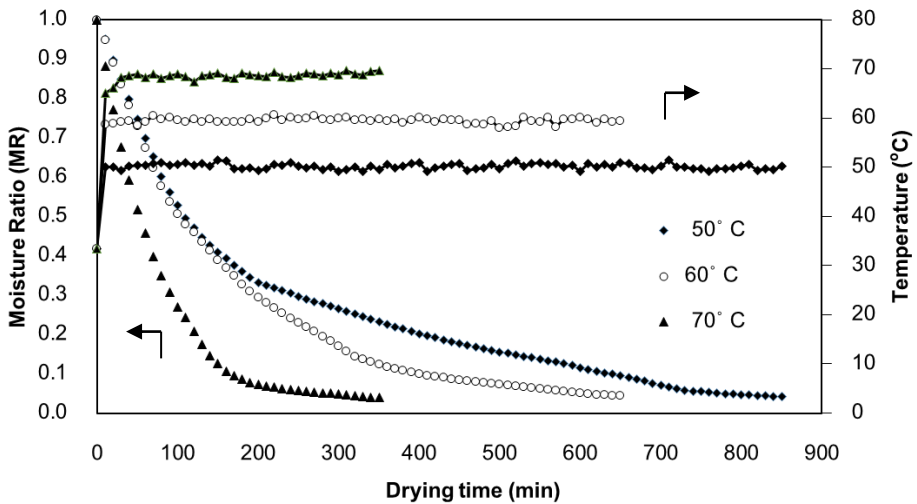
3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้กับเวลากรณีไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยใช้อุณหภูมิการอบแห้ง 50, 60 และ 70°C ความเร็วลม 0.3 m/s พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็ว และใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นสุดที่ 350 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C ใช้เวลาการอบแห้ง 850 นาที และ 650 นาที ตามลำดับเนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิผิวของวัสดุและภายในเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sriariyakul et al., [17] และ Srithai [18] สำหรับกรณีแช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ดังรูปที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่อุณหภูมิเดียวกัน ไม่มีผลต่ออัตราส่วนความชื้นและระยะเวลาการอบแห้ง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้กับเวลา กรณีไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้กับเวลา กรณีแช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล



3.2 คุณภาพหลังการอบแห้ง

ตารางที่ 1 แสดงค่าสีของมะม่วงหลังการอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนด้วยการไม่แช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Untreated) และแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C พบว่ามะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ผ่านแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) เงื่อนไข (1%CA+1%AA+1%CC) แนวนอนให้ค่าความสว่าง (L*) และสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น ค่าสีแดง (a*) ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sriithai [18] เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งและกรดซिटริกและกรดแอสคอร์บิก สามารถช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องกับบริเวณที่ผิวของมะม่วงจึงส่งผลให้ชั้นมะม่วงหลังจากการอบแห้งมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่าคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนด้วยการไม่แช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Untreated) และแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C จะเห็นได้ว่ากรณีแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) อบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็ง 3.46 N ซึ่งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ที่ความแข็ง 10.64 และ 7.51 N ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นทำให้ตัวอย่างหดตัวน้อยลง ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งน้อยลง สำหรับการแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) มีผลต่อความแข็งของมะม่วงเล็กน้อย

ตารางที่ 1 ค่าสีของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้ง ที่อุณหภูมิกอบแห้งแบบต่างๆ

	Condition					
	Hot-air Temp (°C)	FIR Temp (°C)	Drying Time (min)	L*	a*	b*
Untreated	50	50	850	37.44	9.54	22.03
	60	60	650	36.14	7.17	23.17
	70	70	350	42.15	7.51	25.65
Treated	50	50	850	59.81	14.45	47.84
	60	60	650	55.81	13.36	47.52
	70	70	350	60.26	11.75	54.80



ตารางที่ 2 ค่าคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้ง ที่อุณหภูมิการอบแห้งแบบต่างๆ

	Condition			
	Hot-air Temp (°C)	FIR Temp (°C)	Drying Time (min)	Hardness (N)
Untreated	50	50	850	12.89
	60	60	650	8.69
	70	70	350	4.57
Treated	50	50	850	10.64
	60	60	650	7.51
	70	70	350	3.46

3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ตารางที่ 3 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนด้วยการไม่แช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Untreated) และแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C พบว่ากรณีแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) อบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 68.84 MJ/kg_{evap} ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 201.59 และ 131.14 MJ/kg_{evap} ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sriariyakul *et. al.*, [17] และ Srithai [18] เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้อัตราการอบแห้ง

เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เมื่อนำมาคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จึงทำให้ค่าลดลง

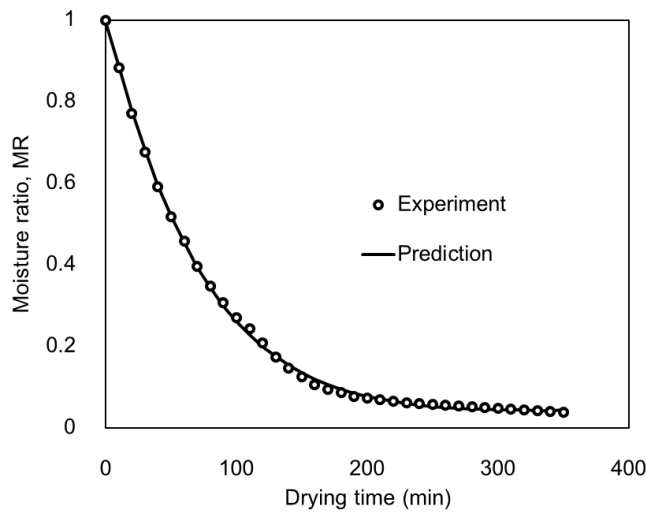
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ ดังตารางที่ 4 พบว่าแบบจำลอง Modilli มีค่า R² สูงที่สุด คือ 0.9995 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายผลการอบแห้ง ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0061 และค่า χ^2 มีค่าเท่ากับ 4.15x10⁻⁵ น้อยที่สุด เมื่อนำแบบจำลองมาสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง Modilli มีช่วงการกระจายข้อมูลน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Modilli มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และสามารถใช้อำนาจผลการอบแห้งได้ดีที่สุด



ตารางที่ 3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้ง ที่อุณหภูมิการอบแห้งแบบต่างๆ

	Condition			SEC (MJ/kg _{evap})
	Hot-air Temp (°C)	FIR Temp (°C)	Drying Time (min)	
Untreated	50	50	850	203.82
	60	60	650	133.26
	70	70	350	76.31
Treated	50	50	850	201.59
	60	60	650	131.14
	70	70	350	68.84



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งจากผลการทดลองเทียบกับแบบจำลอง Modilli



ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Model	k	n	a	b	c	g	h	R ²	RMSE	χ^2
1. Newton										
MR=exp(-kt)	0.0130	-	-	-	-	-	-	0.9972	0.0162	2.68x10 ⁻⁴
2. Page										
MR=exp(-kt ⁿ)	0.0148	0.9713	-	-	-	-	-	0.9969	0.0157	2.59x10 ⁻⁴
3. Modified Page										
MR=exp((-kt) ⁿ)	0.0173	0.7520	-	-	-	-	-	0.9972	0.0162	2.76x10 ⁻⁴
4. Henderson and Pabis										
MR=aexp(-kt)	0.0130	-	0.9978	-	-	-	-	0.9972	0.0161	2.76x10 ⁻⁴
5. Modilli										
MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.0102	1.0649	0.9945	0.0001	-	-	-	0.9995	0.0061	4.15x10 ⁻⁵
6. Logarithmic										
MR=aexp(-kt)+c	0.0143	-	0.9893	-	0.0259	-	-	0.9987	0.0094	9.61x10 ⁻⁵
7. Wang and Singh										
MR=1+at+bt ²	-	-	-0.0064	0.0000	-	-	-	0.9214	0.1176	1.46x10 ⁻²
8. Verma et al.										
MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.0140	-	0.9761	-	-	0.00001	-	0.9986	0.0101	1.11x10 ⁻⁴
9. Modified Henderson and Pabis										
MR=aexp(-kt)+bexp(-gt)+cexp(-ht)	0.0143	-	0.9893	0.0000	0.0259	0.0060	0.0001	0.9987	0.0095	1.07x10 ⁻⁴
10. Jena and Das										
MR=aexp(-kt+bt ^{1/2} +c)	0.0130	-	0.5975	0.0000	0.5128	-	-	0.9972	0.0161	2.93x10 ⁻⁴



4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรด ไกลร่วมกับอากาศร้อนและประเมินคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้งพบว่า การแช่มะม่วงน้ำดอกไม้สุกในสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 350 นาที จะได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 68.84 MJ/kg_{evap} ส่วนการทดสอบคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้ง พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีแดงลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 3.46 N และนอกจากนี้ยังพบว่า สมการอบแห้งชั้นบางของ Modilli สามารถทำนายผลการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดระยะไกลร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด โดยมีค่า R² สูงที่สุด คือ 0.9995 ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0061 และค่า χ^2 มีค่าเท่ากับ 4.15×10^{-5} น้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0335/2021

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/732720/732720.pdf&title=732720&cate=414&d=0. (Accessed on 6 July 2021)
- [2] A.S. Mujumdar, Handbook of industrial drying, 3rd Ed., Marcel Dekker., NY, 1995, 567-588.
- [3] N. Sakai and T. Hanzawa, Applications and advances in far-Infrared heating in Japan, Trends in Food Science & Technology, 1994, 5(11), 357-362.
- [4] C. Sandu, Infrared radiative drying in food engineering a process analysis, Biotechnology Progress, 1986, 2(3),109-119.
- [5] N. Harnkamsujarit and C. Sanguansri, Influence of collapsed structure on stability of β -carotene in freeze-dried mangoes, Food Research International, 2011, 44(10), 3188-3194.
- [6] C. Raikham, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, Influences of pretreatment and drying process including fluidized bed puffing on quality attributes and microstructural changes of banana slices, Drying Technology, 2015, 33(8), 915-925.
- [7] AOAC, Official methods of analysis, 16th ed, Association of Official Agricultural Chemists, Washington, DC, 1995.



- [8] www.ptallinstrument.com/article/5/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%AA%E0%B8%B5-color-measurement (Accessed on 6 July 2021)
- [9] S. Jaturonglumert, J. Varith and T. Kiatsiroat, Influence of drying method on drying kinetics and qualities of longan fruit leather, Maejo International Journal of Science and Technology, 2015, 9(1), 54-63. (in Thai)
- [10] M. Younis, D. Abdelkarim and AZ. El-Abdein, Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices, Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(2), 332-338.
- [11] U. Teeboonma and S. Jongjam, Ginger drying using infrared-vacuum technique, Burapha Science Journal, 2010, 15, 76-86. (In Thai)
- [12] S.J. Babalis, E. Papanicolaou, N. Kyriakis and VG. Belessiotis, Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), Journal of Food Engineering, 2006, 75, 205-214.
- [13] V. Demir, T. Gunhan and A.K. Yagcioglu, Mathematical modelling of convection drying of green table olives, Biosystems Engineering, 2007, 98(1), 47-53.
- [14] K. Witinaatakit and S. Jaekhom, Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals, Kasem Bundit Engineering Journal, 2019, 9(3), 29-44. (In Thai)
- [15] K. Mugodo and TS. Workneh, The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality, Heliyon, 2021, 7, 1-14.
- [16] T. Sarkar, SK. Saha, M. Saluddin, and R. Chakraborty, Drying kinetics, fourier-transform infrared spectroscopy analysis and sensory evaluation of sun, hot-air, microwave and freeze dried mango leather, Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2021, 10, 1-7.
- [17] W. Sriariyakul, T. Swasdisevi, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation, Food and Bioproducts Processing, 2016, 100, 391-400.
- [18] S. Sriithai, The Development of Natural Dried Mango Products without Sugar Added Solvent Using Step-Down Temperature Technique in Conjunction with Microwave and Hot Air Belt Conveyor Drying, Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. 2016. (in Thai)



การเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในพื้นที่โล่งด้วยปัญญาประดิษฐ์

กิตมงคลชัย พรหมบริรักษ์ ก่าพล แจ้วชุ่มชื่น และ กฤษฎา มามาตร*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 29 มิถุนายน 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 15 ตุลาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 3 พฤศจิกายน 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานปัญญาประดิษฐ์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในพื้นที่โล่งสองวิธีได้แก่วิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัม โดยทั้งสองวิธีใช้การวนซ้ำเพื่อทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำที่สุด ความแตกต่างของทั้งสองวิธีคือวิธีอดัมใช้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่มาช่วยให้การวนซ้ำแต่ละรอบเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนในขณะที่วิธีการเคลื่อนลงตามความชันใช้เพียงอนุพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเพียงอย่างเดียว สำหรับการประมาณพิกัดของวัตถุที่สนใจนั้นบทความนี้เลือกใช้วิธี True-range Multilateration ผลการดำเนินการแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีสามารถลดความคลาดเคลื่อนได้ใกล้เคียงกันโดยทั้งสองวิธีสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งได้โดยสามารถลดความคลาดเคลื่อนลงได้ประมาณ 10.17% จากวิธีปกติภายในพื้นที่ทดลองขนาด 2,500 ตารางเมตร เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนของทั้งสองวิธีพบว่าวิธีอดัมมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมากในพื้นที่ขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพื้นที่ขนาดใหญ่พบว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมีความซับซ้อนน้อยกว่าเล็กน้อย

คำสำคัญ: การระบุตำแหน่ง; ปัญญาประดิษฐ์; วิธีการเคลื่อนลงตามความชัน; วิธีอดัม



Accuracy Improvement for Localization in Outdoor Area Using Artificial Intelligence

Kitmonkonchai Promboriraksa, Kampon Jawchumchuen and Kritsada Mamat*

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

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

Received: 29 June 2021; Revised; 15 October 2021; Accepted: 3 November 2021

Online Published: 15 December 2021

Abstract: In this article, we propose to apply two artificial intelligence methods, Gradient descent and Adam (Adaptive movement estimation), in order to increase the accuracy in localization for an outdoor area. Both methods use an iteration to minimize error. The difference between the two methods is that Adam applies moving average to reduce error while Gradient descent only uses partial derivative. We select a True-range multilateration method to estimate a coordinate of an interesting object. Simulation results show that both Gradient descent and Adam perform approximately the same. Both methods can reduce error from the conventional method by 10.17% for a 2,500 square meters area. For complexity, we observe that the Adam method requires much less complexity than Gradient descent dose in very small area size; however, Gradient descent is slightly less complex than Adam as the area size becomes bigger.

Keywords: Localization; Artificial intelligence; Gradient descent method; Adam method



1. บทนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication) เป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญในโลกยุคปัจจุบันเป็นอย่างมากเนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ต่าง ๆ ได้มากกว่าการสื่อสารที่ต้องใช้สายส่งสัญญาณ (Wireline Communication) ในปัจจุบันนอกจากจะใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเพื่อรับส่งข้อมูลแล้วนั้น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่งของวัตถุ (Localization) ก็ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเช่นกัน โดยการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่งนั้นมีความแตกต่างกันไปตามมาตรฐานและชื่อเรียกของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย เช่น ไวไฟ (Wireless Fidelity: WiFi) [1] การระบุตำแหน่งด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) [2] การระบุตำแหน่งด้วยบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy) [3] และการระบุตำแหน่งด้วยแสง (Light Fidelity: LiFi) [4] โดยทั่วไปแล้วหลักการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในการระบุตำแหน่งคือการคำนวณระยะทางจากความแรงของสัญญาณที่วัดได้ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) และใช้เทคนิคทางเรขาคณิตในการประมาณพิกัดของวัตถุที่ต้องการระบุตำแหน่งซึ่งวิธีดังกล่าวยังมีความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอยู่มากและความคลาดเคลื่อนดังกล่าวยังเพิ่มขึ้นตามขนาดของพื้นที่ที่สนใจด้วย

บทความนี้สนใจการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในพื้นที่โล่งด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย โดยการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) สองวิธีได้แก่วิธีการเคลื่อนลงตาม

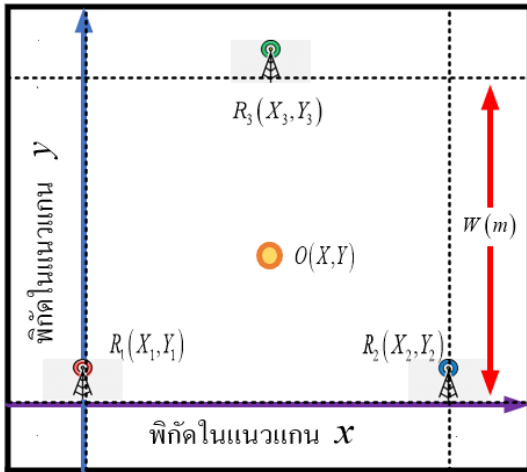
ความชัน (Gradient Descent) [5] และวิธีอดัม (Adaptive Movement Estimation) [6] โดยทั้งสองวิธีใช้หลักการเดียวกันคือการวนซ้ำเพื่อหาพิกัดที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำที่สุด ความแตกต่างของทั้งสองวิธีคือวิธีอดัมมีการใช้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (Moving Average) เพื่อให้การอัปเดตในแต่ละรอบของการวนซ้ำมีการเคลื่อนที่ไปสู่ค่าต่ำที่สุดของความคลาดเคลื่อนในทิศทางที่ถูกต้อง ในส่วนของการประมาณพิกัดของวัตถุที่สนใจนั้นบทความนี้ใช้วิธี True-range Multilateration โดยงานวิจัย [3] มีการใช้วิธีการเคลื่อนลงตามความชันในการลดความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งเช่นกัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวกำหนดให้พื้นที่ที่สนใจเป็นพื้นที่ในอาคารและใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะในการประมาณพิกัดของวัตถุที่สนใจ ผลการดำเนินการแสดงให้เห็นว่าทั้งวิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งลงได้โดยที่พื้นที่ขนาดเล็กนั้นวิธีอดัมมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมากและเมื่อพื้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีอดัมเล็กน้อย

บทความนี้มีส่วนประกอบตามเนื้อหาในแต่ละหัวข้อดังนี้ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงปัญหาที่สนใจรวมถึงวิธีพื้นฐานในการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย หัวข้อที่ 3 นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมในการลดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง หัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผลที่ได้ หัวข้อที่ 5 เป็นการสรุปและอภิปรายผลการดำเนินการรวมทั้งนำเสนอแนวทางการพัฒนางานในอนาคต



2. ปัญหาที่สนใจ

บทความนี้สนใจการหาตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่โล่งโดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่สนใจตำแหน่งของวัตถุ และจุดอ้างอิง

จากรูปที่ 1 กำหนดให้พื้นที่สนใจเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่ละด้านมีความกว้างเท่ากับ W เมตร โหนด O ที่พิกัด (X, Y) แสดงตำแหน่งของวัตถุที่สนใจ โหนด R_1 R_2 และ R_3 ที่พิกัด (X_1, Y_1) (X_2, Y_2) และ (X_3, Y_3) แทนตำแหน่งของโหนดอ้างอิงลำดับที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ในการระบุตำแหน่งของวัตถุ O นั้นกำหนดให้โหนดอ้างอิงแต่ละโหนดส่งสัญญาณไวไฟมายังโหนด O โดยสัญญาณดังกล่าวเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ ความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) ที่โหนด O รับผิดชอบจากโหนดอ้างอิงแต่ละจุดแทนด้วยสัญลักษณ์ γ_i ในหน่วยดีบีเอ็ม (dBm) โดยสามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้ [7]

$$\gamma_i = P_{r,i} - 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right) + X \quad (1)$$

โดยที่ $P_{r,i}$ (dBm) คือกำลังสัญญาณที่วัตถุรับได้จากจุดอ้างอิง i ที่ระยะ 1 เมตร α คือตัวประกอบการลดทอน

$$d_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad (2)$$

คือระยะทางระหว่างวัตถุกับจุดอ้างอิงที่ i ในหน่วยเมตร d_0 คือระยะอ้างอิงที่ 1 เมตร และ X แทนตัวแปรสุ่ม Log-normal ที่มีค่าเฉลี่ย μ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ตามลำดับ เราสามารถคำนวณหา $P_{r,i}$ ได้ด้วยสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis Formula) ดังนี้ [8]

$$P_{r,i} = P_{t,i} + G_{t,i} + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \quad (3)$$

โดยที่ $P_{t,i}$ คือ กำลังของสัญญาณที่จุดอ้างอิงที่ i (dBm)

$G_{t,i}$ คือ อัตราขยายที่จุดอ้างอิงที่ i (dBm)

G_r คือ อัตราขยายที่ภาครับ (dBm)

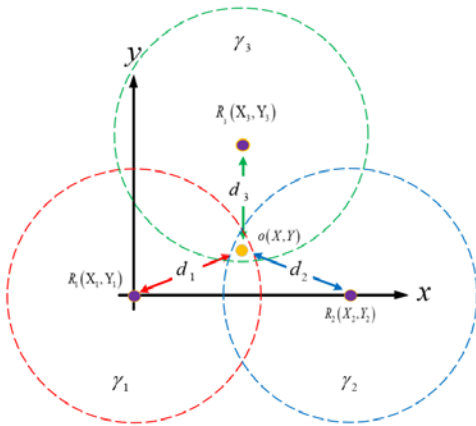
$\lambda = \frac{c}{f}$ เมื่อ $c = 3 \times 10^8$ คือความเร็วแสงในหน่วย

เมตรต่อวินาทีและ f คือความถี่ของสัญญาณไวไฟในหน่วยกิกะเฮิรตซ์ (GHz)

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าโหนดอ้างอิงแต่ละโหนดส่งสัญญาณไวไฟมายังโหนด O ดังนั้นตัวรับสัญญาณไวไฟที่โหนด O จะทราบค่าความแรงของสัญญาณจากโหนดอ้างอิงแต่ละโหนด γ_i ซึ่งตัวรับสัญญาณไวไฟที่โหนด O สามารถนำข้อมูลของ γ_i แต่ละค่า



มาใช้ในการระบุตำแหน่งของตัวเองได้ โดยในการระบุตำแหน่งนั้น โหนด O จำเป็นต้องทราบระยะทาง d_i แต่ละค่า หลังจากนั้น โหนด O จะใช้วิธี True-range Multilateration [9] ซึ่งอาศัยรัศมีครอบคลุมของโหนดอ้างอิงทั้ง 3 โหนดแต่ละโหนดอ้างอิงมีรัศมีครอบคลุมของสัญญาณไปในลักษณะวงกลมแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงขอบเขตความแรงสัญญาณของ

โหนดอ้างอิงทั้ง 3 โหนดในการหาตำแหน่งของวัตถุด้วยวิธี True-range Multilateration

จากรูปที่ 2 เมื่อกำหนดพิกัดของโหนดอ้างอิง R_1 ไว้ที่ $(0, 0)$ เราสามารถหาตำแหน่งของโหนด O ที่พิกัด (X, Y) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$X = \frac{d_1^2 - d_2^2 + X_2^2}{2X_2} \quad (4)$$

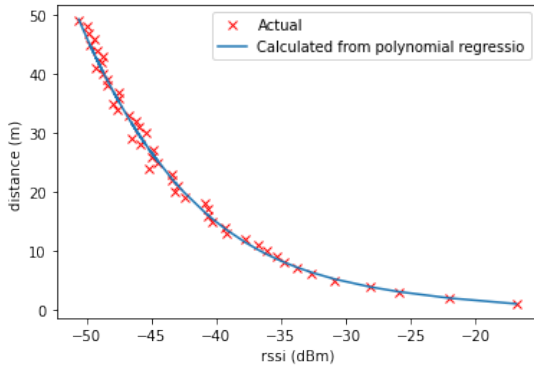
$$Y = \frac{d_1^2 - d_3^2 + Y_3^2 - 2Y_3X}{2Y_3} \quad (5)$$

เมื่อ $V^2 = X_3^2 + Y_3^2 \quad (6)$

นอกจากวิธี True-range Multilateration ที่ใช้ในการหาพิกัดของโหนด O ในงานนี้แล้วงานวิจัย [4] ใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะในการระบุตำแหน่งเช่นกัน โดยทั้งสองวิธีให้คำตอบที่ตรงกัน การระบุตำแหน่งของโหนด O โดยใช้สมการ (4) และ (5) นั้นสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อโหนด O ทราบระยะทาง d_1 d_2 และ d_3 เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วโหนด O ไม่สามารถทราบระยะทางทั้งสามได้เลยจะทราบก็แต่เพียงค่าความแรงของสัญญาณ γ_1 γ_2 และ γ_3 ซึ่งสามารถวัดได้ที่โหนด O โดยระยะทางทั้งสามนั้นสามารถหาค่าประมาณได้จากค่าความแรงของสัญญาณโดยใช้วิธีการถดถอยของพหุนาม (Polynomial Regression) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้ [10]

$$d_{est;i} = \gamma_i^n \omega_n + \gamma_i^{n-1} \omega_{n-1} + \dots + \gamma_i \omega_1 + \omega_0 \quad (7)$$

เมื่อ n ดีกรีสูงสุดของพหุนาม และ ω_k โดยที่ $k \in \{n, n-1, \dots, 1, 0\}$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนาม ดีกรีต่าง ๆ ตามลำดับซึ่งการได้มาของ ω_k นั้นจะต้องมีการเรียนรู้จากชุดข้อมูลที่เป็นค่าความแรงของสัญญาณและระยะทางเป็นจำนวนมาก สมการ (7) เป็นการประมาณค่าระยะทางโดยกระจายค่าความแรงสัญญาณไปในพหุนามดีกรีต่าง ๆ รูปที่ 3 แสดงผลการประมาณระยะทางจากค่าความแรงของสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามเมื่อกำหนดให้ $n=4$ และใช้ข้อมูลสำหรับการเรียนรู้จำนวน 500 ข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางที่ได้จากการวัดจริง

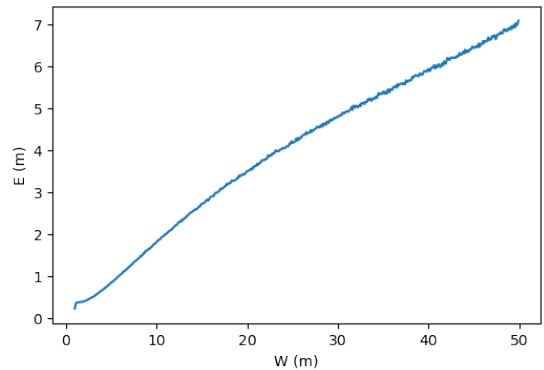


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบระยะทางที่ประมาณได้จากวิธีการถดถอยของพหุนามกับระยะทางที่ได้จากการวัดจริง

จากรูปที่ 3 พบว่าวิธีการถดถอยของพหุนามสามารถใช้ประมาณระยะทางที่ได้จากการวัดจริงได้เป็นอย่างดีโดยจะเห็นว่าวิธีดังกล่าวมีแนวโน้มของระยะทางเป็นไปในทางเดียวกับค่าที่ได้จากการวัดจริง กล่าวคือระยะทางจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณที่รับได้อ่อนกำลังลง เมื่อได้ระยะทาง $d_{est;1}$, $d_{est;2}$ และ $d_{est;3}$ ที่ประมาณจากวิธีการถดถอยของพหุนามแล้ว โหนด O สามารถประมาณตำแหน่งของตนเองในพิกัด (X_{est}, Y_{est}) ได้ด้วยวิธี True-range Multilateration โดยใช้สมการ (4) และ (5) ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อน E ระหว่างตำแหน่งจริงที่พิกัด (X, Y) กับตำแหน่งที่ได้จากประมาณสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = \sqrt{(X - X_{est})^2 + (Y - Y_{est})^2} \quad (8)$$

รูปที่ 4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อน E กับความกว้างของพื้นที่ที่สนใจ W พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ที่สนใจมีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อน E กับความกว้างของพื้นที่สนใจ W

โดยเมื่อพื้นที่ที่สนใจมีขนาด 10 ตารางเมตรหรือที่ W เท่ากับ 10 เมตรค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2 เมตรและเมื่อพื้นที่ที่สนใจมีขนาด 2500 ตารางเมตรหรือที่ W เท่ากับ 50 เมตรค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 7 เมตรโดยเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการระบุตำแหน่งด้วยระยะทางที่ประมาณได้จากค่าความแรงของสัญญาณโดยใช้วิธีการถดถอยของพหุนามนั้นมีค่าค่อนข้างสูงถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะสามารถประมาณระยะทางเมื่อกำหนดค่าความแรงได้ค่อนข้างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณตำแหน่งของโหนด O นั้นต้องใช้ระยะทาง $d_{est;i}$ จำนวนสามค่าด้วยกัน ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในการประมาณระยะทางเพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมากตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 ในหัวข้อถัดไปเป็นการนำเสนอวิธีการประมาณระยะทางด้วยปัญญาประดิษฐ์เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนลงจากวิธีการถดถอยของพหุนาม



3. การลดความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์

เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการระบุตำแหน่งในหัวข้อก่อนหน้านั้นเราพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดขึ้นในกระบวนการประมาณระยะทางด้วยค่าความแรงของสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามเนื่องจากวิธีการดังกล่าวไม่มีกระบวนการตรวจสอบและลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาสมการค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่ง (8) แล้วพบว่าค่าความคลาดเคลื่อน E ควรจะมีค่าน้อยที่สุดที่ค่า W ใด ๆ การหาฟังก์ชัน (X_{est}, Y_{est}) ที่เหมาะสมนั้นสามารถทำได้โดยการวนซ้ำเพื่อคำนวณหาค่า E ที่น้อยที่สุดในหัวข้อนี้เป็น การนำเสนอการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อตรวจสอบและลดค่าความคลาดเคลื่อน E ดังกล่าว

3.1 การลดความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งด้วยวิธีการเคลื่อนลงตามความชัน

วิธีการเคลื่อนลงตามความชัน (Gradient Descent Method) เป็นวิธีสำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้กับฟังก์ชันที่กำหนด หลักการของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันคือการใช้การวนซ้ำเพื่อหาค่าที่ต่ำที่สุดจากความชันที่ตำแหน่งปัจจุบันเพื่อไปยังตำแหน่งที่อยู่ตรงข้ามกับความชันดังกล่าว [5] สำหรับการประมาณฟังก์ชัน (X_{est}, Y_{est}) โดยวิธีการเคลื่อนลงตามความชันของการวนซ้ำรอบที่ t นั้นสามารถสร้างได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_{est}^t = X_{est}^{t-1} - \eta \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial X_{est}} \quad (9)$$

$$Y_{est}^t = Y_{est}^{t-1} - \eta \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial Y_{est}} \quad (10)$$

เมื่อ $\partial(\cdot)$ แทนการหาอนุพันธ์ย่อย η แทนอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ที่มีผลต่อจำนวนรอบของการวนซ้ำซึ่งต้องปรับให้เหมาะสม $E(X_{est}, Y_{est})$ คือค่าความคลาดเคลื่อนโดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ X_i , Y_i และ $d_{est;i}$ ได้ดังนี้

$$E(X_{est}, Y_{est}) = \sum_{i=1}^3 ((X_{est} - X_i)^2 + (Y_{est} - Y_i)^2 - d_{est;i}^2)^2 \quad (11)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (9) และสมการ (10) จะพบว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันจะทำการวนซ้ำเพื่อหาฟังก์ชัน (X_{est}, Y_{est}) ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนในเทอม $\frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial X_{est}}$ และ

$\frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial Y_{est}}$ ที่ได้มีค่าน้อยที่สุด โดยค่าฟังก์ชันเริ่มต้นในการวนซ้ำสามารถหาได้จากจุดกึ่งกลางระหว่างโหนดอ้างอิงทั้งสามดังสมการ

$$X_{est}^i = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (12)$$

$$Y_{est}^i = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{3} \quad (13)$$

โดยสามารถสรุปวิธีการเคลื่อนลงตามความชันได้ตาม **Algorithm 1** ดังนี้



Algorithm 1: การประมาณ (X_{est}, Y_{est}) ด้วยวิธีการเคลื่อนลงตามความชัน (Gradient Descent)

1. กำหนด: $\eta, E(X_{est}, Y_{est}), X_{est}^i, Y_{est}^i$
2. กำหนด: $\varepsilon \approx 0, c_x = c_y = 0$
3. **while** c_x และ c_y ไม่เท่ากับ 1 **do**
4. **if** $|X_{est}^t - X_{est}^{t-1}| > |\varepsilon|$ และ $c_x = 0$ **then**
5. $X_{est}^t \leftarrow X_{est}^{t-1} - \eta \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial X_{est}}$
6. **else**
7. $X_{est}^t \leftarrow X_{est}^{t-1}$
8. $c_x = 1$
9. **end if**
10. **if** $|Y_{est}^t - Y_{est}^{t-1}| > |\varepsilon|$ และ $c_y = 0$ **then**
11. $Y_{est}^t \leftarrow Y_{est}^{t-1} - \eta \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial Y_{est}}$
12. **else**
13. $Y_{est}^t \leftarrow Y_{est}^{t-1}$
14. $c_y = 1$
15. **endif**
16. $t = t + 1$
17. **end while**
18. **return** (X_{est}, Y_{est})

เมื่อพิจารณา **Algorithm 1** วิธีการเคลื่อนลงตามความชันจะทำการวนซ้ำจนกว่าพิกัด (X_{est}, Y_{est}) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากรอบก่อนหน้าอย่างไรก็ตามข้อจำกัดของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันคือต้องมีการเลือกอัตราการเรียนรู้ η ที่เหมาะสมกับฟังก์ชันไม่เช่นนั้นแล้วอาจไม่เกิดการลู่เข้าหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดหรืออาจไม่ลู่ออกเข้าสู่ค่าต่ำสุดที่แท้จริง

และเกิดการแกว่งของพารามิเตอร์ในการลู่เข้าทำให้เข้าสู่ค่าต่ำสุดได้ช้า

3.2 การลดความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งด้วยวิธีออดัม

วิธีออดัม (Adam หรือ Adaptive Movement Estimation) เป็นวิธีปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่ได้รวบรวมข้อดีและกำจัดข้อเสียของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีปัญญาประดิษฐ์วิธีอื่น ๆ [6] ในการประมาณพิกัด (X_{est}, Y_{est}) ในส่วนของ X_{est} นั้นสามารถประมาณได้ด้วยชุดสมการดังต่อไปนี้

$$X_{est}^t \leftarrow X_{est}^{t-1} - \frac{\eta \cdot \hat{m}_{tx}}{\sqrt{\hat{v}_{tx} + |\varepsilon|}} \quad (14)$$

$$\hat{v}_{tx} = \frac{v_{tx}}{(1 - \beta_2^t)} \quad (15)$$

$$v_{tx} = \beta_2 \cdot v_{tx-1} - (1 - \beta_2) \cdot g_{tx}^2 \quad (16)$$

$$\hat{m}_{tx} = \frac{m_{tx}}{1 - \beta_1^t} \quad (17)$$

$$m_{tx} = \beta_1 \cdot m_{tx-1} - (1 - \beta_1) \cdot g_{tx} \quad (18)$$

$$g_{tx} = \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial X_{est}} \quad (19)$$

เมื่อ m_{tx} และ v_{tx} คือค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average) และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง (Squared moving average) ของ $E(X_{est}, Y_{est})$ ตามลำดับ $\beta_1, \beta_2 \in [0, 1]$ แทนค่าถ่วงน้ำหนักและ ε คือพารามิเตอร์สำหรับความเสถียรของตัวเลขโดยทั่วไปแล้วกำหนดให้มีค่าเข้าใกล้ 0 สำหรับการประมาณ Y_{est} นั้นสามารถทำได้เช่นเดียวกับการประมาณ X_{est} ตามสมการ (14)-(19) ซึ่งสามารถสรุปวิธีออดัมได้ตาม **Algorithm 2** ดังนี้



Algorithm 2: การประมาณ (X_{est}, Y_{est}) ด้วยวิธีอึดัม (Adaptive Moment Estimation)

1. กำหนด: $\eta, E(X_{est}, Y_{est}), X_{est}^i, Y_{est}^i$
2. กำหนด: $\varepsilon \approx 0, c_x = c_y = 0$
3. กำหนด: $m_{tx} = m_{ty} = \hat{m}_{tx} = \hat{m}_{ty} = v_{tx} = v_{ty} = \hat{v}_{tx} = \hat{v}_{ty} = 0$
4. **while** c_x และ c_y ไม่เท่ากับ 1 **do**
5. **if** $|X_{est}^t - X_{est}^{t-1}| > |\varepsilon|$ และ $c_x = 0$ **then**
6. $g_{tx} = \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial X_{est}}$
7. $m_{tx} \leftarrow \beta_1 \cdot m_{tx-1} - (1 - \beta_1) \cdot g_{tx}$
8. $\hat{m}_{tx} \leftarrow m_{tx} / (1 - \beta_1^t)$
9. $v_{tx} \leftarrow \beta_2 \cdot v_{tx-1} - (1 - \beta_2) \cdot g_{tx}^2$
10. $\hat{v}_{tx} \leftarrow v_{tx} / (1 - \beta_2^t)$
11. $X_{est}^t \leftarrow X_{est}^{t-1} - \frac{\eta \cdot \hat{m}_{tx}}{\sqrt{\hat{v}_{tx}} + |\varepsilon|}$
12. **else**
13. $X_{est}^t \leftarrow X_{est}^{t-1}$
14. $c_x = 1$
15. **endif**
16. **if** $|Y_{est}^t - Y_{est}^{t-1}| > |\varepsilon|$ และ $c_y = 0$ **then**
17. $g_{ty} = \frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial Y_{est}}$
18. $m_{ty} \leftarrow \beta_1 \cdot m_{ty-1} - (1 - \beta_1) \cdot g_{ty}$
19. $\hat{m}_{ty} \leftarrow m_{ty} / (1 - \beta_1^t)$
20. $v_{ty} \leftarrow \beta_2 \cdot v_{ty-1} - (1 - \beta_2) \cdot g_{ty}^2$
21. $\hat{v}_{ty} \leftarrow v_{ty} / (1 - \beta_2^t)$

22. $Y_{est}^t \leftarrow Y_{est}^{t-1} - \frac{\eta \cdot \hat{m}_{ty}}{\sqrt{\hat{v}_{ty}} + |\varepsilon|}$
23. **else**
24. $Y_{est}^t \leftarrow Y_{est}^{t-1}$
25. $c_y = 1$
26. **endif**
27. $t = t + 1$
28. **end while**
29. **return** (X_{est}, Y_{est})

เมื่อพิจารณาวิธีอึดัมในสมการ (14) เปรียบเทียบกับวิธีการเคลื่อนลงตามความชันในสมการ (9) พบว่าเทอมของอัตราการเรียนรู้ $\frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_{tx}} + |\varepsilon|}$ มีการปรับค่าในแต่ละรอบของการวนซ้ำด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่กำลังสองในขณะที่ยังอัตราการเรียนรู้ของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันเป็นค่าคงที่ และในส่วนอนุพันธ์ย่อยของค่าความคลาดเคลื่อน $\frac{\partial E(X_{est}, Y_{est})}{\partial X_{est}}$ นั้นวิธีอึดัมจะมีการนำมาถ่วงน้ำหนักด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ในแต่ละรอบของการวนซ้ำ ในขณะที่วิธีการเคลื่อนลงตามความชันจะนำค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าความคลาดเคลื่อนมาอัปเดตค่า (X_{est}, Y_{est}) โดยตรง โดยทั้งสองส่วนเป็นข้อได้เปรียบของวิธีอึดัมในการทำให้อัตราการลู่เข้า (Convergence Rate) หรือจำนวนรอบของการวนซ้ำเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดมีความไวกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชัน



4. ผลการดำเนินงาน

การทดสอบสมรรถนะของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมนั้นทำโดยการใช้โปรแกรมภาษา Python จำลองด้วยวิธี Monte Carlo Simulation ซึ่งเป็นการหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง [11] โดยผลการทดลองในบทความนี้ได้จากการการหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 10,000 ครั้งในการทดลองแต่ละครั้งกำหนดให้พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง W ตั้งแต่ 0-50 เมตรโดยโหนดอ้างอิง R_1 R_2 และ R_3 มีพิกัดอยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 0)$ $(0, W)$ และ $(0.5W, W)$ ตามลำดับ พิกัดของโหนด O กำหนดให้เป็นตัวแปรสุ่มยูนิฟอร์ม (Uniform Random Variable) มีค่าอยู่ในช่วง $[0, W]$ สำหรับพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบนั้นได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 และ รูปที่ 5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อน E ที่ได้จากการประมาณพิกัด (X_{est}, Y_{est}) ด้วยวิธี True-range Multilateration (ในรูปแทนด้วย Normal) วิธีการเคลื่อนลงตามความชัน (ในรูปแทนด้วย gds) และวิธีอดัม (ในรูปแทนด้วย Adam) ที่กำลังส่ง $P_{t,i}$ เท่ากับ 1 dBm โดยกำหนดให้ค่าความเบี่ยงเบนของตัวแปรสุ่ม Log-normal σ มีค่าเท่ากับ 0.35

จากตารางที่ 2 และรูปที่ 5 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสามวิธีเพิ่มขึ้นตามขนาดความกว้างของพื้นที่ เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามวิธีพบว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนลงจากวิธี True-range Multilateration โดยทั้งวิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมนั้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของทั้งสองวิธีสามารถหาได้ดังสมการที่ (20)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับจำลองระบบ

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่า
$G_{t,i}$	อัตราขยายที่จุดอ้างอิงที่ i	2 dBm
G_r	อัตราขยายที่ภาครับ	2 dBm
λ	ความยาวคลื่น	0.124 เมตร
α	ตัวประกอบการลดทอน	2
X	ตัวแปรสุ่ม log-normal	$\mu = 0$
f	ความถี่	2.4 GHz

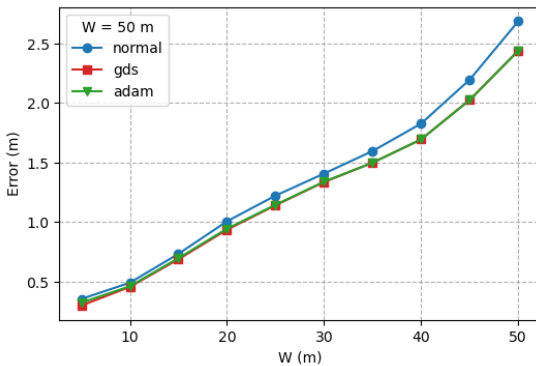
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน E ของทั้งสามวิธีที่ $P_{t,i} = 1$ dBm และ $\sigma = 0.35$

วิธี	Gradient descent		
	Normal	Adam	Adam
ความกว้าง			
5 เมตร	0.356392	0.300481	0.325254
10 เมตร	0.492625	0.457637	0.462582
15 เมตร	0.734449	0.689270	0.698085
20 เมตร	1.007356	0.936793	0.945523
25 เมตร	1.223066	1.142322	1.146089
30 เมตร	1.407920	1.337213	1.340092
35 เมตร	1.597186	1.499035	1.499580
40 เมตร	1.827467	1.694810	1.694931
45 เมตร	2.195746	2.025911	2.024898
50 เมตร	2.685555	2.438683	2.437726

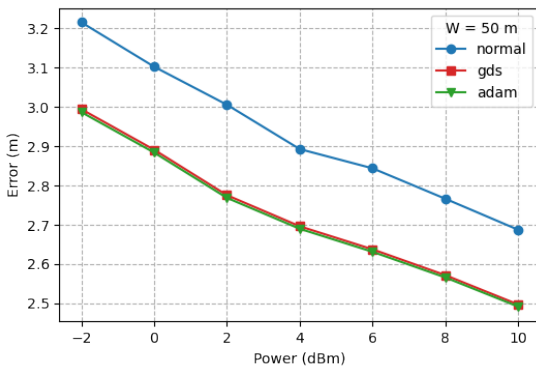


$$\% \text{difference} = \frac{|\text{value}_1 - \text{value}_2|}{\min(\text{value}_1, \text{value}_2)} \times 100 \quad (20)$$

โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างแล้ววิธีเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมมีความแตกต่างกันเพียง 0.0393% สำหรับพื้นที่ขนาด 2,500 ตารางเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี True-range Multilateration พบว่าทั้งสองวิธีสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนลงได้ 10.17% สำหรับพื้นที่ขนาด 2,500 ตารางเมตรเช่นกัน

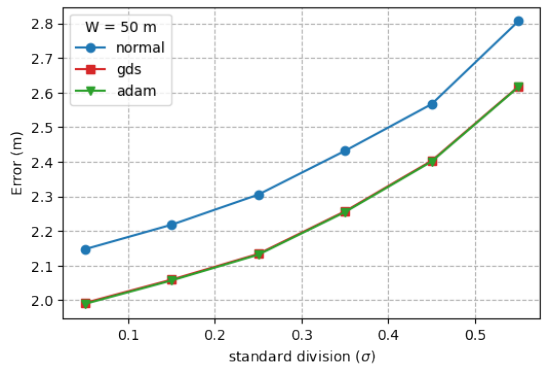


รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน E ของทั้งสามวิธีที่ $P_{t,i} = 1$ dBm และ $\sigma = 0.35$



รูปที่ 6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสามวิธีโดยกำหนดให้แกนนอนแทนกำลังส่งที่ในพื้นที่ทดลอง ขนาด 2,500 ตารางเมตรและ $\sigma = 0.35$

รูปที่ 6 แสดงผลกระทบของกำลังส่งต่อค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสามวิธีโดยจากรูปจะเห็นว่าเมื่อกำลังส่งเพิ่มขึ้นค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสามวิธีมีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกัน จากรูปเราสามารถสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนสามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มกำลังส่ง เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความเบี่ยงเบน σ ของตัวแปรสุ่ม Log-normal ซึ่งเป็นเหมือนสัญญาณรบกวนในระบบผู้เขียนได้เพิ่มรูปที่ 7 โดยกำหนดให้พื้นที่ทดลองมีขนาด 2,500 ตารางเมตร เมื่อพิจารณารูปดังกล่าวพบว่าทั้งสามวิธีมีการทนต่อสัญญาณรบกวนที่ใกล้เคียงกัน



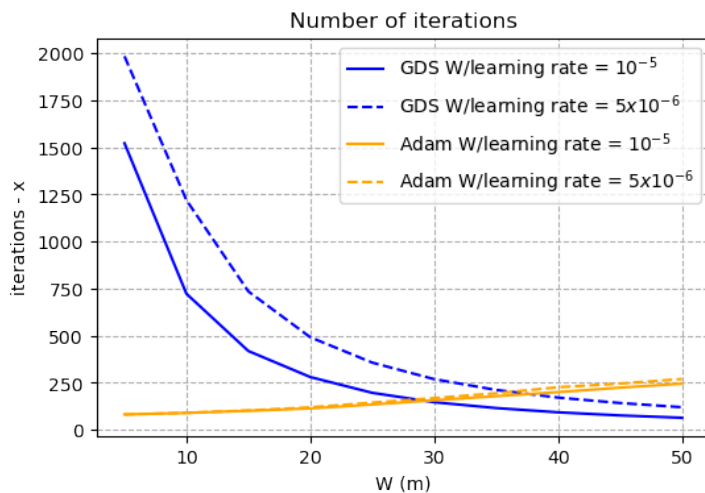
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน E ของทั้งสามวิธีที่ $P_{t,i} = 1$ dBm และ $\sigma = 0.45$

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียโดยพิจารณาจากจำนวนครั้งของการวนซ้ำของการประมาณพิกัดของโหนด O ในแนวแกน x หรือ X_{est} ระหว่างวิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัมเมื่อกำหนดให้อัตราการเรียนรู้ η มีค่าเท่ากับ 10^{-5} และ 5×10^{-6} โดยจากรูปเมื่อพิจารณาที่ $\eta = 10^{-5}$ พบว่าในพื้นที่ขนาดเล็กนั้นวิธีอดัมจะมีอัตราการสูญเสียที่ต่ำกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมากโดยที่ W มีค่าเท่ากับ 5 เมตรนั้นวิธีอดัมใช้จำนวนครั้งของการ



วนซ้ำที่ต่ำกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันถึง 15 เท่า โดยประมาณอย่างไรก็ตามเมื่อขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้น จำนวนการวนซ้ำของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมีการลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่จำนวนการวนซ้ำของวิธีอ้อมกลับเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยจำนวนการวนซ้ำของทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากันที่ขนาดพื้นที่ W มีค่าเท่ากับ 30 เมตรและหลังจากที่ระยะ 30 เมตรขึ้นไปจำนวนครั้งของการวนซ้ำของวิธีอ้อมจะมีค่าสูงกว่าของวิธีการเคลื่อนลงตามความชันเนื่องจากในพื้นที่ขนาดเล็กนั้น ผลคูณในเทอมของอัตราการเรียนรู้กับอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน $E(X_{est}, Y_{est})$ มีค่าใกล้เคียงกับ X_{est}^{t-1} จึงทำให้การปรับตัวของ X_{est}^t มีการเปลี่ยนแปลงที่ช้า แต่เมื่อขนาดพื้นที่ใหญ่ขึ้นผลคูณของอัตราการเรียนรู้กับอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน $E(X_{est}, Y_{est})$ มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ X_{est}^t มีการปรับตัวที่เร็วขึ้น ดังนั้นวิธีแก้ปัญหของวิธีการเคลื่อนลงตามความชัน

ในพื้นที่ขนาดเล็กคือการเพิ่มอัตราการเรียนรู้ให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการเรียนรู้ที่มากเกินไปจะทำให้ฟังก์ชันไม่เข้าสู่ค่าต่ำสุดที่แท้จริง จากการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าอัตราการรู้มีผลต่อจำนวนการวนซ้ำและค่าความผิดพลาด ส่วนวิธีอ้อมจะมีกลไกในการปรับอัตราการเรียนรู้ด้วยการหารด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่กำลังสอง ทำให้ขนาดของอัตราการเรียนรู้มีค่าเปลี่ยนแปลงทุกรอบการวนซ้ำ จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการให้ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสำหรับอัตราการรู้เข้าของการประมาณฟังก์ชันของโหนด O ในแนวแกน y หรือ Y_{est} นั้นก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการประมาณในแนวแกน x เมื่อพิจารณาที่อัตราการเรียนรู้ $\eta = 5 \times 10^{-6}$ จะพบว่าเมื่อลดอัตราการเรียนรู้ลงความแตกต่างของจำนวนรอบของการวนซ้ำของทั้งสองวิธีที่พื้นที่ขนาดใหญ่ลดลง ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าการปรับอัตราการเรียนรู้ให้เหมาะสมมีผลต่อสมรรถนะของทั้งสองวิธี



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเรียนรู้ของทั้งสองวิธีที่ $\eta = 10^{-5}$ และ 5×10^{-6}



5. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีปัญหาประดิษฐ์สองวิธีเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งในพื้นที่โล่งได้แก่วิธีการเคลื่อนลงตามความชันและวิธีอดัม โดยทั้งสองวิธีนั้นใช้วิธีการวนซ้ำเพื่อลดความคลาดเคลื่อนโดยการอัปเดตในแต่ละรอบของการวนซ้ำอ้างอิงจากอนุพันธ์ย่อยของค่าความคลาดเคลื่อน โดยทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันคือวิธีการเคลื่อนลงตามความชันนั้นจะใช้อนุพันธ์ย่อยของค่าความคลาดเคลื่อนมาอัปเดตตำแหน่งของวัตถุโดยตรงในขณะที่วิธีอดัมมีการนำค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่และค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ที่ยกกำลังสองมารวมพิจารณาด้วยซึ่งทำให้วิธีอดัมมีทิศทางการอัปเดตที่ถูกต้องมากกว่าและมีอัตราการลู่เข้าที่เร็วกว่า ผลการดำเนินงานแสดงให้เห็นว่าวิธีทั้งสองสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งจากวิธี True-range multilateration ลงได้ เมื่อพิจารณาอัตราการลู่เข้าแล้วพบว่าที่พื้นที่ขนาดเล็กวิธีอดัมมีอัตราการลู่เข้าที่เร็วกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันอย่างมาก อย่างไรก็ตามวิธีการเคลื่อนลงตามความชันมีอัตราการลู่เข้าที่เร็วกว่าเล็กน้อยในพื้นที่ขนาดใหญ่เนื่องจากเทอมของอนุพันธ์ย่อยมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าการนำค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่มารวมพิจารณาดังนั้นผู้เขียนเสนอให้ใช้วิธีอดัมในพื้นที่ขนาดเล็กสำหรับพื้นที่ไม่เกิน 900 ตารางเมตรและใช้วิธีการเคลื่อนลงตามความชันในวิธีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 900 ตารางเมตรขึ้นไป นอกจากนี้ผลการดำเนินการยังชี้ให้เห็นว่าอัตราการเรียนรู้มีผลต่ออัตราการลู่เข้าของทั้งสองวิธี

แนวทางพัฒนางานต่อไปในอนาคตได้แก่การหาอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้วิธีทั้งสองที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานนี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในแง่ของการลดค่าความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้นในอนาคตจะมีการนำทั้งสองวิธีไปประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคารอีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Li, M. Hedley, K. Bengston, D. Humphrey, M. Johnson and W. Ni, Passive localization of standard WiFi devices, *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(4), 3929-3932.
- [2] S. Atipong, A study and design of object localization in wireless sensor network, *The 39th Electrical Engineering Conference, Proceeding*, 2016, 423-426.
- [3] P. Dangkham, Indoor real time localization system with bluetooth low power, *Journal of Industrial Technology*, 2018, 13(1), 71 – 80. (in Thai)
- [4] E.W. Lam and T.D.C. Little, Indoor 3D localization with low-cost LiFi components, *2019 Global LIFI Congress, Proceeding*, 2019, 1-6.
- [5] <https://tupleblog.github.io/gradient-descent-part1/>. (Accessed on 8 June 2021)
- [6] D.P. Kingma and J.L. Ba, Adam: A method for stochastic optimization, *International Conference on Learning Representation, Proceeding*, 2014, 1-15.



- [7] T.S. Rappaport, Wireless communications: Upper saddle river, Prentice Hall, NJ, USA, 1996.
- [8] D.M. Pozar, Microwave engineering, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 1998.
- [9] www.wikiwand.com/en/True-range_multilateration. (Accessed on 8 June 2021)
- [10] Sutiyo, R.Hidayat, I. W. Mustika and Sunarno, The wide range of regression analysis in distance estimation system of the fingerprint-based outdoor wireless access point localization system, International Journal of Engineering and Technology, 2018, 7(4.40), 183 – 186.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method. (Accessed on 22 June 2021)



การออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ของแขนกลช่วยยก

อภิชาติ มณีงาม^{1*} กัลยา อุบลทิพย์¹ รติ มณีงาม² กัณฑ์ธร เก่งพล¹ ฐิติพงษ์ มาคุ้ม¹
ธิดาวลัยย์ อ่ำแจ่ม¹ รัชกรรินทร์ ไร่ไวย¹ และ พงษ์ธร จังพานิช¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ภาควิชามนุษยศาสตร์, คณะศิลปศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 13 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 15 ตุลาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 30 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: การแข่งขันทางธุรกิจในระดับโลกทำให้บริษัทกรณีศึกษาต้องมีการปรับปรุงแขนกลช่วยยกที่มีให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นและมีต้นทุนน้อยลงเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทั้งในประเทศและต่างประเทศผู้เขียนได้ศึกษาปัญหาการออกแบบแขนกลช่วยยกที่รับภาระโหลดเท่ากับ 75 กิโลกรัม โดยที่มีตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัมติดตั้งไว้ที่ด้านหลังเพื่อถ่วงดุลน้ำหนัก โดยที่ผู้ออกแบบสามารถปรับขนาดของแต่ละชิ้นส่วนโดยที่ต้องรักษารูปร่างโดยรวมเดิมของแขนกลช่วยยกไว้ และ บริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้กำหนดปัจจัยและระดับการปรับปรุงขนาดที่เป็นไปได้เพื่อให้บริษัทกรณีศึกษาสามารถเลือกซื้อหรือผลิตชิ้นส่วนนั้นในประเทศไทยได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์สำหรับแขนกลช่วยยกโดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมให้น้อยที่สุดและมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) มากที่สุด ผลการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถลดต้นทุนการผลิตลดลงจากเดิม 34,117.64 บาท เหลือ 25,698.40 บาท และมีค่าความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจาก 3.00 เป็น 9.13 เมื่อเทียบกับแขนกลช่วยยกแบบเดิม

คำสำคัญ: การออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์; แขนกลช่วยยก; การออกแบบการทดลอง



Bi-objective Design Optimization of a Manipulator Arm

Apichit Maneengam^{1*}, Kanlaya Ubontip¹, Rati Maneengam², Kantorn Kengpol¹,
Thitipong Markum¹, Thidawan Amjang¹, Ruksarin Warawai¹ and Pongtorn Jungpanich¹

¹ Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Humanities, Faculty of Applied Arts, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok

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

Received: 13 August 2021; Revised 15 October January 2021; Accepted: 30 October 2021

Online Published: 15 December 2021

Abstract: Global business competition forces case study companies to improve their manipulator arms by providing better quality and lower costs to increase their domestic and international competitiveness. The authors investigated a manipulator arm design case study problem for loading 75 kilograms, with 15 kilograms mounted on the back as a counterbalance. The designer can adjust the size of each part while maintaining the original overall shape of the manipulator arm. The case study company determines the factors and the possible level of improvements in size, allowing it to either purchase or manufacture the part in Thailand. This paper proposes a bi-objective design optimization method for a manipulator arm by applying the finite element method with a full factorial design of experiment and optimization to minimize the total production cost and maximize safety factors. Results showed that the proposed method can reduce the total production cost from THB 34,117.64 to THB 25,698.40, while the factor of safety value increases from 3.08 to 9.13, compared to the traditional mechanical arm design.

Keywords: Bi-objective design optimization; Manipulator Arm; Design of experiments



1. บทนำ

แขนกลช่วยยก (Manipulator Arm) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับช่วยยกชิ้นงานที่มีน้ำหนักมากตั้งแต่ 5-150 กิโลกรัม อุปกรณ์นี้ทำให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพไร้น้ำหนัก พนักงานไม่ต้องออกแรงยกชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้ลดอาการเมื่อยล้าจากการยกของหนักและลดอุบัติเหตุในระหว่างการทำงาน แขนกลช่วยยกที่ขายในท้องตลาดทำงานด้วยระบบลม นอกจากนี้สามารถหมุนได้ 360 องศา ครอบคลุมรัศมีกว้าง 2.50 เมตร มีระบบเบรกเพื่อล็อกแขนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและลดการเคลื่อนตัวของหัวจับ ด้วยเหตุนี้ทำให้แขนกลช่วยยกถูกใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ในประเทศไทยมีบริษัทที่ผลิตและจำหน่ายแขนกลช่วยยกหลายราย ซึ่งแต่ละรายมีการออกแบบแขนกลช่วยยกที่แตกต่างกันเล็กน้อย ในปัจจุบันนี้มีการแข่งขันทางธุรกิจอย่างมากในธุรกิจนี้ โรงงานที่งานวิจัยนี้ได้ใช้เป็นกรณีศึกษาจำเป็นต้องออกแบบแขนกลช่วยยกใหม่ให้มีต้นทุนที่ถูกลงและมีค่าความปลอดภัยที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน



รูปที่ 1 แขนกลช่วยยกของกรณีศึกษา [1]

หลายปีมานี้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแขนกลช่วยยกหลายบทความโดยเริ่มจาก Mahalingam and Sharan [2] ได้วิเคราะห์ความสมดุลคงที่ของแขนกลของหุ่นยนต์ โดยกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการใช้มวลหรือสปริงสำหรับการทรงตัว และผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ ต่อมา Newman and Hogan [3] ได้นำเสนออัลกอริทึมที่สำหรับการแก้ปัญหาการควบคุมเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนกล Coello *et. al.* [4] ได้นำเสนอวิธีการแบบไฮบริดเพื่อปรับสมดุลถ่วงน้ำหนักของแขนหุ่นยนต์ โดยใช้การผสมผสานของอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) กับวิธีน้อยที่สุด-มากที่สุด แบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ชุดพาเรโตโซลูชันของปัญหาดังกล่าว Baradat *et. al.* [5] ได้เสนอแนวทางใหม่ในการแก้ไขปัญหาลดแรงบิดของแขนกลช่วยยกแบบขนาน Nikoobin and Moradi [6] ได้เสนอวิธีการสร้างสมดุลของแขนกลช่วยยกใหม่สำหรับหุ่นยนต์แขนกลแบบห่วงโซ่เปิด (Open-chain Robot Manipulators) บนพื้นฐานของการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดแบบรูปเปิด Xu *et. al.* [7] ได้นำเสนอวิธีการวางแผนแบบซิงกูลาริตีฟรี ทราเจคทอรี (Singularity-free Trajectory Planning Method) เพื่อให้แขนกลมีความสมดุลและรักษาตำแหน่งศูนย์กลางเรขาคณิตของฐานให้คงที่ Wang and Kong [8] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดใหม่สำหรับการออกแบบแขนกลแบบสถิตโดยใช้เครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพของ MATLAB เพื่อกำหนดจุดยึดสปริงเพื่อปรับสมดุลแขนกลแบบสถิตที่ประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) ในเร็ว ๆ นี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับแขนกลในมุมมองที่กว้างขวางมากขึ้นดังนี้ Ali *et. al.* [9] ได้นำเสนอแขนกล 2 รูปแบบเพื่อใช้ใน



การขนถ่ายวัสดุและช่วยในการสร้างสิ่งก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยจำลองผลและประยุกต์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของวิทยาการหุ่นยนต์ผ่านซอฟต์แวร์ Roboanalyzer และในปีเดียวกัน Xu et al. [10] นำเสนอแนวทางในการกำหนดท่าทางการจับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนกลแบบสองแขนที่ทำงานร่วมมือกันเพื่อคว่ำดาวเทียมที่อยู่ในอวกาศ เทคนิคของพวกเขาที่นำเสนอได้สร้างพื้นที่ทำงานร่วมกันระหว่างแขนกลทั้งสองข้างด้วยระบบห่วงโซ่ปิด (Closed Chain System) เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันเองของแขนกลทั้งสองข้าง

นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่มีจุดประสงค์การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกลที่ดีที่สุด โดยปรับปรุงขนาดเช่นเดียวกับแนวคิดของงานวิจัยนี้โดยมีรายละเอียดดังนี้ Cholaseuk [11] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยใช้แนวทางการออกแบบการทดลอง และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นและค่าโก่งตัวสูงสุด งานวิจัยของเขามีจุดประสงค์เพื่อให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของทาคุชิ (Taguchi's Signal-to-noise Ratio) มีค่าสูงที่สุด ความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นและมีค่าโก่งตัวสูงสุดน้อยลงวิธีนี้ทำให้ได้ชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็กและสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องกลได้อย่างหลากหลาย Cholaseuk [12] นำเสนอวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับการออกแบบรูปร่างของชิ้นส่วนทางกลที่มีน้ำหนักต่ำสุดภายใต้ข้อจำกัดด้านความเค้น ต่อมา Manee-ngam et al. [13] ได้ออกแบบตะขอยกสำหรับรับภาระ 2 ตัน ให้มีความแข็งแรงมากที่สุด ต้นทุนต่ำที่สุด พวกเขาเขียนตัวแบบทางคณิตศาสตร์

และแก้ปัญหาด้วยวิธีออกแบบที่เหมาะสมที่สุดในโปรแกรม SolidWorks และล่าสุด Kot et al. [14] นำเสนอวิธีการใหม่ในการค้นหาความยาวและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของข้อต่อที่สำคัญสองชิ้นของแขนกล โดยที่ความยาวเป้าหมายสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดมวล และเลือกรูปร่างในรูปแบบของเส้นโค้งเบซีเยร์ (Bézier Curve) เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกับสิ่งกีดขวาง โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การชนเชิงลึก (In-depth Collision Analysis) เพื่อหาค่าตอบเริ่มต้นและใช้วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Algorithm) เพื่อปรับปรุงคำตอบในขั้นตอนสุดท้าย

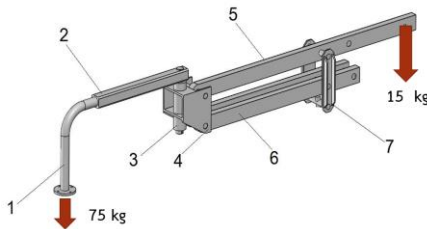
จากการทบทวนวรรณกรรมที่ศึกษาแขนกลและวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดสำหรับชิ้นส่วนเครื่องกลพบว่าส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การออกแบบแขนกลให้สมดุลด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน และงานวิจัยน้อยมากที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่ดีที่สุดแบบหลายจุดประสงค์เพื่อออกแบบแขนกลช่วยยกทำการปรับปรุงขนาดและเปลี่ยนรูปแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนของแขนกลช่วยยกโดยพิจารณาความแข็งแรงและต้นทุนเลย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ (Bi-objective Optimization Method) สำหรับแขนกลช่วยยกประเภทตั้งพื้นภาระโหลดสูงสุด 75 กิโลกรัม เพื่อให้แขนกลช่วยยกที่ออกแบบมีต้นทุนที่ต่ำที่สุด และมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) มากที่สุด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอกับ แขนกลสมดุลน้ำหนักเดิม งานวิจัยนี้จะเปลี่ยนรูปแบบการออกแบบที่มีความเป็นไปได้ทั้งหมดตามที่โรงงานกรณีศึกษา กำหนดให้เท่านั้น



2. ลักษณะของปัญหา

ปัญหาการออกแบบแขนกลช่วยยกประเภทตั้งพื้น ที่รับภาระโหลดคือ 75 กิโลกรัม และมีตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัม ติดตั้งไว้ที่ด้านหลัง ปัญหานี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบแขนกลช่วยยกให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดและค่าความปลอดภัยมากที่สุด โดยมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนรูปแบบหรือขนาดของส่วนประกอบแต่ละชิ้นของแขนกลช่วยยกจากแนวคิดการออกแบบที่เป็นไปได้ แขนกลช่วยยกประเภทตั้งพื้นที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้คือ รุ่นรหัสโมเดล BMS-75 ของ บริษัท ที.อาร์.โมเดิร์น อินดัสทรี จำกัด โดยที่บริษัทได้มีการยืนยันค่าความปลอดภัย (Factor of safety: FOS) มีค่าเท่ากับ 3.00 [15]



รูปที่ 2 ชิ้นส่วนที่พิจารณาของแขนกลช่วยยก

จากรูปที่ 2 แขนกลช่วยยกเดิมของกรณีศึกษาที่งานวิจัยนี้ได้พิจารณามีทั้งหมด 7 ชิ้น ซึ่งเป็นกลุ่มชิ้นส่วนที่บริษัทกรณีศึกษาผลิตเอง และสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ขาตั้ง เสารับน้ำหนัก และอื่นๆ งานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบเดิมจึงไม่ได้พิจารณาส่วนประกอบเหล่านั้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดการจับยึดที่ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบที่จะออกแบบใหม่และส่วนประกอบที่ไม่ได้พิจารณาแทนเพื่อลดเวลาในการคำนวณและจะวิเคราะห์ความแข็งแรงเฉพาะสภาวะ

การรับน้ำหนักแบบคงที่เท่านั้น การปรับปรุงแขนกลช่วยยกนี้ต้องรักษารูปร่างโดยรวมของแขนกลช่วยยกเดิมไว้ ซึ่งจัดอยู่ในรูปแบบปัญหาการปรับมิติทั่วไปที่ดีที่สุด (Parametric Optimization) และ บริษัทกรณีศึกษาต้องสามารถเลือกซื้อหรือผลิตชิ้นส่วนนั้นในประเทศไทยได้ งานวิจัยนี้ต้องเลือกใช้เหล็กรูปพรรณเกรด SS400 เท่านั้น เนื่องจากหาซื้อง่ายในท้องตลาดและบริษัทกรณีใช้ในการผลิตแขนกลช่วยยกนี้อยู่แล้ว

3. วิธีที่นำเสนอ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับออกแบบแขนกลช่วยยกสำหรับรับภาระโหลด 75 กิโลกรัม เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มค่าความปลอดภัย (Factor of safety: FOS) ให้มากขึ้น โดยวิธีการที่นำเสนอมีรายละเอียดต่อไปนี้

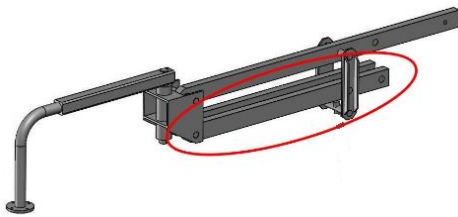
3.1 การกำหนดแนวทางการปรับปรุงแขนกลช่วยยก

งานวิจัยนี้วิศวกรของบริษัทกรณีศึกษาและผู้วิจัยร่วมกันเป็นผู้กำหนดแนวทางการปรับปรุงแขนกลช่วยยกที่สามารถแก้ไขได้เป็น 8 ปัจจัย (A-H) จากนั้นกำหนดขนาดของเหล็กและรูปแบบการออกแบบที่มีความเป็นไปได้ของแต่ละแนวทางการปรับปรุงให้เป็นระดับของแต่ละปัจจัย สำหรับแนวทางการออกแบบ (ปัจจัย) B D และ E เป็นการปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดและความหนาชิ้นส่วนมาตรฐานซึ่งมีระดับที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างมาก เช่น เหล็กแผ่นในท้องตลาดมีความหนาที่หลากหลายทำให้ยากที่จะนำมาพิจารณาทั้งหมด และ บริษัทกรณีศึกษาไม่สามารถตั้งเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมาตั้งแต่แรก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้วิศวกรของบริษัท



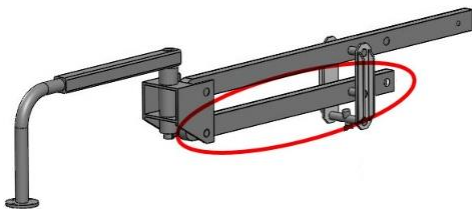
กรณีศึกษาคัดเลือกเฉพาะระดับของแต่ละปัจจัยที่มีความเป็นไปได้จากขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16] มาใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาสำหรับแต่ละปัจจัยดังกล่าวเพื่อลดขนาดปัญหาในการออกแบบให้น้อยลง ส่วนปัจจัยอื่นๆ วิศวกรของบริษัทกรณีศึกษาและผู้วิจัยร่วมกันเป็นผู้กำหนดระดับการปรับปรุงรูปแบบของชิ้นส่วนนั่นเอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ปัจจัย A คือ ปรับจำนวนชิ้นส่วนหมายเลข 6 มีทั้งหมด 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 ของปัจจัย A กำหนดจำนวนชิ้นส่วนหมายเลข 6 ให้มี 2 ท่อน ดังแสดงในรูปที่ 3



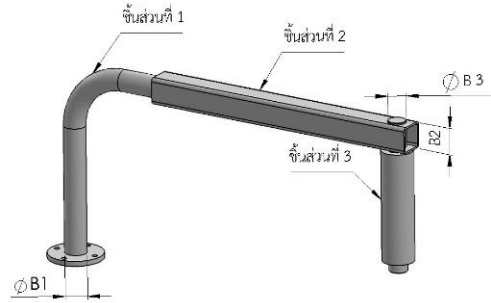
รูปที่ 3 ปัจจัย A ระดับที่ 1

ระดับที่ 2 ของปัจจัย A กำหนดจำนวนชิ้นส่วนหมายเลข 6 ให้มี 1 ท่อน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปัจจัย A ระดับที่ 2

ปัจจัย B คือ ขนาดหน้าตัดของชิ้นงานที่ 1 ชิ้นงานที่ 2 และ ชิ้นงานที่ 3 โดยกำหนดขนาดของหน้าตัดชิ้นงานทั้งสามชิ้นดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปัจจัย B

จากรูปที่ 5 งานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดขนาดที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ $\varnothing B1$ $B2$ $\varnothing B3$ เนื่องจากขนาดหน้าตัดทั้งสามเป็นตัวแปรไม่อิสระ ถ้าปรับขนาดตำแหน่งใดๆ จะทำให้ตำแหน่งอื่นๆ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ตารางที่ 1 ระดับขนาดหน้าตัดที่เปลี่ยนได้ของชิ้นส่วนทั้ง 3 ของปัจจัย B

ระดับ	ขนาดหน้าตัดที่เปลี่ยนได้ (มิลลิเมตร)		
	$\varnothing B1$ ($\varnothing \times t$)	$B2$ (ยาว \times สูง)	$\varnothing B3$ (\varnothing)
1	60.5, t=3.8	75 x 75	50
2	76.3, t=4	90 x 90	65
3	89.1, t=3.2	100 x 100	75
4	114.3, t=3.5	125 x 125	89

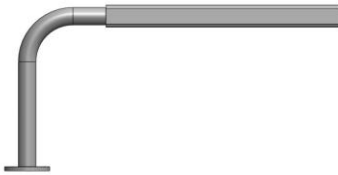
เมื่อ t คือ ความหนา และ \varnothing คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



จากตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับของปัจจัย B โดยอ้างอิงขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16] และให้วิศวกรออกแบบของบริษัทกรณีศึกษาคัดเฉพาะระดับหน้าของเหล็กรูปพรรณที่เหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการจัดซื้อและผลิต

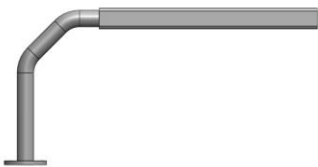
ปัจจัย C คือ แนวทางการปรับปรุงรูปแบบของชิ้นส่วนหมายเลข 1 งานวิจัยนี้ได้หารูปแบบการขึ้นรูปแบบสำหรับชิ้นส่วนหมายเลข 1 จากบริษัทที่ขายแขนกลช่วยยกในท้องตลาด ซึ่งได้รูปแบบของชิ้นส่วนหมายเลข 1 มาทั้งหมด 3 ระดับ มีดังต่อไปนี้

ระดับที่ 1 ของปัจจัย C โครงสร้างถูกตัดเป็นรูปตัวแอลทำมุม 90 องศา และมีรัศมีโค้งเท่ากับ 157.15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ปัจจัย C ระดับที่ 1

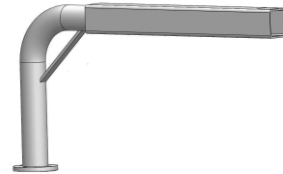
ระดับที่ 2 ของปัจจัย C ทำการตัดโครงสร้างสองจุด โดยมุมทั้งสองมีขนาด 135 องศา ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ปัจจัย C ระดับที่ 2

ระดับที่ 3 ของปัจจัย C มีโครงสร้างแบบเดียวกับระดับที่ 1 แต่ระดับที่ 3 นี้จะมีการเสริมเหล็กแผ่นหนา

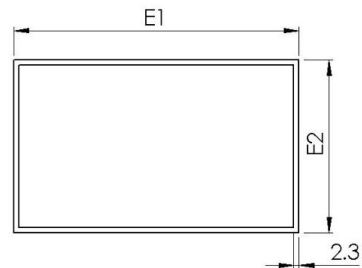
10 มิลลิเมตร ความยาว 262 มิลลิเมตร และมีความกว้าง 10 มิลลิเมตร เชื่อมติดที่มุมฉากของท่อที่เป็นชิ้นส่วนหมายเลข 1 ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ปัจจัย C ระดับที่ 3

ปัจจัย D คือ แนวทางการปรับปรุงความหนาเหล็กแผ่นของชุดประกอบเพลลา หรือความหนาชิ้นส่วนหมายเลข 4 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัย D ให้มี 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 ชิ้นส่วนหมายเลข 4 มีความหนา 12 มิลลิเมตร และระดับที่ 2 ชิ้นส่วนหมายเลข 4 มีความหนาเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ซึ่งคัดมาจากความหนาของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16]

ปัจจัย E คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมของชิ้นส่วนหมายเลข 5 และ 6 โดยกำหนดขนาดที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้คือ E1 และ E2 ส่วนความหนาไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 พื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วนหมายเลข 5 และ 6 และขนาดที่เปลี่ยนแปลงได้ของปัจจัย E

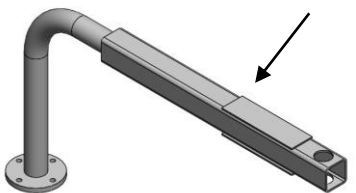


งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกเฉพาะระดับที่มีความเป็นไปได้ของปัจจัย E มาทั้งหมด 3 ระดับ จากขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัย E (มิลลิเมตร)

ระดับของปัจจัย E	ความยาว E1	ความยาว E2
1	100	50
2	125	75
3	60	30

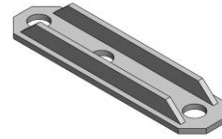
ปัจจัย F คือ การเสริมแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ที่ชิ้นส่วนหมายเลข 2 เพื่อให้ชิ้นส่วนหมายเลข 2 แข็งแรงขึ้น งานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัย F มา 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 ไม่มีการเสริมแผ่นเหล็กที่ชิ้นส่วนหมายเลข 2 และ ระดับที่ 2 มีการเสริมแผ่นเหล็กที่ชิ้นส่วนหมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ปัจจัย F ระดับที่ 2

ปัจจัย G คือ แนวทางเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนหมายเลข 7 ซึ่งวิศวกรของบริษัทกรณีศึกษาได้กำหนดระดับของปัจจัย G 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ของปัจจัย G คือใช้รูปแบบเดิมของชิ้นส่วนหมายเลข 7 ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ปัจจัย G ระดับที่ 1

ระดับที่ 2 ของปัจจัย G มีการตัดครีบที่ไม่จำเป็นของชิ้นงานหมายเลข 7 ออกไป ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ปัจจัย G ระดับที่ 2

ระดับที่ 3 ของปัจจัย G มีการตัดครีบที่ไม่จำเป็นของชิ้นงานหมายเลข 7 ออกไป และ ลดความกว้างของแผ่นเหล็กให้น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ปัจจัย G ระดับที่ 3

ปัจจัย H คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาเหล็กแผ่นที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนหมายเลข 7 ซึ่งชิ้นส่วนนี้จะใช้เหล็กแผ่นที่มีความหนาเท่ากันทั้งหมด ปัจจัย H มี 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 กำหนดความหนา 12 มิลลิเมตร และ ระดับที่ 2 กำหนดความหนา 4 มิลลิเมตร



3.2 การออกแบบการทดลอง

สร้างแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) โดยกำหนดปัจจัย A ถึง H และกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยตามหัวข้อ 3.1 โดยที่กำหนดไม่มีการทำการทดลองซ้ำ จากการสร้างแผนการทดลองนี้จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 1,728 ครั้ง

3.3 การหาหน้าหนักและค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยก

งานวิจัยนี้ทำการสร้างโมเดลสามมิติในโปรแกรม SolidWorks ด้วยขนาดจริงตามแผนการทดลองในหัวข้อ 3.2 เพื่อหาหน้าหนักของแต่ละชิ้นส่วนสำหรับนำไปใช้คำนวณต้นทุนของวัสดุ และ ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อหาค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) สำหรับแขนกลช่วยยกแบบต่าง ๆ การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแขนกลช่วยยกมีรายละเอียดดังนี้ (1) ปัญหานี้เป็นการวิเคราะห์แบบสถิต (Static Analysis) (2) สมบัติวัสดุ SS400 ของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 3 การกำหนดการจับยึดและแรงที่กระทำกับแขนกลช่วยยกได้กำหนดตามลักษณะของปัญหาที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2

ตารางที่ 3 สมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ [17]

สมบัติ	ค่า
Elastic Modulus (N/m ²)	2.10 x 10 ¹¹
Shear modulus (N/m ²)	7.93 x 10 ¹⁰
Yield stress (N/m ²)	245000000
Tensile strength (N/m ²)	510000000
Poisson ratio	0.26
Density (kg/m ³)	7860

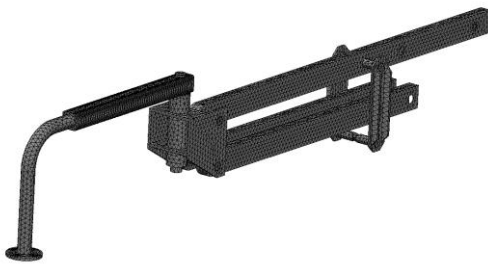
งานวิจัยนี้ได้สร้างเอลิเมนต์ (Element) เป็นรูปร่างเอลิเมนต์สามมิติที่มีโครงสร้างพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) และกำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากันทุกแบบ และ กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) ของเอลิเมนต์มีค่าเป็นร้อยละ 5 ของขนาดเอลิเมนต์ที่กำหนด ก่อนดำเนินการหาค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกตามแผนการทดลองต่อไป ผู้เขียนได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองก่อน โดยเริ่มจากกำหนดเกณฑ์การลู่เข้า (Convergence) ให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 5 และประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกแบบเดิมของกรณีศึกษา เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความปลอดภัยที่อ้างอิงจากแคตตาล็อกของ บริษัท ที.อาร์. โมเติร์น อินดัสทรี จำกัด [15] โดยกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ผลลัพธ์การตรวจสอบแสดงในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่าการกำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 93,248 ดังแสดงในรูปที่ 14 และมีได้ค่าความปลอดภัยจากการจำลองเท่ากับ 3.08 มีความคลาด-เคลื่อนร้อยละ 2.67 จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำที่น่าพอใจตามเกณฑ์การลู่เข้าที่ร้อยละ 5

ตารางที่ 4 การตรวจสอบผลลัพธ์เชิงตัวเลข

ขนาดเอลิเมนต์	จำนวนเอลิเมนต์	FOS	%d
15 mm	93,248	3.08	2.67%

เมื่อ %d คือ ค่าคลาดเคลื่อนร้อยละระหว่างค่า FOS ที่อ้างอิงจากบริษัท ที.อาร์.โมเติร์น อินดัสทรี จำกัด และ ค่า FOS ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 14 การสร้างเอลิเมนต์สำหรับแขนกลช่วยยก
แบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา

3.4 โครงสร้างต้นทุนการผลิตแขนกลช่วยยก

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของต้นทุนการผลิตแขนกลช่วยยกของบริษัทกรณีศึกษา จากนั้นงานวิจัยนี้ได้สร้างสมการต้นทุนการผลิตของแขนกลช่วย โดยมีพารามิเตอร์และตัวแปรดังต่อไปนี้

p	ดัชนีของชิ้นส่วนทั้ง 7 ชิ้น $p = 1, 2, 3, \dots, 7$
CS_p	ราคาเหล็กต่อกิโลกรัมของชิ้นส่วน p
CM_p	ราคาตัดเนื้อวัสดุโดยเครื่องจักรของชิ้นส่วน p
CF_p	ราคาการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์ของชิ้นส่วนส่วน p
CB_p	ราคาเหมาตัดท่อต่อองศาของชิ้นส่วน p
CW_p	ราคาเชื่อมต่อมิลลิเมตรของชิ้นส่วน p
WS_p	น้ำหนักเหล็กของชิ้นส่วน p
V_p	ปริมาตรที่ตัดเนื้อวัสดุออกไปของชิ้นส่วน p
LF_p	ความยาวในการตัดด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์ของชิ้นส่วน p
α_p	องศาที่ตัดของชิ้นส่วน p
n_p	จำนวนที่ตัดสำหรับชิ้นส่วน p
LW_p	ความยาวแนวเชื่อมของชิ้นส่วน p
TS_p	ต้นทุนวัสดุ

TM_p ต้นทุนการตัดเนื้อวัสดุโดยเครื่องจักร

TF_p ต้นทุนการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์

TB_p ต้นทุนการกัดเหล็ก

TW_p ต้นทุนการเชื่อม

TMC_p ต้นทุนการผลิตโดยรวมของชิ้นส่วน p

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของต้นทุนการผลิตโดยรวมของแขนกลช่วยยกดังสมการที่ 1

$$\sum_{p=1}^7 TMC_p \quad (1)$$

เมื่อ

$$TMC_p = TS_p + TM_p + TF_p + TB_p + TW_p \quad (2)$$

$$TS_p = CS_p WS_p \quad (3)$$

$$TM_p = CM_p V_p \quad (4)$$

$$TF_p = CF_p LF_p \quad (5)$$

$$TB_p = CB_p \alpha_p n_p \quad (6)$$

$$TW_p = CW_p LW_p \quad (7)$$

จากสมการที่ 2 อธิบายที่มาต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วน p สำหรับแขนกลช่วยยก ซึ่งเกิดจากการรวมกันของต้นทุนวัสดุ ต้นทุนการตัดเนื้อวัสดุโดยเครื่องจักร ต้นทุนการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์ ต้นทุนการกัดเหล็ก และ ต้นทุนการเชื่อม งานวิจัยนี้ได้อธิบายต้นทุนดังกล่าวไว้ในสมการที่ 3 ถึง 7 หลังจากนั้นทำการคำนวณต้นทุนของแขนกลช่วยยกทุกรูปที่ได้จากแผนการทดลองในหัวข้อที่ 3.2



3.5 การออกแบบที่ดีที่สุด

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและหา รูปแบบของแขนกลช่วยยกที่ดีที่สุดด้วยเครื่องมือหา ผลตอบสนองค่าที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ใน โปรแกรม Minitab โดยกำหนดให้ค่าตอบสนอง (Response) ของต้นทุนการผลิตรวมมีเป้าหมายคือน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองของค่าความปลอดภัยคือ มากที่สุด นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้วิศวกร และผู้มีอำนาจตัดสินใจของบริษัทกรณีศึกษาเป็นคน กำหนดระดับความสำคัญของจุดประสงค์ทั้งสอง เมื่อมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการออกแบบแขนกล ช่วยยกนี้จะทำให้ได้ตัวแบบถดถอยเชิงเส้นของต้นทุน การผลิตรวมและค่าความปลอดภัย แต่เนื่องจากปัจจัย และระดับในการออกแบบแขนกลช่วยยกมีจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถนำตัวแบบทั้งหมดลงในบทความได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแทนค่าตัวแบบถดถอยเชิงเส้นทั้งสองด้วย Z_1 คือ สมการตัวแบบถดถอยเชิงเส้นของ ต้นทุนการผลิตรวม และ Z_2 คือ สมการตัวแบบ ถดถอยเชิงเส้นของค่าความปลอดภัย ดัชนีและตัวแปร การออกแบบมีรายละเอียดดังนี้

ดัชนี

- a ดัชนีแทนระดับของปัจจัย A โดย $a = 1, 2$
- b ดัชนีแทนระดับของปัจจัย B โดย $b = 1, 2, 3, 4$
- c ดัชนีแทนระดับของปัจจัย C โดย $c = 1, 2$
- d ดัชนีแทนระดับของปัจจัย D โดย $d = 1, 2$
- e ดัชนีแทนระดับของปัจจัย E โดย $e = 1, 2, 3$
- f ดัชนีแทนระดับของปัจจัย F โดย $f = 1, 2$
- g ดัชนีแทนระดับของปัจจัย G โดย $g = 1, 2, 3$
- h ดัชนีแทนระดับของปัจจัย H โดย $h = 1, 2$

ตัวแปรการออกแบบ

- A_a ถ้า $A_a = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย A ระดับที่ a ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย A ระดับที่ a ไม่ถูกเลือก
- B_b ถ้า $B_b = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย B ระดับที่ b ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย B ระดับที่ b ไม่ถูกเลือก
- C_c ถ้า $C_c = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย C ระดับที่ c ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย C ระดับที่ c ไม่ถูกเลือก
- D_d ถ้า $D_d = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย D ระดับที่ d ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย D ระดับที่ d ไม่ถูกเลือก
- E_e ถ้า $E_e = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย E ระดับที่ e ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย E ระดับที่ e ไม่ถูกเลือก
- F_f ถ้า $F_f = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย F ระดับที่ f ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย F ระดับที่ f ไม่ถูกเลือก
- G_g ถ้า $G_g = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย G ระดับที่ g ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย G ระดับที่ g ไม่ถูกเลือก
- H_h ถ้า $H_h = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย H ระดับที่ h ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย H ระดับที่ h ไม่ถูกเลือก

เมื่อนำตัวแบบถดถอยเชิงเส้นทั้งสองค่าตอบสนอง มาสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ฟังก์ชันจุดประสงค์ ของต้นทุนการผลิตรวมให้มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงใน สมการที่ (8) และ ฟังก์ชันจุดประสงค์ของค่าความ ปลอดภัยให้มีค่ามากที่สุด แสดงในสมการที่ (9)



$$\text{Min } Z_1 \quad (8)$$

$$\text{Max } Z_2 \quad (9)$$

ภายใต้เงื่อนไข

$$A_a, B_b, C_c, D_d, E_e, F_f, G_g, H_h \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$\forall a = 1, 2, b = 1, 2, 3, 4,$$

$$c = 1, 2, d = 1, 2,$$

$$e = 1, 2, 3, f = 1, 2,$$

$$g = 1, 2, 3, h = 1, 2$$

สมการที่ (10) กำหนดให้ตัวแปรออกแบบทั้งหมดมีค่าเป็นไบนารี (binary design variables) ผลลัพธ์ที่ได้จาก Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เป็นค่าคาดการณ์ที่ได้จากสมการถดถอย (Z_1 และ Z_2) ทำให้ยังไม่สามารถนำต้นทุนและค่าความปลอดภัยที่คาดการณ์ได้มาใช้เป็นคำตอบที่แท้จริงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องประกอบชิ้นงานของแขนกลช่วยยกตามรูปแบบที่ดีที่สุดจากการคาดการณ์ แล้วจึงคำนวณต้นทุนและค่าความปลอดภัยอีกครั้ง เพื่อให้ต้นทุนและค่าความปลอดภัยจริง

4. ผลการวิจัย

วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อออกแบบแขนกลช่วยยกที่มีต้นทุนต่ำที่สุดและมีค่าความปลอดภัยสูงที่สุด งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SolidWorks 2017 ในการสร้างโมเดลสามมิติและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแขนกลช่วยยก และใช้โปรแกรม Minitab เพื่อออกแบบการทดลองและหาค่าที่ดีที่สุด โดยกำหนดการตั้งค่าต่างๆใน Response Optimizer ของ

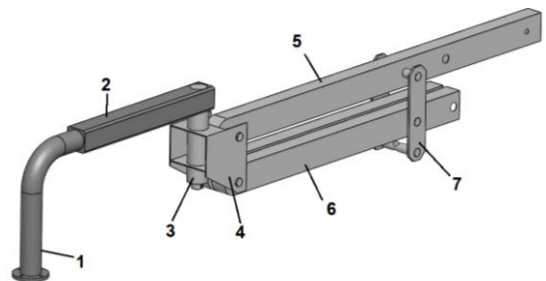
โปรแกรม Minitab โดยที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดให้ค่ามีน้ำหนักและความสำคัญเท่ากัน ส่วนค่าอื่นๆใช้ค่าตั้งต้นที่โปรแกรมให้มา ซึ่งแขนกลช่วยยกนี้สามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ตามที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดและไม่ทำให้รูปร่างโดยรวมของแขนกลช่วยยกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจัดเป็นการปรับขนาดของชิ้นงานที่ดีที่สุด (Parametric Optimization)

4.1 การเปรียบเทียบแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับแขนกลช่วยยกแบบเดิม

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับแขนกลช่วยยกแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 การเปรียบเทียบด้านรูปแบบที่เลือกใช้และผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแขนกลช่วยยก

วิธีที่นำเสนอได้ทำการเลือกระดับของแต่แนวทางการออกแบบแขนกลช่วยยกให้แตกต่างจากแขนกลช่วยยกเดิมสำหรับปัจจัย B, D, E, G และ H ส่วนปัจจัย A, C และ F ยังคงใช้รูปแบบเดิม ดังแสดงในตารางที่ 5 และแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



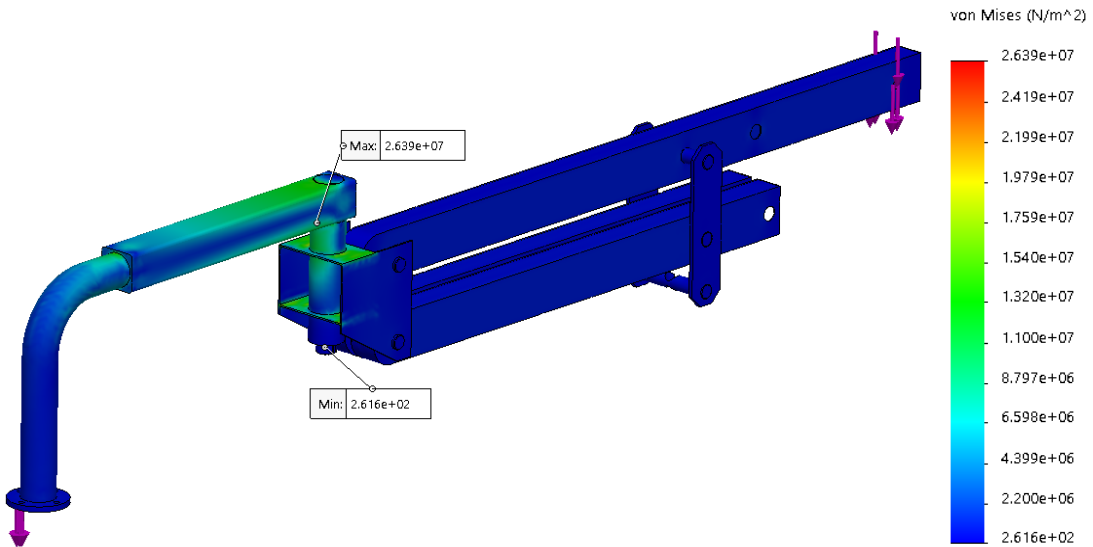
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบด้านรูปแบบที่เลือกใช้

ปัจจัย	ระดับที่แขนกลช่วยยกแบบเดิมเลือกใช้	ระดับที่แขนกลที่ได้จากวิธีที่เสนอเลือกใช้
A	1	1
B	1	3
C	1	1
D	1	2
E	1	2
F	1	1
G	1	2
H	1	2

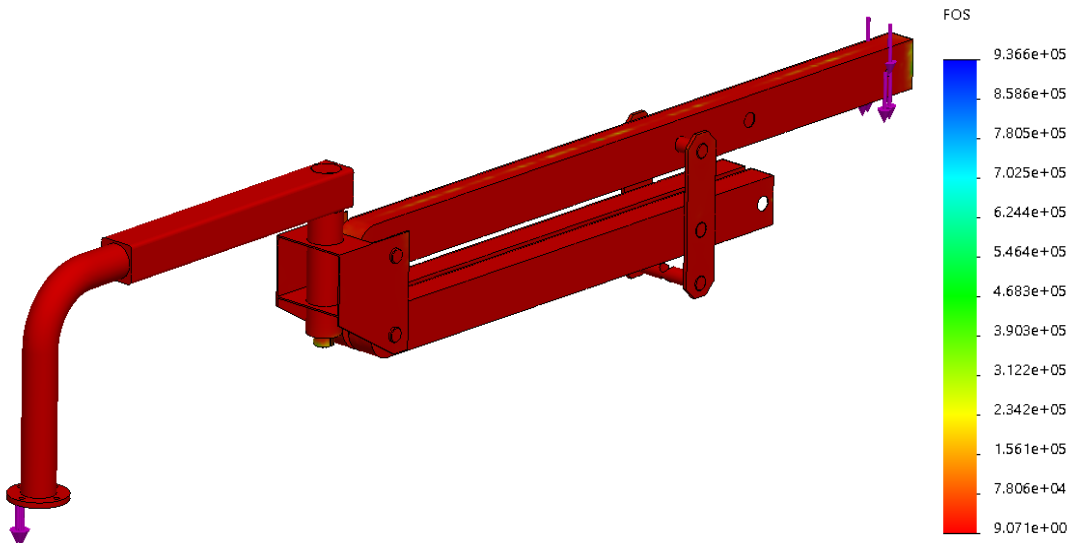
จากรูปที่ 15 และตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแขนกลช่วยยกแบบเดิมของบริษัท

กรณีศึกษาในรูปที่ 2 พบว่ามีการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนที่ 1, 2, 3, 5 และ 6 ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มแข็งแรงโดยรวมให้กับแขนกลช่วยยก ในขณะที่ชิ้นส่วนที่ 4 และ 7 ถูกลดความหนาและปรับให้มีความซับซ้อนในการผลิตน้อยลงเพื่อให้ต้นทุนน้อยลง

จากรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีความเค้นสูงอยู่ที่บริเวณชิ้นส่วนที่ 1, 2, 3 และ 4 ในขณะที่ชิ้นส่วนที่ 5, 6, 7 มีความเค้นน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ นอกจากนี้แขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 9.07 ซึ่งผลการคำนวณเพื่อหาค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 16 ค่า von Mises Stress ของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 17 ค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ

4.1.2 การเปรียบเทียบด้านต้นทุนและค่าความปลอดภัย

ในหัวข้อนี้แสดงการเปรียบเทียบด้านต้นทุนและค่าความปลอดภัยระหว่างแขนกลช่วยยกแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษาและแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ ดังนั้นงานวิจัยจึงกำหนดให้ต้นทุนและค่าความปลอดภัยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการออกแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพทางด้านต้นทุนดีกว่าแบบเดิม 24.68% และ แขนกลช่วยยกใหม่นี้ยังมีค่าความปลอดภัยมากกว่าแบบเดิม 204.33% ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบด้านต้นทุนและค่าความปลอดภัย

RP	TD	New	%e
Cost	34,117.64	25,698.40	24.68%
FOS	3.00	9.13	204.33%

เมื่อ RP = ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการออกแบบทั้งด้านต้นทุนการผลิตรวมและค่าความปลอดภัย, TD = แขนกลช่วยยกแบบเดิม, New = ผลลัพธ์จริงของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ, FOS = ค่าความปลอดภัย, Cost = ต้นทุนการผลิตรวม, %e = ค่าคลาดเคลื่อนร้อยละระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบเก่าและแบบใหม่



4.2 ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ

ในหัวข้อนี้ได้แสดงผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินความเหมาะสมของตัวแบบถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากวิธีที่นำเสนอโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (r^2) และ ค่าคาดการณ์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริงที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ (New) ดังแสดงในตารางที่ 7

จากตารางที่ 7 แสดงค่า r^2 ของทั้งต้นทุนการผลิตรวมคือ 100.00% และค่าความปลอดภัย 99.53% แสดงว่าตัวแบบถดถอยเชิงของทั้งสองตัวชี้วัดประสิทธิภาพการออกแบบเหมาะสมกับข้อมูล ในส่วนค่าคาดการณ์ด้านต้นทุนการผลิตรวมที่ได้จากตัวแบบถดถอยเชิงเส้นมีค่าเท่ากับผลลัพธ์จริงของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ส่วนค่าคาดการณ์กับผลลัพธ์จริงด้านค่าความปลอดภัยมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเพียง 0.99% เท่านั้น แสดงว่าตัวแบบถดถอยนี้มีความแม่นยำที่น่าพอใจ ในงานวิจัยนี้ยังตรวจสอบความเชื่อมั่นเพื่อยืนยันความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ ดังในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ

RP	r^2	ค่า คาดการณ์	New
Cost	100.00%	25,698.40	25,698.40
FOS	99.53%	9.22	9.13

ตารางที่ 8 ยืนยันความเชื่อมั่นของผลลัพธ์

RP	95% CI
Cost	(25,698, 25,698)
FOS	(9.0994, 9.3405)

จากตารางที่ 8 แสดงว่าสามารถมั่นใจได้ร้อยละ 95 ว่าผลลัพธ์ของวิธีที่นำเสนอ (ต้นทุนการผลิตรวม คือ 25,698.40 และ ค่าความปลอดภัย คือ 9.13) อยู่ในช่วงความเชื่อมั่น (95% CI หรือ 95% Confidence Interval)

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ที่ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการหาค่าที่ดีที่สุด สำหรับแขนกลช่วยยกเพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมและมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) มากที่สุด

จากผลการวิจัยพบว่าแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในด้านต้นทุนการผลิตรวมดีกว่าแบบเดิม 24.68% และ มีค่าความปลอดภัยมากกว่าแบบเดิม 204.33% ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะดีกว่าเดิมค่อนข้างมาก แต่การที่ค่าความปลอดภัยสูงถึง 9.13 อาจถูกมองว่าเป็นการออกแบบที่ให้แขนกลช่วยยกมีความแข็งแรงเกินความจำเป็น ดังนั้นในอนาคตผู้เขียนจะพัฒนาวิธีการที่นำเสนอให้สามารถสร้างพรมแดนพาเรโต (Pareto frontier) ด้วยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายจุดประสงค์ที่จะให้ผู้มีอำนาจตัดสินใจของบริษัทนี้ศึกษาได้เลือกรูปแบบของแขนกลช่วยยกที่หลากหลาย พรมแดนพาเรโตนี้จะเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการผลิตและค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยก จากนั้นใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) เพื่อเลือกแบบแขนกลช่วยยกที่เหมาะสมและตรงต่อความ



ต้องการของบริษัทกรณีศึกษามากที่สุดเพื่อนำแบบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอไปขายจริงในท้องตลาดต่อไป นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าตัวแบบถดถอยที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีความเหมาะสมกับข้อมูลสูงมาก และ ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นอย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอนี้ต้องใช้ความพยายามในการสร้างตัวแบบสามมิติของแขนกลช่วยยกจำนวนมาก เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบที่ต้องสร้างแบบแขนกลช่วยยกให้ครบทุกแบบที่มีความเป็นไปได้ และมีปัจจัยการออกแบบจำนวนมากกว่านี้อาจจะทำให้ขั้นตอนการสร้างตัวแบบสามมิตินานมากขึ้น ดังนั้นในอนาคตจำเป็นต้องจะพัฒนาวิธีการออกแบบการทดลอง หรือ แนวทางการตัดปัจจัย หรือ ระดับการทดลองที่ช่วยลดจำนวนการทดลองให้น้อยลง แต่ยังคงประสิทธิภาพไว้ หรือมีประสิทธิผลลดลงเพียงเล็กน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทำวิจัยจาก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ขอขอบคุณกรรมการผู้จัดการและวิศวกรของบริษัท ที.อาร์.โมเดิร์น อินดัสทรี จำกัด ที่ให้ข้อมูลรวมถึงให้ความช่วยเหลืออย่างมากจากงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] www.trmodernasia.com/content/3057/ผลิตและจำหน่าย-เครื่องช่วยยก-เครื่องทุ่นแรงระบบลม-air-balancer-manipulator. (Accessed on 4 August 2021)
- [2] S. Mahalingam and A. Sharan, The optimal balancing of the robotic manipulators, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceeding, 1986, 828-835.
- [3] W.S. Newman and N. Hogan, Time optimal control of balanced manipulators, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1989, 111(2), 187–193.
- [4] C.A.C. Coello, A.D. Christiansen, and A.H. Aguirre, Multiobjective design optimization of counterweight balancing of a robot arm using genetic algorithms, the 7th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, Proceeding, 1995, 20-23.
- [5] C. Baradat, V. Arakelian, S. Briot, and S. Guegan, Design and prototyping of a new balancing mechanism for spatial parallel manipulators, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2008, 130(7), 0723051-07230513.
- [6] A. Nikoobin and M. Moradi, Optimal balancing of robot manipulators in point-to-point motion, Robotica, 2011, 29(2), 233-244.
- [7] W. Xu, D. Meng, H. Liu, X. Wang, and B. Liang, Singularity-free trajectory planning of free-floating multiarm space robots for keeping the base inertially stabilized, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12), 2464- 2477.



- [8] J. Wang and X. Kong, An optimization method for the static balancing of manipulators using springs, the 44th Mechanisms and Robotics Conference, Proceeding, 2020, 22217.
- [9] M.H. Ali, Y. Kuralbay, A. Aitmaganbet, and M.A.S. Kamal, Design of a 6-DOF robot manipulator for 3D printed construction, Materials Today: Proceedings, In Press, 31 July 2021.
- [10] R. Xu, J. Luo, and M. Wang, Optimal grasping pose for dual-arm space robot cooperative manipulation based on global manipulability, Acta Astronautica, 2021, 183, 300-309.
- [11] D. Cholaseuk, Optimum and robust geometric design of mechanical parts, Thesis, Columbia University, USA, 2001.
- [12] D. Cholaseuk, A stress-based material distribution method for optimum shape design of mechanical parts, Thammasat International Journal of Science and Technology, 2006, 11(3), 17-21.
- [13] A. Manee-ngam, P. Saisirirat, and P. Suwankan, Hook design loading by the optimization method with weighted factors rating method, Energy Procedia, 2017, 138, 337–342.
- [14] T. Kot, Z. Bobovský, M. Brandstötter, V. Krys, I. Virgala, and P. Novák, Finding optimal manipulator arm shapes to avoid collisions in a static environment, Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(1), 64.
- [15] <https://drive.google.com/file/d/1NpY0PhRgTiJzeCKOaKcApZq7PCW32S2/view?usp=sharing> (Accessed on 14 October 2021)
- [16] www.syssteel.com/wp-content/uploads/2018/09/AW-Catalog-Thai-Effective-April-2018.pdf. (Accessed on 14 October 2021)
- [17] www.meadinfo.org/2010/09/jis-g-3101-ss400-steel-properties-spec.html. (Accessed on 14 October 2021)



การเปรียบเทียบเทคนิคการพยากรณ์ราคาพืชไร่ในประเทศไทย

ศิรประภา ดีประดิษฐ์* และ พงศ์ธร รักซ้อน

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

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

วันที่รับบทความ: 5 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 3 กันยายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 18 พฤศจิกายน 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้พยากรณ์ราคาพืชไร่ที่สำคัญของประเทศไทย ได้แก่ ข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด ถั่วลิสง และข้าวโพด โดยเปรียบเทียบความแม่นยำด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย และค่าสัญญาณติดตาม งานวิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วยข้อมูลราคารายเดือน ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2543 – 2562 จำนวน 240 ข้อมูล ซึ่งทดลองสร้างแบบจำลองการพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลราคารายเดือนย้อนหลังที่แตกต่างกัน ช่วง 3 - 20 ปี และชุดที่ 2 ใช้ในการทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลราคาจริง ประกอบด้วย ข้อมูลราคารายเดือน ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2563 จำนวน 12 ข้อมูล ผลการสร้างแบบจำลอง พบว่า เทคนิคการพยากรณ์วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เหมาะสำหรับการพยากรณ์ราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด และข้าวโพด สำหรับการพยากรณ์ราคาถั่วลิสงใช้วิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังสองครั้ง ดังนั้นการสร้างแบบจำลองจากเทคนิคการพยากรณ์ที่ใช้มีค่า MAPE อยู่ในช่วง 1.22% ถึง 8.13% สำหรับการทดสอบแบบจำลอง พบว่าค่า MAPE ของการพยากรณ์ราคาพืชไร่อยู่ในช่วง 2.00% ถึง 11.94% ซึ่งเป็นการพยากรณ์ที่แม่นยำ

คำสำคัญ: พืชไร่; การพยากรณ์อนุกรมเวลา; ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย; ค่าสัญญาณติดตาม



The Forecasting Techniques Comparison of Field Crops in Thailand

Siraprapha Deepradit^{*} and Pongthorn Ruksorn

Department of Engineering Management, Faculty of Science and Technology,
Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

^{*} Corresponding author, E-mail: d_siraprapha@aru.ac.th

Received: 5 August 2021; Revised 3 September 2021; Accepted: 18 November 2021

Online Published: 24 December 2021

Abstract: The essential agricultural production of field crops in Thailand was forecasted in this study. Time-series approaches were used to forecast six field crops, including Thai white rice 15%, Thai jasmine rice 105, sugar cane, cassava, peanuts, and corn, and the results were compared to the mean absolute percentage error and tracking signal. For forecasting, there were two datasets: a training dataset and a testing dataset. The first set of data is developed a forecasting model, and it contains 240 monthly price data from 2000 to 2019, which uses historical monthly pricing data ranging from 3 to 20 years. The second set of data has tested the model with actual price data to develop a forecast model and validate the model with current price data, consisting of 12 monthly price data in 2020. The Box-Jenkins forecasting technique was found to be suitable for forecasting the prices of Thai white rice 15%, Thai jasmine rice 105, sugar cane, cassava, and corn, while the Double Exponential Smoothing technique was shown to be suitable for forecasting peanut prices with MAPE ranging from 1.22% to 8.13%. The MAPE of field crops for the testing dataset varies from 2.00% to 11.94%, which is an accurate estimate.

Keywords: Field crops; Time-series forecasting technique; Mean absolute percentage error; Tracking signal



1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่เกี่ยวข้องกับเกษตรกรรม พืชไร่เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอันดับ ต้น ๆ ของประเทศ โดยพืชไร่แบ่งเป็น กลุ่มธัญพืช กลุ่มพืชน้ำมัน กลุ่มพืชน้ำตาล กลุ่มพืชเส้นใย กลุ่มพืชหัว กลุ่มพืชอาหารสัตว์ และกลุ่มพืชออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท [1] ซึ่งแนวโน้มสภาวะเศรษฐกิจในปี 2564 ในส่วนของพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณฝนที่ตกสะสมเพิ่มขึ้นในช่วงครึ่งหลังของปี 2563 ทำให้ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำและแหล่งน้ำธรรมชาติเพิ่มขึ้น รวมถึงราคาของพืชหลายชนิดปรับตัวเพิ่มขึ้น จึงให้เกษตรกรขยายพื้นที่เพาะปลูก [2] ซึ่งการทราบราคาสินค้าทางการเกษตรล่วงหน้าเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากสามารถนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มาเป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับผู้ผลิตและผู้ส่งออกในการวางแผนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นและสอดคล้องกับความต้องการของตลาด

การพยากรณ์เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ทราบถึงข้อมูลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยถ้าค่าการพยากรณ์ที่ได้มีความแม่นยำสูงจะช่วยให้ผู้วางแผนสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีงานวิจัย เช่น Deepradit *et al.* [3] ได้พยากรณ์ราคามะพร้าว น้ำหอมรายเดือน โดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบเฉพาะ คือ วิธีแยกองค์ประกอบอนุกรมเวลา และวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ เปรียบเทียบกับวิธีการพยากรณ์ลำดับชั้นแบบบนลงล่าง โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย และค่าสัญญาณติดตามที่อยู่ในช่วง [-6,+6] งานวิจัยของ BüyüçŞahin and Ertekin [4] ปรับปรุงความแม่นยำของการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาโดยใช้วิธีผสมผสานระหว่าง ARIMA-ANN และวิธีแยกองค์ประกอบอนุกรมเวลา Ohyver and Pudjihastuti [5]

ได้ใช้ตัวแบบ ARIMA ในการพยากรณ์ราคาข้าว Tanyarattanasisakul [6] ใช้เทคนิคอนุกรมเวลาระหว่างวิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังแบบวินเทอร์และวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ในการพยากรณ์ราคามะพร้าว น้ำหอม สำหรับงานวิจัยที่ได้ใช้เทคนิคในการพยากรณ์เกี่ยวกับสินค้าทางการเกษตร เช่น พืชไร่ ได้มีงานวิจัยของ Anggraeni *et al.* [7] ศึกษาการพยากรณ์ราคาข้าวของอินโดนีเซียโดยใช้วิธีผสมผสานกับโครงข่ายประสาทเทียม Saelim *et al.* [8] ได้พยากรณ์ผลผลิตข้าวหอมมะลิจังหวัดนครราชสีมาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ วิธีการถดถอยแบบลำดับชั้น และวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาบ็อกซ์-เจนกินส์ และใช้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ Luangtong และ Kantananttha [9] ศึกษาวิธีการพยากรณ์ผลผลิตการเกษตรของพืช 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวนาปี ข้าวนาปรัง มันสำปะหลัง และสับปะรด ในจังหวัดที่มีผลผลิตสูงสุด 3 อันดับแรก ของประเทศ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ระบบผสมของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ความแม่นยำของการพยากรณ์จะถูกเปรียบเทียบโดยใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย สำหรับ Kodsueb และ Boonlha [10] ได้ศึกษาตัวแบบที่เหมาะสมและเพื่อเปรียบเทียบตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ราคาข้าวหอมมะลิ 105 โดยใช้การพยากรณ์โดยวิธีการปรับให้เรียบแบบเอกซ์โปเนนเชียลซ้ำสองครั้ง และวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ โดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด และ Jinno [11] พยากรณ์ราคาข้าวส่งออกของประเทศไทยโดยใช้แบบจำลอง ARIMAX



งานวิจัยนี้ได้พยากรณ์ราคารายเดือนของพืชไร่จำนวน 6 ชนิด ประกอบด้วย ได้แก่ ข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด ถั่วลิสง และข้าวโพด โดยใช้เทคนิคอนุกรมเวลา และเปรียบเทียบแบบจำลองด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยโดยแปลผลจากงานวิจัยของ Montañó *et al.* [12] โดยถ้าค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 แสดงว่าการพยากรณ์มีความแม่นยำสูง (Highly Accurate Forecasting) ถ้าค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 10 - 20 แสดงว่าเป็นการพยากรณ์ที่ดี (Good Forecasting) ถ้าค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 20 - 50 แสดงว่าเป็นการพยากรณ์ที่สมเหตุสมผล (Reasonable Forecasting) และถ้าค่ามากกว่า 50 แสดงว่าเป็นการพยากรณ์ที่ไม่แม่นยำ (Inaccurate Forecasting) และค่าสัญญาณติดตามให้อยู่ในช่วง [-6,+6] [13]

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาพืชไร่ที่สำคัญ จำนวน 6 ชนิด ประกอบด้วย ข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด ถั่วลิสง และข้าวโพด โดยมีขั้นตอน ดังนี้

2.1 วิเคราะห์ข้อมูลราคารายเดือนของราคาพืชไร่

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลราคาของพืชไร่แต่ละชนิด ตั้งแต่ ปี พ.ศ.2543 – 2563 โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 สำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Training Dataset) ประกอบด้วย ข้อมูลราคารายเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ.2543 ถึง พ.ศ.2562 จำนวน 240 ข้อมูล สำหรับราคารายเดือนของอ้อยโรงงานใช้ข้อมูลจำนวน 60 ข้อมูล โดยผู้วิจัยทดลองสร้างแบบจำลอง

การพยากรณ์ของพืชไร่ทั้ง 6 ชนิด โดยแต่ละชนิดทดลองใช้ข้อมูลราคารายเดือนย้อนหลัง ช่วง 3 – 20 ปี ดังตารางที่ 1 และข้อมูลชุดที่ 2 สำหรับใช้ในการทดสอบแบบจำลอง (Testing Dataset) กับข้อมูลราคาจริง ประกอบด้วย ข้อมูลราคารายเดือน ในปี พ.ศ.2563 จำนวน 12 ข้อมูล

ตารางที่ 1 จำนวนปีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ลำดับที่	จำนวนปีย้อนหลังในการสร้างแบบจำลอง	ข้อมูลราคารายเดือนของพืชไร่
1	20	พ.ศ.2543 – 2562
2	15	พ.ศ.2548 – 2562
3	10	พ.ศ.2553 – 2562
4	5	พ.ศ.2558 – 2562
5	4	พ.ศ.2559 – 2562
6	3	พ.ศ.2560 – 2562

ผู้วิจัยได้ศึกษาอนุกรมเวลาของพืชไร่ทั้ง 6 ชนิด เพื่อวิเคราะห์รูปแบบแนวโน้มและฤดูกาลของราคาในแต่ละเดือน โดยวิเคราะห์รูปแบบของข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ.2543 ถึง พ.ศ.2562 ดังนี้

2.1.1 ราคารายเดือนของข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15%

ข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% คือ ข้าวเปลือกแห้ง (Dry Paddy Rice) หมายถึง ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นจนมีความชื้นไม่เกิน 15% ซึ่งความชื้นมีบทบาทสำคัญในการกำหนดราคาข้าว ข้าวที่เก็บเกี่ยวในระยะที่เหมาะสม และลดความชื้นอย่างเหมาะสม เหลือ 13-15% จะมีราคาสูงกว่าข้าวที่มี



ความชื้นสูง เนื่องจากข้าวแห้งที่มีความชื้นเหมาะสมสามารถนำมาขัดสีได้เลย ไม่ต้องผ่านกระบวนการลดความชื้น [14] อนุกรมเวลาของข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ดังรูปที่ 1 และจากการวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลในอดีตของราคารายเดือนของข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% จำนวน 240 ข้อมูลพบว่ารูปแบบอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล

2.1.2 ราคารายเดือนของข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105

ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 มีชื่อเรียกทางการว่าข้าวขาวดอกมะลิ ซึ่งนิยมปลูกในฤดูข้าวนาปี มีกลิ่นหอม นุ่ม อร่อย เป็นข้าวหนัก คุณภาพดี และจากการวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลในอดีตของราคารายเดือนของข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ จำนวน 240 ข้อมูล ดังรูปที่ 2 พบว่ารูปแบบอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล

กราฟอนุกรมเวลาของราคารายเดือนข้าวเปลือกเจ้า (บาทต่อตัน) ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 จากกราฟในช่วงเดือนที่ 96 เป็นต้นไป (ปี พ.ศ.2551) เมื่อวิเคราะห์ราคาในช่วงดังกล่าว พบว่า ในปี 2550 ปัจจัยภายนอกเอื้ออำนวยต่อการค้าข้าวของไทย เนื่องจากปริมาณความต้องการข้าวในตลาดโลกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ราคาข้าวขยับตัวสูงขึ้น

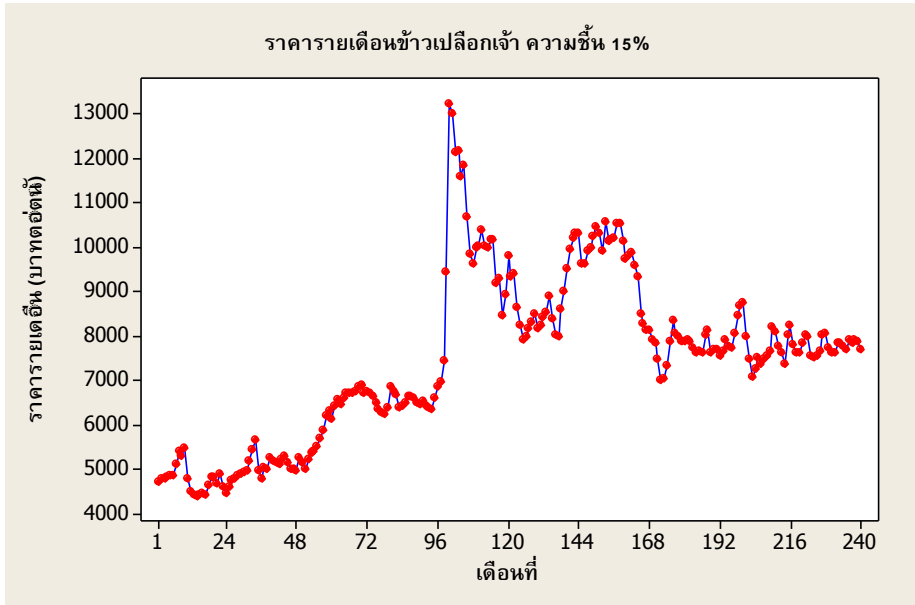
2.1.3 ราคารายเดือนของอ้อยโรงงาน

ความต้องการผลผลิตอ้อยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่การผลิตอ้อยในเขตภาคกลางยังคงประสบปัญหาผลผลิตต่ำเนื่องจากการปลูกอ้อยส่วนใหญ่อาศัยน้ำฝนทำให้ผลผลิตมีความแปรปรวนสูงเพราะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนและการกระจายของฝนในแต่ละปี การบริหารจัดการไร่อ้อยและช่วงปลูกที่

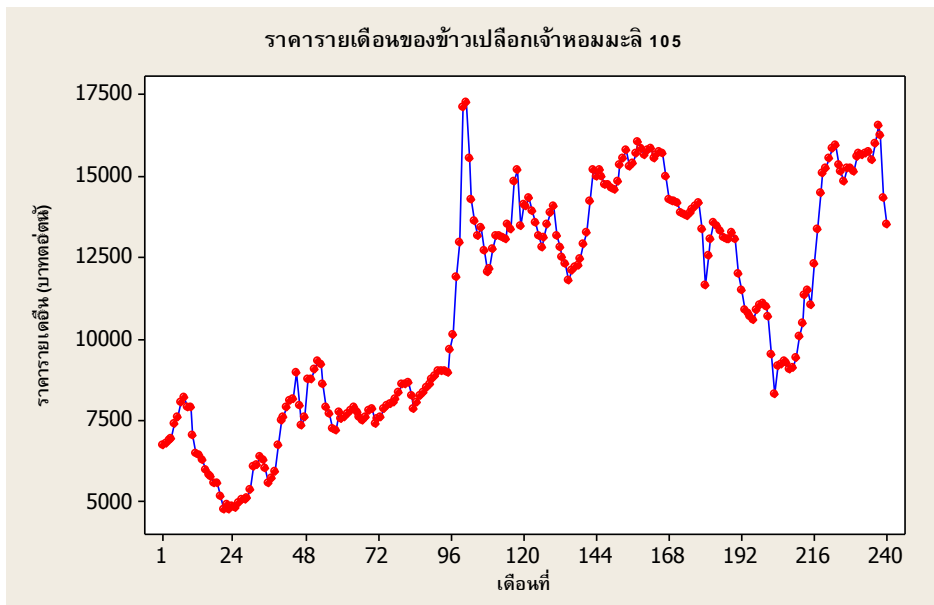
เหมาะสม จึงเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตามเกษตรกรยังพบปัญหาการปลูกอ้อยให้ทันช่วงฤดูปลูกที่เหมาะสมเนื่องจากต้องรอเก็บเกี่ยวอ้อยให้แล้วเสร็จทันโรงงานน้ำตาลปิดหีบ [15] โดยแสดงกราฟอนุกรมเวลาของราคารายเดือนอ้อยโรงงาน (บาทต่อตัน) ดังรูปที่ 3 ซึ่งข้อมูลราคาของอ้อยโรงงานในแต่ละปี มีข้อมูลเดือนมกราคมถึงมีนาคม เป็นระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งมีฤดูหีบอ้อยในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม สำหรับอ้อยโรงงานจึงมีข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง จำนวน 60 ข้อมูล เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลในอดีตพบว่ารูปแบบอนุกรมเวลา มีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล

2.1.4 ราคารายเดือนของมันสำปะหลังสด

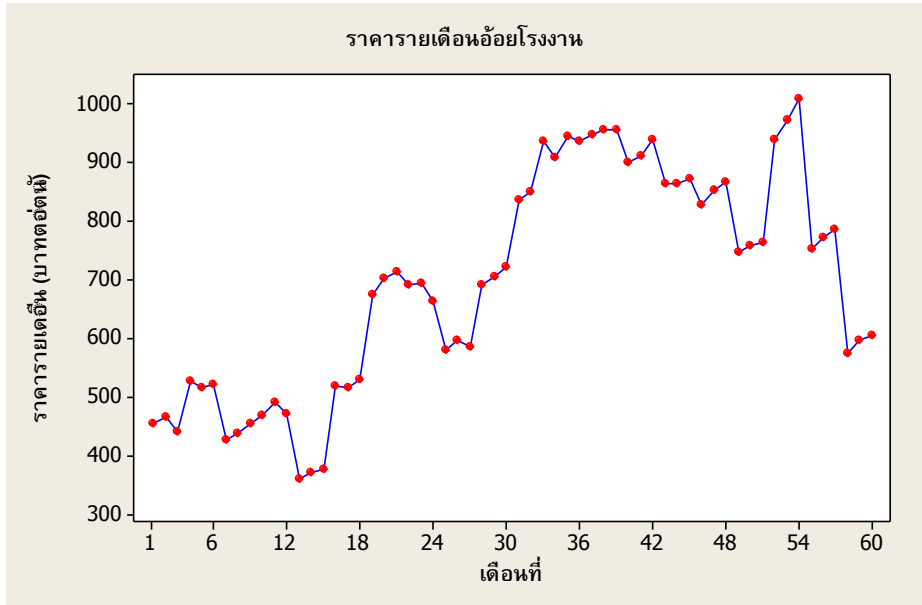
มันสำปะหลังสดเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศเนื่องจากเป็นพืชที่ไทยมีศักยภาพในการผลิตสูง ในปี 2560 ไทยสามารถผลิตมันสำปะหลังได้มากเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากไนจีเรีย และคองโก [1] โดยมีผลผลิตปริมาณ 30.50 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 10.45 ของผลผลิตมันสำปะหลังของโลก ซึ่งผลผลิตจากมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร อาหารสัตว์ กระดาษ สิ่งทอ เคมีภัณฑ์ และพลังงาน และในช่วงปี 2558 – 2562 เนื้อที่เก็บเกี่ยวและผลผลิตมันสำปะหลังของไทยลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.50 และร้อยละ 1.39 ต่อปี ตามลำดับ แต่รัฐบาลได้มีมาตรการประกันรายได้รักษาเสถียรภาพราคามันสำปะหลัง ซึ่งคาดว่าจะสามารถ ใจเกษตรกรให้หันมาปลูกมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น [1] โดยแสดงกราฟอนุกรมเวลาของราคารายเดือน มันสำปะหลังสด (บาทต่อกิโลกรัม) จำนวน 240 ข้อมูล ดังรูปที่ 4 เมื่อวิเคราะห์รูปแบบอนุกรมเวลาพบว่าราคามีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล



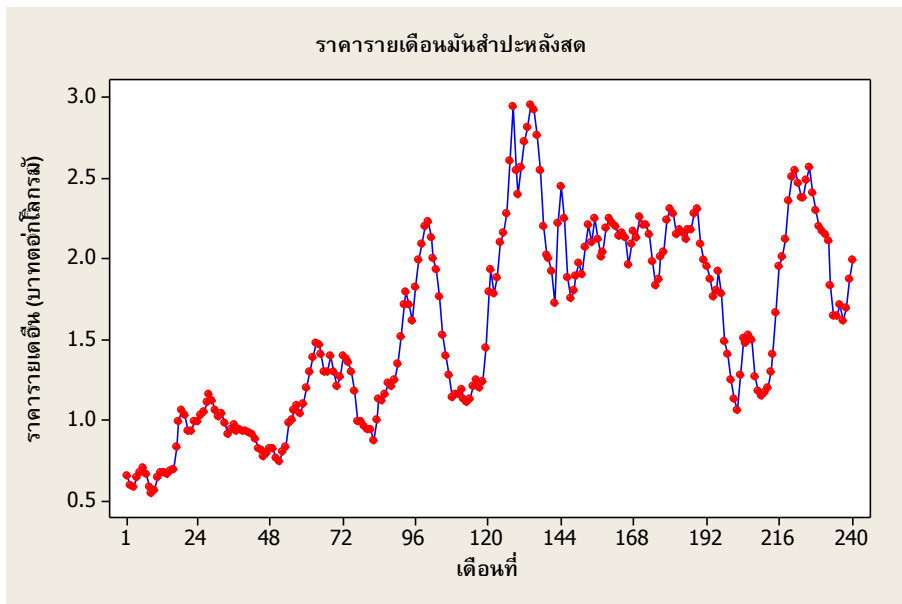
รูปที่ 1 ราคารายเดือนของข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15%



รูปที่ 2 ราคารายเดือนของข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105



รูปที่ 3 ราคารายเดือนของอ้อยโรงงาน



รูปที่ 4 ราคารายเดือนของราคารายเดือนของมันสำปะหลังสด



2.1.5 ราคาขายเดือนของถั่วลิสง

ถั่วลิสงเป็นพืชตระกูลถั่วที่สามารถปลูกได้ตลอดปี ส่วนใหญ่ปลูกกระจุกกระจายในพื้นที่ต่าง ๆ กัน ปลูกได้ทุกภาคของประเทศ แหล่งปลูกที่สำคัญคือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง เกษตรกรมักปลูกเป็นพืชหมุนเวียนปลูกแซมและปลูกเหลื่อมกับพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ในอาเซียนมีประเทศผู้ผลิตถั่วลิสง 8 ประเทศ ซึ่งประเทศไทยจัดอยู่ในอันดับ 4 [16] ถั่วลิสงจัดอยู่ในกลุ่มพืชที่ผลิตไม่เพียงพอกับความต้องการใช้ภายในประเทศ เพราะถั่วลิสงเป็นพืชอาหารที่บริโภคง่าย เป็นส่วนประกอบอาหารหวานคาวต่าง ๆ และเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป บางส่วนนำไปสกัดน้ำมันและกากใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยแสดงกราฟอนุกรมเวลาของราคาขายเดือนถั่วลิสง (บาทต่อกิโลกรัม) ดังรูปที่ 5 เมื่อวิเคราะห์รูปแบบอนุกรมเวลาของราคาขายเดือนของถั่วลิสง จำนวน 240 ข้อมูลพบว่าไม่มีแนวโน้มและฤดูกาล

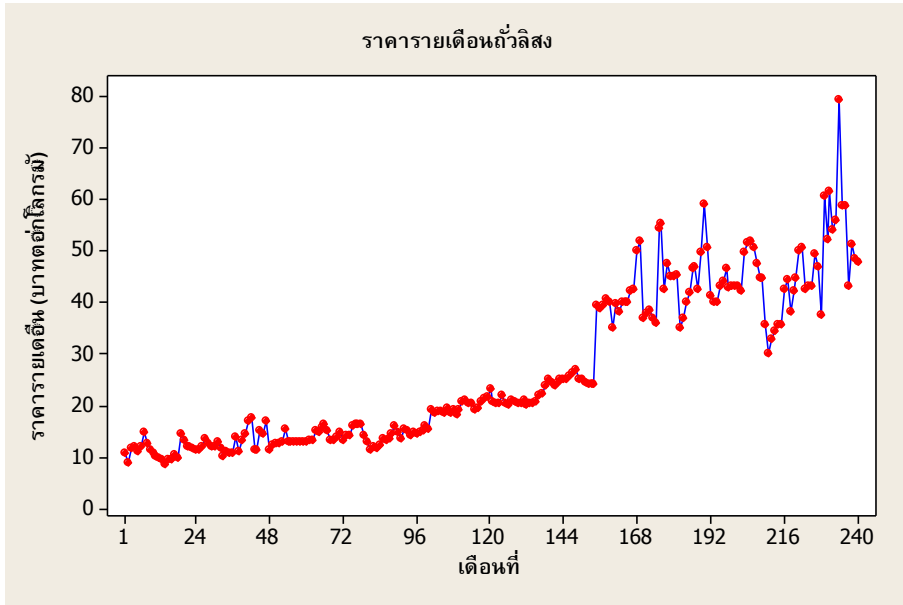
2.1.6 ราคาขายเดือนของข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ที่มีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน [17] ตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ ในขณะที่ผลผลิตยังไม่เพียงพอความต้องการใช้ในประเทศ จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยในปี 2561 ประเทศไทยนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปริมาณ 153,662.73 ตัน มูลค่ารวม 900.93 ล้านบาท ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับเกษตรกร เนื่องจากมีตลาดรองรับผลผลิต โดยเฉพาะการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

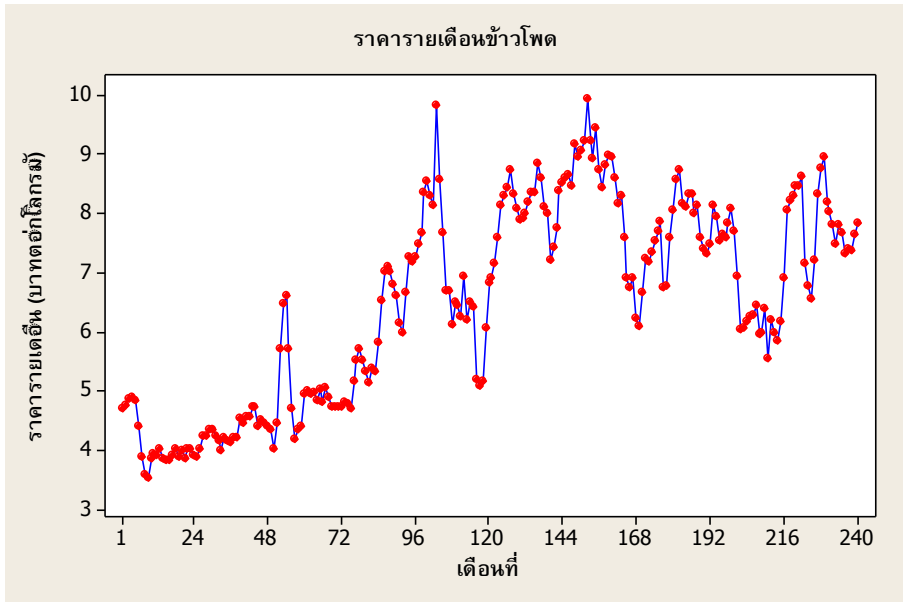
เนื่องจากเป็นพืชอายุสั้นและใช้น้ำน้อย เหมาะสำหรับการปลูกทดแทนนาปรังที่ประสบปัญหาผลผลิตล้มตลาด นอกจากนั้นผลผลิตข้าวโพดหลังทำน่ายังมีคุณภาพดีกว่าฤดูฝน เนื่องจากการเก็บเกี่ยวไม่อยู่ในช่วงที่มีฝนตกชุก และรัฐบาลสนับสนุนการผลิตทดแทนนาปรัง [18] โดยแสดงกราฟอนุกรมเวลาของราคาขายเดือนข้าวโพด (บาทต่อกิโลกรัม) จำนวน 240 ข้อมูล ดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่ารูปแบบอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล

2.2 การพยากรณ์อนุกรมเวลาราคาขายเดือนของพืชไร่

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองการพยากรณ์โดยเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทั้งหมด 12 วิธี ได้แก่ (1) วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins) (2) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่ไม่มีแนวโน้มแบบเติมพ (Damped Trend Non-Seasonal) (3) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มผลบวกแบบเติมพ (Damped Trend Seasonal Additive) (4) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มผลคูณแบบเติมพ (Damped Trend Seasonal Multiplicative) (5) วิธีปรับเรียบด้วยการถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average) (6) วิธีปรับเรียบด้วยการถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่สองครั้ง (Double Moving Average) (7) วิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังครั้งเดียว (Single Exponential Smoothing) (8) วิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังสองครั้ง (Double Exponential Smoothing) (9) วิธีฤดูกาลแบบผลบวก (Seasonal Additive) (10) วิธีฤดูกาลแบบผลคูณ (Seasonal Multiplicative) (11) วิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์วินเทอร์แบบบวก (Holt-Winters' Additive)



รูปที่ 5 ราคารายเดือนของถั่วลิสง



รูปที่ 6 ราคารายเดือนของข้าวโพด



และ (12) วิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของ โฮลต์วินเทอร์แบบคูณ (Holt-Winters' Multiplicative) และนำเสนอวิธีการพยากรณ์ที่ดีที่สุด โดยทดลองใช้ ข้อมูลรายย้อนหลังในช่วง 3-20 ปี ในการสร้าง แบบจำลองการพยากรณ์ที่มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่มีค่าน้อยที่สุดจากทั้ง 12 วิธี

2.3 การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์โดยใช้ ค่าความผิดพลาดด้วยค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่น้อยที่สุด ดังสมการ (1) ซึ่งแปลผล ดังงานวิจัยของ [12] และเปรียบเทียบด้วยค่าสัญญาณ ติดตาม (Tracking Signal: TS) ดังสมการ (2) โดย คำนวณจากอัตราส่วนระหว่าง ค่า Bias (สมการที่ (3)) และค่า MAD (สมการที่ (4)) ซึ่งกำหนดให้อยู่ในช่วง [-6,+6] [13] โดยกำหนด \hat{Y}_t คือ ค่าพยากรณ์เดือนที่ t Y_t คือ ค่าจริงเดือนที่ t และ n คือ จำนวนช่วงเวลา

$$MAPE = \left(\frac{100}{n} \right) \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{Y}_i - Y_i|}{\hat{Y}_i} \tag{1}$$

$$TS_t = \frac{Bias_t}{MAD_t} \tag{2}$$

$$MAD_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \tag{3}$$

$$Bias_t = \sum_{i=1}^t (Y_i - \hat{Y}_i) \tag{4}$$

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการสร้างแบบจำลองของการพยากรณ์ราคา

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลรายเดือนของพีชไรโน ประเทศไทย ตั้งแต่ ปี พ.ศ.2543 - 2562 จำนวน 240 ข้อมูล โดยผู้วิจัยทดลองสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ โดยใช้ข้อมูลรายเดือนย้อนหลังที่แตกต่างกัน ช่วง 3 - 20 ปี แสดงผลการสร้างแบบจำลองการ พยากรณ์ของพีชไรโนแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2 - 8

ตารางที่ 2 ความแม่นยำของการพยากรณ์ราคา ข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15%

ข้อมูลย้อนหลัง (ปี)	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
20	ARIMA(0,1,1)	3.13
15	Damped Trend Non-Seasonal	3.15
10	ARIMA(0,1,1)	2.58
5	SARIMA(2,0,2)(1,0,1)	1.67
4	Single Moving Average	1.68
3	SARIMA(2,0,2)(1,0,1)	1.22

ตารางที่ 3 ความแม่นยำของการพยากรณ์ราคา ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105

ข้อมูลย้อนหลัง (ปี)	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
20	Damped Trend Non-Seasonal	2.99
15	Damped Trend Non-Seasonal	2.76
10	Damped Trend Non-Seasonal	2.54
5	Damped Trend Non-Seasonal	2.67
4	Damped Trend Non-Seasonal	2.80
3	ARIMA(0,1,1)	2.34



การพยากรณ์ราคาข้าวเปลือกเจ้าที่มีความชื้น 15% จากตารางที่ 2 พบว่า รูปแบบของข้อมูลราคารายเดือนที่ใช้เวลาย้อนหลัง 10 – 20 ปี รูปแบบของข้อมูลราคามีเพียงแนวโน้ม แต่สำหรับข้อมูลราคาย้อนหลัง 3-5 ปี มีรูปแบบทั้งแนวโน้มและฤดูกาล และเมื่อพิจารณาการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ การพยากรณ์ ด้วยวิธีบี อ๊กซ์-เจนกินส์ แบบ SARIMA(2,0,2)(1,0,1) มีค่า MAPE เท่ากับ 1.22% โดยสร้างจากข้อมูลราคาย้อนหลัง 3 ปี

การพยากรณ์ราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 ดังตารางที่ 3 พบว่า รูปแบบของข้อมูลราคารายเดือนที่ใช้เวลาย้อนหลัง 3 – 20 ปี มีเพียงรูปแบบแนวโน้ม และเมื่อพิจารณาการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ การพยากรณ์ ด้วยวิธีบี อ๊กซ์-เจนกินส์ แบบ ARIMA(0,1,1) มีค่า MAPE เท่ากับ 2.34% โดยสร้างจากข้อมูลราคาย้อนหลัง 3 ปี

การพยากรณ์ราคาอ้อยโรงงาน ดังตารางที่ 4 พบว่า รูปแบบของข้อมูลราคารายเดือนที่ใช้เวลาย้อนหลัง 4 – 20 ปี รูปแบบของข้อมูลราคามีเพียงแนวโน้ม แต่สำหรับข้อมูลราคาย้อนหลัง 3 ปี มีรูปแบบทั้งแนวโน้มและฤดูกาล และเมื่อพิจารณา การพยากรณ์ที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ การพยากรณ์ด้วยวิธีบี อ๊กซ์-เจนกินส์ แบบ SARIMA(0,1,1)(1,0,0) มีค่า MAPE เท่ากับ 1.76% โดยสร้างจากข้อมูลราคาย้อนหลัง 3 ปี

การพยากรณ์ราวมันสำปะหลังสด จากตารางที่ 5 พบว่า การพยากรณ์ที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ การพยากรณ์ ด้วยวิธีบี อ๊กซ์-เจนกินส์ แบบ ARIMA(2,1,2) มีค่า MAPE เท่ากับ 3.65% โดยสร้างจากข้อมูลราคาย้อนหลัง 3 ปี ที่มีเพียงรูปแบบแนวโน้ม

ตารางที่ 4 ความแม่นยำของการพยากรณ์ราคาอ้อยโรงงาน

ข้อมูลย้อนหลัง (ปี)	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
20	Double Exponential Smoothing	6.09
15	Double Exponential Smoothing	5.64
10	Single Exponential Smoothing	5.36
5	Single Exponential Smoothing	8.3
4	Single Exponential Smoothing	9.00
3	SARIMA(0,1,1)(1,0,0)	1.76

ตารางที่ 5 ความแม่นยำของการพยากรณ์ราคารายเดือนของมันสำปะหลังสด

ข้อมูลย้อนหลัง (ปี)	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
20	SARIMA(0,1,1)(1,0,0)	4.88
15	SARIMA(0,1,1)(1,0,0)	4.94
10	ARIMA(1,1,2)	4.72
5	ARIMA(1,0,1)	4.33
4	ARIMA(0,1,1)	4.78
3	ARIMA(2,1,2)	3.65

ตารางที่ 6 ความแม่นยำของการพยากรณ์ราคารายเดือนของถั่วลิสง

ข้อมูลย้อนหลัง (ปี)	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
20	Double Exponential Smoothing	8.34
15	Double Exponential Smoothing	8.13
10	Double Exponential Smoothing	8.79
5	ARIMA(1,1,1)	9.45
4	Damped Trend Non-Seasonal	9.72
3	ARIMA(0,1,1)	11.26



ตารางที่ 7 ความแม่นยำของการพยากรณ์ราคารายเดือนของข้าวโพด

ข้อมูลย้อนหลัง (ปี)	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
20	Damped Trend Non-Seasonal	4.50
15	Damped Trend Non-Seasonal	4.55
10	ARIMA(2,1,1)	4.03
5	ARIMA(1,0,1)	4.32
4	Damped Trend Non-Seasonal	4.65
3	Damped Trend Non-Seasonal	4.79

สำหรับราคารายเดือนของถั่วลิสงไม่มีข้อมูลในหลายเดือน ดังนั้นข้อมูลที่ขาดหายไป (Missing Data) ในบางช่วง ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคการพยากรณ์โดยสร้างข้อมูลจากการพยากรณ์ของราคาช่วงเดือนก่อนหน้า โดยเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE ไม่เกิน 10% โดยในปี พ.ศ.2546 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ กุมภาพันธ์ กรกฎาคม สิงหาคม และธันวาคม วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ ARIMA(1,0,0) ปี พ.ศ.2547 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ มกราคมถึงมีนาคม และมีถั่วลิสงถึงธันวาคม วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ Single Moving Average ปี พ.ศ.2548 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ มกราคม กุมภาพันธ์ และธันวาคม วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ Single Moving Average ปี พ.ศ.2549 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ มกราคมและกุมภาพันธ์ วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ Single Moving Average ปี พ.ศ.2557 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ กรกฎาคมและสิงหาคม วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ Double Exponential Smoothing ปี พ.ศ.2558 เดือนที่ไม่มี

ข้อมูล คือ มกราคม มิถุนายน และกรกฎาคม วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ Double Exponential Smoothing ปี พ.ศ.2559 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ มีนาคม กรกฎาคม และกันยายน วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ ARIMA(0,0,1) และในปี พ.ศ.2561 เดือนที่ไม่มีข้อมูล คือ สิงหาคม และกันยายน วิธีการพยากรณ์ที่เลือกใช้ คือ ARIMA(1,0,2) จากนั้นจึงทำการพยากรณ์และหาความแม่นยำ

การพยากรณ์ราคาถั่วลิสง จากตารางที่ 6 พบว่ารูปแบบของข้อมูลราคารายเดือนที่ใช้มีเพียงรูปแบบแนวโน้ม โดยการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ การพยากรณ์ด้วยวิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังสองครั้ง มีค่า MAPE เท่ากับ 8.13% โดยสร้างจากข้อมูลรายเดือนย้อนหลัง 15 ปี

การพยากรณ์ราคาข้าวโพด จากตารางที่ 7 พบว่าข้อมูลราคาข้าวโพดมีเพียงรูปแบบแนวโน้ม ซึ่งพยากรณ์ที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ การพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบ ARIMA(2,1,1) มีค่า MAPE เท่ากับ 4.03% โดยสร้างจากข้อมูลรายเดือนย้อนหลัง 10 ปี

สรุปผลจากการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด ถั่วลิสง และข้าวโพด พบว่าเทคนิคการพยากรณ์ที่ดีที่สุดสำหรับพืชไร่แต่ละชนิด โดยมีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ ราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ใช้เทคนิคบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบ SARIMA(2,0,2)(1,0,1) ราคาข้าวเปลือกเจ้า 105 ใช้เทคนิคบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบ ARIMA(0,1,1) ราคาอ้อยโรงงาน ใช้เทคนิคบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบ SARIMA(0,1,1)(1,0,0) ราคามัน



สำปะหลังสด ใช้เทคนิคบ็อกซ์-เจนกินส์แบบ ARIMA(2,1,2) ราคาถั่วลิสงใช้เทคนิควิธีปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังสองครั้ง และราคาข้าวโพดใช้เทคนิคบ็อกซ์-เจนกินส์แบบ ARIMA(2,1,1) โดยค่า MAPE ของราคาพืชไร่ อยู่ในช่วง 1.22 ถึง 8.13

จากนั้นจึงนำเทคนิคการพยากรณ์ที่ดีที่สุดที่ได้จากการสร้างแบบจำลองไปทำการทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์กับราคารายเดือนของพืชไร่จริง ในปี พ.ศ.2563

3.2 ผลการทดสอบแบบจำลองของการพยากรณ์ราคา

ผู้วิจัยใช้ข้อมูลราคาในการทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลราคาจริง ประกอบด้วย ข้อมูลราคารายเดือนของปี พ.ศ.2563 จำนวน 12 ข้อมูล

การเปรียบเทียบความแม่นยำจากการพยากรณ์พบว่า ค่า MAPE ของการสร้างแบบจำลองอยู่ในช่วง

1.22% ถึง 8.13% จากนั้นนำเทคนิคการพยากรณ์ที่ดีที่สุดมาใช้พยากรณ์ราคารายเดือนของพืชไร่แต่ละชนิด ในปี พ.ศ.2563 นำมาเปรียบเทียบกับราคาจริงดังตารางที่ 8

ค่า MAPE การทดสอบแบบจำลองของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด ถั่วลิสง และข้าวโพด เท่ากับ 11.42% 9.41% 39.45% 11.94% 9.16% และ 2.82% ตามลำดับ

ค่า MAPE ของการทดสอบแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่า ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105 ถั่วลิสง และข้าวโพด มีค่า MAPE อยู่ในช่วงที่กำหนด คือไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูงสำหรับข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15% และมันสำปะหลังสด มีค่า MAPE เท่ากับ 11.42 และ 11.94 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำ

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบความแม่นยำจากการพยากรณ์

ชนิดของพืชไร่	วิธีการพยากรณ์	จำนวนปี ย้อนหลัง	%MAPE	
			การสร้าง แบบจำลอง	การทดสอบ แบบจำลอง
ข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15%	SARIMA(2,0,2)(1,0,1)	3	1.22	11.42
ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105	ARIMA(0,1,1)	3	2.34	9.41
อ้อยโรงงาน	SARIMA(0,1,1)(1,0,0)	3	1.76	39.45
มันสำปะหลังสด	ARIMA(2,1,2)	3	3.65	11.94
ถั่วลิสง	Double Exponential Smoothing	15	8.13	9.16
ข้าวโพด	ARIMA(2,1,1)	10	4.03	2.82



สำหรับราคาอ้อยโรงงาน ค่า MAPE เท่ากับ 39.45% ถึงแม้ว่าการแปลผลถือว่าการพยากรณ์ที่สมเหตุสมผล (Montaño et al., 2013) [10] แต่ผู้วิจัยต้องการปรับปรุงค่าตอบเนื่องจากยังมีค่า MAPE ที่สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ราคาของอ้อยโรงงาน ซึ่งในแต่ละปีจะผลิตอ้อยในช่วงมกราคมถึงมีนาคม เป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยมีรูปแบบข้อมูล ดังรูปที่ 7 ผู้วิจัยได้ใช้ค่าเฉลี่ยในแต่ละเดือนในการพยากรณ์โดยทดลองจำนวนปีย้อนหลังในการหาค่าเฉลี่ยที่ต่างกักัน ในช่วง 3 – 20 ปี

ผลจากการปรับค่าการพยากรณ์ราคารายเดือนของอ้อยโรงงานโดยใช้ค่าเฉลี่ยเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ และมีนาคม ในปี พ.ศ.2543 - 2562 มาใช้ในการพยากรณ์ ปี พ.ศ.2563 พบว่า ทำให้มีค่า MAPE ที่น้อยที่สุด เท่ากับ 2.00%

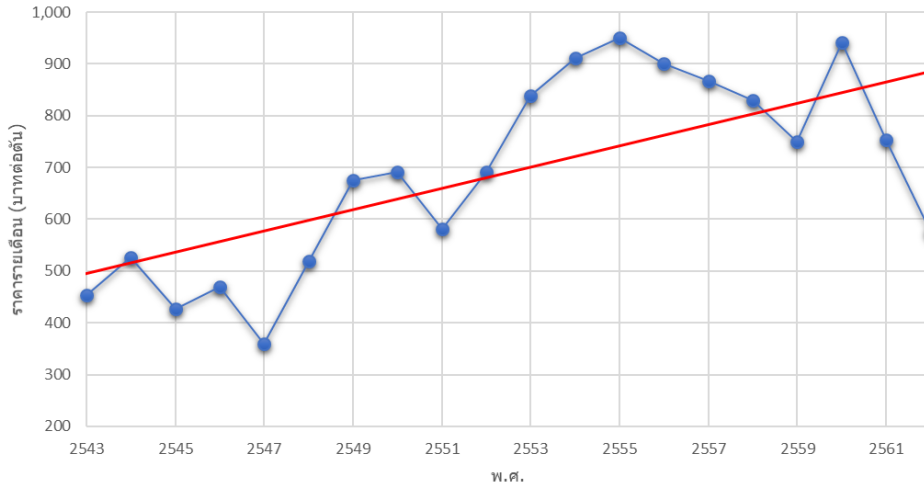
ความแม่นยำของการทดสอบแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ ดังตารางที่ 9 พบว่า การทดสอบแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ ทำให้ค่า MAPE ของพีชไร้อยู่ในช่วง 2.00% ถึง 11.94%

การแปลผลของการทดสอบแสดงว่าเป็นการพยากรณ์ที่แม่นยำสูงและเป็นการพยากรณ์ที่ดี นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณติดตามในแต่ละเดือนของราคาที่ได้จากการพยากรณ์แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า ค่าสัญญาณติดตามของทุกเดือนอยู่ในช่วงที่กำหนด [-6,+6]

การเปรียบเทียบราคารายเดือนของพีชไรแต่ละชนิดกับค่าพยากรณ์ที่ได้ ในปี พ.ศ.2563 แสดงให้เห็นว่าการพยากรณ์มีความแม่นยำและสามารถพยากรณ์ล่วงหน้าที่มีความแม่นยำได้ถึง 1 ปี แสดงดังรูปที่ 9

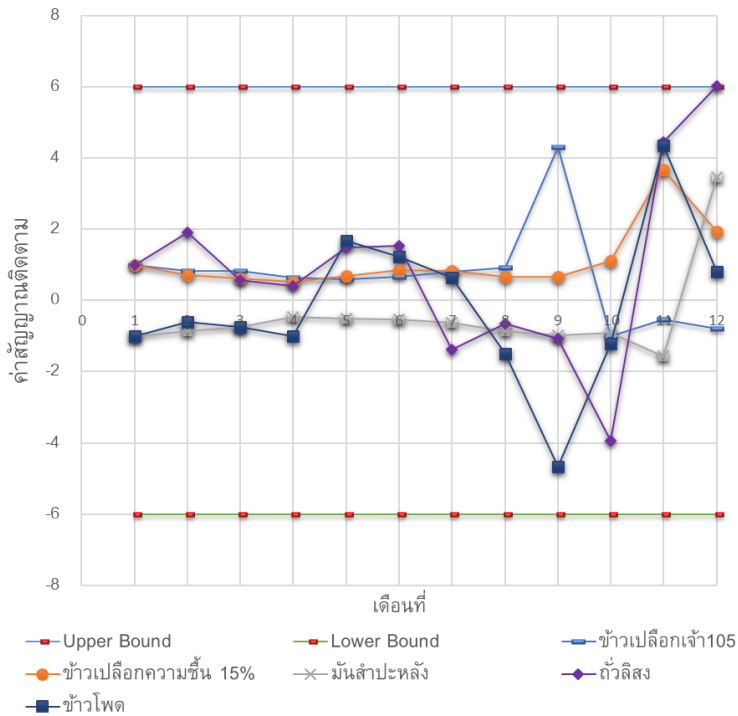
ตารางที่ 9 ความแม่นยำของการทดสอบแบบจำลอง ที่ปรับปรุงใหม่

ชนิดของพีชไร	วิธีการพยากรณ์	%MAPE
ข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15%	SARIMA(2,0,2)(1,0,1)	11.42
ข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ 105	ARIMA(0,1,1)	9.41
อ้อยโรงงาน	ค่าเฉลี่ยของราคา 20 ปี	2.00
มันสำปะหลัง	ARIMA(2,1,2)	11.94
ถั่วลิสง	Double Exponential Smoothing	9.16
ข้าวโพด	ARIMA(2,1,1)	2.82



รูปที่ 7 การวิเคราะห์แนวโน้มราคาอ้อยโรงงาน

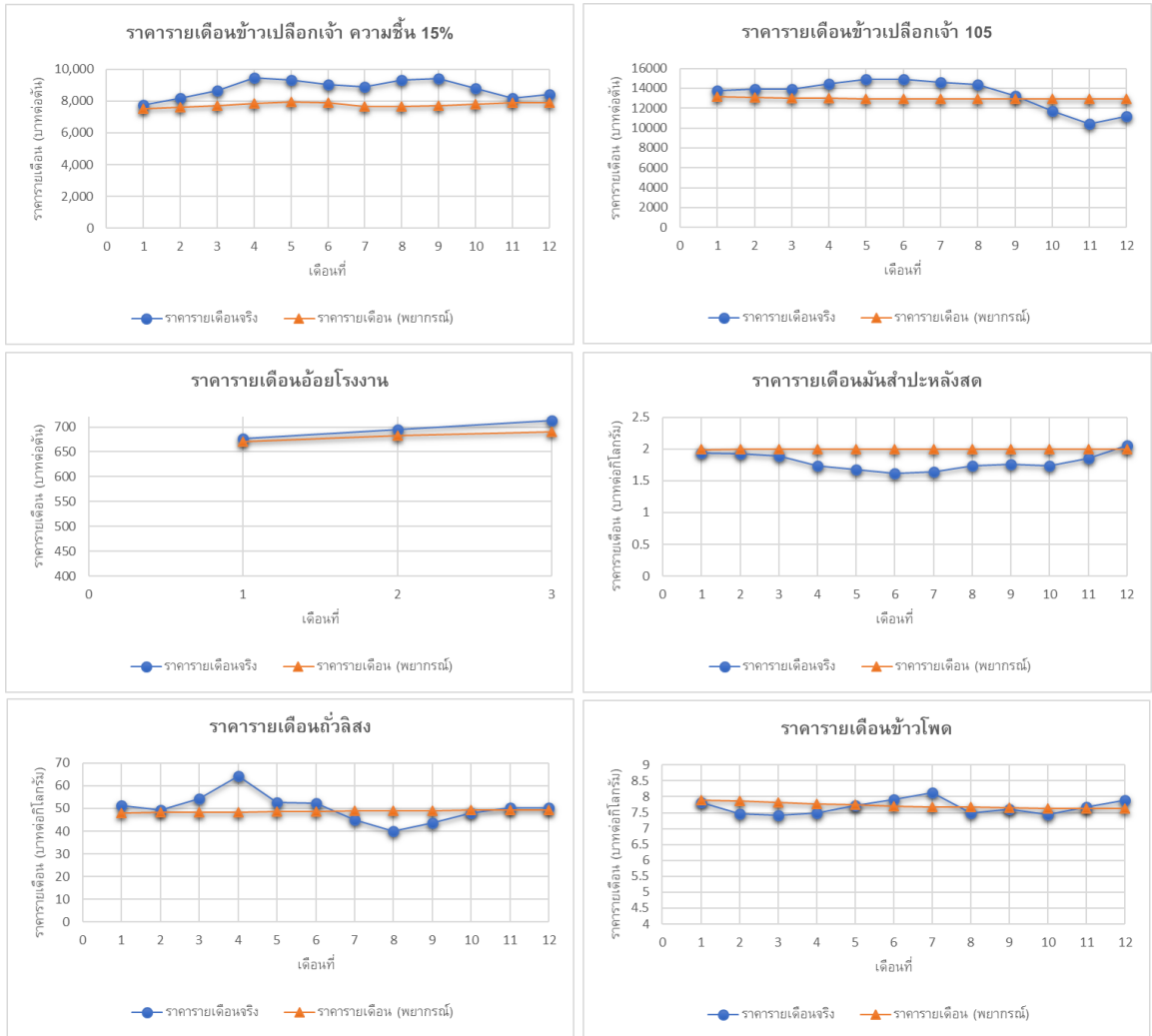
Tracking Signal ของ Testing Dataset ปี พ.ศ.2563



รูปที่ 8 ค่าสัญญาณติดตามของการทดสอบแบบจำลอง ปี พ.ศ.2563 ของการพยากรณ์



บทความวิจัย



รูปที่ 9 ค่าพยากรณ์ราคาขายเดือนของพืชไร่แต่ละชนิดเทียบกับราคาจริง ปี พ.ศ. 2563

4. บทสรุป

การพยากรณ์เป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญ เนื่องจากการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง จะส่งผลให้ค่าที่ได้มีความถูกต้อง นำไปสู่การวางแผนล่วงหน้าที่มีประสิทธิภาพ และนำมาเป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับผู้ผลิตและผู้ส่งออกเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการ

ความต้องการของตลาด การพยากรณ์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาของสินค้าทางการเกษตร สำหรับราคาขายเดือนของพืชไร่ 6 ชนิด คือ ข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ข้าวเปลือกเจ้าหอม มะลิ 105 อ้อยโรงงาน มันสำปะหลังสด ข้าวโพด ใช้เทคนิคพยากรณ์วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และราคาถั่วลิสงใช้เทคนิควิธีปรับ



เปรียบเทียบเส้นโค้งเลขชี้กำลังสองครั้ง มีค่า MAPE อยู่ในช่วง 1.22% ถึง 8.13% เมื่อนำแบบจำลองที่ได้มาทำการทดสอบแบบจำลองพบว่าค่า MAPE ของอ้อยโรงงาน เท่ากับ 39.45% ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงการพยากรณ์ราคาอ้อยโรงงานโดยใช้ค่าเฉลี่ยราคาจำนวน 20 ปี ทำให้มีค่า MAPE ของการทดสอบแบบจำลองเท่ากับ 2.00% ซึ่งแสดงว่าเป็นการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้และเป็นแนวทางในการพยากรณ์สินค้าทางการเกษตรอื่น ๆ เพื่อช่วยเป็นเครื่องมือในการวางแผนของเกษตรกรผู้ผลิต และโรงงานอุตสาหกรรมหรือผู้ส่งออก เพื่อให้สามารถวางแผนได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สำหรับแนวทางงานวิจัยในอนาคตอาจวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อราคาของสินค้าทางการเกษตรโดยใช้การวิเคราะห์เชิงสาเหตุ การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ โครงข่ายประสาทเทียม หรือวิธีการผสมผสานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยาที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ซอฟต์แวร์ Minitab 18.0 ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.arda.or.th/>. (Accessed on 7 July 2021)
- [2] <https://www.oae.go.th>. (Accessed on 7 July 2021)
- [3] S. Deepradit, P. Ongkunaruk and R. Pisuchpen, The study of forecasting techniques for aromatic coconut monthly prices using individual and hierarchical forecasting, Thai Journal of Operation Research, 2020, 8(2), 15-26. (in Thai)
- [4] Ü.Ç. BüyükŞahin and Ş. Ertekin, Improving forecasting accuracy of time series data using a new ARIMA-ANN hybrid method and empirical mode decomposition, Neurocomputing, 2019, 361, 151-163.
- [5] M. Ohlyver and H. Pudjihastuti, Arima model for forecasting the price of medium quality rice to anticipate price fluctuations, Procedia Computer Science, 2018, 135, 707-711.
- [6] M. Tanyarattanasrisakul, The accuracy comparison of time series model between Winters' exponential smoothing and Box - Jenkins methods: A case study of forecasting garden coconut price, RMUTSB Academic Journal, 2018, 6(2), 101-113. (in Thai)
- [7] W. Anggraeni, F. Mahananto, A.Q. Sari, Z. Zaini, K.B. Andri and Sumaryanto, Forecasting the price of Indonesia's rice using hybrid artificial neural network and autoregressive integrated moving average (Hybrid NNs-ARIMAX) with exogenous variables, Procedia Computer Science, 2019, 161, 677-686.



- [8] P. Saelim, V. Kanjanavajee, P. Suwannasean and N. Sopipan, Forecasting jasmine rice yield in Nakhon Ratchasima, Science and Technology Research Journal Nakhon Ratchasima Rajabhat University, 2019, 4(2), 25-37. (in Thai)
- [9] N. Luangtong and N. Kantanantha, Selection of the appropriate agricultural yield forecasting models, Thai Science and Technology Journal, 2016, 24(3), 370-381. (in Thai)
- [10] S. Kodsueb and K. Boonlha, Construction of model for the price of Thai jasmine rice 105, Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal, 2016, 8(8), 49-60. (in Thai)
- [11] P. Jinno, Forecasting Thai rice export price using ARIMAX model. Thesis, Chiangmai University, Thailand, 2016.
- [12] J. Montaño, A. Palmer, A. Sesé and B. Cajal, Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy, Psicothema, 2013, 25, 500-506.
- [13] P. Ongkunaruk, Introduction to supply chain management for Agro-industry, The one printing Inc., Bangkok, Thailand, 2019.
- [14] [https:// www.ricethailand.go.th/](https://www.ricethailand.go.th/). (Accessed on 7 July 2021)
- [15] <https://tattawin.com/> (Accessed on 7 July 2021)
- [16] The Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Maize, soybeans, green beans and peanuts, Thai Economic Crop Direction in Asean, Pronthip Inc., Bangkok, Thailand, 2016.
- [17] P. Khamchoo, P. Malawal and A. Wongchai, Technical efficiency of maize production in Wiang Sa District, Nan Province, Khon Kaen Agricultural Journal, 2020, 48(1), 735-742. (in Thai)
- [18] <https://www.doa.go.th/>. (Accessed on 8 July 2021)



การกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้าง

มนตรี พิริยะกุล*

ภาควิชาสถิติ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: mpiriyakul@yahoo.com

วันที่รับบทความ: 5 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 22 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 12 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: ขนาดตัวอย่างที่ใช้เพื่อทำการวิจัยโดยวิธีการวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้างเป็นปัญหาที่นักวิจัยจำนวนมากไม่แน่ใจว่าควรกำหนดไว้เท่าไรจึงจะถูกต้องและ/หรือเหมาะสม ควรเน้นที่การใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่คือมีจำนวนมากเพื่อความมั่นใจในผลการวิเคราะห์/วิจัย หรือว่าควรน้อยลงได้ตามเหตุผลอื่นๆ การศึกษาโดยการสำรวจเอกสารพบว่าวิธีกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้างมีได้หลายวิธีหลากหลายแตกต่างกันไปตามการพัฒนาสูตรด้วยกฎเกณฑ์ทางสถิติที่ผิดแผก รวมถึงกฎอย่างง่าย ทำให้ได้รับขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมแตกต่างกันไป มีทั้งขนาดตัวอย่างที่ใหญ่มากและขนาดตัวอย่างที่เล็กมาก จากผลการเปรียบเทียบวิธีกำหนดขนาดตัวอย่างจำนวน 11 วิธีสามารถสรุปได้ว่าขนาดตัวอย่างที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้างคือควรมีประมาณ 200 แต่อาจเล็กกว่านี้หรือใหญ่กว่านี้ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของตัวแบบสมการโครงสร้างว่าซับซ้อนมากน้อยเพียงใดและประชากรมีขนาดเล็กหรือใหญ่

คำสำคัญ: จำนวนตัวชี้วัดต่อปัจจัย ($\frac{f}{p}$); ขนาดตัวอย่าง; กฎกำหนดขนาดตัวอย่างอย่างง่าย



Sample size Determination for Structural Equation Modeling (SEM)

Montree Piriyaikul *

Department of Statistic, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

* Corresponding author, E-mail: mpiriyakul@yahoo.com

Received: 5 July 2021; Revised 22 August 2021; Accepted: 12 October 2021

Online Published: 20 December 2021

Abstract: Sample size was the problem that always raised to question of what size is correct or suitable for most researchers of structural equation analysis (SEM). Whether more subjects for high confidence in the accuracy of analysis/research or lesser subjects according to some contexts is plausible? Literature reviews show that sample size for SEM could be determined in a variety of ways depending upon different statistical formulas and rules including rules of thumbs. From a comparative study of sample size determination among 11 available formulas and rules, several plausible sizes are found to be numbers that range from large to small. In conclusion, a sufficient sample size for SEM is 200 but more or less than 200 is possible subject to complications of the SEM model itself and population size constrained.

Keywords: number of indicators (p) per factor $\left(\frac{f}{p}\right)$; sample size; rule of thumb



1. บทนำ

ในการวิจัยโดยใช้วิธีวิทยาศาสตร์การวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling, [SEM]) นักวิจัยจะพบปัญหาตลอดมาว่าควรกำหนดขนาดตัวอย่างเท่าไรจึงจะถือว่าเป็นขนาดที่เหมาะสมไม่มากเกินไป (More is never too much.) ตามทฤษฎีการทดสอบจนเป็นภาระหนัก หรือไม่น้อยเกินไป (More is ever too much.) จนได้รับการโต้แย้งว่าน่าจะไม่มีพอที่จะมีผลให้ค่าประมาณมีความถูกต้อง (Accuracy) และน่าเชื่อถือ (Reliable)

ตัวแบบสมการโครงสร้างคือวิธีวิทยาศาสตร์ที่นำเสนอ ประเมินค่า และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝงและตัวแปรการวัด (ตัวชี้วัด) ที่เชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย

กฎการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับตัวแบบสมการโครงสร้างในระยะเวลาที่ผ่านมามีอยู่หลายประการ กฎที่นิยมใช้กันมากเรียกว่ากฎการกำหนดขนาดตัวอย่างอย่างง่าย (Rule of Thumb) ซึ่งดัดแปลงมาจากแนวทางที่ใช้มานานในเรื่องการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) คือ $\frac{n}{p}$ ควรมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 20 โดยที่ n คือขนาดตัวอย่าง p คือจำนวนตัวแปร กฎนี้นักวิจัยเองก็ไม่มั่นใจว่าถูกต้องหรือไม่ เพียงใด? มีการศึกษายืนยันความเหมาะสมหรือไม่? เป็นปัจจุบันหรือไม่? กฎการกำหนดขนาดตัวอย่างอย่างง่ายคือ

1. กำหนดให้กลุ่มตัวอย่าง (n) มีขนาดใหญ่มาก ๆ เข้าไว้ ยิ่งมากยิ่งขึ้นดี

2. อัตราส่วนจำนวนข้อถามขั้นต่ำ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ตัวแปรแฝงหนึ่งๆมีข้อถามอย่างมาก 3 ข้อ [1] หรือ 2 ข้อถาม [2] ซึ่งเมื่อย้อนคุณกลับกับจำนวน

ตัวแปรแฝง (Latent Variable, LV) จะได้ตัวอย่างเท่ากับจำนวนตัวแปรแฝงคูณด้วย 2 หรือจำนวนตัวแปรแฝงคูณด้วย 3 ซึ่งยอมรับได้ยากเพราะตัวอย่างจะมีขนาดเล็กเกินไปและขัดแย้งกับข้อ 1.

3. กำหนดให้ $n = 100, 200$ [3]

4. กำหนดให้ $\frac{n}{p} \geq 10$ โดยที่ p คือจำนวนตัวชี้วัด (Indicator, Manifest Variable) ดังนั้นขนาดตัวอย่างขั้นต่ำคือ $n \geq 10p$ [4]

5. กำหนดให้ $\frac{n}{q} \geq 5, 10$ โดยที่ q คือจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องประมาณ (คือจำนวนสัมประสิทธิ์เส้นทาง: β) จำนวนน้ำหนักปัจจัย (Loading: λ) และจำนวนส่วนเหลือ (δ) รวมกัน) ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำคือ $n \geq 5q$ หรือ $n \geq 10q$ [5, 2]

ขนาดตัวอย่างตามกฎอย่างง่ายอาจมีผลกระทบหรือเกี่ยวพันไปถึงคำถามว่าขนาดตัวอย่างที่พอดีคือเท่าไร ขนาดตัวอย่างอาจสูงเกินไป (Over Sample Size) หรือต่ำเกินไป (Under Sample Size) ขนาดตัวอย่างที่ต่ำเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้างในเรื่องความถูกต้อง (Accuracy) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของผลการศึกษาและของค่าสถิติเกี่ยวกับความสอดคล้องกับข้อมูลของตัวแบบ (Model Fit)

บทความนี้มุ่งนำเสนอวิธีกำหนดขนาดตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิจัยที่วิเคราะห์ด้วยตัวแบบสมการโครงสร้าง โดยจะศึกษาจากวิธีกำหนดขนาดตัวอย่างที่มีวิธีกำหนดหลายวิธีที่แตกต่างกันเพราะมีวิธีพัฒนาสูตรที่ยืดหยุ่นที่ตัดสินใจต่างกัน แล้วสรุปเป็นแนวทางกลางให้ถือปฏิบัติได้



2. วิธีการกำหนดขนาดตัวอย่าง

การวิจัยเพื่อหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมมีมานานแล้วโดยวิธีศึกษาเปรียบเทียบด้วยการกำหนดสถิติตัดสินใจแตกต่างกันไป เช่นตัดสินใจด้วยสัดส่วนการไม่ลู่เข้า (Non-convergence: NC) หรือตัดสินใจด้วยสัดส่วนส่วนการลู่เข้า (Convergence) คำตอบที่ไม่เหมาะสม (Improper Solution: IS) การทดสอบความกลมกลืนด้วยไคกำลังสอง (Chi-square Fit) ความเอนเอียง (Biasness) กำลังการทดสอบ (Power of Test) หรือตัดสินใจด้วยเกณฑ์ผสมระหว่าง NC กับ IS หรือตัดสินใจด้วยเกณฑ์ผสมระหว่างความเอนเอียงกับกำลังการทดสอบ หรือตัดสินใจด้วยกำลังการทดสอบเพียงอย่างเดียว ต่อไปนี้จะแสดงการกำหนดขนาดตัวอย่างรวม 4 แนวทางดังนี้

2.1 การกำหนดขนาดตัวอย่างให้สอดคล้องกับคำตอบที่ไม่เหมาะสมและการไม่ลู่เข้า

Marsh *et al.* [6] ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างด้วยการจำลองแบบรวมรวมตัวอย่างทั้งสิ้น 30,000 ตัวอย่าง โดยแปรค่าขนาดตัวอย่างจาก 50 ถึง 1,000 แปรค่าจำนวนตัวซ้ำต่อ 1 ปัจจัย (Indicator to Construct, $\frac{f}{p}$) จาก 2 ถึง 12 โดยที่ p คือจำนวนตัวซ้ำทั้งหมด f คือจำนวนตัวแปรแฝงทั้งหมด แล้วนับความถี่และหาค่าร้อยละของตัวอย่างที่มีปัญหาการไม่ลู่เข้าและปัญหาคำตอบไม่เหมาะสม

การไม่ลู่เข้าคือสถานการณ์ที่โปรแกรมทางสถิติไม่สามารถประมาณค่าตัวแบบให้ได้คำตอบในรอบติดกันต่างกันน้อยกว่าทศนิยมหลักที่ 3 หรือไม่สามารประมาณค่าตัวแบบได้ภายในจำนวนการวนซ้ำ (Iteration) ที่กำหนดให้คือ 250 รอบ [7] หรือไม่สามารถ

ประมาณค่าตัวแบบได้ภายในจำนวนการวนซ้ำกำหนดให้คือไม่เกิน 3 เท่าของจำนวนพารามิเตอร์ [8]

คำตอบที่ไม่เหมาะสมคือสถานการณ์ที่ตัวแบบที่ประมาณค่าได้แล้วมีความผันแปรของส่วนเหลือ (Residual Variance) หรือค่าความผันแปรของข้อมูล (Variance) เป็นปริมาณลบ (เรียกว่า Heywood Case) หรือน้ำหนักปัจจัยมีค่ามากกว่า 1 หรือเป็นปริมาณลบ หรือความผันแปรของส่วนเหลือมีค่าใหญ่มาก

หมายเหตุ: เหตุการณ์นี้ถ้าพบในทางปฏิบัติอาจแก้ปัญหาได้ 3 วิธีคือตัดหน่วยวิเคราะห์ทิ้ง หรือตัดตัวซ้ำทิ้ง หรือปรับปรุงตัวแบบ

ผลการศึกษาของ Marsh *et al.* [6] ปรากฏดังตาราง 1 ซึ่งแสดงสัดส่วนของคำตอบที่เหมาะสม (proper solution) คืออัตราการไม่เกิดคำตอบที่ไม่เหมาะสมและสัดส่วนของการไม่ลู่เข้าจำแนกตามขนาดตัวอย่างและจำนวนตัวซ้ำต่อ 1 ปัจจัยคือ

$$\frac{\text{ยอดรวมจำนวนตัวซ้ำ (p)}}{\text{ยอดรวมจำนวนตัวแปรแฝง (f)}}$$

โดยทดลองให้มีจำนวนจากน้อยไปหามากคือ 2, 3, 4, 6, 12 ตัว ขนาดตัวอย่างกำหนดให้มีจากขนาดเล็กไปหาขนาดใหญ่คือ 50, 100, 200, 400 และ 1,000 พบว่า ขนาดตัวอย่าง $n = 50$ เป็นขนาดที่เพียงพอถ้ามีตัวซ้ำ 4 ตัวขึ้นไป โดยที่ถ้ามีตัวซ้ำมากกว่า 4 ตัวก็จะนับเป็นขนาดตัวอย่างที่ดียิ่งขึ้น สังเกตว่าสัดส่วนของคำตอบที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้นจนถึงร้อยละ 86.5 และมีสัดส่วนของการไม่ลู่เข้าเพียงร้อยละ 2.2 เมื่อมีตัวซ้ำ 4 ตัว และเมื่อกำหนดให้มีตัวซ้ำมากกว่า 4 ตัวสัดส่วนของคำตอบที่เหมาะสมนี้จะใกล้ร้อยละ 100 และสัดส่วนของการไม่ลู่เข้าจะเข้าใกล้ 0 และสำหรับ



บทความวิชาการ

ตัวอย่างที่ใหญ่กว่า 50 คือ 100, 200, 400, 1,000 และกำหนดให้มีตัวชี้วัดตั้งแต่ 4 ตัวขึ้นไปจะได้ขนาดตัวอย่างที่ถือได้ว่าเป็นขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม แต่ถ้าจะลดจำนวนตัวชี้วัดลงโดยกำหนดให้มีตัวชี้วัดเพียง 3 ตัวและกำหนดขนาดตัวอย่างไว้ 100 หรือ 200 หน่วยก็นับว่าเพียงพอ

ขอให้สังเกตได้ว่าเมื่อมีตัวชี้วัดมากขึ้นสัดส่วนของคำตอบที่เหมาะสมจะสูงขึ้นขณะที่สัดส่วนของการไม่ลู่เข้าจะลดลง ขนาดตัวอย่างที่มากกว่าจึงเหมาะสมกว่า แต่ถ้านักวิจัยประสงค์จะกำหนดให้มีขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100 หรือ 200 ก็นับว่าเป็นจำนวนที่มากเพียงพอแล้ว อนึ่ง จากตารางที่ 1 จะพบว่าจำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย ($\frac{p}{f}$) และขนาดตัวอย่างจะชดเชยกันได้คือถ้ามีจำนวนตัวชี้วัดต่อตัว 1 ปัจจัย ($\frac{p}{f}$) มากขึ้นก็สามารถลดขนาดตัวอย่างลงได้ กลับกันถ้ามี

จำนวนตัวชี้วัดต่อตัว 1 ปัจจัย ($\frac{p}{f}$) น้อยก็ควรเพิ่มขนาดตัวอย่างขึ้น แต่ไม่แนะนำให้กำหนดให้มีจำนวนตัวชี้วัดต่อตัว 1 ปัจจัย ($\frac{p}{f}$) น้อยๆ ถ้าเป็นไปได้ควรเลือกให้สูงทั้ง 2 กรณีคือกำหนดให้มีขนาดตัวอย่างมากและมีจำนวนตัวชี้วัดต่อตัว 1 ปัจจัยมากจะเหมาะสมกว่า [6]

นักวิจัยอาจมีคำถามว่าควรกำหนดจำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัยเท่าไร ซึ่งก็คือคำถามว่าควรมีค่าถามรวมกันกี่ข้อ ให้นักวิจัยเลือกดูจากตาราง 1 ต่อไปนี้ ผู้เขียนให้ความคิดไว้ว่าการมีจำนวนข้อถามมากและไม่มีคำถามซ้ำในตัวแปรแฝงเดียวกันและไม่ซ้ำซ้อนกับคำถามในตัวแปรแฝงอื่น (นี่คือต้นทางของการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) นักวิจัยจะถามก็ข้อก็ได้จนกว่าจะสามารถใช้วัดผลตัวแปรแฝงได้ครบถ้วน

ตารางที่ 1 ร้อยละของคำตอบที่เหมาะสมและอัตราการไม่ลู่เข้าจำแนกตามขนาดตัวอย่างและจำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย
หมายเหตุ: ข้อมูลดัดแปลงจากงานวิจัยของ H.W. Marsh, *et.al.* [6]

จำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย	ชนิดของผลการศึกษา	ขนาดตัวอย่าง				
		50	100	200	400	1,000
2	Proper solution	13.6	32.8	55.6	82.4	93.0
	Non-convergence	56.6	33.1	12.6	2.4	-
3	Proper solution	54.8	85.4	97.8	100.0	99.0
	Non-convergence	10.8	0.9	-	-	-
4	Proper solution	86.5	99.1	99.6	100.0	100.0
	Non-convergence	2.2	-	-	-	-
6	Proper solution	99.6	100.0	100.0	100.0	100.0
	Non-convergence	0.1	-	-	-	-
12	Proper solution	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Non-convergence	-	-	-	-	-



เช่นมีข้อถาม 15 ข้อใน New Ecological Paradigm Scale (NEP) มีข้อถาม 20 ข้อใน Short form Minnesota Satisfaction Questionnaire (MSQ) ซึ่งหากนักวิจัยเห็นว่ามีความซ้ำซ้อนมากเกินไปในแต่ละตัวแปรแฝงก็มีทางออกคือจัดตัวชี้วัดเป็นกลุ่มๆ (Parcel) แล้วใช้ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดหรือใช้ค่านำหนักปัจจัย (Factor Score) ของแต่ละกลุ่มเป็นตัวแทนกลุ่ม ซึ่งจะเป็นการลดตัวชี้วัดไปในขณะเดียวกัน แนวความคิดนี้ก็ถือการออกแบบการวิจัยเป็นตัวแบบสมการโครงสร้าง 2 ระดับ (Second Order SEM) หรือเป็นตัวแบบสมการโครงสร้าง 3 ระดับ (Third Order SEM) นั่นเอง ซึ่งกรณีทั้งสองนี้ก็มีวิธีวิเคราะห์ของตนเองอยู่ [9]

2.2 การกำหนดขนาดตัวอย่างให้สอดคล้องกับการสุ่มเข้า กำลังการทดสอบ และระดับนัยสำคัญของการทดสอบความกลมกลืนด้วยไคกำลังสอง

Koran [10] ทำการศึกษาด้วยวิธีจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบวิธีกำหนดขนาดตัวอย่าง 7 วิธีโดยใช้การสุ่มเข้า กำลังการทดสอบ และระดับนัยสำคัญของการทดสอบความกลมกลืนด้วยไคกำลังสอง โดยการกำหนดให้มีสัดส่วนของการสุ่มเข้าเท่ากับร้อยละ 99 กำหนดระดับวิกฤติ (α) ของตัวสถิติไคกำลังสองไว้ที่ 0.05 และกำหนดระดับกำลังการทดสอบไว้ที่ร้อยละ 88 สูตรกำหนดขนาดตัวอย่างทั้ง 7 สูตร คือ

1. $n = 8.2p$
2. $n = 10p$
3. $n = 2.7q$
4. $n = 10q$
5. $W1 = 6.3 * \left(\frac{p}{f}\right)^2 - 7.4 \left(\frac{p}{f}\right) + 665.9$

จาก Westland [11]

$$6. W2 = 50 * \left(\frac{p}{f}\right)^2 - 405 \left(\frac{p}{f}\right) + 1,100$$

จาก Westland [11]

$$7. n = \alpha - \frac{\beta}{\alpha - \gamma + \left(\frac{p}{f}\delta\right)^{\epsilon}}$$

โดยนิยาม α , β , γ และ δ ดังนี้

$$\alpha = \frac{(f-9.25)^2}{4 * 0.18} + 990$$

$$\beta = 10^{[-1.06 + 36.717 * \frac{1}{f} + 6.491a - 27.202(\frac{a}{f})]}$$

$$\gamma = 398 + 375a + 2a * (f-4.5)^2$$

$$\delta = 2.783 + 10.507 \left(\frac{1}{a * f}\right)$$

โดยที่ a = จำนวน Loading และ f = จำนวนตัวแปรแฝง การทดลองดำเนินการโดยแปรค่านำหนักปัจจัย เป็น 2 ค่าคือ 0.4 กับ 0.8 เพื่อแสดงค่าน้อยกับค่ามาก จำนวนชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย (ตัวแปรแฝง) คือ $\left(\frac{p}{f}\right)$ เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12 และจำนวนปัจจัยเท่ากับ 3, 6, 12, 16 ทำให้ได้จำนวนพารามิเตอร์ (q) เท่ากับ 21, 27, 33, 39, 45, 75 ตัว

ผลการจำลองแบบปรากฏดังตารางที่ 2 ต่อไปนี้ การเปรียบเทียบระหว่าง 7 วิธีจะตัดสินด้วยความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณ (Standard Error of Estimate: SEE) ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีที่ 7 มี SEE ต่ำที่สุด วิธีที่ให้ SEE ต่ำอันดับรองลงมาอีก 4 อันดับคือวิธีที่กำหนดให้ $n = 2.7q$ วิธี $n = 8.2p$ และวิธี $n = 10p$ ซึ่งเป็นวิธีการของกฎอย่างง่าย (Rule of Thumb) ทั้ง 3 วิธี ส่วนวิธี Westland วิธีที่ 1 [11] คือ

$$W1 = 6.3 * \left(\frac{p}{f}\right)^2 - 7.4 \left(\frac{p}{f}\right) + 665.9$$

ให้ค่า SEE ไม่สูงมาก วิธีที่เหลืออีก 2 วิธีคือวิธี $n = 10q$ และวิธี Westland วิธีที่ 2 คือ

$$W2 = 50 * \left(\frac{p}{f}\right)^2 - 405 \left(\frac{p}{f}\right) + 1,100$$



บทความวิชาการ

ให้ค่า SEE สูงมากเกินไป ขอให้สังเกตว่าวิธี $n = 10q$

ให้ค่า SEE สูงมากแบบก้าวกระโดด

ผลการศึกษาของ Koran [10] สรุปกว้างๆ ได้ว่า

ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำจะมากขึ้นถ้ามีจำนวนปัจจัยมาก

ขึ้น นักวิจัยสามารถเลือกใช้วิธีกำหนดขนาดตัวอย่าง

ได้หลายวิธีและหลายองค์ประกอบจากตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอย่างจำแนกตามสูตรการกำหนดขนาดตัวอย่างและจำนวนปัจจัย คำนำนักปัจจัย จำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย จำนวนข้อถาม (ตัวชี้วัด) และจำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ

หมายเหตุ: ข้อมูลดัดแปลงจากงานวิจัยของ J. Koran [10]

f	a	p/f	p	q	C						
					ที่ 1	ที่ 2	ที่ 3	ที่ 4	ที่ 5	ที่ 6	ที่ 7
3	0.4	3	9	21	754	58	74	90	491	200	210
3	0.4	4	12	27	563	74	98	120	458	100	270
3	0.4	5	15	33	388	91	123	150	437	100	330
3	0.4	6	18	39	293	107	147	180	429	200	390
3	0.4	12	36	75	250	205	294	360	647	2900	750
3	0.8	2	6	15	379	41	49	60	537	400	150
3	0.8	3	9	21	169	58	74	90	491	200	210
3	0.8	4	12	27	110	74	98	120	458	100	270
3	0.8	5	15	33	103	91	123	150	437	100	330
3	0.8	6	18	39	102	107	147	180	429	200	390
3	0.8	7	21	45	102	123	172	210	434	400	450
3	0.8	12	36	75	250	205	294	360	647	2900	750
6	0.4	3	18	51	999	140	147	180	491	200	510
6	0.4	4	24	63	953	173	196	240	458	100	630
6	0.4	5	30	75	565	205	245	300	437	100	750
6	0.4	6	36	87	255	238	294	360	429	200	870
6	0.4	7	42	99	250	271	343	420	434	400	990
6	0.4	12	72	159	1002	435	588	720	647	2900	1590
6	0.8	2	12	39	665	107	98	120	537	400	390
6	0.8	3	18	51	161	140	147	180	491	200	510
6	0.8	4	24	63	102	173	196	240	458	100	630
6	0.8	5	30	75	102	205	245	300	437	100	750



บทความวิชาการ

ตารางที่ 2 (ต่อ)

f	a	p/f	p	q	C	2.7q	8.2p	10p	W2	W1	10q
					ที่ 1	ที่ 2	ที่ 3	ที่ 4	ที่ 5	ที่ 6	ที่ 7
6	0.8	6	36	87	102	238	294	360	429	200	870
6	0.8	7	42	99	139	271	343	420	434	400	990
6	0.8	12	72	159	1004	435	588	720	647	2900	1590
12	0.4	3	36	138	986	377	294	360	491	200	1380
12	0.4	4	48	162	428	443	392	480	458	100	1620
12	0.4	5	60	186	294	508	490	600	437	100	1860
12	0.4	6	72	210	350	574	588	720	429	200	2100
12	0.4	7	84	234	977	639	686	840	434	400	2340
12	0.4	12	144	354	1001	967	1176	1440	647	2900	3540
12	0.8	2	24	114	540	312	196	240	537	400	1140
12	0.8	3	36	138	191	377	294	360	491	200	1380
12	0.8	4	48	162	189	443	392	480	458	100	1620
12	0.8	5	60	186	192	508	490	600	437	100	1860
12	0.8	6	72	210	592	574	588	720	429	200	2100
12	0.8	7	84	234	969	639	686	840	434	400	2340
12	0.8	12	144	354	1001	967	1176	1440	647	2900	3540
16	0.4	2	32	184	1053	503	262	320	537	400	1840
16	0.4	3	48	216	1006	590	392	480	491	200	2160
16	0.4	4	64	248	356	678	523	640	458	100	2480
16	0.4	5	80	280	355	765	654	800	437	100	2800
16	0.4	6	96	312	999	852	784	960	429	200	3120
16	0.4	7	112	344	1053	940	915	1120	434	400	3440
16	0.8	2	32	184	534	503	262	320	537	400	1840
16	0.8	3	48	216	310	590	392	480	491	200	2160
16	0.8	4	64	248	310	678	523	640	458	100	2480
16	0.8	5	80	280	348	765	654	800	437	100	2800



ตารางที่ 2 (ต่อ)

f	a	p/f	p	q	C	2.7q	8.2p	10p	W2	W1	10q
					ที่ 1	ที่ 2	ที่ 3	ที่ 4	ที่ 5	ที่ 6	ที่ 7
16	0.8	6	96	312	932	852	784	960	429	200	3120
16	0.8	7	112	344	1046	940	915	1120	434	400	3440
SEE					200.5	308.7	314.5	327.1	333.3	877.3	1320.9

2.3 การกำหนดขนาดตัวอย่างให้สอดคล้องกับความเอนเอียงและกำลังการทดสอบ

Wolf *et al.* [12] ทำการศึกษาวิธีกำหนดขนาดตัวอย่างด้วยการจำลองแบบโดยความเอนเอียงและกำลังการทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสินใจ

Bias ($\hat{\beta}_i$) = $\sum_{j=1}^{n_r} \frac{\beta_{ij} - \beta_i}{n_r}$ คือค่าเฉลี่ยจากจำนวนการวนซ้ำ n_r รอบของอัตราความเอนเอียงของค่าประมาณสัมประสิทธิ์เส้นทาง

Power of test $W = \text{Prob}(\frac{|\hat{\beta}|}{\sigma_\beta} > t_{.05})$ คือโอกาสที่จะปฏิเสธสมมุติฐานหลักที่ไม่เป็นจริง [13] Wolf *et al.* [12] กำหนดให้มีกำลังการทดสอบไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 ณ ระดับ $\alpha = 0.05$

การทดลองกำหนดให้น้ำหนักปัจจัยแปรค่าไป 3 ค่า คือ 0.50, 0.65, 0.80 จำนวนตัวชี้วัดมี 3 ระดับคือ 4, 6, 8 ตัว จำนวนปัจจัยเท่ากับ 1, 2, 3 และอัตราการสูญหายของข้อมูล (Missing Data) เท่ากับร้อยละ 2, 5, 10, 20 ผลการศึกษาปรากฏดังรูปที่ 1

Wolf *et al.* [12] พบว่าเมื่อกำหนดให้มีจำนวนตัวชี้วัดมากขึ้นจะใช้ขนาดตัวอย่างน้อยลงดังรูปที่ 1 A, B และ C ยกเว้นกรณีมีข้อมูลสูญหายมากกว่าจะต้องมีขนาดตัวอย่างที่ใหญ่กว่า (รูปที่ 1 E model A สำหรับกรณี CFA ส่วนรูปที่ 1 E model B สำหรับกรณี SEM)

มีข้อสรุปได้ว่าขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100, 150, 200 มากพอสำหรับกรณีที่มีตัวชี้วัด 3-8 ตัวต่อตัวแปรแฝง 1 ตัวและน้ำหนักปัจจัยสูงกว่า 0.50 (เกณฑ์คือน้ำหนักปัจจัยต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.707 แต่น้ำหนักปัจจัยอาจต่ำกว่านี้ได้แต่ไม่ต่ำกว่า 0.50 และต้องมีผลให้ AVE มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.50) และเป็นกรอบการวิจัยขนาดเล็กมีตัวแปรแฝง 2, 3 ตัว

2.4 การกำหนดขนาดตัวอย่างให้สอดคล้องกับกำลังการทดสอบ

Kock และ Hayada [13] ทำการศึกษาโดยการพัฒนาสูตรกำหนดขนาดตัวอย่างให้สอดคล้องกับกำลังการทดสอบ และปรับสูตรให้สามารถใช้ได้ง่าย สามารถคำนวณได้ด้วยเครื่องคำนวณหรือด้วยโปรแกรมเอกเซล ซึ่งผู้เขียนจะแสดงตารางให้เห็นต่อไป

กำลังการทดสอบนิยามได้ดังนี้คือ

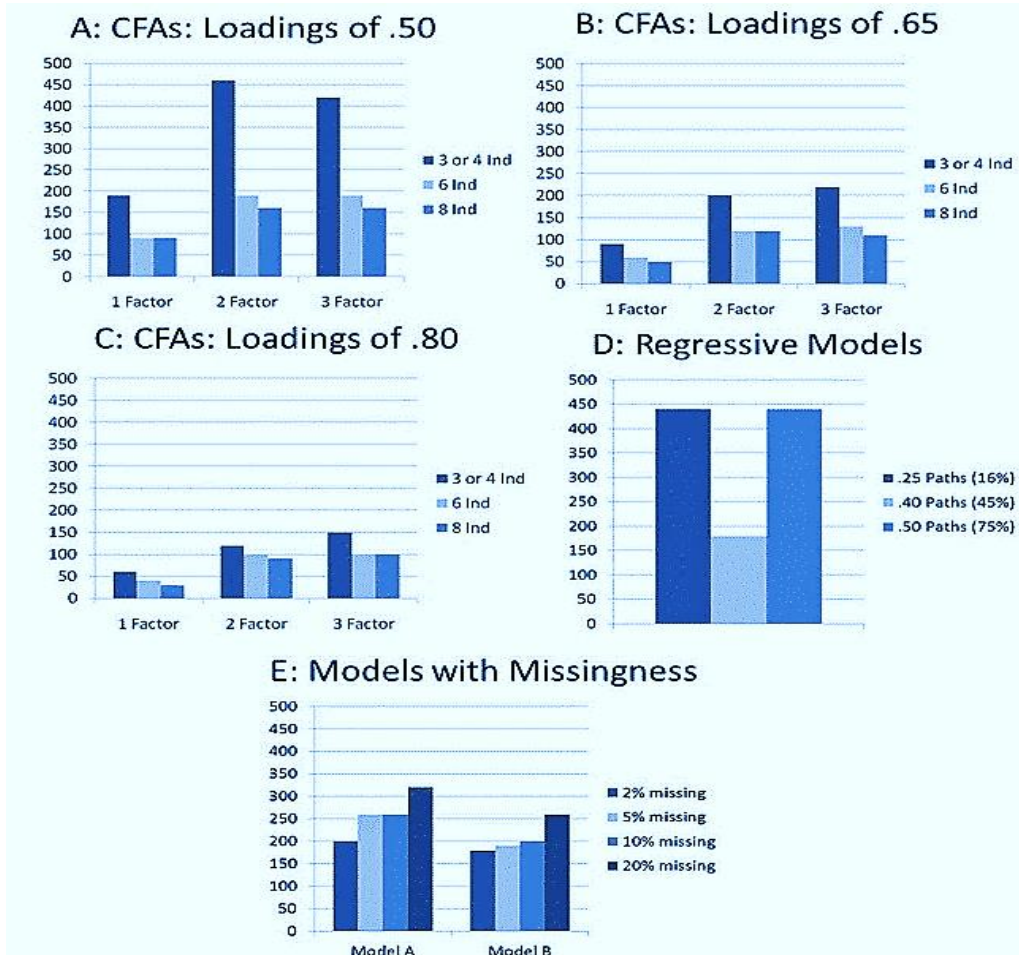
จาก β และ σ_β ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง และ SEE ตามลำดับ พบว่า

$$t = \frac{\beta}{\sigma_\beta} \text{ จะมีค่าสูงถ้า } \beta \text{ มีค่าสูงและ/หรือ } \sigma_\beta$$

มีค่าต่ำและมีผลให้ $\text{Pr}(\frac{\beta}{\sigma_\beta} > t_{.05})$ มีค่าสูงไปด้วย

$$\text{โดยเรียก } W = \text{Pr}(\frac{|\hat{\beta}|}{\sigma_\beta} > t_{.05}) = \text{Pr}(\frac{|\hat{\beta}|}{\sigma_\beta} - t_{.05} > 0)$$

เมื่อ $\beta \neq 0$ ว่ากำลังการทดสอบ



รูปที่ 1 ขนาดตัวอย่างจำแนกตามขนาดของ Loading จำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย และชนิดตัวแบบ [12]

กำหนดให้ $W = 0.80$ ดังนั้น

$$\Phi\left(\frac{|\beta|}{\sigma_\beta} - t_{.05}\right) > 0.80 \text{ หรือ } \left(\frac{|\beta|}{\sigma_\beta} - t_{.05}\right) > Z_{0.80}$$

ถ้าตัวอย่างมีขนาดใหญ่สามารถปรับเป็น

$$\left(\frac{|\beta|}{\sigma_\beta} - z_{.95}\right) > Z_{0.80}$$

ดังนั้น

$$\frac{|\beta|}{\sigma_\beta} > Z_{0.80} + z_{.95} \quad (1)$$

แต่ SEE ของสัมประสิทธิ์การถดถอยปรับมาตรฐาน (standardized Regression Coefficient) มีค่าประมาณ

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \quad [14] \text{ (นี่คือที่มาของชื่อว่า Inverse Square Root)}$$

ดังนั้นสมการ (1) สามารถเสนอได้เป็น

$$\frac{|\beta|}{\frac{1}{\sqrt{n}}} > Z_{0.80} + z_{.95} \text{ โดยที่ } Z_{0.80} = 0.842, z_{.95} = 1.645$$

$$\frac{|\beta|}{\sigma_\beta} > Z_{0.80} + z_{.95} \quad (2)$$



$$\text{ดังนั้น} \quad n = \frac{2.487^2}{|\beta|_{\min}^2} \quad (2)$$

สมการ (2) เป็นสมการสำหรับกำหนดขนาดตัวอย่างที่มีผลให้กำลังการทดสอบมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 มีระดับความคลาดเคลื่อน α ไม่เกินร้อยละ 5 เรียกวิธีนี้ว่าวิธีส่วนกลับของรากที่สอง (Inverse Square Root)

จากสมการ (1) สามารถประมาณค่า SEE ของสัมประสิทธิ์การถดถอยปรับมาตรฐานได้เป็น

$$s = \frac{1}{\sqrt{n}} e^{-\left(\frac{e^{|\beta|}}{\sqrt{n}}\right)} \quad [13]$$

ดังนั้นเมื่อแทนที่ σ_β ในสมการ (1) ด้วย s สมการ (1) จึงเปลี่ยนรูปเป็น

$$|\beta|_{\min} \sqrt{n} e^{\left(\frac{e^{|\beta|}}{\sqrt{n}}\right)} > 2.487 \quad (3)$$

จัดรูปสมการ (3) ใหม่ได้เป็น

$$\ln \sqrt{n} + \frac{e^{|\beta|_{\min}}}{\sqrt{n}} > \ln \left(\frac{2.487}{|\beta|_{\min}} \right) \quad (4)$$

สมการ (4) เรียกว่า Gamma-Exponential Method การกำหนดขนาดตัวอย่างตามวิธีนี้สามารถคำนวณได้ด้วยโปรแกรมเอกเซลโดยให้กำหนดค่า $|\beta|_{\min}$ และเงื่อนไข $\ln \left(\frac{2.487}{|\beta|_{\min}} \right)$ แล้วแปรค่าของ n ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพบค่า n ที่ตรงกับเงื่อนไข สำหรับกำหนดขนาดตัวอย่างทั้ง 2 สูตร ปรากฏดังตารางต่อไป

จากตารางที่ 3 จะสังเกตเห็นว่าขนาดตัวอย่างจะลดลงตามค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางที่สูงขึ้น จำนวนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางสามารถมีได้มากเท่าจำนวนเส้นทางในภาพเส้นทางซึ่งทราบได้จากการทบทวนวรรณกรรม

ตารางที่ 3 ขนาดตัวอย่างตามสูตร Inverse Square Root Method [สมการ (2)]

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยปรับมาตรฐาน	n
0.05	2474
0.10	619
0.15	275
0.20	155
0.25	99
0.30	69
0.35	50
0.40	39
0.45	31
0.50	25
0.55	20
0.60	17
0.65	15
0.70	13
0.75	11
0.80	10

ตารางที่ 4 คำนวณได้จากสมการ (4) โดยผู้เขียนแสดงไว้สำหรับค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางเพียง 5 ค่า ค่าเหล่านี้เป็นเพียงตัวอย่างที่ผู้เขียนกำหนดจากการคาดหมายว่าค่าของสัมประสิทธิ์เส้นทางที่เป็นไปได้ที่สุด หากนักวิจัยพบว่าสัมประสิทธิ์เส้นทางแตกต่างไปจากค่าตามตารางนี้ก็ขอให้ใช้ค่าที่คำนวณหาขนาดตัวอย่าง



ตารางที่ 4 ขนาดตัวอย่างตามสูตร Gamma-Exponential method [สมการ (4)]

beta	เงื่อนไข	beta	เงื่อนไข	beta	เงื่อนไข	beta	เงื่อนไข	beta	เงื่อนไข
0.1	3.213662	0.15	2.808197	0.2	2.520515	0.25	2.297372	0.3	2.11505
n	LH	n	LH	n	LH	n	LH	n	LH
1	1.105171	1	1.161834	1	1.221403	1	1.284025	1	1.349859
2	1.128047	2	1.168114	2	1.210236	2	1.254517	2	1.301068
3	1.187377	3	1.220091	3	1.254483	3	1.290639	3	1.328647
4	1.245733	4	1.274064	4	1.303849	4	1.335164	4	1.368077
5	1.298966	5	1.324307	5	1.350947	5	1.378953	5	1.408394
41	2.029385	41	2.038234	41	2.047537	41	2.057317	41	2.067599
42	2.039366	42	2.04811	42	2.057301	42	2.066964	42	2.077123
43	2.049137	43	2.057778	43	2.066862	43	2.076412	43	2.086452
44	2.058706	44	2.067248	44	2.076228	44	2.085669	44	2.095594
45	2.068084	45	2.076527	45	2.085407	45	2.094742	45	2.104556
46	2.077269	46	2.085624	46	2.094407	46	2.103644	46	2.113347
47	2.086284	47	2.094545	47	2.103234	47	2.112368	47	2.121971
47	2.086284	47	2.094545	47	2.103234	47	2.112368		
72	2.268579	72	2.275257	72	2.282277	72	2.289657		
74	2.280506	74	2.287093	74	2.294017	74	2.301297		
124	2.509388	124	2.514477	124	2.519826				
125	2.513006	125	2.518074	125	2.523402				
126	2.516597	126	2.521645						
236	2.803856	236	2.807545						
237	2.805819	237	2.809499						
238	2.807773								
559	3.209818								
564	3.214063								



บทความวิชาการ

ตารางที่ 4 ผู้เขียนย่อตารางเอกเซลเหลือเพียงให้พอดี 1 หน้า คำว่าเงื่อนไขหมายถึงด้านขวาของอสมการ (4) คือ $\ln\left(\frac{2.487}{|\beta|_{\min}}\right)$ และอักษรย่อ LH (Left Hand Side) หมายถึงด้านซ้ายมือของอสมการ (4) คือ $\ln\sqrt{n} + \frac{e^{|\beta|_{\min}}}{\sqrt{n}}$ จากนั้นให้แปรค่า n ไปจนกระทั่งพบว่าผลการคำนวณคือขนาดตัวอย่างที่ปรากฏใน LH มีค่ามากกว่าค่าของเงื่อนไข

สูตรทั้ง 2 ข้างต้นให้คำตอบต่างกัน สูตรตามวิธีส่วนกลับของรากที่สองคือ $n = \frac{2.487^2}{|\beta|_{\min}^2}$ คำนวณได้ง่ายกว่า ขอให้สังเกตด้วยว่าขนาดตัวอย่างจากทั้ง 2 สูตร จะลดลงลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง (จากผลการทบทวนวรรณกรรม) มีค่าสูง เหตุที่ต้องใช้ $|\beta|_{\min}$ เพราะต้องการให้ได้ขนาดตัวอย่างใหญ่ครอบคลุมขนาดตัวอย่างที่สอดคล้องกับ β ที่มีขนาดใหญ่กว่า

ผลจากการทบทวนวรรณกรรมอาจพบว่าค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางของเส้นทางหนึ่ง ๆ มีหลายค่าแตกต่างกันไปตามผลการศึกษาเชิงประจักษ์ซึ่งขึ้นอยู่กับบริบทของการวิจัยนั้น ๆ ให้บันทึกค่าเหล่านี้เอาไว้ภาพกรอบการวิจัยมีหลายเส้นทาง จึงอาจมีจำนวนสัมประสิทธิ์เส้นทางเป็นจำนวนมากหลายชุดตามความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างคู่ตัวแปร ในแต่ละชุดคือกลุ่มสัมประสิทธิ์เส้นทางของแต่ละเส้นทาง ให้เลือกเอาค่าต่ำสุดมาใช้คำนวณขนาดตัวอย่างตามสูตร

$$n = \frac{2.487^2}{|\beta|_{\min}^2} \quad \text{หรือ}$$

$$\ln\sqrt{n} + \frac{e^{|\beta|_{\min}}}{\sqrt{n}} > \ln\left(\frac{2.487}{|\beta|_{\min}}\right)$$

จึงจะมีผลให้ได้ขนาดตัวอย่างที่ใหญ่ที่สุด ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดปัญหาจากการใช้ตัวอย่างน้อยเกินไป ขอให้สังเกตจากตาราง 3 ว่าถ้าสัมประสิทธิ์เส้นทางมีค่าประมาณ 0.35 และที่สูงกว่านี้ขนาดตัวอย่างจะเล็กมากจนอาจไม่เหมาะสมในด้านความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

3. บทสรุป

สูตรสำหรับกำหนดขนาดตัวอย่างเพื่อการวิจัยด้วยตัวแบบสมการโครงสร้างเป็นสิ่งที่นักวิจัยทุกคนถือว่าเป็นเรื่องยุ่งยากและมักเป็นปัญหาต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มออกแบบการวิจัยสืบเนื่องไปจนถึงการประเมินผลงานวิจัยโดยผู้เชี่ยวชาญ เพราะจะได้รับคำถามเสมอว่าขนาดเท่านี้พอเพียงให้ผลการวิเคราะห์ตัวแบบถูกต้อง (Accurate) แม่นยำ (Precise) และมีความน่าเชื่อถือ (Reliable) หรือไม่เพราะไม่มั่นใจในความเหมาะสมของขนาดตัวอย่างที่ใช้ ด้วยเหตุดังกล่าวนักวิจัยจำนวนมากจึงใช้วิธีกำหนดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดใหญ่มาก โดยสุ่มตัวอย่างเพื่อเอาไว้โดยเชื่อว่าน่าจะเหมาะสมในเรื่องความถูกต้องและความเชื่อถือได้ของผลการวิจัย ที่จริงแล้วการใช้ขนาดตัวอย่างที่ใหญ่มากไม่จำเป็นต้องมีผลให้งานวิจัยมีความถูกต้องและมีความเชื่อถือได้สูงกว่าการใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า ผลการศึกษาในปัจจุบันหรือใกล้ปัจจุบันพบว่าขนาดตัวอย่างที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ตัวแบบสมการโครงสร้างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างคือ ค่าของน้ำหนักปัจจัย จำนวนปัจจัย จำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย ($\frac{p}{f}$) ค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง (จากวรรณกรรม) อัตราข้อมูลสูญหาย และจำนวนพารามิเตอร์ ด้วยเหตุนี้ขนาดตัวอย่างสำหรับการวิจัยด้วย SEM จึงแปรไปได้



นักวิจัยสามารถเลือกใช้สูตรต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม เช่น ขนาดประชากรที่อาจมีจำนวนสมาชิกไม่มาก หรือองค์ประกอบของตัวแบบที่อาจมีตัวแปรแฝงมากมีตัวชี้วัดมากหรือกลับกัน

ผลสรุปโดยรวมคือขนาดตัวอย่างขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัย (คือตัวแปรแฝง) ถ้ามีปัจจัยมากคือเป็นตัวแบบที่มีขนาดใหญ่ขนาดตัวอย่างก็จะมีขนาดใหญ่ และขึ้นอยู่กับจำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย (Indicator to Construct, $\frac{f}{p}$) และค่าน้ำหนักปัจจัย ถ้าจำนวนตัวชี้วัดต่อ 1 ปัจจัย ($\frac{f}{p}$) มาก และน้ำหนักปัจจัยมีค่าสูงจะใช้ตัวอย่างขนาดเล็ก ซึ่งกรณีนี้ $n = 50$ ก็เพียงพอ และถ้าประชากรมีได้มีขนาดเล็กการกำหนดให้ $n = 200$ ถือได้ว่าเป็นขนาดที่เพียงพอเพราะจะไม่มีปัญหาการไม่ลู่เข้าและปัญหาค่าตอบที่ไม่เหมาะสม [6, 7]

นักวิจัยอาจกำหนดขนาดตัวอย่างโดยเลือกจากตาราง 1-4 เฉพาะตาราง 4 ผู้เขียนคำนวณไว้เพียงบางระดับของค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางที่เห็นว่าเป็นค่าต่ำ นักวิจัยสามารถคำนวณได้เองจากสมการ (4)

4. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. W. Anderson, H. Rubin, Statistical inference in factor analysis, The Third Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Proceedings, 1956, 111-150.
- [2] K.A. Bollen, Structural equations with latent variables, John Wiley & Sons, NY, USA, 1989.
- [3] A. Boomsma, Non-convergence, improper solutions, and starting values in lisrel maximum likelihood estimation, Psychometrika, 1985, 50(2), 229–242.
- [4] J.C. Nunnally, Psychometric theory, McGraw-Hill, NY, USA, 1967.
- [5] P. Bentler, EQS structural program manual, CA. BMPD statistical software, LA, USA, 1989.
- [6] H.W. Marsh, K.T. Hau, J.R. Balla, and D. Grayson, Is more ever too much? The number of indicators per factor in confirmatory factor analysis, Multivariate Behavioral Research, 1998, 33, 181-220.
- [7] A. Boomsma and J.J. Hoogland, The robustness of LISREL modeling revisited, Structural equation modeling: Present and future: A festschrift in honor of Karl Jöreskog, Scientific Software International Inc, Lincolnwood, IL, USA, 2001, 1-25.
- [8] K.G. Joreskog and D. Sorbom, Lisrel7-A guide to program and applications, 2nd ed., SPSS, IL, USA, 1988.
- [9] M. Piriyakal, Analytical techniques for Second Order SEM, Journal of Modern Management Science, 6(1), 97-111.(in Thai)
- [10] J. Koran, Preliminary proactive sample size determination for confirmatory factor analysis models, Measurement and Evaluation in Counseling and Development, 2016, 49(4), 296-308.



- [11] J.C. Westland, Lower bounds on sample size in structural equation modeling, *Electronic Commerce Research and Applications*, 2010, 9(6), 476-487.
- [12] E.J. Wolf, K.M. Harrington, S.L. Clark, and M.W. Miller, Sample size requirements for structural equation models: An evaluation of power, bias, and solution propriety, *Educational and Psychological Measurement*, 2013, 76(6), 913-934.
- [13] N. Koch and P. Hadaya, Minimum sample size estimation in PLS-SEM: The inverse square root and gamma-exponential methods, *Information Systems Journal*, 2018, 28(1), 227-261.
- [14] P.S. Petraitis, A.E. Dunham and P.H. Niewiarowski, Inferring multiple causality: The limitations of path analysis, *Functional Ecology*, 1996, 10(4), 421-431.



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 (ไม่เกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ(6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech

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 no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 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/jointech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังกล่าวการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/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



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 - พ.ศ. 2564

- | | |
|--|---|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ หวังรักษาศีสกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกาญญา ทงมี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร เชื้อเพ็ง | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.กมล บุษบา | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 7. รองศาสตราจารย์ ผกามาศ ผจญแก้ว | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชญาณี ทิพย์เสม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยรัชต์ เผือกสามัญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรารัชต์พร นวลสุวรรณ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุต รัตนมณี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา มามาตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ มีถม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา มากมูล กราร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิรา โกมาสถิต | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อบ นิลผาย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมคิด สุทธิธารวัช | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธินี เกิดเทพ | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา สายใจ | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ รนต์ละออง | มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา |
| 25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันสพรรัตน์ สวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ |



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 - พ.ศ. 2564

- | | |
|--|--|
| 26. อาจารย์ ดร.โสภิตา ท้วมมี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 27. อาจารย์ ดร.วนิดา เหล่ารักษาเกียรติ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 28. อาจารย์ ดร.เชาวนันต์ จำเริญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 29. อาจารย์ ดร.ภัทรศยา ตันติวัฒนกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 30. อาจารย์ ดร.มานิดา ทองรุณ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 31. อาจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 32. อาจารย์ ดร.ปรารถนา ประชานุรักษ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 33. อาจารย์ ดร.รัตมี แสงศิริมงคลยิ่ง | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร |
| 34. อาจารย์ ดร.อมิรดี สุขมิลินท์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร |
| 35. อาจารย์ ดร.รัฐศาสตร์ ลายกนก | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา |
| 36. อาจารย์ ดร.ชฎานินษฐ์ วิทยาภิรมย์ | มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| 37. อาจารย์ ดร.รัฐชัย ปิ่นชัยพัฒน์ | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 38. อาจารย์ ดร.บุษบา ปิ่นชัยพัฒน์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 39. อาจารย์ เจตน์พงศ์ พาโลมัส | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๔

บทความ (Articles)

- Impact of Mining Industry on Agricultural Land Degradation from Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Rice Crops in Contaminated Paddy Fields, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 1-15.
- Removal of Methylene Blue Dye using Local Adsorbent Materials, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 16-27.
- The Engine Start Ability of Acetone-Butanol-Ethanol Blended Diesel Fuel for a Common Rail Diesel Engine, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 28-42.
- The Development of Dye-based, Anti-counterfeit Printing Ink Detected by CO₂, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 43-55.
- Applying the Lean Concept to Improve the Oil Pipelines Processing for Tractor: A Case Study of ABC Company Ltd., The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 56-78.
- Improvement of Pressing Process in Automotive Industry, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 79-98.
- Study on the Performance of Small Size Diesel Engine Using Fish Oil Blended with Biodiesel as Fuel, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 99-112.
- Coating of Nano-film Cr₂O₃ on Welded 304L Stainless Steel and Its Surface Resistance Properties, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 113-123.
- Queuing System Analysis: A Case Study of Fast Fashion Business, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 124-133.
- Improvement Current-Mode Four-Quadrant Multiplier Low input Impedance and Very High Output Impedance, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 134-148.
- Effect of Crosslinking Agent and Blowing Agent on the Properties of Natural rubber: Morphology and Mechanical Properties - Before and After Fuel Swelling, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 149-168.
- Drying of Nam Dok Mai Mango Using Far-Infrared Radiation in Combination with Hot-Air, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 169-182.
- Accuracy Improvement for Localization in Outdoor Area Using Artificial Intelligence, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 183-196.
- Bi-objective Design Optimization of a Manipulator Arm, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 197-213.
- The Forecasting Techniques Comparison of Field Crops in Thailand, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 214-231.
- Sample size Determination for Structural Equation Modeling (SEM), The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 232-246.