

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

ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๗

VOLUME 20 | ISSUE 2 | 2024 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๗

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายิ่งจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ผลศิลป์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี นายสุวรรณ

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

กองบรรณาธิการนานาชาติ

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

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

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

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

Editor-in-Chief

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

Associate Editor

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

Editorial Board Members

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

International Editors

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

Head of Administrative Management

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

Administrative Management

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

Journal Manager

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

วัตถุประสงค์

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

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

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่ นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

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

ผู้จัดพิมพ์

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

Objectives

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

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

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

Publishing Schedule

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

Publisher

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

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567

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

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

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชา ข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

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

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
Study of Strength and Corrosion Behavior on Aluminum A1050 and Copper C1100 Joints by Mechanical Steel Bolt, Blind Steel Rivet, and Resistance Spot Weld <i>Saranya Wichachai, Prachapol Saowapa, Ratiporn Munprom, Thanate Na Wichean, Anon Nutanong, Ratchatee Techapiesancharoenkij</i>	1-17
เทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Bicycle Trainer Connected to The Grid) <i>Decha Panprasert, Wara Sadara</i>	18-33
การปรับปรุงความแข็งของกราฟไฟต์ผ่านการเสริมแรงด้วยซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โดยวิธีการแทรกซึมสารละลาย (Hardness Improvement on Graphite by Silicon Nitride (Si_3N_4) Reinforcement using Slurry Infiltration) <i>Nitirut Phongsirimethi, Laksika Suyawong, Somsak Siwadamrongpong</i>	34-46
การประยุกต์กรอบวิธีวิศวกรรมคั่นเซกับแบบจำลองคาโนสำหรับเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ (Application of Integrated Framework of Kansei Engineering and Kano Model Applied to Healthy Office Chair) <i>Dolrit Somupahard, Pongphet Sangkhamanee, Vanchai Laemlaksakul, Sirichai Yodwangjai</i>	47-65
การวิจัยและพัฒนาเตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอลเพื่อการใช้งานเอนกประสงค์ (Research and Development of a Dual-Fuel Radiant Burner for Diverse Applications: Utilizing of Liquefied Petroleum Gas and Bio-Ethanol) <i>Usa Makmool Grare, Kanokkarn Jirakulsomchok</i>	66-78



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การพัฒนาต้นแบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะ (Development of Infectious Waste Prototype Bin for Public Toilets in Commercial Buildings) <i>Panpisu Julpanwattana, Tiptaptim, Jittapat Choruengwiwat, Patrrarat Tannukit, Singh Intrachooto</i>	79-96
Application of Failure Mode Effect and Critical Analysis for Risk Management: A Case of Road-rail Transport at the Thai-Lao PDR Cross Border <i>Jirapan Liangrokapart, Surangkana Rungwattanataratom</i>	97-111
ผลของความดันฉีดต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวเพื่อการเกษตร (Effect of Injection Pressure to Fuel Consumption of Single Cylinder Diesel Engine for Agriculture) <i>Wuttichai Sittiwong</i>	112-124
การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวสำเร็จจูลูมิเนียมอัลลอย เกรด 7075 ด้วยกระบวนการล้อเดี่ยวกดรีดปิดเงา (An Optimization Process of Automatic Finishing Surface Treatment Al 7075 by a Single Roller Burnishing Tool) <i>Thanawan Bunpheng, Nutsuda Songma, Supanut Ritpraseart, Peerapong Kasuriya</i>	125-140
การศึกษากระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในโยเกิร์ตโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยการแช่แข็งสำหรับใช้ในครัวเรือน (A Study of the Freeze-Drying Process for Probiotics in Yogurt Produced from a Typical Household Freeze Dryer) <i>Wasan Theansuwan, Sanon Wongmongkolrit, Surachai Hemhirun, Pawinee Suksuntornsiri</i>	141-151
การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนออกซิเจนต่อการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวรากท่อไทเทเนียม เกรด 2 ASTM B861 ด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (The Study of the Effect of O ₂ Contamination on Discoloration at Root Pass Welding of Titanium Grade 2 Pipe ASTM B 861 Using Gas Tungsten Arc Welding) <i>Kitsada Kaewsuriwong, Phuwit, Umnad Sornwongkaew, Adisak Aumpiem, Siripong Lumpapiwat, Pariyasut Wattanathum</i>	152-164



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การปรับปรุงสถานีงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อลดความเหนื่อยล้าในการทำงานของพนักงาน โรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน (The Work Station Improvement by Ergonomics Principle to Reduce Fatigue from Work of Worker's in Smoked Rubber Sheets Processing) <i>Weerachai Madtharak, Rungsima Homsettee, Angoon Sungkhapong</i>	165-183
การระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการ ปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Identifying the Optimal Location and Capacity of Distributed Generation for Improving Reliability in Distribution System) <i>Papon Ngamprasert, Natchapol Ruangsap, Nattachote Rugthaicharoencheep</i>	184-195
การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนกำลังแบบอินดักทีฟที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่ด้วยการ ควบคุมความถี่ร่วมกับการปรับตัวชดเชย (Efficiency Enhancement of An Inductive Power Transfer System Used for Battery Charging Through Frequency Control and Compensation Adjustment) <i>Chokchai Chuenwattanapraniti, Montana Rungsiyopas</i>	196-211
Effect of the Ternary Blends (Ethanol-Biodiesel-Diesel) on Deterioration of a Stationary Agricultural Engine <i>Sakda Thongchai, Ob Nilaphai, Pomphan Phanphatrapong, Manida Tongroon</i>	212-228
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2

Study of Strength and Corrosion Behavior on Aluminum A1050 and Copper C1100 Joints by Mechanical Steel Bolt, Blind Steel Rivet, and Resistance Spot Weld

Saranya Wichachai¹, Prachapol Saowapa¹, Ratiporn Munprom², Thanate Na Wichean³
Anon Nutanong³ and Ratchatee Techapiesancharoenkij^{1*}

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

² Nuovo Plus Co., Ltd.

³ Materials Innovation Center, Faculty of Engineering, Kasetsart University

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

Received: 29 January 2024; Revised 26 March 2024; Accepted: 5 April 2024

Online Published: 20 August 2024

Abstract: A1050 and C1100 are normally used as terminal tabs, they are connected either by mechanical joining, e.g. mechanical bolt, or rivet, or by welding, e.g. resistance spot welding. This study aimed to compare the mechanical bolt, blind rivet, and resistance spot welding methods by measuring important joining properties to support the process selection for joining terminal tabs in pouch cell batteries. T-peel-shaped were created and immersed in a 3.5 wt% NaCl electrolyte solution over different durations. Tensile tests were conducted to ascertain the maximum load-bearing capacity of the various joints. Furthermore, the electrical resistivities of the joints were measured using the 4-point probe technique. The corrosion rates of various joints were calculated from the corrosion current density (i_{corr}) measured from the Tafel polarization technique. ANOVA and Tukey's test were used for analyst data comparison of the three joining techniques. Based on the mechanical properties, the mechanical joints by either steel bolt or steel rivet exhibited higher shear peeling strength than the resistance spot welding. The mechanical joining processes were simple with ease of maintenance, however, the use of steel components correlated with heightened corrosion rates and higher resistivity. Spot welding joints tended to produce low joining strength due to the brittleness of the welding spot. Nonetheless, the spot weld joints demonstrated minimal changes in resistivity following corrosion exposure as opposed to the mechanical joining counterparts.

Keywords: Corrosion; Resistivity; Aluminum; Copper; Mechanical joining; Resistance spot weld; ANOVA



1. Introduction

The electrical vehicle fields (EVs) are speedily growing according to the environmental issues because EVs can contribute to the reduction of global warming by producing zero pollutant emissions. Terminal tabs of pouch cell batteries, which are one of the core components of EVs, are of interest in this work. Al and Cu are commonly used as terminal tabs due to their great mechanical and electrical properties. An Al tab is used as a positive electrode and Cu is a negative one. Due to their different electrochemical potentials, galvanic corrosion may occur due to the connection of Al and Cu tabs for battery cells connected in series. The corrosion issue could affect the performance of a battery and raise safety concerns. In terms of corrosive environment, the surface has more rust or white flake which are signs of corrosion behavior [1].

In recent years, several joining techniques of terminal tabs have been used, including mechanical bolt joints, resistance spot welding, ultrasonic welding, and laser welding. Welding techniques provide direct contact between the two tabs without extra joining components, enabling good electrical contact and compact joining. However, the welding processes normally require high-budget equipment and good welding practice. A mechanical bolt joining is simple, low-cost, does not require high technical skill, and can be easily removed.

Therefore, it is a popular joining technique among small-business and hobbyist communities of battery module packaging. However, the electrical contact, galvanic corrosion of the steel bolt, and long-term bolt tightening of the mechanical bolt joint are of concern. Rivet joining method, commonly used in the aviation industry, is another good alternative mechanical joining technique, which offers a fast and simple joining process [2]. Solid riveting is used widely for metal joining process. For the riveting process, holes are made through sheets and a rivet is used to join the sheets through the holes. The aviation industries commonly use a riveted lap joint to make a strong joint in fuselage of aircraft [3]. A blind rivet was used to join Al and Cu sheet for comparison with Cu-Cu and Al-Al sheets; the results were shown that the strength of Al-Al and Cu-Cu were lower than strength of Al-Cu combination, which was tested by the tensile testing [4]. The mechanical and electrical properties have been tested in many techniques to ensure safety and performance, then the selection of terminal-tab joining techniques must consider the joining strength, corrosion behavior, and electrical contact quality. However, to date, there is no report on the comparison of the terminal tab joining performance among resistance spot welding, mechanical bolt joining, and rivet joining. Terminal tabs experience a harsh environment, including fatigue damage and chemical reactions.



Resistance spot welding (RSW) is a popular welding method for joining metal sheets in industries like automotive and aerospace. It involves applying pressure and passing an electric current through the sheets, creating heat that melts the metal at the joint. When pressure is maintained, the molten metal solidifies, forming a strong bond known as a weld nugget. RSW is favored for its high production rates, quality welds, and suitability for automation, but it requires precise control of welding parameters for consistent and reliable results, including current level, electrode force, and welding time [5]. Yang et al. [6] studied the behavior of corrosion of spot weld zone on dissimilar metals (Al and Al-Li) by immersion and electrochemical tests. The polarization curve ensured the increase of immersed time in electrolyte, the corrosion was spread widely on the surface of metals.

In this study, we investigated the joining of Aluminum A1050 and Copper C1100 plates, comparing the resistance spot welding, mechanical bolt, and rivet joining methods. Both A1050 and C1100 are common alloy grades used as terminal tabs in pouch-cell battery manufacturing. Additionally, Aluminum 1050 is known for its high purity, good corrosion resistance, and high electrical conductivity. It's suitable for general applications where these properties are sufficient, while Copper1100 is also an excellent choice when high electrical conductivity, good thermal conductivity,

and corrosion resistance are crucial [7]. The mechanical joining, corrosion behaviors and electrical contact conductivity of the three joining techniques were studied and compared to provide useful information for a proper selection of the terminal tab joining techniques.

2. Experimental procedure

According to JIS Z 3136-1978 standard (ASTM International, 2000), the 30 mm width, 100 mm length, and 0.3 mm thickness of Al A1050 and Cu C1100 plates were prepared and connected to form a T-peel shape as shown in Fig. 1, which is similar to a joining configuration of the pouch cell battery terminal tabs. Chemical compositions of both metals are shown in Table 1. Moreover, Fig. 2 shows a diagram of the experimental process. Before the joining processes, the surfaces of the workpieces were cleaned with a solvent cleaner. For the mechanical bolt joining, a mechanical steel bolt (low head socket cap screw M4, 4-mm diameter) was applied with a tightening force of 2.5 N.m. (DIN 7984 standard). For the rivet joining,

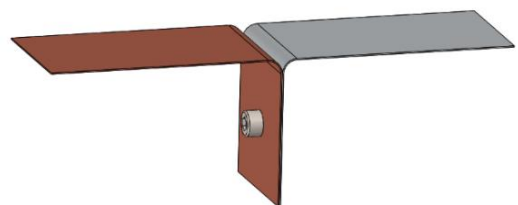


Fig. 1 Geometrical illustration of T-peel shape workpiece

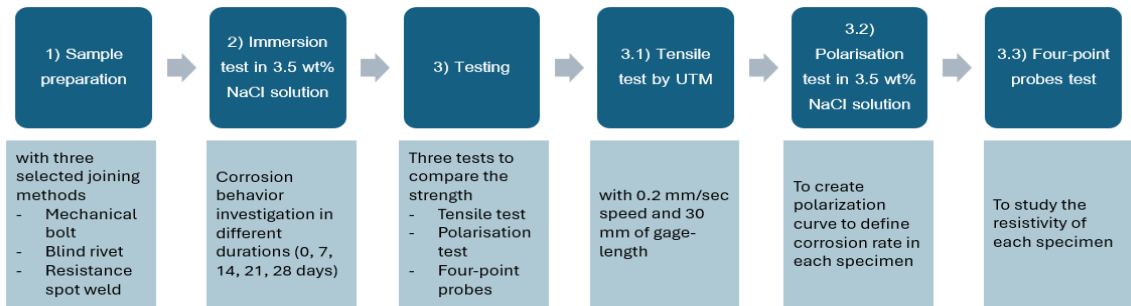


Fig. 2 The diagram of the experimental process

a 4 mm-diameter blind steel rivet was clamped by a rivet gun with the clamping force. For the resistance spot welding, we used the optimal spot weld conditions of the laboratory spot welding equipment reported by Saowapa et al. [8]. During the spot weld process, heat and pressure were applied on the terminal tabs joining by the pressing spot electrodes. The spot weld electrodes of the spot weld equipment are a 5-mm Copper Chrome alloy (type E Truncated).

To prevent the overheating damage of the Al and Cu plates, two C1100 plates of 0.7-mm thickness were added both Al and Cu plates, as busbars. The three key parameters of the laboratory resistance spot welding equipment were set as following: (i) electrode pressure is 1.5-2 MPa, (ii) welding frequency is 35 cycles/sec, and (iii) weld current is 8500 A or 85% of max current [8]. It should be noted that we have controlled the joining areas for all three joining techniques to be as close as possible using

Table 1 Chemical composition of C1100 and A1050, according to JIS, Japanese Industrial Standard (Japanese Standard Association, 1978)

C1100	Percentage, wt%
Copper (Cu)	≥ 99.9
(Pb, S, Fe, Ni, Zn, Cu)	≤ 0.01

A1050	Percentage, wt%
Aluminum (Al)	≥ 99.9
Titanium (Ti)	≤ 0.40
Silicon (Si)	≤ 0.25
Iron (Fe)	≤ 0.05
Copper (Cu)	≤ 0.05
Magnesium (Mg)	≤ 0.05
Manganese (Mn)	≤ 0.025

available components in the market, including 4-mm diameters for both mechanical and blind rivet joining and 5-mm spot-welding electrodes.



2.1 Joining strength and immersion tests

The specimen from three different joining methods, including (i) mechanical steel bolt, and (ii) blind steel rivet, (iii) resistance spot welding, were prepared for mechanical, corrosion, and electrical characterizations. Three replications of the workpieces were characterized for all testing to mean calculation. The workpiece was immersed in 3.5 wt% NaCl solution for different durations (0 to 4 weeks) for corrosion behavior investigation and mechanical tensile test. Additionally, 3.5 wt% sodium chloride solution was referred to ASTM G44-21 for a corrosion investigation. The mechanical tensile test is conducted according to ASTM E8 [9], with the purpose of achieve stress-strain behavior as referring to Fig. 3. The T-peel shape specimens (as illustrated in Fig. 1) were prepared for the mechanical tensile test with 30 mm gage length and performed with force-displacement graph record via Universal testing machine (UTM).

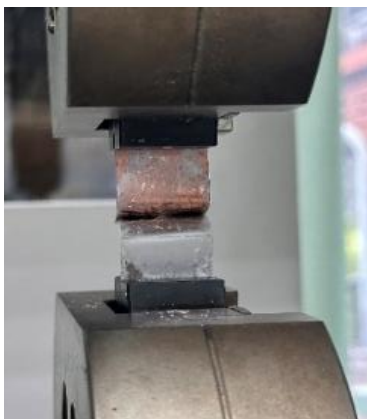


Fig. 3 T-peel shape test in UTM alignment

2.2 Electrochemical test

Electrochemical test was performed using a “PGSTAT302N auto lab” electrochemical workstation for polarization curve to determine the corrosion resistance of the specimens in an electrolyte solution of 3.5 wt% NaCl at room temperature. The polarization test was conducted by initiated electrode potential -1.5 V to 1.5 V at sweep rate of 20 mV/min with the study area was 90 mm², this chosen range was sufficient to evaluate corrosion current density measurement, I_{corr} in A/cm², by Tafel extrapolation. The three-electrode system was used, including a silver wire coated with silver chloride (Ag/AgCl/saturated KCl) as a reference electrode, a platinum-coated mesh as a counter electrode (CE), and the workpiece as a working electrode (WE). After the electrochemical test, the exposed surface was cleaned and rinsed with acetone and dried in air. For Tafel potentiostatic analysis, the polarization curves of current density-vs.-applied potential (vs. Ag/AgCl) could reveal the corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current (I_{corr}) at the interception of the cathodic and anodic polarization curves. I_{corr} value represents the flow of electrons from the working metal to the electrolyte environment during the corrosion process. Therefore, the corrosion rate could then be calculated from I_{corr} using Faraday's Law. The corrosion rate measures the rate at which the metal surface corroded under the concentrated NaCl environment.



2.3 Resistivity measurement

The four-point probe method was used for measuring the resistivity of the joints. The four-point probe technique used an alignment of four conductive probes in series with equal spacing between adjacent probes. A current (I mode) was passed between the two outer probes, so the current flowed through the specimen along the alignment of the four probes. A voltage (V) was then measured across the two inner probes. The Al/Cu joints of the T-peel shape specimens were placed in between the two inner probes. Therefore, a pair of outer and inner probes would be pressed on Al side and another pair would be on Cu side. This was to ensure that the current flowed through the joints and the joint resistivity was measured. The resistance could then be calculated from the slope of a voltage-current linear graph. The resistivity could be calculated from the resistance data and the probe spacing parameters.

2.4 Statistical data analysis

Tukey Honestly Significant Different (HSD) test was used to compare the resultant mechanical, electrical, and corrosion data for Al/Cu specimens with varying joining methods. Tukey analysis was used to assess the significance of effects of different joining methods on the joining properties of interest. For the treatment conditions with non-significant difference in the response values, they are labeled with the same letter. For the treatment groups,

which show significant difference, they are labeled with different letters. The letters are conventionally labeled from highest to lowest values in the order of 'a', 'b', 'c' and so on ('a' as the maximum value). A treatment group might be labeled with two letters, which reflect overlapping values with two other treatments or more.

The Tukey's test is used in conjunction with the analysis of variance (ANOVA) via excel. In this analysis, the ANOVA tested the overall hypothesis whether the varying joining methods and the immersion durations had significant effect on the mechanical, electrical and corrosion characteristics of the specimens. For both Tukey's test and ANOVA, the confidence interval or confident level of 95% ($\alpha = 0.05$) was applied. If ANOVA reports a P-value less than $\alpha (= 0.05)$, the treatment of interest shows significant effect on the measured characterization behavior (rejecting null hypothesis).

3. Results and Discussion

3.1 Joining strength test

Fig .4 presents a bar chart of the average maximum tensile load for different joining methods with Tukey's labeled difference. The average tensile loading of the mechanical bolt joining appeared to be the highest. However, with Tukey's comparison analysis at 95% confidence level ($\alpha = 0.05$), the difference between the average maximum tensile loadings of the mechanical bolt joining and the blind rivet joining is not statistically significant.

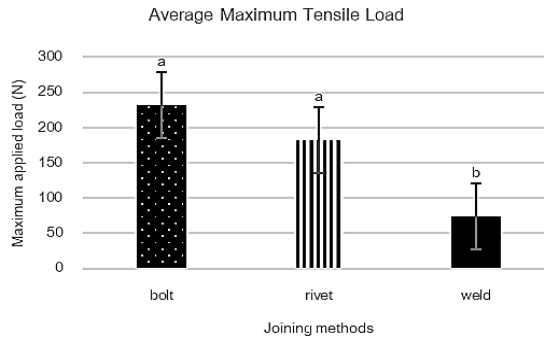


Fig. 4 Bar chart of the maximum tensile loads for the three joining methods with Tukey's HSD letter display

As a result, both joining methods were labeled with 'a'. Meanwhile, the resistance spot weld joining showed the lowest average tensile load.

3.2 Immersion

Fig. 5 shows the bar charts of the maximum tensile load bearing of different joining methods after immersion period from 0 – 4 weeks for (a) mechanical bolt, (b) blind rivet, and (c) spot welding with Tukey's analysis labels. Additionally, the statistical test was a tool to confirm the accuracy of all data in each joining method. One-way ANOVA test showed that the P-value for bolt, rivet, and spot weld was lower than 0.05 (for 95% confidence level), as 2.9×10^{-7} , 6.7×10^{-7} , and 3.5×10^{-7} , respectively. It is clearly seen that an increase of immersion time decreased the joining strength of the specimens. Additionally, it is evident that both before and after exposure to corrosive environment period, the bolt method consistently attains the highest maximum tensile load, thus signifying its robust mechanical integrity and load-bearing

capacity under normal conditions. On the other hand, the spot weld process consistently exhibits the lowest maximum tensile load, even at the outset of corrosion period (0th week immersion). This lower load-bearing capacity is indicative of the mechanical characteristics of spot weld method, which tend to be more vulnerable to tensile stresses compared to mechanical assemblies. For the spot-welding method, the maximum load dropped significantly from zero week to first week and then slightly decreased in next three weeks. For the mechanical bolt and blind rivet methods, the maximum loads appeared to drop slightly after the 1st week, then decreased significantly after the 2nd week. The joining strength of the spot weld specimens decreased the most over 4-week immersion period with more than 65% maximum load tensile from Week 0 to Week 4. The rivet method specimen's joining strength decreased around 42% after four weeks, while the joining load of the steel bolt specimen showed the lowest drop of 37% after 4-week immersion.

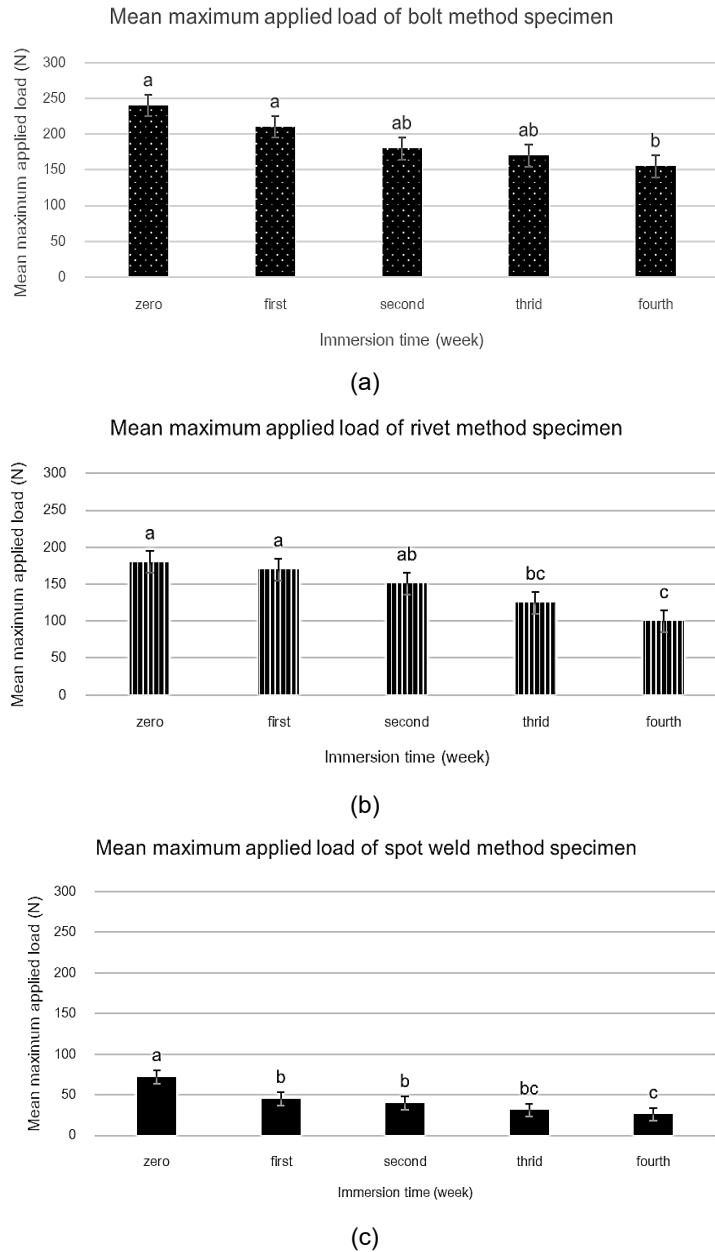


Fig. 5 Bar chart plot of the tensile strength results for over different immersion durations with Tukey's analysis labels for (a) Mechanical steel bolt, (b) Blind steel rivet, and (c) spot welding



Spot welds exhibit higher susceptibility to corrosion compared to mechanical joining (bolts and blind rivets) due to the lack of protective coatings in their heat-affected zones (HAZ). Therefore, spot welds are more prone to degradation when exposed to corrosive environments such as water or chemicals. These may explain significant drop in the joining strength of the spot welding as compared to the mechanical bolt and blind rivet joining.

3.3 Failure mode

Fig. 6 displays pictures of the failure onsets of the workpieces under tensile loading for all three joining methods. For both mechanical bolt joining and rivet joining (Fig. 6 (a, b)), it is clearly seen that the damage occurred on the Al sides, which ripped along the steel tool length. Under the tensile load, the connector was uniformly loaded at the initial loading phase, then the Al sheet was bent slightly due to its lower strength than either the steel tools or the Cu sheet. As the tensile loading continued, the steel connectors (either bolt or rivet) remained strongly connected to both Al and Cu sheets. As a result, the Al sheets were the weakest links and sheared along the steel connectors. After the tensile test, both heads of steel bolt and blind rivet were struck on the metal sheets with a little bend on the Cu sheets. On the other hand, for the resistance spot welding, the fracture occurred along the weld nugget, as shown in Fig. 6 (c). From the fracture surfaces, it is clearly seen that the welding nugget

was the molten Al on the Cu sheet. There were Al pieces throughout the fractured surface on the Cu, while a fractured weld-nugget hole was observed on the Al sheet. Fig. 7 illustrates the cross-sectional microstructure of the Al/Cu spot welding area, taken by Scanning Electron Microscope (SEM). The melting and pressure on dissimilar metals during welding leads to the formation of several phase within the weld nugget upon solidification [10]. Moreover, an intermetallic welding area is evident between the Al and Cu sheets. The intermetallic layer provided the bonding strength however, it was brittle and easily fractured, especially by shearing strength. As a result, the spot-welding provided the weakest joining strength as compared to bolt and rivet methods.

3.4 Corrosion characteristics

Fig. 8 presents the polarisation curves, which provides the corrosion potential (E_{corr}) of materials: steel bolt, steel rivet, Al A1050, Cu C1100. The corrosion potentials of A1050, steel bolt, steel rivet, and C1100 were found to be approximately -1.08, -0.98, -0.96, and -0.90 V vs Ag/AgCl, respectively. These values reflect the materials' inherent tendencies to undergo corrosion within the given experimental conditions (3.5 wt% NaCl solution): the lower potential, the higher corrosion tendency (poorer corrosion resistance). The Al A1050 showed the lowest potential, while the Cu C1100 the highest. Difference in corrosion potentials between

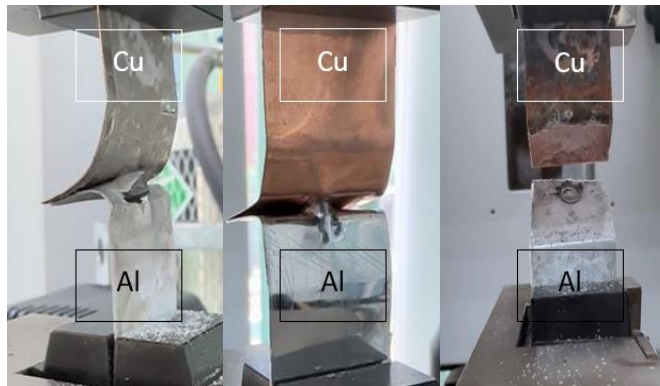


Fig. 6 Failure modes observation of workpieces which connected by (a) bolt, (b) rivet, and (c) weld

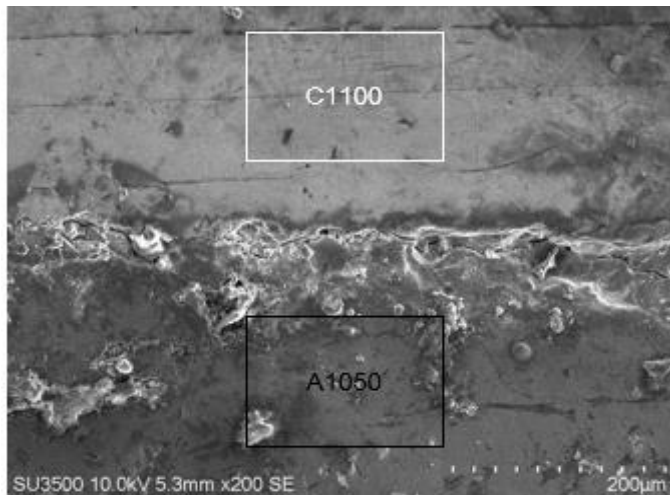


Fig. 7 SEM micrograph of the cross-sectional area of a representative Al and Cu nugget

coupled metals can lead to galvanic corrosion to the lower-potential metal. The current densities (I_{corr}) of A1050, steel bolt, steel rivet, and C1100, are 7.7×10^{-5} , 4.4×10^{-5} , 3.4×10^{-5} , 6.3×10^{-5} A/cm², respectively. The Cu C1100 showed the lowest corrosion density, while both steel bolt and steel rivet showed the highest corrosion density. Fig. 9 presents polarization curves of Al/Cu specimens

with the three joining methods. The corrosion potentials of the Al/Cu specimens joined with steel bolt, steel rivet, spot welding, are -1.05, -1.11, and -1.00 V vs. Ag/AgCl, respectively. The corrosion potentials of the three specimens are comparable with difference by less than 0.1 V. The couple potentials of the joint Al/Cu are in between the potentials of Al and Cu.

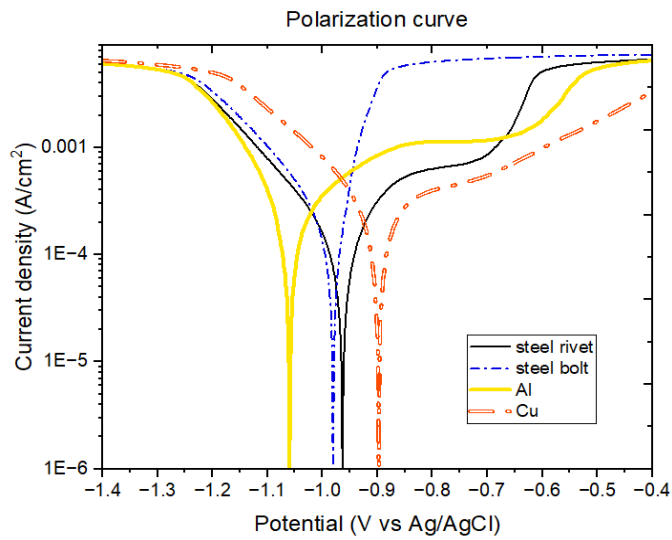


Fig. 8 Polarization curves of Al A1050, Cu C1100, bolt, and steel rivet

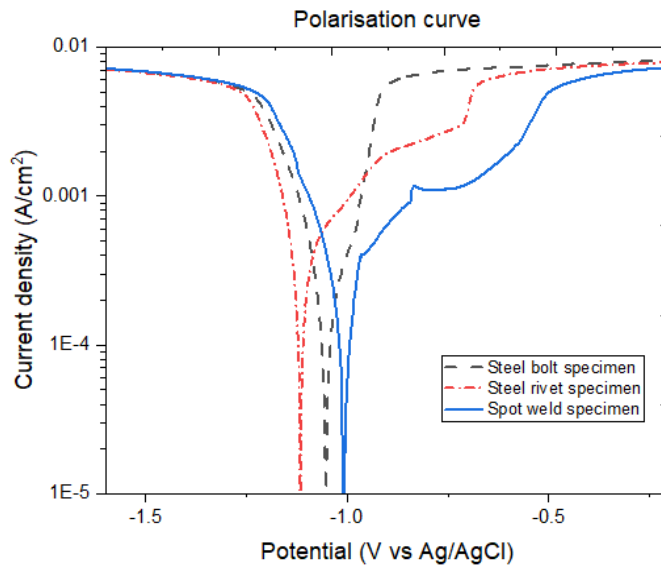


Fig. 9 Polarization curves of the Al/Cu workpieces joined with bolt, rivet, and weld



Furthermore, the presence of steel tools appears to have shift the potential to more negative (more anodic) than the spot-welding specimen, with the corrosion potential of bolt and rivet specimens being lower than that of the weld specimen. The current density of the Al/Cu specimens joined with steel bolt, steel rivet, spot welding, are 7.9×10^{-5} , 1.7×10^{-4} , and 7.7×10^{-5} A/cm², respectively. The corrosion current density data were used to calculate the corrosion rates, which is a measure of how fast a material undergoes corrosion in a controlled environment (expressed in mm/year). This metric provides valuable insights into a material's durability and its susceptibility to chemical degradation. The calculation of corrosion rate from corrosion current is based on Faraday's equation, as shown in corrosion rate Equation (1):

$$\text{corrosion rate, } r = \frac{0.00327 i_{corr} EW}{d} \quad (1)$$

where i_{corr} is corrosion current density (A/cm²), EW is an equivalent weight ($\frac{\text{atomic weight}}{\text{number of electrons}}$), and d is density of material.

Table 2 Corrosion rates from Polarization curves

Joining methods	Corrosion rate (mm/year)
By steel bolt	0.57
By steel rivet	0.76
By resistance spot weld	0.45

Table 2 shows the calculated corrosion rates of all joining specimens. Interestingly, when comparing the corrosion rates between different joining methods, it became evident that the spot weld method exhibited the lowest corrosion rate in contrast to the method involving the addition of steel tools assemblies. Bolt and rivet can create gaps between the fastener and the jointed material, providing a favorable environment for corrosion the steel tools contact with other metal like Al and Cu in a joint, galvanic corrosion can accelerated the corrosion rates of less stable steel and Al components. Furthermore, the concentration of electrolyte of 3.5 wt% NaCl was very high, the concentrated chloride ions could destroy the passive film of Al. Normally, the corrosion rates of A1050 and C1100 in neutral environment are typically less than 0.1 mm/year [11].

Therefore, in this experiment, the high corrosion rates of the three joining specimens are obviously due to the galvanic corrosion under the controlled environment of 3.5 wt% NaCl electrolytes. The concentration of 3.5 wt% NaCl was relatively high and could accelerate the corrosion process, which sodium chloride is a corrosive agent that can be particularly aggressive in promoting corrosion [12,13]. Interestingly, in corrosive environment like NaCl, the surface of metal has a sign of corrosion behavior. Al surface, which Al is known for its ability to rapidly form a protective oxide layer when



exposed to oxygen, formed a corrosion product that is transparent and colorless. While Cu surface tends to turn darker color as a reddish-brown layer. Moreover, the steel tools (bolt, nut, and rivet) are oxidized and chemically changed to produce rust, resulting in the deterioration of the exposed surface of the material.

3.5 Electrical properties

The four-point probe measurement provided a linear V-I graph from which a resistance could be determined from the V-I slope based on the Ohm's law equation (2):

$$V = IR \quad (2)$$

where V is voltage between the two inner probes (V), I is current through the outer probes (A), R is resistance of material. The resistivity was calculated using the resistivity equation [14], as shown in resistivity equation (3):

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \quad (3)$$

where ρ = resistivity ($\Omega \cdot m$), S = probe spacing (m). This resistivity equation (Equation 3) is valid for the 4-point probe measurement, of which the workpiece's surface area is much larger than the probe spacing (S). The average resistivities of the workpieces with steel bolt joining, steel rivet joining, and spot welding, for 0-week and 4-week immersion, are shown in Table 3. Before the immersion test, the resistivities of the three joining methods are comparable. After 4-week immersion in

3.5 wt% NaCl solution, the resistivities of all the specimen increased significantly by at least an order of magnitude. The blind steel rivet specimens exhibited the largest increase of resistivity after the 4-week immersion (increasing by two orders of magnitude). The resistivities of the steel-bolt and spot-welding specimens increased by an order of magnitude after 4-week immersion. The spot-welding specimen exhibited the lowest resistivity after 4-week immersion. The corrosion reaction may form oxide scales between the joints and result in an increase in resistivity on the joints of the metal sheets, as compared to the common resistivity of conductor materials [15]. The standard resistivity of Cu, Al, and steel are 1.68×10^{-8} , 2.82×10^{-8} , and 10×10^{-8} ohm/m, respectively [16]. The resistivity of the three joints were already higher than the standard resistivity of the metals by an order of magnitude, even before immersion test. The higher resistivity will deteriorate the performance of the conductors with higher power loss at the terminal tabs. Normally, the common steel conductor has a higher electrical resistivity than Al and Cu materials. Therefore, the resistivity of the steel-bolt and steel-rivet specimens were higher than that of spot weld specimen. Bolted joints involve threaded connections, which can introduce additional resistance due to the threading and contact interface between the screw and the nut. Whereas, spot welds typically create a more direct and



continuous electrical path between the joined materials, minimizing resistance at the joint interface.

Table 3 shows Tukey test label letter has confirmed the result were increased more than 10 times with an increased immersion time, from week0 to week4 immersion. In addition, corrosion causes an increase in resistance on metal sheets, moreover, the higher resistance will deteriorate the performance of the conductors. Steel bolt and steel rivet show insignificant difference in their resistivity values for the 0th week. However, after the 4th week immersion, the steel rivet showed the highest resistivity due to the deformation of the tight connection. The deformation may create gaps or surface irregularities which introduce additional resistance to the flow of electric current compared to steel bolt. The spot-welding joining exhibited the lowest resistivity as compared to the mechanical bolt and rivet, weld contact is directly bonded the Al and Cu tabs, as opposed to the touching contacts of the mechanical bolt and rivet, which may result in micro gap between Al and Cu tabs.

4. Conclusion

This research reports mechanical, corrosion, and electrical comparisons of three joining methods for Al A1050 and Cu C1100 plates: mechanical steel bolt, steel blind rivet workpieces, and resistance spot welding.

Table 3 The Average Resistivity of workpieces in (a) 0-week, and (b) 4th week immersion test

Joining Methods	Average Resistivity ($\Omega \cdot m$)	
	0 th week-immersion	4 th week-immersion
Steel bolt	$4.27 \times 10^{-7} \text{ c}$	$4.11 \times 10^{-6} \text{ b}$
Blind steel rivet	$3.66 \times 10^{-7} \text{ c,d}$	$2.83 \times 10^{-5} \text{ a}$
Resistance spot weld	$1.57 \times 10^{-7} \text{ d}$	$1.32 \times 10^{-6} \text{ b}$

The immersion of in a 3.5 wt% NaCl solution, a highly concentrated environment, allowed for the assessment of corrosion over a 4-week duration.

In terms of tensile load, the mechanical bolt joining exhibited the highest strength, while the spot welding showed the lowest strength. The failure analysis showed that, after the tensile test, both heads of steel bolt and blind rivet were struck on the metal sheets with a little bend on the Cu sheets, which helped impede further fracturing. On the other hand, for the resistance spot welding, the fracture occurred along the weld nugget, which was the molten Al on the Cu sheet. Therefore, the fracture mechanism of the spot-welding join was more brittle and weaker than the mechanical joining.

The corrosion from week 0 to week 4 on the workpiece surfaces demonstrated a direct and significant impact on their mechanical strength



with substantial decreases in the maximum load for all joining methods—steel bolt, blind rivet, and spot weld—approximately 42.62%, 60.06%, and 63.37%, respectively. Spot welds exhibit higher susceptibility to corrosion compared to mechanical joining (bolts and blind rivets) due to the lack of protective coatings in their heat-affected zones (HAZ). These may explain significant drop in the joining strength of the spot welding as compared to the mechanical bolt and blind rivet joining.

The corrosion rates (from Faraday's equation and Tafel analysis) of the three joining methods under 3.5 wt% NaCl environment were relatively high with the corrosion rate of 0.4 – 0.8 mm/year. The high corrosion rates of the three joining specimens are obviously due to the galvanic corrosion under the controlled environment of 3.5 wt% NaCl electrolytes. The concentration of 3.5 wt% NaCl was relatively high and could accelerate the corrosion process, which sodium chloride is a corrosive agent that can be particularly aggressive in breaking the passive oxide films and promoting corrosion.

For the electrical resistivity data, the resistivities of the three joining methods are comparable. After 4-week immersion in 3.5 wt% NaCl solution, the resistivities of all the specimen increased significantly by at least an order of magnitude. The blind steel rivet specimens

exhibited the largest increase of resistivity after the 4-week immersion (increasing by two orders of magnitude). The spot-welding specimen exhibited the lowest resistivity after 4-week immersion. The corrosion reaction may form oxide scales between the joints and result in an increase in resistivity on the joints of the metal sheets.

In summary, from a mechanical strength and durability standpoint, the mechanical bolt joining is the best option exhibiting the highest bonding strength even after 4-week immersion in the 3.5 wt% NaCl solution. However, from an electrical power loss standpoint, the spot welding provides the lowest electrical resistivity even after 4-week immersion. So, for the application with low loading demand, the resistance spot welding may be an optimal choice to minimize power loss due to electrical resistance. However, for high loading applications, mechanical joining is recommended.

5. Acknowledgements

This work was supported by the International Collaborative Education Program in Materials Technology, Education, and Research (ICE-Matter), AUN/SEED-Net, JICA. The authors thank Research and Development Institute of Industrial Production Technology (RD IPT), Faculty of Engineering, Kasetsart University for the support of the resistance spot welding equipment.



6. References

- [1] R. Frank and C. Morton, Comparative corrosion and current burst testing of copper and aluminum electrical power connectors, Fortieth IAS Annual Meeting Conference, Proceeding, 2005, 442-447.
- [2] H. Moslemi, K. Farhangdoost and P. Zamani, Fatigue life evaluation of single and two riveted coach peel joints using strain-life criteria, AUT Journal of Mechanical Engineering, 2019, 3(2), 229-234.
- [3] C. Lei, Q. Huang and Y. Bi, Tensile load distribution improvement of three-row riveted lap joint based on different squeezing displacement combinations, Coatings, 2021, 11, 856.
- [4] T. Bothiraj and M. Saravanan, Experimental investigation of friction stir blind riveting process for similar and dissimilar alloy sheet, Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2018, 12(1), 17-00679.
- [5] D.C. Saha, and Y.D. Park, A review on Al-Al/Al-steel resistance spot welding technologies for light weight vehicles, Journal of Welding and Joining, 2011, 29(4), 35-40.
- [6] Y. Yang, Y. Li, J. Bi, H. Liu, S. Ao and Z. Luo, Study on the corrosion behavior of resistance spot welded dissimilar 2195/5A06 joints, Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(7), 3114-3128.
- [7] AZO Materials, Aluminium Alloys - Aluminium 1050 Properties, Fabrication and Applications, 2005. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2798> (Accessed on 30 January 2024)
- [8] P. Saowapa, S. Wichachai, R. Munprom and R. Techapiesanchaorenkij, Study the spot welding for difference material between copper C1100 and aluminum A1050, CRU-National Conference in Science and Technology: NCST 6th, Proceeding, 2023.
- [9] ASTM E8/E8M-13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ,2015.
- [10] K.O Cooke and T.I. Khan, Microstructure development during low-current resistance spot welding of aluminum to magnesium, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 46-48.
- [11] A. Groysman, Corrosion for everybody, Springer Science and Business Media, 2019.
- [12] M.F. Ibrahim, Effect of different sodium chloride (NaCl) concentration on corrosion of coated steel, Doctoral Dissertation, University Malaysia Pahang, Malaysia, 2013.



- [13] F. Brownlie, T. Hodgkiess, A. Pearson and A. Galloway, Electrochemical evaluation of the effect of different NaCl concentrations on low alloy-and stainless steels under corrosion and erosion-corrosion conditions, *Corrosion and Materials Degradation*, 2022, 3, 101-126.
- [14] R.S. Waremra and P. Betaubun, Analysis of electrical properties using the four point probe method, *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, 73, 13019.
- [15] V. Tsakiris, W. Kappel, and G. Alecu, Solid state diffusion welding of Cu-Fe/Al/Ag and Al-Ni dissimilar metals, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2011, 13(9), 1176.
- [16] A.M. Helmenstine, A table of electrical conductivity and resistivity of common materials, ThoughtCo, 2019.
<https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resisitvity-conductivity-608499>. (Accessed on 30 September 2023)



เทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

เดชา ปานประเสริฐ* และ วราห์ สาตะระ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 29 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 1 เมษายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 23 เมษายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: ชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยใช้จักรยานเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จากนั้นทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส แรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 12 โวลต์กระแสสลับและใช้หม้อแปลงยกกระดุมแรงดันเป็น 220 โวลต์กระแสสลับ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าใช้เทคนิคการควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสแบบซิงเกิลแบนด์ ทำการทดสอบโหมดเรียงกระแส โหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือ บูสคอนเวอร์เตอร์ และโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ผลการทดสอบชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงได้ 109 วัตต์ มีค่าตัวประกอบกำลัง 0.92 ในโหมดบูสคอนเวอร์เตอร์ขณะมีการต่อโหลด และการทดสอบชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปยังระบบโครงข่ายไฟฟ้า 107 วัตต์ และมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.98 โดยประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส มีค่าเท่ากับ 63.7 %

คำสำคัญ: เทรนเนอร์จักรยาน; การควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสแบบซิงเกิลแบนด์; เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน; อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า; บูสคอนเวอร์เตอร์

Bicycle Trainer Connected to The Grid

Decha Panprasert* and Wara Sadara

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

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

Received: 29 February 2024; Revised: 1 April 2024; Accepted: 23 April 2024

Online Published: 20 August 2024

Abstract: The bicycle trainer is connected to the grid by using a bicycle as a mechanical source to drive a DC brushless generator. Then convert the AC voltage to DC voltage to be an energy source for the single-phase inverter connected to the grid. The output voltage from the inverter connected to the grid has a value of 12 volts AC and uses a step-up transformer to raise the voltage to 220 volts AC. The inverter connected to the grid using a single-band hysteresis current control technique. Perform a rectifying mode, step-up voltage or boost converter mode, and inverter connected to the grid mode. Testing result the bicycle trainer connected to the grid measured the real power of 109 watts with a power factor of 0.92 in boost converter mode under load conditions and the inverter connected to the grid was able to supply real power of 107 watts and with a power factor of 0.98. The efficiency of the single-phase inverter connected to the grid equals 63.7%.

Keywords: Bicycle trainer; Single-band hysteresis current control; DC brushless generator; Inverter connected to the grid; Boost Converter



1. บทนำ

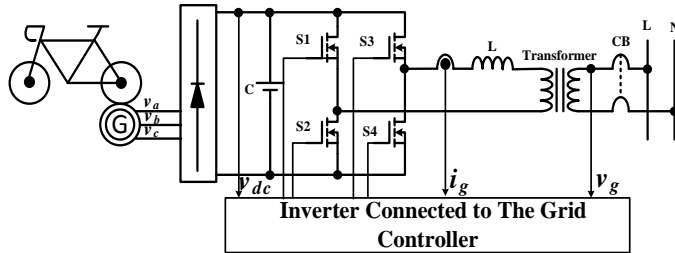
ปัจจุบันการออกกำลังกายเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับร่างกาย ได้รับความนิยมนิยมเพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นออกกำลังกายกลางแจ้งและการออกกำลังกายในร่มเช่น การว่ายน้ำ การวิ่ง การเล่นฟุตบอล การชก เจทสกี การปั่นจักรยาน การเข้ายิม ฟิตเนส โยคะและการออกกำลังกายแบบอื่นๆ ซึ่งข้อดีของการออกกำลังกายมีมากมาย เช่น การเผาผลาญไขมันส่วนเกิน ลดระดับน้ำตาลและคอเลสเตอรอล ลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ ร่างกายมีกล้ามเนื้อที่กระชับ ส่งเสริมการลดน้ำหนัก [1] โดยกิจกรรมออกกำลังกายต่างๆ สามารถทำได้ทั้งในบ้าน นอกบ้าน ในยิม นอกจากนี้การออกกำลังกายอาจจะต้องมีอุปกรณ์ประกอบการออกกำลังกาย เช่น ลู่วิ่งไฟฟ้า ซึ่งทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการออกกำลังกาย เป็นการดีหากการออกกำลังกายนอกจากจะส่งเสริมให้ร่างกายมีความแข็งแรงแล้วยังช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้า ด้วยการปั่นจักรยานเพื่อนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความนี้นำเสนอเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงพลังงานกลจากการปั่นจักรยานไปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ส่วนที่ 2 ของบทความอธิบายเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ส่วนที่ 3 แสดงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ส่วนที่ 4 การจำลองการทำงานชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ส่วนที่ 5 การทดสอบชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ส่วนที่ 6 ผลการทดสอบ และส่วนที่ 7 สรุปผลการทดสอบ

2. เทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

เทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 จักรยานทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานกล ส่วนที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า โดยโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 สเตเตอร์จะมีแม่เหล็กถาวรติดตั้งไว้ภายใน ส่วนที่ 2 โรเตอร์ประกอบไปด้วยขดลวด 3 ชุด วางทำมุมกัน 120 องศา ซึ่งแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสและใช้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า 3 เฟสทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ [2, 3] หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับยกระดับแรงดัน ส่วนที่ 3 วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังระบบโครงข่ายไฟฟ้า



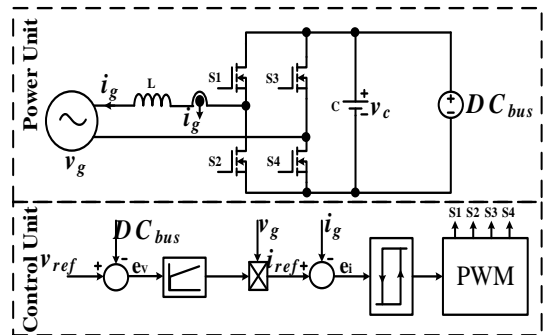
รูปที่ 1 ชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

3. หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

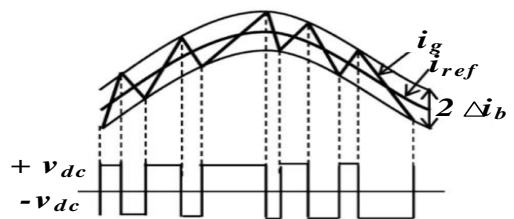
การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟสแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ วงจรภาคกำลังและวงจรภาคควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2 วงจรภาคกำลังด้านซ้ายมือของรูปคือระบบโครงข่ายไฟฟ้า ส่วนถัดมาเป็นตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้า ส่วนถัดมาเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟส และส่วนสุดท้ายด้านขวามือของรูปคือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรภาคควบคุมจะแบ่งการควบคุมเป็น 2 ส่วน คือการควบคุมแรงดันดีซีบัส และการควบคุมกระแส โดยการควบคุมแรงดันจะนำแรงดันอ้างอิง (v_{ref}) มาเปรียบเทียบกับแรงดันดีซีบัส ค่าความผิดพลาด (e_v) จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมแบบพีไอ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้คูณกับแรงดันของระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_{ref}) การควบคุมกระแสจะนำสัญญาณกระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_g) ค่าความผิดพลาด (e_i) จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมกระแส การควบคุมกระแสจะใช้เทคนิคฮิสเทอรีซิส [4-11] เปิด-ปิด การทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ตามการเคลื่อนตัวของปริมาณกระแสตามขอบเขตกระแสบน และขอบเขตกระแสล่าง โดยความกว้างของแบนมีค่าเท่ากับ ($2\Delta i_b$) ผลที่ได้จะเป็นรูปแบบของการ ปิด-เปิด สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยมีลักษณะกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้างดังรูปที่ 3



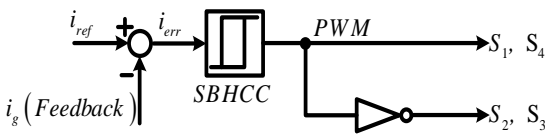
รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส



รูปที่ 3 สัญญาณการสวิตช์ของฮิสเทอรีซิสแบบซิงเกิลแบนด์



รูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสวิตช์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสแบบซิงเกิลแบนด์ โดยกระแสอ้างอิง (i_{ref}) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_g) ซึ่งผลต่างที่ได้คือค่าความผิดพลาด (i_{err}) จะถูกส่งเข้าไปที่วงจรถ่ายยิบฮิสเตอร์ซิสโดยสัญญาณด้านออกมีลักษณะเป็นสัญญาณพีดีบีเอ็ม (PWM) โดยเมื่อกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นบวก วงจรถ่ายยิบจะส่งสัญญาณให้ S1, S4 ทำงานและเมื่อกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นลบ วงจรถ่ายยิบจะส่งสัญญาณให้ S2, S3 ทำงาน ซึ่งสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในบทความนี้ใช้ MOSFET กระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (i_g) เคลื่อนที่ติดตามกระแสอ้างอิง (i_{ref}) โดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในแถบความกว้างฮิสเตอร์ซิสที่ได้กำหนดไว้ โดยกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ได้นั้นจะมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ซอชด์ ซึ่งมีมุมต่างเฟสกับสัญญาณแรงดัน 180 องศา ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ามี่ค่าเป็นลบ (จ่ายพลังงานให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า)



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสวิตช์โดยใช้การควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสแบบซิงเกิลแบนด์

เมื่อสัญญาณสวิตช์สั่งให้มอสเฟตทำงานเป็นคู่สลับกันสามารถคำนวณหาอัตราส่วนมอดูเลชันได้จากสมการที่ (1) [12]

$$m = \frac{\sqrt{2} \times V_g}{V_{dc}} \tag{1}$$

เมื่อ m คือ อัตราส่วนการมอดูเลชัน V_g คือ ค่ายอดของแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุต ความถี่สวิตช์เฉลี่ยในกรณีใช้การควบคุมกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮิสเตอร์ซิสแบบซิงเกิลแบนด์แสดงในสมการที่ (2) [12]

$$f_{Avg} = \frac{V_{dc}}{4hL} \left(1 - \frac{1}{2}m^2 \right) \tag{2}$$

เมื่อ f_{Avg} คือ ความถี่การสับสวิตช์เฉลี่ย h คือ ความกว้างของแบนด์ L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ ค่าวนค่าตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (3) [12]

$$L = \frac{V_{dc}}{4hf_{Avg}} \left(1 - \frac{1}{2}m^2 \right) \tag{3}$$

วงจรมิตทริกเกอร์เป็นวงจรถ่ายยิบแบบแรงดันซึ่งมีการต่อป้อนกลับแบบบวก [13] ดังรูปที่ 5 แรงดันอินพุต v_i จะมีการกระตุ้นแรงดันเอาต์พุต v_o ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่ขั้วอินพุตทั้งสอง โดยที่ระดับแรงดันเหล่านี้คือแรงดันเทรลโสลต์ด้านสูง (V_{UT}) และแรงดันเทรลโสลต์ด้านต่ำ (V_{LT}) ผลต่างของระดับแรงดันทั้งสองนี้เรียกว่า ความกว้างของฮิสเตอร์ซิส สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเหล่านี้ได้โดยสมมติว่าแรงดันเอาต์พุต v_o เท่ากับ V_{+SAT}



ดังนั้น แรงดันที่ขาเข้าไม่กลับเฟส (+) จะมีค่าตามสมการที่ (4)

$$V_{UT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{+SAT} \quad (4)$$

เมื่อแรงดันเอาต์พุต v_o เท่ากับ V_{-SAT} แรงดันที่ขาเข้าไม่กลับเฟส (+) จะมีค่าเป็นตามสมการที่ (5)

$$V_{LT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{-SAT} \quad (5)$$

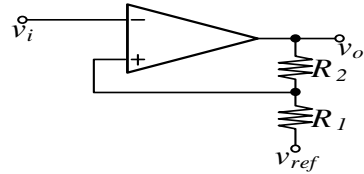
ความกว้างของฮิสเทอรีซิส V_H ในกรณีที่ขนาดของ V_{+SAT} มีขนาดเท่ากับ V_{-SAT} สามารถหาค่า V_H ได้จากสมการที่ (6)

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} \quad (6)$$

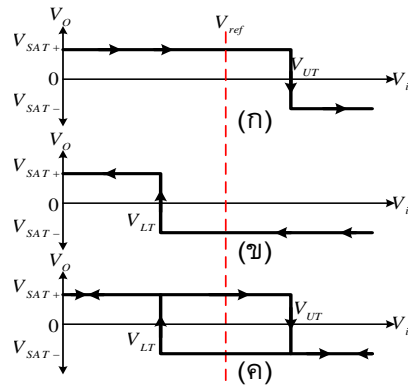
แรงดันอินพุต v_i มีค่าน้อยกว่า V_{UT} แรงดันเอาต์พุต v_o ก็ยังคงมีค่าเป็น V_{+SAT} เมื่อ v_i มาถึงจุดที่มากกว่า V_{UT} เอาต์พุตจะเปลี่ยนเป็น V_{-SAT} และแรงดันเอาต์พุตจะยังคงรักษาระดับแรงดันอยู่ที่ ค่านี้นานเท่าที่ $v_i > V_{UT}$ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และแรงดันอินพุต v_i จะต้องมีค่าน้อยกว่า V_{LT} เพื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตจาก V_{-SAT} เป็น V_{+SAT} ตามที่แสดงในรูปที่ 6 (ข) คุณสมบัติการส่งถ่ายของวงจรมิตทริกเกอร์ที่สมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 6 (ค)

ตัวควบคุมแบบพีไอ เป็นการนำเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบพีและตัวควบคุมแบบไอมารวมกัน สัญญาณด้านเอาต์พุตดังแสดงในสมการที่ (7) [12]

$$V_{OUT}(t) = G_p \times V_{in}(t) + \frac{1}{T} \int_0^t V_{in}(T) dT \quad (7)$$



รูปที่ 5 วงจรมิตทริกเกอร์

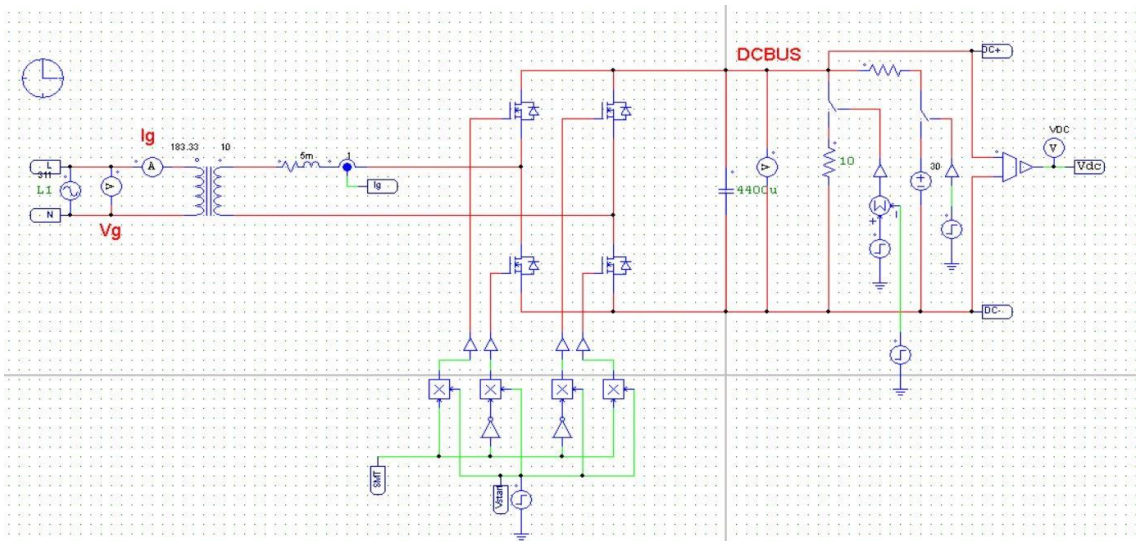


รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติการส่งถ่ายของวงจรมิตทริกเกอร์

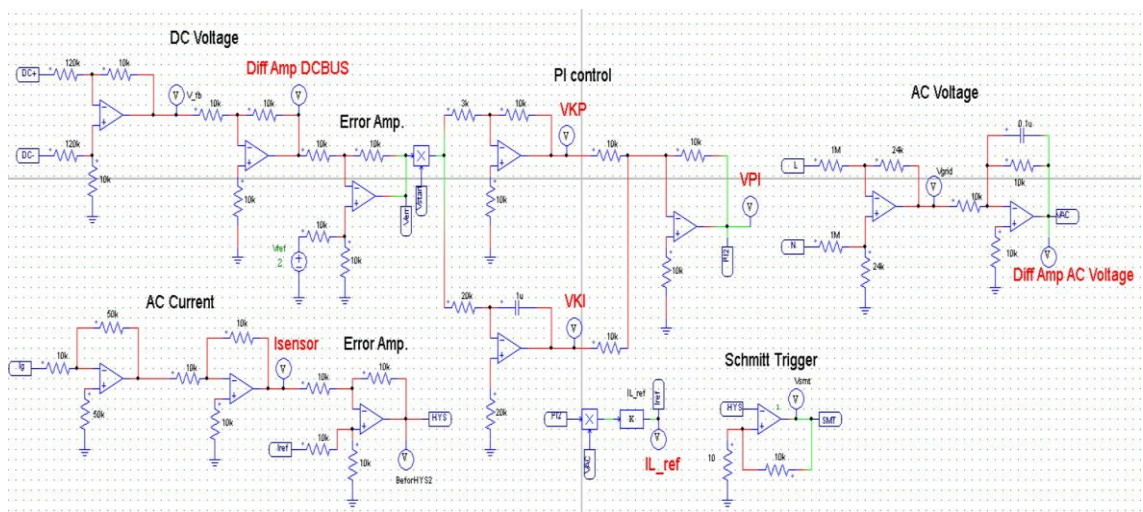
ระบบควบคุมแบบพีไอของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส เป็นระบบควบคุมแบบอนาล็อก ซึ่งใช้ออปแอมป์ในการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ

4. การจำลองการทำงานชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การจำลองการทำงานชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบบระบบควบคุมและตรวจสอบสถานะ การทำงานด้วยโปรแกรม PSIM โดยจำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ซึ่งแบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกคือวงจรภาคกำลังดังแสดงในรูปที่ 7 ส่วนที่ 2 วงจรภาคควบคุมดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 วงจรแสดงการจำลองการทำงานวงจรภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบริเวณระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส



รูปที่ 8 วงจรแสดงการจำลองการทำงานภาคควบคุมของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบริเวณระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส

โดยทำการจำลองการทำงานเป็น 2 โหมด ได้แก่ โหมดเรียงกระแสจำลองการทำงานแบบทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ คือแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

และโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบริเวณโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟสคือแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรภาคกำลังดังแสดงในรูปที่ 7 ประกอบด้วยด้านซ้ายมือคือระบบโครงข่ายไฟฟ้า



จุดวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะถูกส่งไปยังภาคควบคุม ส่วนถัดมาคือหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ยกแรงดันให้สูงขึ้นส่วนถัดมาคือตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้าให้เรียบขึ้น ส่วนถัดมาคือวงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ และ ส่วนสุดท้ายคือดีซีชีบัส โดยจำลองการทำงานในสภาวะมีโหลดและไม่มีโหลด รูปที่ 8 แสดงวงจรภาคควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ประกอบด้วย DC Voltage ทำหน้าที่วัดแรงดันที่ดีซีชีบัส เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ส่วนถัดมาเป็นวงจรควบคุมแบบพีไอ การปรับค่าพีไอใช้วิธีการ Ziegler and Nichols [14-16] โดยสัญญาณที่ออกจากวงจรควบคุมแบบพีไอจะถูกนำมาคูณกับวงจร AC Voltage ซึ่งเอาต์พุตที่ได้คือสัญญาณกระแสอ้างอิง ซึ่งสัญญาณนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ วงจร AC Current ซึ่งเอาต์พุตจะถูกส่งไปยังวงจร Schmitt Trigger เพื่อสร้างสัญญาณสวิตซ์

4.1 ผลการจำลองการทำงานในโหมดเรียงกระแสและโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้า

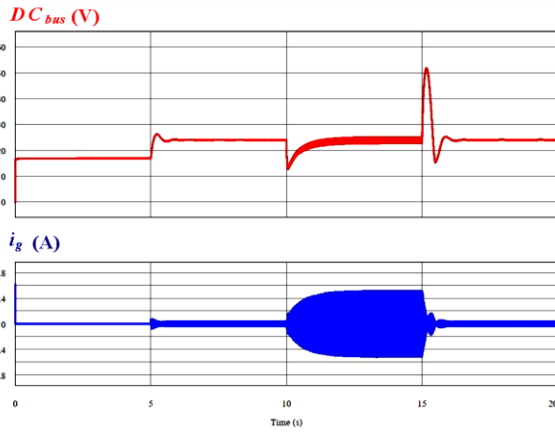
การจำลองแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ช่วงคือ ช่วงเวลา 0 ถึง 5 วินาที เป็นการทดสอบการทำงานในโหมดเรียงกระแส แรงดันที่ดีซีชีบัส 16.9 โวลต์และกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามียค่าใกล้เคียงศูนย์ ช่วงเวลา 5 ถึง 10 วินาที เป็นการจำลองการทำงานในโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ขณะไม่มีโหลด โดยยกแรงดันที่ดีซีชีบัสขึ้นจาก 16.9 โวลต์เป็น 24 โวลต์ และกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามียค่า 0.1 แอมแปร์ ช่วงเวลา 10 วินาทีถึง 15 วินาที เป็นการจำลองการ

ทำงานในโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ขณะมีการต่อโหลด เมื่อมีต่อโหลดแรงดันดีซีชีบัสตกลงจาก 24 โวลต์เหลือ 16 โวลต์ และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 24 โวลต์ และกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.58 แอมแปร์ ช่วง 15 ถึง 20 วินาที เป็นการจำลองการทำงานในโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ขณะปลดโหลดออกทันที เมื่อปลดโหลดกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้แรงดันดีซีชีบัสเกิดโอเวอร์ชู้ตขึ้นโดยมีขนาด 52 โวลต์และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 24 โวลต์

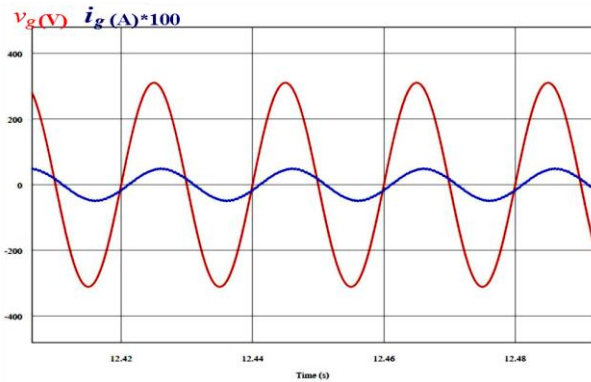
รูปที่ 10 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในโหมดทบทระดับแรงดันหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะมีโหลด เส้นสีแดงแสดงสัญญาณแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยแรงดันมีค่า 220 โวลต์ เส้นสีน้ำเงินแสดงสัญญาณกระแสระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยสัญญาณกระแสมีค่า 0.38 แอมแปร์ และมีการเลื่อนเฟส 20 องศาทางไฟฟ้า

4.2 ผลการจำลองในโหมดดีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

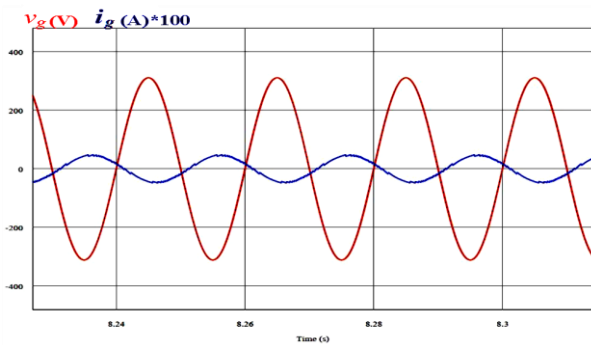
รูปที่ 11 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในโหมดดีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า เส้นสีแดงแสดงสัญญาณแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยแรงดันมีค่า 220 โวลต์ เส้นสีน้ำเงินแสดงสัญญาณกระแสระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยสัญญาณกระแสมีค่า 0.38 แอมแปร์มีมุมเฟสต่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้าและมีการเลื่อนเฟส 20 องศา (จ่ายพลังงานให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า)



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันดีซีบัสและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในโหมดเรียงกระแสและโหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 10 สัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในโหมดเรียงกระแสและโหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 11 สัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบริเวณระบบโครงข่ายไฟฟ้า



5. การทดสอบชุดทรานเนอร์จิกยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

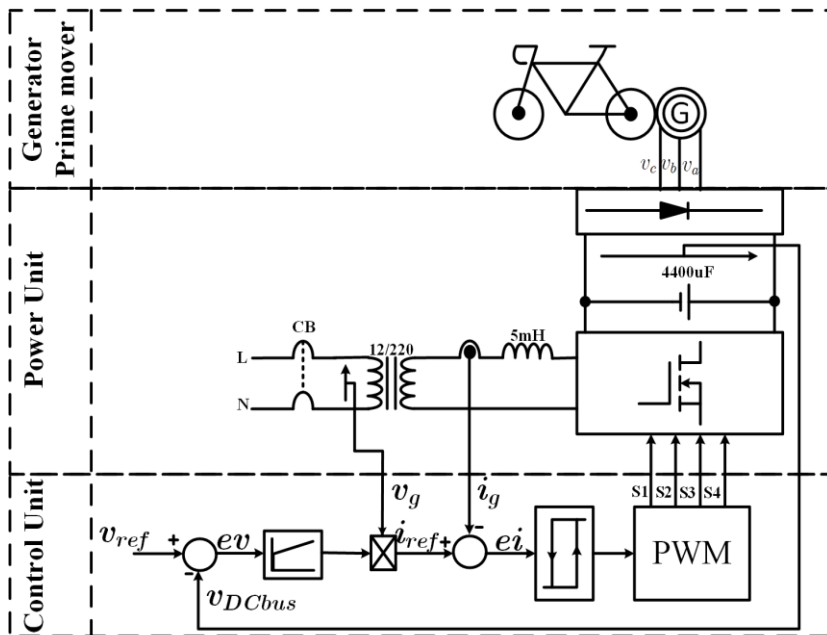
บล็อกไดอะแกรมทรานเนอร์จิกยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเครื่องต้นกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่สองภาคกำลังวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และส่วนที่สามภาคควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 12 พารามิเตอร์ทรานเนอร์จิกยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 13 แสดงการติดตั้งจิกยานเข้ากับชุดทรานเนอร์จิกยานไฟฟ้าเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า เมื่อบันจิกยาน ล้อจิกยานที่สัมผัสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยตรง

ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน ซึ่งส่วนที่หมุนเป็นส่วนของสเตเตอร์ ทำให้มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดขดลวดทั้ง 3 ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทรานเนอร์จิกยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

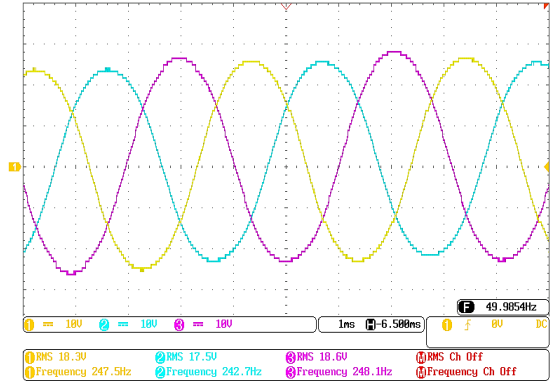
พารามิเตอร์	พิกัด
พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	250 วัตต์
แรงดันดีซีบัส	24 โวลต์
พิกัดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส	500 วัตต์
พิกัดแรงดันด้านออก	12 โวลต์
พิกัดหม้อแปลงยกกระต๊บบแรงดัน	150 โวลต์แอมแปร์



รูปที่ 12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของทรานเนอร์จิกยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า



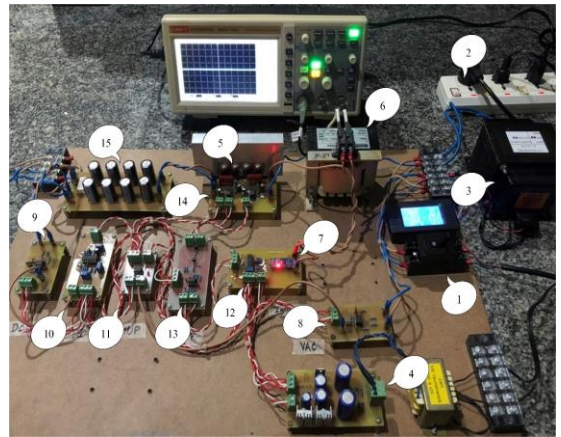
รูปที่ 13 ชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้า



รูปที่ 14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่ออกมาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

รูปที่ 14 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแรงดันดังกล่าวจะถูกเรียงกระแสด้วย วงจรบริดจ์เรกติไฟร์ 3 เฟส ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส

รูปที่ 15 แสดงระบบที่ใช้ในการทดสอบเทรนเนอร์จักรยาน เชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย (1) เซอร์คิตเบรกเกอร์ 1 เฟส (2) สวิตช์เปิด-ปิดแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (3) หม้อแปลงไฟฟ้า 220/12 โวลต์, 150 โวลต์-แอมแปร์ (4) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ± 15 โวลต์ และ $+5$ โวลต์ (5) วงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส (6) ตัวเหนี่ยวนำ 5 มิลลิเฮนรี่ (7) เซนเซอร์วัดกระแส (8) วงจรขยายความแตกต่างฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (9) วงจรขยายความแตกต่างฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (10) วงจรควบคุมแบบพีไอ (11) วงจรคุณสมบัติแอนะล็อก (12) วงจรปรับปรุงสัญญาณกระแส (13) วงจรสมิตทริกเกอร์ (14) วงจรขั้วเกต และ (15) คาปาซิเตอร์ที่บัสไฟตรง



รูปที่ 15 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

6. ผลการทดสอบ

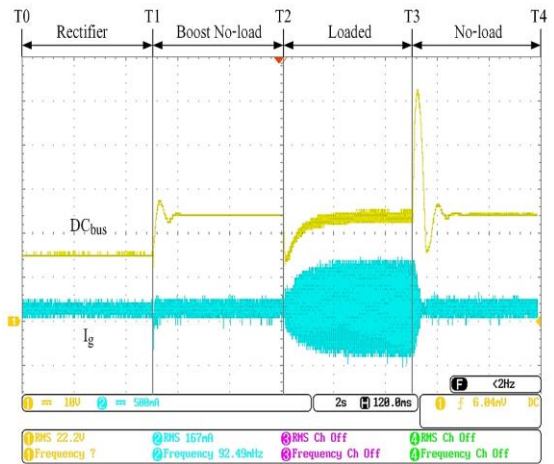
จากรูปที่ 15 ทำการทดสอบใน 2 กรณีคือการทดสอบในสภาวะโหมดเรียงกระแสและโหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบัสคอนเวอร์เตอร์ และการทดสอบในโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนโครงข่ายไฟฟ้า โดยผลการทดสอบจะอธิบายหัวข้อถัดไป



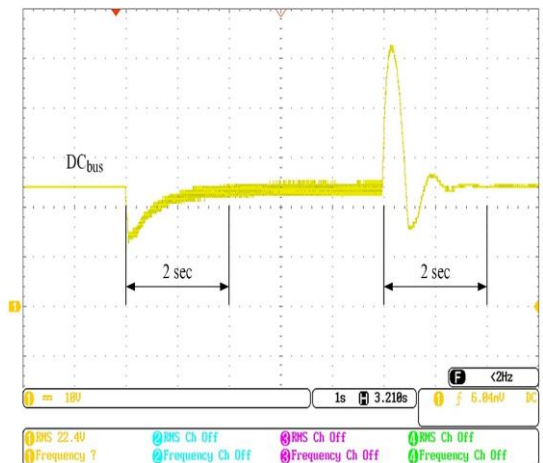
6.1 ผลการทดสอบในสภาวะโหมดเรียงกระแสและโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 4 ช่วงคือ ช่วง T0 ถึง T1 เป็นการทดสอบการทำงานของโหมดเรียงกระแส โดยแรงดันที่ตีชีบัสมีค่า 16.9 โวลต์และกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงศูนย์ ช่วง T1 ถึง T2 เป็นการทดสอบในโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีโหลด โดยแรงดันตีชีบัสเพิ่มจาก 16.9 โวลต์เป็น 24 โวลต์ ช่วง T2 ถึง T3 เป็นการทดสอบในโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ ขณะมีการต่อโหลด จะเห็นได้ว่าเมื่อมีต่อโหลดแรงดันตีชีบัส (DC_{bus}) จะตกลงจาก 24 โวลต์เหลือ 16 โวลต์และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 24 โวลต์ในเวลา 2 วินาที และกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 0.38 แอมแปร์ ช่วง T3 ถึง T4 เป็นการทดสอบในโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบูสคอนเวอร์เตอร์ ขณะปลดโหลดออกทันที เมื่อปลดโหลดกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟาลดลงอย่างรวดเร็วทำให้แรงดันตีชีบัสเกิดโอเวอร์ชhootสูงขึ้นและสามารถกลับมารักษาระดับแรงดันที่ 24 โวลต์ในเวลา 2 วินาที

รูปที่ 17 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตีชีบัส เมื่อทำการเพิ่มโหลด แรงดันตีชีบัสตกลงจาก 24 โวลต์เหลือ 16 โวลต์ และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 24 โวลต์ในเวลา 2 วินาที เมื่อทำการปลดโหลดแรงดันตีชีบัสมีค่าโอเวอร์ชhoot 52 โวลต์และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 24 โวลต์ เวลา 2 วินาที โดยแรงดันโอเวอร์ชhootที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าต่ำกว่าพิกัดแรงดันที่มอสเฟตสามารถทนได้จึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์



รูปที่ 16 สัญญาณแรงดันตีชีบัสและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในโหมดเรียงกระแสและโหมดทบทระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 17 การเข้าสู่ภาวะคงตัวในสภาวะมีโหลดและไม่มีโหลดของแรงดันตีชีบัส



รูปที่ 18 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในการทดสอบโหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบวสคอนเวอร์เตอร์ขณะมีการต่อโหลดโดยแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้าวัดได้ 243 โวลต์เส้นสีเหลือง กระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าวัดได้ 0.383 แอมแปร์เส้นสีฟ้า และกำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 109 โวลต์-แอมแปร์ โดยสัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีมุมต่างเฟส 22 องศาทางไฟฟ้า ส่งผลให้มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.92 ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการคำนวณมีค่า 101.06 วัตต์

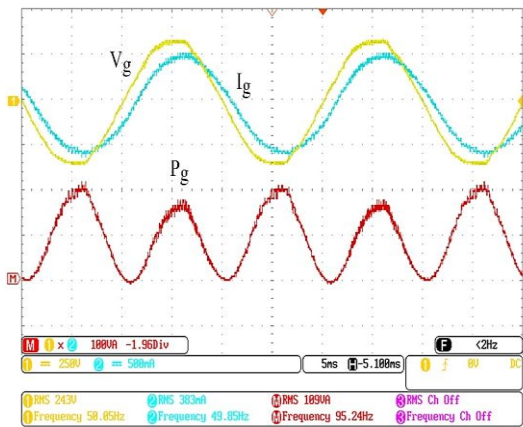
รูปที่ 19 แสดงค่าที่วัดจากพาวเวอร์มิเตอร์ซึ่งแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 234 โวลต์ กระแสระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 0.51 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าจริง 109 วัตต์ พลังงาน 14 วัตต์-ชั่วโมง ความถี่ 50 เฮิร์ต ค่าตัวประกอบกำลัง 0.92

6.2 ผลการทดสอบในโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

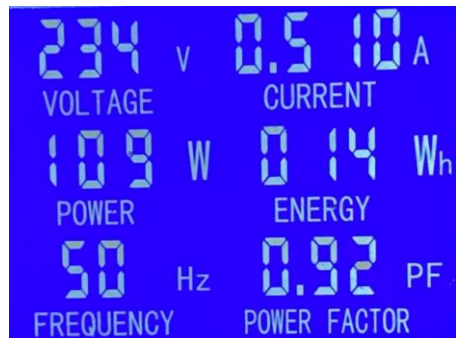
การทดสอบในโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าทำโดยการปั่นจักรยานที่อยู่บนชุดเทรนนอร์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส เมื่อแรงดันที่ดีซีบัลลัสสูงกว่าแรงดันอ้างอิงจะส่งผลให้ค่ากระแสอ้างอิงมีค่าเป็นลบ ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นมุมต่างเฟสจากแรงดันของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเป็นลบ (จ่ายพลังงานให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า)

จากรูปที่ 20 แสดงสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าปรากฏในโหมดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบ

โครงข่ายไฟฟ้า โดยแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้าวัดได้ 240 โวลต์เส้นสีเหลือง กระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าวัดได้ 0.372 แอมแปร์เส้นสีฟ้า และกำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 109 โวลต์-แอมแปร์เส้นสีแดง โดยสัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีมุมต่างเฟส 183.6 องศาทางไฟฟ้า ส่งผลให้มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการคำนวณมีค่า 107.91 วัตต์



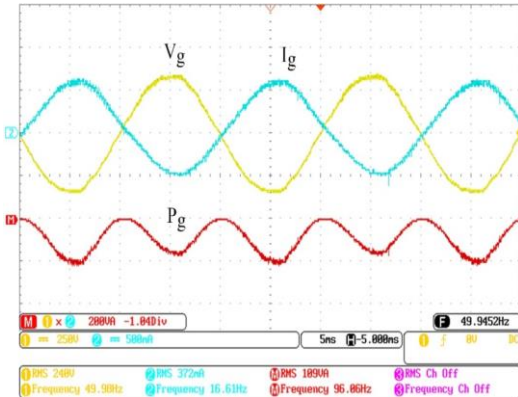
รูปที่ 18 สัญญาณแรงดันและกระแสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในการทดสอบโหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือบวสคอนเวอร์เตอร์ขณะมีการต่อโหลด



รูปที่ 19 ปริมาณทางไฟฟ้าจากการทดสอบในโหมดทบระดับแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด



บทความวิจัย



รูปที่ 20 สัญญาณแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ปรากฏในโหมตอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบ โครงข่ายไฟฟ้า

รูปที่ 21 แสดงค่าที่วัดจากพาวเวอร์มิเตอร์ ซึ่งแรงดันระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 235 โวลต์ กระแสระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่า 0.465 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าจริง 107 วัตต์ พลังงาน 4 วัตต์-ชั่วโมง ค่าตัวประกอบกำลัง 0.98 สามารถคำนวณหาค่า ประสิทธิภาพจากสมการที่ (8)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

เมื่อ

η คือ ประสิทธิภาพ

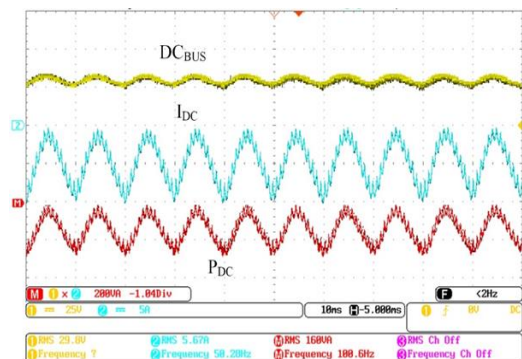
P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าด้านออก

P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าด้านเข้า

จากรูปที่ 22 กำลังไฟฟ้าดีซีบัสคือกำลังไฟฟ้าด้านเข้าอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 168 วัตต์ และเมื่อนำกำลังไฟฟ้าด้านออกมามา คำนวณหาประสิทธิภาพ พบว่าประสิทธิภาพของวงจรรินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟส มีค่าเท่ากับ 63.7 %



รูปที่ 21 ปริมาณทางไฟฟ้าในโหมตอินเวอร์เตอร์ เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า



รูปที่ 22 สัญญาณแรงดันดีซีบัส กระแสดีซีบัส และ กำลังไฟฟ้าดีซีบัส ในโหมตอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า

7. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อผู้ใช้งานปั่นจักรยานเพื่อออกกำลังกายทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับจากนั้นถูกเรียงกระแสด้วยวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับวงจรรินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ชนิด 1 เฟส โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแส อิสเตอร์ซีสแบบซิงเกิลแบนด์ จากการทดสอบ



ชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงได้ 109 วัตต์ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.92 ในโหมดบัสคอนเวอร์เตอร์ขณะมีการต่อโหลด และการทดสอบชุดเทรนเนอร์จักรยานเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปยังระบบโครงข่ายไฟฟ้า 107 วัตต์ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.98 โดยประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด 1 เฟสมีค่าเท่ากับ 63.7 %

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Sukwatjane, Exercise for elders, Srinakharinwirot Research and Development Journal of Humanities and Social Sciences, 2012, 216-223. (in Thai)
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A.V. Timbus, Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5), 1398-1409.
- [3] J. Benjanarasut and B. Neammanee, The d- q-axis control technique of single phase grid connected converter for wind turbines with MPPT and anti-islanding protection, The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI), Proceeding, 2011, 649-652.
- [4] B. Pradyumna Kumar, S. Anurag and P. Monalisa, Design and implementation of a single-band hysteresis current controlled H-bridge inverter, International Conference on Power Electronics (IEEE-2020), Proceeding, 1-6.
- [5] Y. Xue, L. Chang, S.B. Kjaer, J. Bordonau, and T. Shimizu, Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators, IEEE transactions on Power Electronics, 2004, 19(5), 1305-1314.
- [6] J.K. Singh and R.K. Behera, Hysteresis current controllers for grid connected inverter, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Proceeding, 2018, 1-6.
- [7] A.I. Putri, A. Rizqiawan, F. Rozzi, N. Zakkia, Y. Haroen and P.A. Dahono, A hysteresis current controller for grid-connected inverter with reduced losses, 2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE), Proceeding, 2016, 167-170.
- [8] T. Nguyen-Van, R. Abe, and K. Tanaka, A digital hysteresis current control for half-bridge inverters with constrained switching frequency, Energies, 2017, 1-13.
- [9] P. Dahono, New hysteresis current controller for single-phase full bridge inverters, IET Power Electronics, 2009, 585 - 594.



- [10] Y. Kobayashi and H. Funato, Current control method based on hysteresis control suitable for single phase active filter with LC output filter, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Proceeding, 2008, 479-484.
- [11] G.H. Bode and D.G. Holmes, Implementation of three level hysteresis current control for a single phase voltage source inverter, 31st Annual Power Electronics Specialists Conference, Proceeding, 2000, 33-38.
- [12] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, Power electronics converters applications and design, 3rd Ed., Wiley, NY, USA, 2002.
- [13] P. Rama Krishna, Kakarla Hari Kishore and M. Swathi, A low-power reconfigurable ADC for bioimpedance monitoring system, Electronic Devices, Circuits and Systems for Biomedical Applications, 2021, 13-15.
- [14] K.H. Raut and S.R. Vaishnav, Performance analysis of PID tuning techniques based on time response specification, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 2014, 2(1), 616-619.
- [15] G. Mallesham, S. Mishra and A.N. Jha, Ziegler-Nichols based controller parameters tuning for load frequency control in a microgrid, 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, Proceeding, 2011, 1-8.
- [16] A. Ratna and H. Yulita, Implementation of ziegler-nichols PID tuning method on stabilizing temperature of hot-water dispenser, 16th International Conference on Quality in Research (QIR), Proceeding, 2019, 1-5.

การปรับปรุงความแข็งของกราไฟต์ผ่านการเสริมแรงด้วยซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โดยวิธีการแทรกซึมสารละลาย

นิธิรุจน์ พงศ์สิริเมธี^{*} ลักษิกา สุขะวงษ์ และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์^{*}

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{*} ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: somsaksi@sut.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 มกราคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 11 เมษายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 24 เมษายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: กราไฟต์เป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงแต่มีข้อจำกัดในด้านความแข็งที่ค่อนข้างต่ำในการศึกษานี้ ได้ทำการพัฒนาคอมโพสิตกราไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 โดยการแทรกซึมสารละลายซิลิคอนลงในผิวของกราไฟต์ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการแทรกซึมที่แตกต่างกัน 5, 10 และ 15 นาที โดยใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 1,450 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ผลการวิจัยพบว่าอนุภาค $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ และ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ปรากฏอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตกราไฟต์ และมีปริมาณที่มากขึ้นในระยะเวลาการแทรกซึมที่ 15 นาที และการเสริมแรงด้วย Si_3N_4 มีผลต่อรูพรุนของกราไฟต์ โดยทำให้ความพรุนลดลงและความแข็งของกราไฟต์เพิ่มขึ้น 53.98%, 140.18%, และ 217.49% ในเวลาการแทรกซึม 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความแข็งของกราไฟต์เสริมแรงด้วย Si_3N_4 และใช้ระยะเวลาการแทรกซึมที่ 15 นาที ให้ค่าสูงสุดที่ 217.49% ซึ่งเป็นผลจากการกระจายตัวของ Si_3N_4 ในรูพรุนของกราไฟต์ และส่งผลให้ค่าความแข็งที่สูงที่สุดคือ 15.07 GPa การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและการเสริมแรงด้วย Si_3N_4 นี้ทำให้ความแข็งของกราไฟต์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้มีความสำคัญในการพัฒนาวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอและความแข็งของวัสดุ

คำสำคัญ: กราไฟต์; การเสริมแรงด้วย Si_3N_4 ; การแทรกซึม; ความแข็ง; วัสดุคอมโพสิต

Hardness Improvement on Graphite by Silicon Nitride (Si_3N_4) Reinforcement using Slurry Infiltration

Nitirut Phongsirimethi, Laksika Suyawong and Somsak Siwadamrongpong*

School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding author, E-mail: somsaksi@sut.ac.th

Received: 30 January 2024; Revised: 11 April 2024; Accepted: 24 April 2024

Online Published: 21 August 2024

Abstract: Graphite was an attractive material for high-temperature applications, however, there was limited in its relatively low hardness. In this study, a reinforced graphite composite with Si_3N_4 was developed through infiltrating a silicon slurry onto the graphite surface. The slurry infiltration process was carried out for different durations: 5, 10, and 15 minutes, then sintered at a high temperature of $1,450\text{ }^\circ\text{C}$ in a nitrogen atmosphere. The research revealed the presence of $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ and $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ particles in the microstructure of the graphite composite, with higher quantities observed after 15-minute infiltration. The Si_3N_4 reinforcement influenced the porosity of the graphite, resulting in a reduction in porosity and an increase in hardness by 53.98%, 140.18%, and 217.49% after infiltration durations of 5, 10, and 15 minutes, respectively. Notably, the maximum enhancement in hardness (217.49%) was achieved with Si_3N_4 reinforcement and a 15-minute infiltration, attributed to the effective dispersion of Si_3N_4 within the graphite porosity. This led to a remarkable increase in hardness, reaching a peak value of 15.07 GPa. The improvement in mechanical properties and the reinforcement with Si_3N_4 have significantly enhanced the hardness of the graphite composite, making it crucial for developing high-performance materials with abrasion resistance and increased mechanical strength.

Keywords: Graphite; Si_3N_4 reinforcement; Infiltration; Hardness; Composite material



1. บทนำ

กราฟไฟต์มีสมบัติที่โดดเด่นในด้านการนำความร้อนและไฟฟ้าสูง (149-160 W/mK และ 12.435 ± 0.021 S/m ที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ) คุณสมบัติทนไฟ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ทนต่อสารเคมี และมีสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี [1] ทำให้กราฟไฟต์ถูกนำมาใช้งานหลากหลายด้าน เช่น สารหล่อลื่น ถ้วยใส่ตัวอย่าง สารขัดเงา แบตเตอรี่ แปร่งถ่านสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า และแกนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น [2]

อย่างไรก็ตาม กราไฟต์นั้นยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องความแข็งที่ต่ำ และเนื่องจากความแข็งของวัสดุนี้สามารถส่งผลต่อความทนทานต่อการสึกหรอ โดยวัสดุที่มีความแข็งสูงสามารถต้านทานต่อการเสียดทานและการกัดกร่อนที่สูงขึ้น [3, 4] ดังนั้นการใช้งานกราฟไฟต์ในด้านโทรโพลีจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานกราฟไฟต์ในด้านโทรโพลี จึงได้มีการศึกษาหาวิธีการเพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกหรอ ซึ่งจะนำไปสู่การยืดอายุการใช้งานของส่วนประกอบที่ผลิตจากกราฟไฟต์ในงานด้านโทรโพลีให้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และยังคงช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาได้อีกด้วย

จากการศึกษางานวิจัย พบว่า หนึ่งในวิธีการที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของกราฟไฟต์คือการผสมผสานกับวัสดุอื่นที่มีความแข็งแรงสูง หรือมีการเพิ่มความแข็งของกราฟไฟต์สามารถทำได้โดยใช้วัสดุที่มีอนุภาคแข็งกว่ากราฟไฟต์ [5] เช่น อนุภาคของ Si_3N_4 ที่มีความแข็งประมาณ 35.31 GPa [6] โดย Si_3N_4 ได้ถูกนำมาใช้เสริมแรงให้กับเส้นใยคาร์บอน ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความแข็งให้กับเส้นใยคาร์บอนได้ [7, 8] และมีการ

ใช้งาน Si_3N_4 กับวัสดุคอมโพสิตอื่น ๆ โดยให้ผลต่อความแข็งในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่น คอมโพสิตที่เสริมความแข็งให้กับอะลูมิเนียม ทองแดง และโพลีเมอร์ [9-12] นอกจากนี้ยังมีการรายงานการเสริมแรงของกราฟไฟต์โพลีคริสตัลไลน์ที่ขึ้นรูปโดยใช้การแทรกซึมของซิลิคอนแบบปฏิกิริยาละลายเพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอของเมทริกซ์กราฟไฟต์

การแทรกซึมแบบปฏิกิริยาละลายช่วยให้สามารถสังเคราะห์วัสดุเซรามิกได้อย่างรวดเร็วและมีต้นทุนต่ำ เช่น การแทรกซึมและไพโรไลซิสของโพลีเมอร์ (Polymer Infiltration and Pyrolysis: PIP) [13] การแทรกซึมของไอเคมี (Chemical Vapor Infiltration: CVI) [14] การแทรกซึมของปฏิกิริยาหลอมละลาย (Reactive Melt Infiltration: RMI) [15] รีแอคชันบอนด์ (Reaction Bonded: RB) [16] การแทรกซึมของโซลเจล [17] และการแทรกซึมสารละลาย (Slurry Infiltration) [4] รวมทั้งการรวมกันของปฏิกิริยาเหล่านี้ [18] เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่า การแทรกซึมสารละลายเป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ประหยัด และใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ในการเสริมแรงด้วยวิธีการแทรกซึมสารละลายมีประสิทธิผลที่ดีในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิคอนกับไนโตรเจนและคาร์บอนในกระบวนการให้ความร้อน [19] โดยการแทรกซึมสารละลายนี้เป็นการใช้ผงซิลิคอน ซึ่งจะกระจายตัวในสารละลาย และแทรกซึมเข้าไปในบล็อกที่ประกอบเป็นเมทริกซ์ที่มีรูพรุน จากนั้นบล็อกที่เกิดการแทรกซึมจะถูกให้ความร้อนเพื่อสร้างปฏิกิริยาระหว่างผงซิลิคอนกับเมทริกซ์ [20] และเทคนิคนี้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างอนุภาค SiC และ Si_3N_4 โดยพบว่าการเสริมแรงด้วย Si_3N_4 มีความแข็งและสามารถต้านทาน



การสึกหรอได้ดีกว่าการเสริมแรงด้วย SiC แต่เมื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแล้วมีค่าที่ใกล้เคียงกัน [4]

ในการตรวจสอบการแทรกซึมสารละลายที่เข้าไปแทนที่ในรูพรุน การวัดความพรุนแบบ Quantitative Digital Image Analysis (QDIA) เป็นกระบวนการที่ใช้ภาพดิจิทัลเพื่อวัดปริมาณของสารต่าง ๆ ในภาพโดยการแบ่งภาพเป็นพื้นที่ตามสารต่าง ๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าความเข้มของสีหรือค่าความสว่างในภาพ เช่น การใช้ Grayscale Thresholding เพื่อแบ่งภาพออกเป็นพื้นที่ที่เป็นรูพรุน, คาร์บอน และซิลิคอน และวัดปริมาณของแต่ละสารโดยการนับจำนวนพิกเซลที่เป็นสารนั้น ๆ และหารด้วยจำนวนพิกเซลทั้งหมดในภาพ เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่เป็นสารนั้น ๆ ในภาพ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารและเข้าใจกระบวนการที่เกิดขึ้นในภาพได้อย่างชัดเจนและเชื่อถือได้ [21]

การก่อตัวของ Si_3N_4 สามารถเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาโดยตรงของซิลิคอนกับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1,400-1,450 °C จากกระบวนการไนไตรเดชัน [22] ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถเกิด Si_3N_4 ได้ 2 แบบคือ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ($\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$) และ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ($\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$) โดย $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่มีโครงสร้างคล้ายเข็ม (Needle) จะก่อตัวที่อุณหภูมิน้อยกว่า 1,400 °C และ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ โครงสร้างแบบละเอียด (Fine) จะก่อตัวในช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 1,450 °C และจะก่อตัวเป็น $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ หากอุณหภูมิสูงกว่า 1,450 °C [23] โดยในระหว่างการสร้าง Si_3N_4 นั้นมีการก่อตัวของ SiC โดยซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับกราฟไฟต์ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน และ

ระหว่างการทำปฏิกิริยานั้นซิลิคอนและกราฟไฟต์อาจเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,200 – 1,400 °C ได้แม้ว่าจะมีออกซิเจนที่มีความเข้มข้นต่ำมากก็ตาม (0.001%) ทำให้เกิดซิลิคอนสถานะไอ (Si) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังสมการที่ (1) และ (2) ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการสร้าง Si_3N_4 และสามารถก่อตัวเป็นนิวเคลียสของ $\beta\text{-SiC}$ ($\beta\text{-SiC}$) และวิสเกอร์ได้ [24, 25]



โดยสรุปกราฟไฟต์มีความแข็งค่อนข้างต่ำและสามารถสูญเสียความแข็งได้ง่ายในสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือในสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในการนำไปใช้ในงานที่ต้องการความทนทานสูง อนุภาค Si_3N_4 สามารถช่วยเสริมแรงให้กราฟไฟต์ได้ [26] อย่างไรก็ตาม การศึกษาความแข็งที่เกิดจากการเสริมแรงกราฟไฟต์ด้วย Si_3N_4 ยังพบได้น้อย ดังนั้นเพื่อการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งของกราฟไฟต์ให้สามารถต้านทานต่อการสึกหรอได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการแทรกซึมสารละลายซิลิคอนบนพื้นผิวของกราฟไฟต์ โดยจะทำความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงความแข็งและการเปลี่ยนแปลงด้านสัณฐานวิทยาของกราฟไฟต์ที่ได้รับการเสริมแรงด้วย Si_3N_4 และวัดระยะเวลาการแทรกซึมของซิลิคอนที่แทรกซึมเข้าไปภายในรูพรุนของกราฟไฟต์ด้วยระยะเวลาต่าง ๆ และประเมินความแข็งที่เกิดขึ้นหลังการเสริมแรงเปรียบเทียบกับกราฟไฟต์ที่ไม่ได้เสริมแรง



2. วิธีการดำเนินการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างกราฟไฟต์ขนาด 12×12×3 mm ทำการเตรียมผิวชิ้นงาน โดยขัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 800 1,200 และ 2,500 ตามลำดับ และขัดเงาด้วยผงเพชรขัดเงาขนาด 1 μm ขณะเดียวกันเตรียมสารละลายซิลิคอนโดยการผสมผงซิลิคอน (Si) (325 เมช, 99% Trace Metals Basis, Sigma-Aldrich) ในเอทานอล ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก กวนผสมด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นเติม Polyvinyl Butyral B-98 (Sigma-Aldrich) ปริมาณ 1.33 wt% ลงในสารละลายและกวนต่อเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อเตรียมตัวอย่างและสารละลายซิลิคอนแล้ว แच्छกราฟไฟต์ตัวอย่างในสารละลายซิลิคอนโดยวางในเครื่องสุญญากาศ ให้เกิดการแทรกซึมบนผิวของกราฟไฟต์เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที โดยใช้สุญญากาศแรงดัน 85 kPa หลังจากच्छกราฟไฟต์ในสารละลายซิลิคอนแล้ว นำกราฟไฟต์ขึ้นจากสารละลายและทำให้แห้งในสุญญากาศแรงดัน 85 kPa ใช้เวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่แห้งแล้วมาเผาในเตา (ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF18/300) ที่อุณหภูมิ 1,450 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตรา Heating – Cooling rate 400 °C/hr ควบคุมบรรยากาศในเตาด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) เพื่อสร้างการเสริมแรงด้วยซิลิคอนไนไตรต์ (Si_3N_4) โดยใช้อัตราการไหลไนโตรเจน 2 l/min

2.2 ดำเนินการทดสอบ

ทดสอบความแข็งของตัวอย่างด้วยไมโครวิกเกอร์ (Hv) (ยี่ห้อ Future-Tech รุ่น FM-310) ตามมาตรฐาน ASTM E 92 – 82 โดยใช้หัวกดเพชรพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุมรวมอยู่ที่ 136° ใช้น้ำหนักปกติ

2 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 12 วินาทีที่พื้นผิวของตัวอย่าง จำนวน 9 จุดต่อชิ้น โดยแต่ละจุดห่างกัน 4 มิลลิเมตร

โครงสร้างและระยะการแทรกซึมทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6010LV) โดยใช้โหมด Secondary Electrons และใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (Image Analysis Software) เพื่อวัดการกระจายและระยะที่ซิลิคอนแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของกราฟไฟต์ ในส่วนขององค์ประกอบธาตุของตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX) (ยี่ห้อ Oxford Instrument รุ่น X-Max 20) ด้วยแรงดันเร่ง 15 kV จากนั้นวิเคราะห์สารประกอบ โครงสร้างภายใน และสัดส่วนเฟสของตัวอย่าง โดยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction : XRD) (ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 ADVANCE) ในช่วงมุม 2 θ เท่ากับ 10 - 90° ใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ Cu-K α พลังงาน 40 keV และกระแส 40 mA

ตารางที่ 1 สัดส่วนเฟสที่วิเคราะห์ด้วย XRD และความพรุนของกราฟไฟต์ฐานและคอมโพสิตกราฟไฟต์

ตัวอย่าง	Graphite (wt%)	α - Si_3N_4 (wt%)	β - Si_3N_4 (wt%)	β -SiC (wt%)	ความพรุน (%)
กราฟไฟต์ฐาน	100	-	-	-	27
5 นาที	97.3	1.79	0.32	0.59	20
10 นาที	86.5	8.34	1.98	3.18	16
15 นาที	78.8	12.6	3.24	5.36	13



3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ระยะเวลาการแทรกซึมของสารละลาย

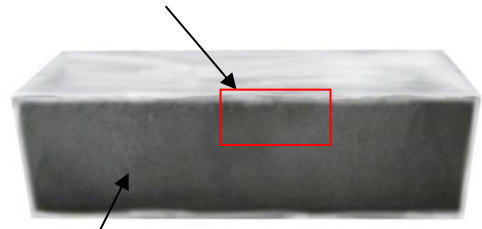
การแทรกซึมของ Si_3N_4 ภายในรูพรุนของกราไฟต์ ถูกเตรียมโดยวิธีการตัดขวาง (Cross-Section) ตัวอย่าง เพื่อให้เห็นระยะเวลาการแทรกซึมที่เกิดขึ้นภายในเนื้อกราไฟต์ ซึ่งลักษณะการตัดขวางจะเป็นไปตามรูปที่ 1 ระยะเวลาที่ Si_3N_4 แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนกราไฟต์ที่เวลา 5, 10 และ 15 นาที ดังรูปที่ 2 มีระยะของการแทรกซึมที่มากที่สุดประมาณ 20 μm , 60 μm และ 120 μm ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการแทรกซึมของ Si_3N_4 ในรูพรุนกราไฟต์เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาการแทรกซึมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจากการทดลองอาจกล่าวได้ว่า ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อระยะเวลาการแทรกซึมของ Si_3N_4 ในรูพรุนกราไฟต์

3.2 สมบัติทางโครงสร้างและทางกลของตัวอย่าง

สัณฐานวิทยาของกราไฟต์และคอมโพสิตกราไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งรูปที่ 3 (a) แสดงพื้นผิวของกราไฟต์ที่ไม่ได้เสริมแรง ประกอบด้วยเกรนและรูพรุนขนาดต่างกัน รูปที่ 3 (b) - (d) แสดงพื้นผิวของคอมโพสิตกราไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 พบว่ามีบริเวณที่เป็นสีเข้มและจาง โดยพื้นที่สีจางพบว่าเป็น Si_3N_4 โดยเกรนของตัวอย่างที่ถูกเสริมแรงมีลักษณะคล้ายกับรูพรุนของกราไฟต์ ซึ่งแสดงว่ารูพรุนของกราไฟต์ถูกเติมเต็มด้วย Si_3N_4 ในขณะที่ยังมีรูพรุนขนาดเล็กกว่า $\sim 5 \mu\text{m}$ ไม่มีการแทรกซึมหรือมีการแทรกซึมเล็กน้อย

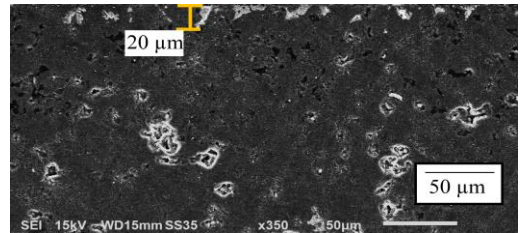
นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการกระจายตัวของ Si_3N_4 ค่อนข้างเป็นลักษณะเดียวกันกับการกระจายของ รูพรุน ดังนั้นความพรุนของคอมโพสิตกราไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 จึงต่ำกว่ากราไฟต์ฐาน ความพรุนที่วัดได้

บริเวณที่สังเกตระยะเวลาการแทรกซึม

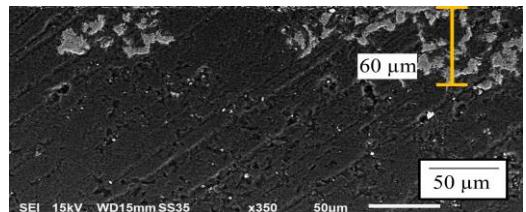


ด้านที่ตัด section

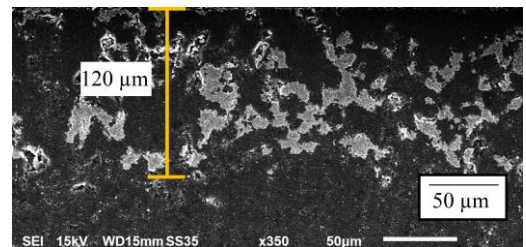
รูปที่ 1 ลักษณะ Cross-section ของตัวอย่างที่ใช้ในการสังเกตระยะเวลาการแทรกซึมของกราไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4



(a) 5 min



(b) 10 min



(c) 15 min

รูปที่ 2 ระยะเวลาการแทรกซึมของ Si_3N_4 ภายในรูพรุนของกราไฟต์ ณ เวลาต่าง ๆ

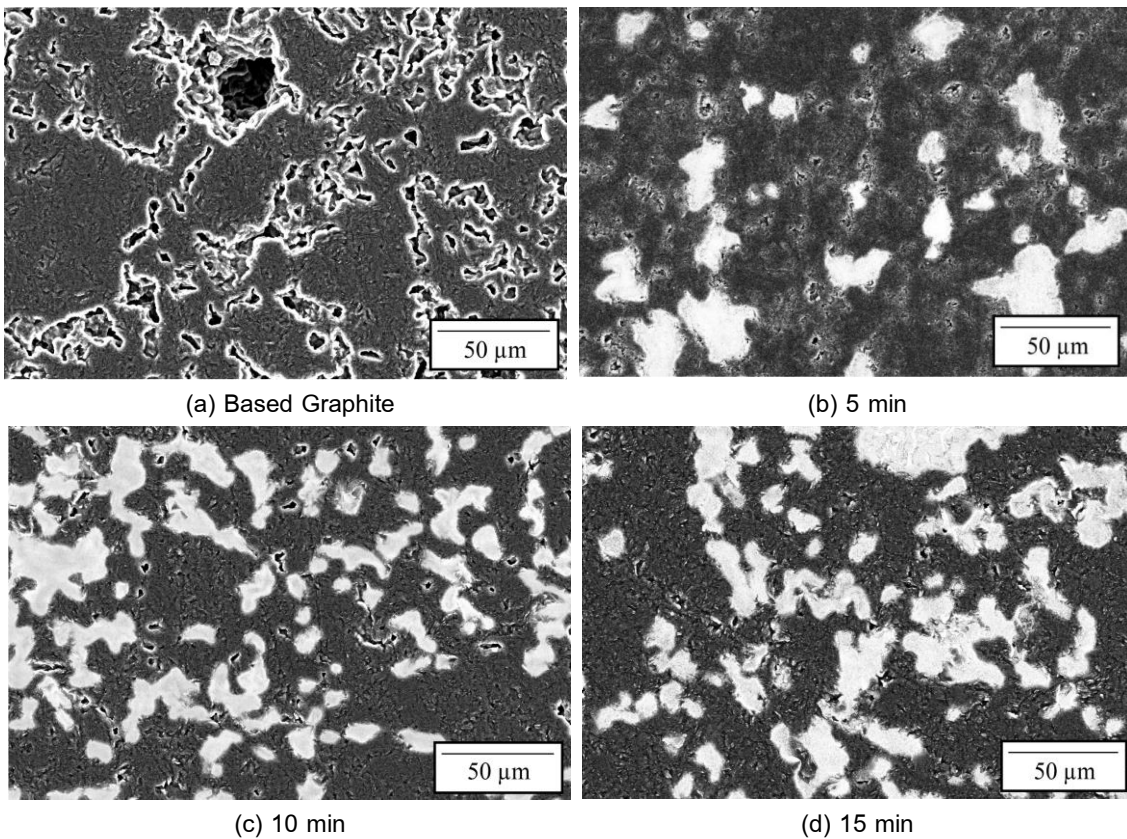


จากไมโครกราฟ SEM ใช้การคำนวณตามวิธี Qualitative Digital Image Analysis (QDIA) [4] มีค่าประมาณ 27% 20% 16% และ 13% สำหรับกราฟไฟต์ฐานและคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ที่เวลา 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ

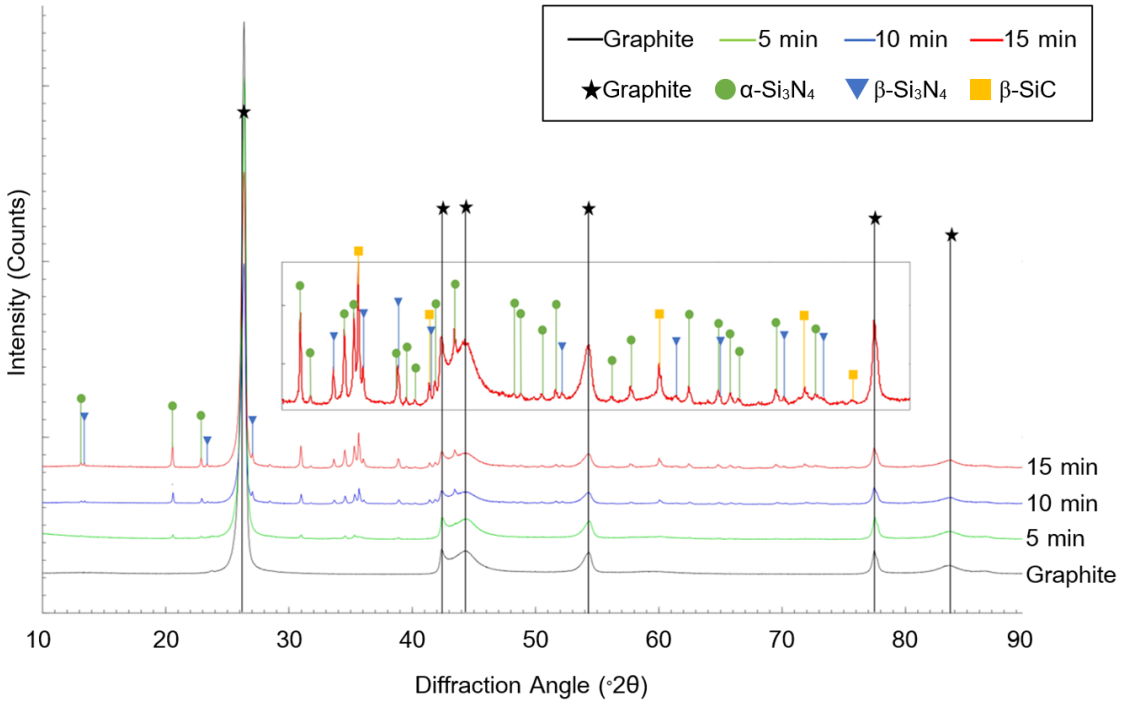
รูปที่ 4 แสดงผลการศึกษาของ XRD จากกราฟไฟต์ฐานและคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 พบว่าสารประกอบกราฟไฟต์เป็นเฟสหลักในทุกตัวอย่าง ในตัวอย่างคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ที่ระยะเวลาการแทรกซึมต่างกัน พบว่าตัวอย่างที่มี

ระยะเวลาแทรกซึม 5 นาที พบ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ และ $\beta\text{-SiC}$ ปริมาณเล็กน้อย และเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาแทรกซึมเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของ XRD สามารถแบ่งสัดส่วนเฟสของกราฟไฟต์ฐานและคอมโพสิตกราฟไฟต์ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลในรูปที่ 2 และ 3

ชั้นตัวอย่างการแทรกซึมที่ระยะเวลา 5 นาที พบ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ปรากฏค่อนข้างชัดเจน ในขณะที่ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ และ SiC นั้นสังเกตเห็นได้ค่อนข้างยาก และจะสังเกตเห็นชัดเจนขึ้นในชั้นตัวอย่างที่แทรกซึมด้วยเวลา 10 และ 15 นาที

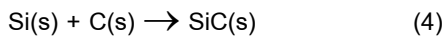


รูปที่ 3 SEM แสดงการแทรกซึมของวัสดุเสริมแรงในรูพรุน ณ เวลาต่าง ๆ

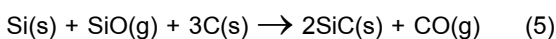


รูปที่ 4 ผลการศึกษา XRD เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุของตัวอย่างกราฟไฟต์และคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ณ เวลาการแทรกซึมต่าง ๆ

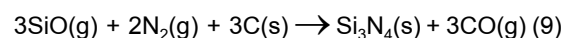
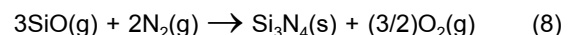
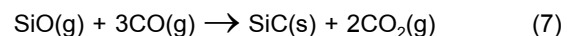
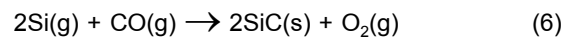
นอกจากนี้ยังเกิดการรวมกันของซิลิคอนและคาร์บอนของกราฟไฟต์ที่ทำปฏิกิริยากันโดยตรงระหว่างการสร้างสารประกอบ Si_3N_4 ซึ่งเกิดเป็นสารประกอบนิวเคลียส SiC ขึ้นตามปฏิกิริยาของสมการที่ (4) [25]



การทำปฏิกิริยาของ Si(g) และ SiO(g) ที่กระจายอยู่ในกราฟไฟต์ที่อุณหภูมิ 1,200 - 1,400 °C สร้าง พันธะ Si-C และ Si-O-C ตามปฏิกิริยาของสมการที่ (5) [27]



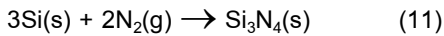
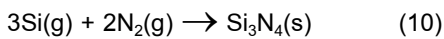
การก่อตัวของ SiC ที่เป็น Whiskers ตามสมการที่ (6) และ (7) ต่อเนื่องจากการเกิดนิวเคลียสในสมการที่ (4) และ (5) จากการทำปฏิกิริยากับ Si(g), SiO(g) และ CO(g) ที่ตกค้างในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย และการก่อตัวของ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่มีสัณฐานคล้ายเข็มตามปฏิกิริยาของสมการที่ (8) และ (9) [24, 28-30]





ในระหว่างปฏิกิริยาของสมการที่ (10) เกิดการก่อตัวของ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่มีสัณฐานวิทยาเกรนละเอียดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่าง Si(g) และ $\text{N}_2\text{(g)}$ [31] นิวเคลียสในไนโตรดจะเกิดขึ้นในขณะที่ Si(g) แพร่กระจายบนพื้นผิวนิวเคลียสและถูกไอของ N_2 ปกคลุมทำปฏิกิริยากับ Si(g) หรือ SiO(g) ก่อตัวเป็น $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ [30, 31] ประเภทเกรนละเอียดและประเภทสัณฐานคล้ายเข็มตามลำดับ

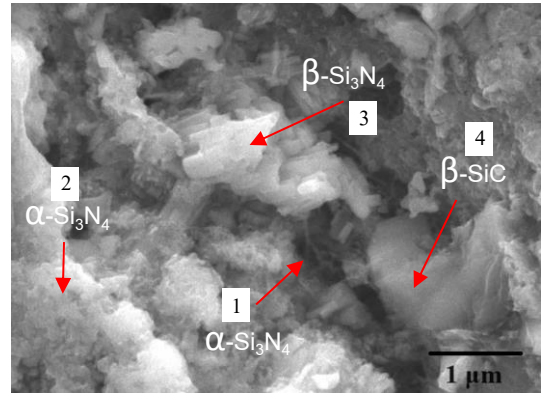
ในขณะที่เดียวกันอาจมีซิลิคอนบางส่วนทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ $\text{N}_2\text{(g)}$ ก่อตัวเป็น $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่มีสัณฐานคล้ายใบมีดที่โดยปกติจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า $1,450^\circ\text{C}$ ตามปฏิกิริยาในสมการที่ (11)



สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงสารประกอบ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่มีลักษณะคล้ายเข็ม (1), $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ เกรนละเอียด (2), $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่คล้ายใบมีด (3) และนิวเคลียสของ $\beta\text{-SiC}$ (4) ตามลำดับ โดย SiC ได้จากการรวมกันของกราฟไฟต์และผงซิลิคอน และได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ $1,200 - 1,400^\circ\text{C}$ และ Si_3N_4 ได้จากการให้ความร้อนซิลิคอนในเตาเผาที่อุณหภูมิ $1,200 - 1,450^\circ\text{C}$ ในบรรยากาศไนโตรเจน [23]

3.3 ความแข็ง

ความแข็งที่วัดได้จากเครื่องไมโครวิกเกอร์ โดยค่าความแข็งวิกเกอร์ถูกแปลงหน่วยจาก HV เป็นหน่วย SI คือ GPa [32] ซึ่งวัดความแข็งเฉลี่ยของกราฟไฟต์ฐาน คือ 4.75 ± 0.60 GPa และ หลังการแทรกซึม



รูปที่ 5 SEM ของตัวอย่างที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ในโหมตอเล็กตรอนทุติยภูมิ

และสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ที่เวลาต่างกัน 5, 10 และ 15 นาที มีค่าสูงขึ้นเป็น 7.31 ± 1.37 , 11.40 ± 3.70 และ 15.07 ± 4.89 GPa ตามลำดับ แม้ว่าค่าความแข็งของคอมโพสิตกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 จะมีค่าที่สูงขึ้น แต่ก็มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง ดังรูปที่ 6 อาจมาเนื่องจากการกระจายตัวแบบสุ่มของ Si_3N_4 ไปตามตำแหน่งรูพรุน บนผิวกราฟไฟต์

จากการเปรียบเทียบสัดส่วนเฟสจาก XRD ในตารางที่ 1 พบว่าสัดส่วนเฟสของกราฟไฟต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4 ถูกแบ่งออกเป็น $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ และ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ซึ่งเมื่อดูจากสัดส่วนเฟสจะพบว่าเฟสของ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ เมื่อเวลาในการแทรกซึมเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเฟสที่มีผลต่อความแข็งของกราฟไฟต์มากที่สุดคือ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ เนื่องจาก $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ (16.80 GPa) โครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรภาพและมีการ slip ที่น้อยกว่าเมื่อถูกแรงกระทำ จึงช่วยให้มีความแข็งและรับแรงดีกว่า $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (11.52 GPa) ที่มีโครงสร้าง Triclinic



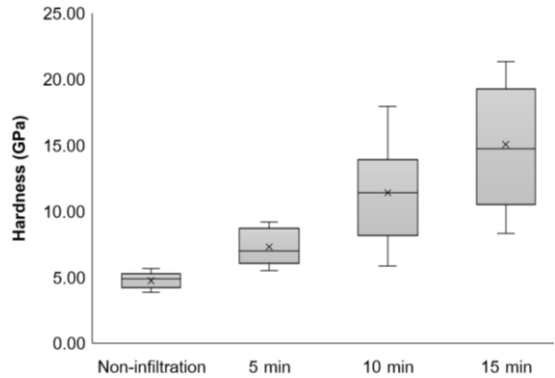
ที่ซับซ้อนกว่า [33] ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Si_3N_4 ที่แทรกซึมเข้าสะสมในรูพรุนของกราฟิต์ที่มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของกราฟิต์เสริมแรง

รายงานระบุค่าความแข็งแรงของเซรามิกส์ Si_3N_4 ปกติอยู่ที่ประมาณ 35.31 Gpa [6] และดังนั้นความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของกราฟิต์เสริมแรงด้วย Si_3N_4 เมื่อเทียบกับตัวอย่างกราฟิต์ฐาน เป็นผลมาจากการสะสมของอนุภาค Si_3N_4 และ SiC ในรูพรุนของกราฟิต์ตามสัดส่วนเฟสของอนุภาคเสริมแรงที่ก่อตัวขึ้น

4. บทสรุป

อนุภาคของ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ และ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของกราฟิต์โดยวิธีการแทรกซึมสารละลายซิลิคอน โดยใช้เวลาแทรกซึมแตกต่างกันคือ 5, 10 และ 15 นาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $1,450^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน มีการเปลี่ยนแปลงด้านสัญญาณวิทยาที่เกิดขึ้นในรูพรุนของ กราไฟต์ การแทรกซึมที่เวลา 15 นาที สารละลายซิลิคอนสามารถแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนได้มากที่สุด ประมาณ $120\ \mu\text{m}$ ความแข็งแรงของกราฟิต์เสริมแรงด้วย Si_3N_4 เพิ่มขึ้นสูงสุด 217.49% เป็นผลจากการกระจายตัวของ Si_3N_4 ในรูพรุนของกราฟิต์ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งในการศึกษานี้ การเสริมแรงด้วย Si_3N_4 มีค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดคือ 15.07 GPa

ดังนั้น วิธีการแทรกซึมสารละลายนี้สามารถเสริมแรงด้วยอนุภาค Si_3N_4 เข้าไว้ในรูพรุนของกราฟิต์ได้ คาดว่าจะส่งผลให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น



รูปที่ 6 ความแข็งวิกเกอร์สเฉลี่ยของกราฟิต์ฐานและคอมโพสิตกราฟิต์ที่เสริมแรงด้วย Si_3N_4

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ให้ความอนุเคราะห์เพื่อสถานที่และเครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณบริษัท สี่มาเทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกราฟิต์และวัสดุ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.D. Burchell and T.R. Pavlov, Graphite: Properties and characteristics, *Comprehensive Nuclear Materials*, 2020, 7, 355-381.
- [2] <https://www.britannica.com/science/graphite-carbon>. (Accessed on 22 June 2023)
- [3] N.B. Dhokey and K.K. Rane, Wear behavior and its correlation with mechanical properties of TiB₂ reinforced aluminium-based composites, *Advances in Tribology*, 2011, 2011, 837469.



- [4] M.A. Hernandez, K.D. Bakoglidis and P. Xiao, A new slurry infiltration method to enhance the wear resistance of bulk graphite with development of reinforced graphitic composites including SiC or Si₃N₄ hard particles, *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(6), 1984-1992.
- [5] H.S. Kim, On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites, *Materials Science and Engineering*, 2000, 289(1-2), 30-33.
- [6] J.Z. Jiang, F. Kragh, D.J. Frost, K. Ståhl and H. Lindelov, Hardness and thermal stability of cubic silicon nitride, *Journal of Physics Condensed Matter*, 2001, 13(22), 515-520.
- [7] P. Ge, Y. Cheng and K. Sun, Structure and performance of Si₃N₄/SiC/CNT composite fibres, *Ceramics International*, 2019, 45(10), 12677-12681.
- [8] A.K. Kothari, J. Kengqing, R. Janet and B.W. Sheldon, Comparison between carbon nanotube and carbon nanofiber reinforcements in amorphous silicon nitride coatings, *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(8), 2743-2746.
- [9] P. Sharma, S. Sharma and D. Khanduja, Production and some properties of Si₃N₄ reinforced aluminium alloy composites, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2015, 3(3), 352-359.
- [10] J.K. Kim, P.K. Rohatgi, J.O. Choi and C.O. Choi, Wear properties and effect of molds on microstructure of graphite reinforced copper alloy composites made by centrifugal casting, *Metals and Materials International*, 2005, 11(4), 333-340.
- [11] M. Chen, W. Zhou, J. Zhang and Q. Chen, Dielectric property and space charge behavior of polyimide/silicon nitride nanocomposite films, *Polymers*, 2020, 12(2), 322.
- [12] A. Khan, M. Puttegowda, P. Jagadeesh, H.M. Marwani, A.M. Asiri, A. Manikandan, A.A.P. Khan, G. Md Ashraf, S.M. Rangappa and S. Siengchin, Review on nitride compounds and its polymer composites: a multifunctional material, *Materials Research and Technology*, 2022, 18, 2175-2193.
- [13] I.E. Aparicio, D.T. Fishpool, V.R. Diaz, R.A. Dorey and J.A. Yeomans, Evaluation of polymer matrix composite manufacturing routes for production of an oxide/oxide ceramic matrix composite, *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(5), 2420-2428.



- [14] C. Wang, X. Wang, B. Wang, G. Xiao, R. Qiao, F. Zhang, Y. Bai, Y. Li, Y. Wu, Z. Wang and H. Wang, Enhancement of thermal shock resistance in B-Si₃N₄ coating with in situ synthesized β-Si₃N₄ nanowires/nanobelts on porous Si₃N₄ ceramics, *Ceramics International*, 2021, 47(18), 25449-25457.
- [15] Y. Tong, S. Bai, X. Liang, Q.H. Qin and J. Zhai, Reactive melt infiltration fabrication of C/C-SiC composite: Wetting and infiltration, *Ceramics International*, 2016, 42(15), 17174-17178.
- [16] X. Liu, D. Zhang, R. Ma, Y. Wang, X. Yang and Y. Liu, The two-tier tissue reinforcing and toughening mechanism caused by dual-granularity Si powders ingredient, and dielectric properties in reaction bonded and sintered reaction bonded Si₃N₄ porous ceramics, *Ceramics International*, 2022, 48(16), 22877-22884.
- [17] S. Li, H. Cui, Q. Ma, X. Liu, Y. Wang, L. Shang and Y. Zheng, The one-step pyrolysis process of rattan-based silicon carbide multiphase ceramics prepared by sol-gel method, *Journal of Wood Science*, 2021, 67(1), 58.
- [18] D. Kopeliovich, Advances in the manufacture of ceramic matrix composites using infiltration techniques, *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 2014, 79-108.
- [19] M. Rosso, Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 175(1-3), 364-375.
- [20] W. Guo, Y. Ye, S. Bai, L. Zhu and S. Li, Preparation and formation mechanism of C/C-SiC composites using polymer-Si slurry reactive melt infiltration, *Ceramics International*, 2020, 46(5), 5586-5593.
- [21] J. C. Margiotta, D. Zhang and D.C. Nagle, Microstructural evolution during silicon carbide (SiC) formation by liquid silicon infiltration using optical microscopy, *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, 28, 191-197.
- [22] J. Rakshit and P.K. Das, Optimization of time-temperature schedule for nitridation of silicon compact on the basis of silicon and nitrogen reaction kinetics, *Bulletin of Materials Science*, 2000, 23, 249-253.
- [23] H.M. Jennings and M.H. Richman, Structure, formation mechanisms and kinetics of reaction-bonded silicon nitride, *Journal of Materials Science*, 1976, 11, 2087-2098.



- [24] M. Long, Y. Li, H. Qin, W. Xue, J. Chen, J. Sun and R.V. Kumar, Formation mechanism of Si_3N_4 in reaction-bonded Si_3N_4 -SiC composites, *Ceramics International*, 2016, 42(15), 16448-16452.
- [25] Y. Li, Q. Wang, H. Fan, S. Sang, Y. Li and L. Zhao, Synthesis of silicon carbide whiskers using reactive graphite as template, *Ceramics International*, 2014, 40(1), 1481-1488.
- [26] A. Saleem, Y. Zhang, H. Gong, M.K. Majeed, M.Z. Ashfaq, J. Jing, X. Lin and M. Sheng, Carbon nanostructure-reinforced $\text{SiC}_w/\text{Si}_3\text{N}_4$ composite with enhanced thermal conductivity and mechanical properties, *RSC Advances*, 2020, 10(25), 15023–15029.
- [27] S. Larpiattaworn, P. Ngemchuklin, W. Khongwong, N. Pankurdee and S. Wada, The influence of reaction parameters on the free Si and C contents in the synthesis of nano-sized SiC, *Ceramics International*, 2006, 32(8), 899-904.
- [28] M. Saito, S. Nagashima and A. Kato, Crystal growth of SiC whisker from the $\text{SiO}(\text{g})$ -CO system, *Journal of Materials Science*, 1992, 11, 373–376.
- [29] Y. H. Gao, Y. Bando, K. Kurashima and T. Sato, SiC nanorods prepared from SiO and activated carbon, *Journal of Materials Science*, 2002, 37(10), 2023–2029.
- [30] G. Ziegler, J. Heinrich and G. Wötting, Relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride, *Journal of Materials Science*, 1987, 22(9), 3041–3086.
- [31] H.M. Jennings, On reactions between silicon and nitrogen, *Journal of Materials Science*, 1983, 18(4), 951–967.
- [32] <https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/vickers-hardness-test/theory.html#:~:text=The%20corresponding%20units%20of%20HV,get%20the%20answer%20in%20GPa>. (Accessed on 9 April 2024)
- [33] Q. Wu, Z. Huo, C. Chen, X. Li, Z. Wang, C. Wang, L. Zhang, Y. Gao, M. Xiong and K. Pan, Prediction of four Si_3N_4 compounds by first-principles calculations, *AIP Advances*, 2023, 13, 045310.

การประยุกต์กรอบวิธีวิศวกรรมคั่นเซกับแบบจำลองคาโนสำหรับแก้อีสำนักงานเพื่อสุขภาพ

ดลฤทธิ์ สมอุปฮาด พงษ์เพชร สังฆมะณี วันชัย แหลมหลักสกุล และ ศิริชัย ยศวังใจ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 15 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 23 เมษายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 25 พฤษภาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เสนอกรอบวิธีวิศวกรรมคั่นเซร่วมกับแบบจำลองคาโนเพื่อสนับสนุนการออกแบบแก้อีสำนักงานเพื่อสุขภาพ วิศวกรรมคั่นเซรวบรวมและแปลงความต้องการทางอารมณ์ของผู้บริโภค ขณะเดียวกันแบบจำลองคาโนใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างคำคั่นเซกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ วิศวกรรมคั่นเซประกอบด้วยขั้นตอนกำหนดขอบเขต กำหนดคำคั่นเซ กำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และการสังเคราะห์ผลงานวิจัยนี้กำหนดแก้อีสำนักงานเพื่อสุขภาพในขอบเขตการศึกษา คำคั่นเซถูกคัดเลือกตามความรู้สึกที่มีต่อแก้อีสำนักงานเพื่อสุขภาพ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ถูกเลือกจากแหล่งผู้ผลิตที่แตกต่างกัน แบบสอบถามประเมินด้วยพนักงานธนาคาร และวิเคราะห์ด้วยวิธีทฤษฎีเซิงปริมาณประเภท 1 ผลการวิจัย พบว่า คำคั่นเซที่แสดงความรู้สึกของผู้บริโภคจำนวน 8 คำ ประกอบด้วย สมดุล สะดวกสบาย การยศาสตร์ คุณสมบัติการทำงาน คุณภาพดี ผ่อนคลาย เรียบง่าย และแข็งแรง คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 7 คุณลักษณะ คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย 20 คุณลักษณะ คำสัมพันธ์สหสัมพันธ์บางส่วนใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคำคั่นเซกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ส่วนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักมี 3 คุณลักษณะ ประกอบด้วย คุณสมบัติที่ปรับได้ การรับน้ำหนัก และวัสดุ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแก้อีสำนักงานเพื่อสุขภาพได้รับการพัฒนาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความรู้สึกของผู้บริโภค

คำสำคัญ: แก้อีสำนักงานเพื่อสุขภาพ; วิศวกรรมคั่นเซ; แบบจำลองคาโน; ออกแบบผลิตภัณฑ์

Application of Integrated Framework of Kansei Engineering and Kano Model Applied to Healthy Office Chair

Dolrit Somupahard, Pongphet Sangkhamanee, Vanchai Laemlaksakul and Sirichai Yodwangjai *

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

* Corresponding author, E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th

Received: 15 February 2024; Revised 23 April 2024; Accepted: 25 May 2024

Online Published: 21 August 2024

Abstract: In this study, a comprehensive framework that combines Kansei engineering and the Kano model is proposed to aid in the design of healthy office chairs. Kansei engineering focuses on understanding and translating customers' emotional needs, while the Kano model explores the correlation between Kansei words and product design attributes. Kansei engineering consists of several stages, namely the choice of domain, the span of the semantic space, the span of product properties, and synthesis. The healthy office chair was determined in the domain. Kansei words were selected according to the perception of a healthy office chair. The product samples were chosen from the different manufacturers. The questionnaire was answered by the banker that were analyzed using Quantitative Theory 1. The finding shows that the eight Kansei words were affected by customer needs. It includes balance, comfort, ergonomics, features, good quality, relaxation, simplicity, and strength. The product design attributes are 7 attributes, and the sub-attributes are 20 design elements. The partial correlation coefficient is used for mapping the relationship between kansei word and product design attributes. The design attributes were 3 attributes includes adjustable, loading support, and material. The results of this study showed that the new design of healthy office chair attributed with the perception of customer.

Keywords: Healthy office chair; Kansei engineering; Kano model; Product design



1. บทนำ

ในปัจจุบันพบการเกิดโรคออฟฟิศซินโดรม (Office Syndrome) เพิ่มมากขึ้นจากการทำงานในสำนักงานหรือการทำงานจากที่พักอาศัย (Work from Home) ซึ่งโรคนี้ไม่ได้เกิดขึ้นฉับพลัน แต่เกิดจากการนั่งทำงานเป็นระยะเวลาสั้น ๆ โดยไม่มีการขยับหรือปรับอิริยาบถ [1] กลุ่มพนักงานธนาคารเป็นหนึ่งในหลายอาชีพที่มีการนั่งทำงานอยู่หน้าจอคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง แก้อั้สำนักงานเพื่อสุขภาพเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อช่วยบรรเทาอาการการทำงานให้เหมาะสมมากขึ้น แก้อั้สำนักงานเพื่อสุขภาพที่จำหน่ายในปัจจุบันมีรูปลักษณะหรือหน้าตาการทำงานแตกต่างจากแก้อั้สำนักงานทั่วไป อีกทั้งราคาที่สูง ทำให้ผู้บริโภคยังไม่แน่ใจถึงความคุ้มค่าที่จะได้รับจากการใช้แก้อั้สำนักงานเพื่อสุขภาพ แก้อั้สำนักงานเพื่อสุขภาพถือเป็นเฟอร์นิเจอร์ประเภทหนึ่งที่ออกแบบเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานแล้วยังต้องตอบสนองต่อความรู้สึกของผู้ใช้เมื่อได้สัมผัส เพื่อความสมบูรณ์ในการออกแบบนั้น จึงไม่สามารถอาศัยความคิดของผู้ออกแบบเพียงอย่างเดียวได้ ต้องอาศัยความรู้สึกของผู้บริโภคด้วย

การปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์มีหลายวิธีที่เป็นที่นิยม เช่น ทฤษฎีการแก้ปัญหาเชิงนวัตกรรม (Theoria Resheneyva Isobretatelskehuh Zadach: TRIZ) [2] การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) [3] และวิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering: KE) เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน วิธี TRIZ เป็นวิธีการแก้ปัญหาเพื่อลดข้อขัดแย้งและใช้ในการปรับปรุงการผลิต วิธี QFD เน้นการปรับปรุงฟังก์ชันการใช้งานของ

ผลิตภัณฑ์และนำไปเปรียบเทียบกับคู่แข่ง ส่วนวิธี KE เน้นการแปลงความต้องการของผู้บริโภคที่เป็นนามธรรม หรือความต้องการที่อยากให้มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ และหาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Product Design Attribute) เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้บริโภคกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งถือว่าวิธี KE เป็นวิธีที่เหมาะสมในขั้นต้นของกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์

นักออกแบบผลิตภัณฑ์จะออกแบบผลิตภัณฑ์ตามประโยชน์ใช้สอยและความต้องการของผู้บริโภค แต่ในบางครั้งความต้องการของผู้บริโภคไม่สามารถถ่ายทอดออกมาเป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้ วิธี KE เป็นหนึ่งในวิธีที่แปลงความต้องการของผู้บริโภคที่เป็นนามธรรมไปเป็นรูปธรรม ที่ช่วยให้นักออกแบบทำการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการผู้บริโภค โดยใช้คำคันเซ (Kansei Word) แทนความต้องการของผู้บริโภคเพื่อเชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และนอกจากนี้แบบจำลองคานอ (Kano Model) ยังใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความพึงพอใจของผู้บริโภคกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อยืนยันว่าสิ่งที่นักออกแบบได้ออกแบบนั้นตรงตามความต้องการของผู้บริโภคที่แท้จริง

ดังนั้น งานวิจัยนี้ศึกษาหาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงความรู้สึกของผู้บริโภคโดยอาศัยกรอบวิธีวิศวกรรมคันเซในการคัดเลือกคำที่แสดงความรู้สึกหรือคำคันเซ และประยุกต์ใช้แบบจำลองคานอเพื่อหาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับแก้อั้สำนักงานเพื่อสุขภาพ กลุ่มเป้าหมายที่ทำการสำรวจเป็นพนักงานธนาคาร ประเมินความสัมพันธ์ระหว่างคำคันเซกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ด้วยแบบสอบถาม วิเคราะห์



ความสัมพันธ์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภท 1 เพื่อกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องและเหมาะสมกับคำค้นเซเพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิศวกรรมคั่นเซ

วิศวกรรมคั่นเซ (Kansei Engineering: KE) หรือวิศวกรรมด้านอารมณ์ความรู้สึก [4] เป็นการผสมผสานระหว่างหลักการออกแบบ หลักการวิศวกรรม และวิธีการอื่น ๆ [5] โดยการแปลงข้อมูลที่ได้จากการสอบถามที่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพที่เป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Product Attribute) เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายด้านคุณภาพ [6] วิธี KE แบ่งออกเป็น 3 ด้านประกอบด้วย ด้านที่ 1 จำแนกคำค้นเซที่แสดงภาพลักษณ์หรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ [7] ด้านที่ 2 เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) และฐานข้อมูล [8] และด้านที่ 3 เป็นการสร้างแบบจำลองวิศวกรรมคั่นเซที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคำค้นเซกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์จากฐานข้อมูล [9]

หลักการของวิศวกรรมคั่นเซ แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 การเลือกขอบเขต ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าแสดงความรู้สึก ขั้นตอนที่ 3 กำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนที่ 4 การสังเคราะห์ และขั้นตอนที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีการประยุกต์วิธี KE ในงานวิจัยของ Rawangwong et al. [10] ประยุกต์วิธี KE ในการพัฒนากระเป๋าเบ้าสะพายหลังสำหรับสตรี โดยแบ่งกลุ่มคำค้นเซออกเป็น 3 กลุ่มประกอบด้วย เรียบง่าย หูหრა และแปลกใหม่ และ

นำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปหาความสัมพันธ์กับคำค้นเซเพื่อใช้เป็นข้อกำหนดพื้นฐานในการออกแบบตัวอย่างทั้ง 3 แบบ และยังมีการประยุกต์วิธีอื่น ๆ เข้าด้วย เช่น วิธีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ [11] ในงานวิจัยของ Rodjananugoon et al. [12] ประยุกต์ใช้วิธี KE ในการหาค่าแสดงความรู้สึกเพื่อใช้ประเมินความพึงพอใจชุดโต๊ะและเก้าอี้จากไม้ไผ่หลังจากได้ข้อกำหนดเชิงเทคนิคในเมทริกซ์ QFD

การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างคำค้นเซกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สามารถประเมินแบบลิเคอร์ท (Likert's Scale) [10] แบบ 5 ระดับ หรือแบบความต่างของคำ (Semantic Differential Method: SD) แบบ 7 ระดับ ที่แสดงค่าด้านบวกและด้านลบ โดย Fu et al. [13] ใช้ประเมินความต้องการของลูกค้ากับแบบตู้เสื้อผ้า และเทคนิคในการประเมิน มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองคานาโน [14] วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) ร่วมด้วย [6]

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้บริโภคกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สามารถวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภท 1 เพื่อหาคุณลักษณะที่ใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่วางปากกา [15] ใช้วิธี โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Correlation Coefficient: PCC) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคำค้นเซกับรูปทรงผลิตภัณฑ์ และใช้วิธีโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับ (Sequential Quadratic Programming) เพื่อหารูปทรงที่ดีที่สุด

วิธี KE นี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนารถยนต์รุ่น MX-5 หรือ Miata [16] นอกจากนี้ยังประยุกต์กับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เพอร์นิเจอร์ [12-13, 17]



กระเป่าเบ้สะพายหลังสำหรับสตรี [10] ผลิตภัณฑ์สำนักงาน [15] สินค้าที่ระลึก [14] เบาะที่นั่งในรถไฟ [18] เป็นต้น

2.2 แบบจำลองคานอ

แบบจำลองคานอ ใช้อธิบายความพึงพอใจของผู้บริโภคใน 2 มิติพร้อมกัน คือ ด้านการตอบสนองทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการและด้านความพึงพอใจของผู้บริโภคในการกำหนดกลยุทธ์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ Kano et al. [19] ได้แบ่งลักษณะคุณภาพออกเป็น 5 คุณลักษณะ ประกอบด้วย ลักษณะมิติเดียว (One-dimensional Attributes) ลักษณะพื้นฐาน (Must-be Attributes) ลักษณะดึงดูด (Attractive Attributes) ลักษณะเฉย (Indifferent Attributes) และลักษณะตรงข้าม (Reverse Attributes)

การตั้งคำถามในแบบสอบถามจะประกอบด้วยคำถามเชิงบวก (Functional Questions) และคำถามเชิงลบ (Dysfunctional Questions) คำถามมีตัวเลือกทั้งหมด 5 ตัวเลือก ประกอบด้วย ชอบมาก (Like) สิ่งที่ต้องมีเป็นพื้นฐาน (Must be) รู้สึกเฉย ๆ (Neutral) รับผิดชอบ (Live with) และรู้สึกไม่ชอบ (Dislike) [20] โดยแต่ละความหมายสามารถเทียบได้จากตารางประเมินคุณภาพของคานอ แสดงตารางที่ 1 [19, 21]

ตัวอักษรในตารางแสดงความหมายของ A (Attractive) คือ หน้าที่นี้ดึงดูดผู้บริโภค O (One-Dimensional) คือ หน้าที่นี้อยู่ส่วนที่ทำให้ผู้บริโภคพอใจ M (Must-be) คือ หน้าที่นี้จำเป็นต้องมีสำหรับผลิตภัณฑ์ Q คือ หน้าที่นี้จำเป็นต้องตระหนักให้มาก เพราะอยู่ในส่วนที่ไม่พอใจ R คือ หน้าที่นี้นอกจากไม่ต้องการแล้วควรให้มีการปรับปรุง I คือ หน้าที่นี้ไม่แตกต่างในความรู้สึกของผู้บริโภค

ตารางที่ 1 ตารางประเมินประเภทคุณภาพบริการ [22]

		Dysfunctional				
		Like	Must be	Neutral	Live with	Dislike
Customer Requirement	Like	Q	A	A	A	O
	Must be	R	I	I	I	M
	Neutral	R	I	I	I	M
	Live with	R	I	I	I	M
	Dislike	R	R	R	R	Q

การประยุกต์ใช้แนวคิดวิธี KE ร่วมกับแบบจำลองคานอในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มีทั้งกลุ่มของใช้สำนักงาน [23] ของใช้ในครัวเรือน [24] ของที่ระลึก [8] ยิ่งไปกว่านั้นมีการประยุกต์ใช้ในกลุ่มธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ [7] ธุรกิจโรงแรม [25] และธุรกิจบริการ [26] ร่วมด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้ Sayifoelida et al. [23] นำเสนอกรอบวิธี KE ออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 พัฒนาคำค้นห ส่วนที่ 2 พัฒนาฟังก์ชันผลิตภัณฑ์ และส่วนที่ 3 พัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์แบบจำลองคานอในส่วนที่ 2 ของวิธี KE Tama et al. [14] ประยุกต์ใช้แบบจำลองคานอในการจัดลำดับความสำคัญเพื่อแบ่งกลุ่มคำค้นหที่มีผลต่อความพึงพอใจในการพัฒนาของที่ระลึก Llinares and Page [7] นำเสนอแบบจำลองคานอในขั้นตอนวิธี KE เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความรู้สึก โดยแบ่งออกเป็นคุณลักษณะพื้นฐานและคุณลักษณะที่โดดเด่นที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้ออสังหาริมทรัพย์ เช่นเดียวกับ Hartono [25] ประยุกต์กรอบวิธี KE และ Kano model ในการศึกษาคุณภาพการบริการของโรงแรมหรูหราในประเทศไทย สิงคโปร์และประเทศอินโดนีเซีย โดยใช้แบบจำลองคานอ



ในแบบสอบถามเพื่อหาคุณลักษณะการบริการ (Service Attributes) และใช้แบ่งกลุ่มคุณลักษณะการบริการอีกด้วย เช่นเดียวกับ Hartono et al. [26] ประยุกต์ใช้แบบจำลองคานาโนในขั้นตอนการพัฒนาคุณภาพการบริการที่คู่ขนานกับการหาค่าคั่นเซ

3. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์กรอบแนวคิดวิธีวิศวกรรมคั่นเซร่วมกับการประเมินด้วยแบบจำลองคานาโนเพื่อช่วยให้เห็นกรอบแบบผลิตภัณฑ์เข้าใจและรับรู้ความต้องการของกลุ่มตัวอย่างพนักงานธนาคาร และช่วยออกแบบต้นแบบของเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพที่สอดคล้องกับความต้องการได้ แสดงดังรูปที่ 1 และมีขั้นตอนดังนี้

3.1 กำหนดขอบเขตผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพหรือเก้าอี้เออร์โกโนมิกส์ (Ergonomic chair) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา โดยทำการรวบรวมตัวอย่างแบบผลิตภัณฑ์ที่เผยแพร่ในสื่อออนไลน์ เกณฑ์ที่ใช้พิจารณา คือ ผลิตภัณฑ์ต้องเป็นเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพเท่านั้นและกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ต้องมีความหลากหลายด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยขนาดผลิตภัณฑ์ รูปทรง วัสดุ ด้านสี และฟังก์ชันการใช้งาน จำนวน 24 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2

3.2 กำหนดค่าแสดงความรู้สึก

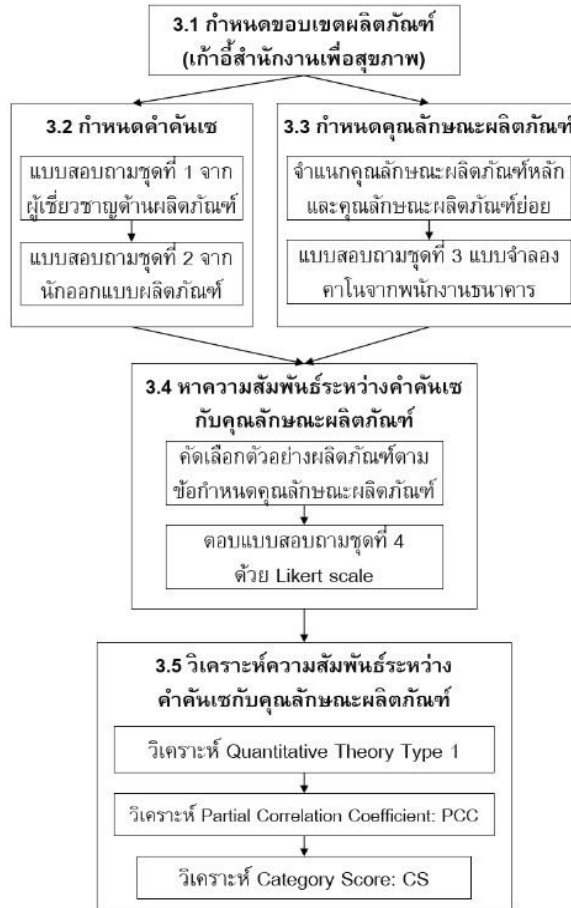
ค่าที่แสดงความรู้สึกหรือค่าคั่นเซ ใช้ในการสื่อถึงผลิตภัณฑ์หรือคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยรวบรวมจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สิ่งตีพิมพ์ และสื่อที่แสดงถึงผลิตภัณฑ์ด้านสุขภาพจำนวนทั้งหมด 60 คำ ต่อจากนั้นนำค่าคั่นเซที่ได้มาหา

ค่าดัชนีสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ (Index of Item-Objective Congruence) หรือค่า IOC จากผู้เชี่ยวชาญด้วยแบบสอบถามชุดที่ 1 คุณสมบัติของผู้เชี่ยวชาญในส่วนนี้เป็นพนักงานขาย (Sale Assistant) ที่อธิบายและสาธิตผลิตภัณฑ์เก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ และรับรู้ความต้องการของผู้บริโภคในการเลือกซื้อเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพจำนวน 16 ท่าน ค่ะเกณฑ์ใช้ประเมินแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ประกอบด้วย รูปแบบคะแนน 1 แสดงว่า คำคั่นเซที่ประเมินมีความสอดคล้องกับเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ รูปแบบคะแนน 0 แสดงว่า คำคั่นเซที่ประเมินไม่แน่ใจว่าสอดคล้องกับเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ และรูปแบบคะแนน -1 แสดงว่า คำคั่นเซที่ประเมินไม่มีความสอดคล้องกับเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ ค่า IOC สามารถคำนวณจากผลรวมคะแนนประเมินของผู้เชี่ยวชาญต่อจำนวนผู้เชี่ยวชาญ แสดงดังสมการที่ 1

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (1)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า IOC ของคำว่า สมดุล จากผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 16 ท่าน ประกอบด้วย คะแนน 1 จำนวน 11 ท่าน คะแนน 0 จำนวน 4 ท่าน และคะแนน -1 จำนวน 1 ท่าน ซึ่งคะแนนทั้งหมดรวม 10 คะแนน แสดงดังตารางที่ 2 ดังนั้น ค่า IOC เท่ากับ 10/16 มีค่าเท่ากับ 0.63 และค่า IOC ของทุกคำคั่นเซต้องมีค่ามากกว่า 0.5 [11] แสดงดังตารางที่ 3

จากนั้น นำคำคั่นเซที่ได้ไปสอบถามนักออกแบบผลิตภัณฑ์เพอร์นิเจอร์จำนวน 7 ท่าน ด้วยแบบสอบถามชุดที่ 2 เพื่อลดจำนวนคำคั่นเซให้เหมาะสม



ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลประเมินค่าคั่นเซจากผู้เชี่ยวชาญ

ลำดับ	ค่าคั่นเซ	ผู้เชี่ยวชาญ																$\sum R$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	สมดุล	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	10
2	สวยงาม	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	13
3	ลักษณะเฉพาะ	-1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	-1	8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	ความคุ้มค่า	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14



ตัวอย่างที่ 1



ตัวอย่างที่ 2



ตัวอย่างที่ 3



ตัวอย่างที่ 4



ตัวอย่างที่ 5



ตัวอย่างที่ 6



ตัวอย่างที่ 7



ตัวอย่างที่ 8



ตัวอย่างที่ 9



ตัวอย่างที่ 10



ตัวอย่างที่ 11



ตัวอย่างที่ 12



ตัวอย่างที่ 13



ตัวอย่างที่ 14



ตัวอย่างที่ 15



ตัวอย่างที่ 16



ตัวอย่างที่ 17



ตัวอย่างที่ 18



ตัวอย่างที่ 19



ตัวอย่างที่ 20



ตัวอย่างที่ 21



ตัวอย่างที่ 22



ตัวอย่างที่ 23



ตัวอย่างที่ 24

รูปที่ 2 ตัวอย่างเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ [27-32]



ตารางที่ 3 ค่าประเมินคำค้นเซตด้วยวิธี IOC

ลำดับ	คำค้นเซต	IOC	ลำดับ	คำค้นเซต	IOC
1	สมดุล (Balance)	0.63	18	นวัตกรรม (Innovative)	0.88
2	สวยงาม (Beautiful)	0.81	19	น่าสนใจ (Interesting)	0.63
3	ลักษณะเฉพาะ (Characteristic)	0.50	20	หรูหรา (Luxury)	0.56
4	สะดวกสบาย (Comfortable)	1.00	21	ทันสมัย (Modern)	0.81
5	ออกแบบ (Design)	0.56	22	ใหม่ (New)	0.88
6	แตกต่าง (Different)	0.81	23	โดดเด่น (Outstanding)	0.56
7	ง่ายต่อการใช้งาน (Easy to Use)	0.88	24	ใช้ได้จริง (Practical)	0.69
8	การยศาสตร์ (Ergonomics)	0.94	25	ความพึงพอใจ (Preference)	0.56
9	แปลกใหม่ (Exotic)	0.63	26	ดูมีราคา (Premium)	0.63
10	คุณสมบัติการทำงาน (Feature)	0.88	27	ผ่อนคลาย (Relaxation)	0.88
11	การทำงาน (Functional)	0.81	28	ปลอดภัย (Safe)	0.88
12	คุณภาพดี (Good Quality)	0.75	29	เรียบง่าย (Simple)	0.69
13	รูปร่างดี (Good Shape)	0.75	30	มั่นคง (Stable)	0.81
14	ดี (Good)	0.75	31	แข็งแรง (Strength)	1.00
15	งดงาม (Gorgeous)	0.63	32	แข็งแกร่ง (Strong)	0.75
16	จุดเด่น (Highlight)	0.88	33	มีเอกลักษณ์ (Unique)	0.69
17	ในอุดมคติ (Ideal)	0.56	34	ความคุ้มค่า (Value)	0.88

3.3 กำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างแบบผลิตภัณฑ์ถูกนำมาแยกองค์ประกอบในแต่ละส่วน ซึ่งเรียกว่า คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Product attribute) การคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์จะแยกคุณลักษณะที่เป็นรูปธรรมจากตัวอย่างแบบผลิตภัณฑ์ที่คัดเลือกมาในตอนต้น ประกอบด้วยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 7 คุณลักษณะและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย 20 คุณลักษณะ แสดงดังตารางที่ 4

จากการประเมินคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ด้วยแบบจำลองค่านับจำนวน 60 คน พบว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพอยู่ในหมวด

O ที่เป็นการต้องการทิศทางเดียว และหมวด A เป็นคุณลักษณะที่ผู้บริโภคไม่คาดการณไว้ ถ้าเพิ่มคุณลักษณะนี้จะทำให้ระดับความพึงพอใจเพิ่มมากขึ้น โดยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยเหลือ 18 คุณลักษณะ ซึ่งโทนีสัสและหลากหลายสีถูกจัดอยู่ในหมวด I ซึ่งผู้บริโภคไม่ได้ให้ความสนใจในผลิตภัณฑ์นี้ แสดงดังตารางที่ 5

หลังจากรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์แล้วจะประเมินด้วยแบบจำลองค่านับที่กำหนดคำถามเชิงบวกและเชิงลบ ตามตัวอย่างในรูปที่ 3 ในแบบสอบถามชุดที่ 3 ด้วยพนักงานธนาคารเป็นผู้ตอบแบบสอบถาม สมมุติว่าคำตอบที่ได้จากแบบจำลองค่านับทั้ง 2 แบบ



คือ ผู้ตอบแบบสอบถามคำถามเชิงบวก ตอบว่า รู้สึกชอบมาก/ พึงพอใจมาก และคำถามเชิงลบ ตอบว่า รู้สึกเฉย ๆ เมื่อแปลผลจากตารางประเมินคุณภาพผลลัพธ์ที่ได้ คือ A ซึ่งหมายถึง คุณลักษณะนี้ผู้บริโภคไม่ได้คาดการณ์ไว้ ถ้ามีคุณลักษณะนี้จะทำให้ผู้บริโภคสนใจผลิตภัณฑ์มากขึ้น

3.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์จะทำการคัดเลือกตัวแทนผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 2 โดยเลือก

ตารางที่ 4 แสดงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ลำดับ	คุณลักษณะหลัก	คุณลักษณะย่อย
1	การยศาสตร์ (x_1)	ออกแบบตามสรีรศาสตร์ (x_{11})
2	ปรับระดับได้ (x_2)	ความสูงที่นั่ง (x_{21}) ความลึกที่นั่ง (x_{22}) พนักพิงด้านหลัง (x_{23}) ที่วางแขน (x_{24}) พนักพิงศีรษะ (x_{25}) รองรับส่วนเว้าหลัง/เอว (x_{26}) ความหนืดของการเอนหลัง (x_{27})
3	วัสดุ (x_3)	หุ้มด้วยผ้าตาข่าย (x_{31}) หุ้มด้วยหนัง (x_{32})
4	ความคล่องตัว (x_4)	ฐานหมุน (x_{41}) ล้อหมุน (x_{42})
5	รูปทรง (x_5)	รูปทรงซี (C-shape) (x_{51}) รูปทรงเอส (S-shape) (x_{52})
6	โทนสี (x_6)	สีเบจ (x_{61}) สีเอิร์ธโทน (x_{62}) สีสไตส์ (x_{63}) หลากหลายสี (x_{64})
7	การรับน้ำหนัก (x_7)	รับน้ำหนัก 100-130 กก. (x_{71}) รับน้ำหนักมากกว่า 130 กก. (x_{72})

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะย่อยครบทุกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ซึ่งได้ตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4 ต่อจากนั้นจะออกแบบสอบถามชุดที่ 4 เพื่อใช้ประเมินผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย ค่าดัชนีที่ผ่านการคัดเลือก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย และตัวแทนผลิตภัณฑ์ โดยการออกแบบสอบถามใช้เกณฑ์เดียวกับ [10] ให้คะแนนความสำคัญแบบสเกล 5 ระดับ (Likert scale) ระดับที่ 1 หมายถึง มีผลน้อยที่สุด และระดับที่ 5 หมายถึง มีผลมากที่สุด



ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ

คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ย่อย	A	O	M	I	R	Q	รวม	การจำแนก
1. การยศาสตร์	1.1 การออกแบบตามสรีรศาสตร์	21	17	8	12	0	2	60	A
2. คุณสมบัติที่ปรับได้	2.1 ความสูงที่นั่ง	19	25	10	5	1	0	60	O
	2.2 ความลึกที่นั่ง	22	19	7	9	2	1	60	A
	2.3 พนักพิงด้านหลัง	24	16	7	13	0	0	60	A
	2.4 ที่วางแขน	23	14	10	12	0	1	60	A
	2.5 พนักพิงศีรษะ	24	16	4	14	2	0	60	A
	2.6 ที่รองรับส่วนเท้าหลัง/เอว	23	19	4	14	0	0	60	A
	2.7 ความหนืดของการเอนหลัง	22	16	8	13	0	1	60	A
3. วัสดุของส่วนต่าง ๆ	3.1 หุ้มด้วยผ้าตาข่าย	23	16	8	12	1	0	60	A
	3.2 หุ้มด้วยหนัง	23	16	8	12	1	0	60	A
4. ความคล่องตัว	4.1 ฐานหมุน	17	23	8	10	0	2	60	O
	4.2 ล้อหมุน	14	21	7	16	0	2	60	O
5. รูปทรงของเก้าอี้	5.1 รูปทรงซี	24	13	5	16	1	1	60	A
	5.2 รูปทรงเอส	20	13	8	18	0	1	60	A
6. โทนสีของเก้าอี้	6.1 สีเบจ	26	15	7	11	0	1	60	A
	6.2 สีเอิร์ธโทน	29	9	3	18	0	1	60	A
	6.3 สีสดใส	3	9	22	25	0	1	60	I
	6.4 หลากหลายสี	9	3	20	27	0	1	60	I
7. การรับน้ำหนัก	7.1 รับน้ำหนัก 100-130 กก.	14	21	7	16	0	2	60	O
	7.2 รับน้ำหนักมากกว่า 130 กก.	14	21	7	16	0	2	60	O

คำถามเชิงบวก	คำถามเชิงลบ
เก้าอี้ ได้ ออกแบบตามหลักสรีรศาสตร์	เก้าอี้ ไม่ได้ ออกแบบตามหลักสรีรศาสตร์
<input type="checkbox"/> รู้สึกชอบมาก / พึงพอใจมาก (Like)	<input type="checkbox"/> รู้สึกชอบมาก / พึงพอใจมาก (Like)
<input type="checkbox"/> ควรมีเป็นพื้นฐาน (Must be)	<input type="checkbox"/> ควรมีเป็นพื้นฐาน (Must be)
<input type="checkbox"/> รู้สึกเฉย ๆ (Neutral)	<input type="checkbox"/> รู้สึกเฉย ๆ (Neutral)
<input type="checkbox"/> ยอมรับในสิ่งนี้ได้ (Live with)	<input type="checkbox"/> ยอมรับในสิ่งนี้ได้ (Live with)
<input type="checkbox"/> รู้สึกไม่ชอบ / ไม่พึงพอใจ (Dislike)	<input type="checkbox"/> รู้สึกไม่ชอบ / ไม่พึงพอใจ (Dislike)

รูปที่ 3 ตัวอย่างคำถามเชิงบวกและเชิงลบของแบบจำลองคานาโน



รูปที่ 4 รูปภาพเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพที่คัดเลือกได้ [27-32]

3.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์กับค่าดัชนี

หาความสัมพันธ์ของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์กับค่าดัชนี ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภท 1 (Quantification Theory Type1: QT1) หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Linear multiple regression) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Correlation Coefficient: PCC) และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกับคุณลักษณะย่อยด้วยค่าคะแนนแต่ละหมวดหมู่ (Category Score: CS)

4. ผลการวิจัย

4.1 คำที่แสดงความรู้สึกต่อผลิตภัณฑ์

จากการคัดเลือกคำดัชนีเซด้วยการประเมินค่า IOC จากพนักงานชายทั้งหมด 60 คำ มีคำที่ผ่านเกณฑ์จำนวน 34 คำ และการประเมินคำดัชนีเซด้วยนักออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์เพื่อลดจำนวนคำที่ใช้ในการทดลอง พบว่า มีคำ IOC มากกว่า 0.5 จำนวน 8 คำ ประกอบด้วย สมดุล สะดวกสบาย การยศาสตร์ คุณสมบัตินักออกแบบดี ผ่อนคลาย เรียบง่าย และแข็งแรง

ซึ่งคำดัชนีเซที่ได้มีจำนวนที่เหมาะสม และเป็นคำที่แสดงถึงความรู้สึกที่ต้องการด้านรูปลักษณ์และฟังก์ชันการใช้งาน อีกทั้งนักออกแบบผลิตภัณฑ์ทั้งหมดประเมินคำว่า คุณสมบัติการทำงาน เป็นคำที่แสดงความรู้สึกที่ควรมีอยู่ในเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเก้าอี้ที่มีฟังก์ชันและประโยชน์มากกว่าการใช้งานอย่างเดียว แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คำดัชนีเซที่ได้รับการคัดเลือกจากนักออกแบบผลิตภัณฑ์

ลำดับ	คำดัชนีเซ	IOC
1	สมดุล (Balance)	0.71
2	สะดวกสบาย (Comfortable)	0.71
3	การยศาสตร์ (Ergonomics)	0.57
4	คุณสมบัติการทำงาน (Feature)	1.00
5	คุณภาพดี (Good Quality)	0.85
6	ผ่อนคลาย (Relaxation)	0.57
7	เรียบง่าย (Simple)	0.85
8	แข็งแรง (Strength)	0.57



4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

เมื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณจะทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (คุณลักษณะผลิตภัณฑ์) กับตัวแปรตาม (ค่าประเมินค่าดัชนี) โดยค่า R-square ที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (Square Multiple Correlation Coefficient: MCC²) จากผลการวิเคราะห์พบว่า มีค่าดัชนีจำนวน 7 ค่า ที่มีค่า MCC² มากกว่า 0.5 (เครื่องหมาย * ท้ายตัวเลข) และค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงดังตารางที่ 7 ซึ่งหมายความว่า ภาพตัวอย่างที่ 1 มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงความรู้สึกว่า ผ่อนคลาย เช่นเดียวกับภาพตัวอย่างที่ 8 มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงความรู้สึกว่า

การยศาสตร์ กับคุณสมบัติการทำงาน เมื่อนำค่าดัชนีทั้ง 7 ค่า ไปวิเคราะห์ค่า PCC และค่า CS เพื่อแยกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์ย่อย แสดงดังสมการที่ (2) ถึง สมการที่ (8) เพื่อนำไปเป็นข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่อไป แสดงดังตารางที่ 8

จากตารางที่ 8 พบว่า ค่าดัชนีทั้ง 5 ค่า จากทั้งหมด 7 ค่า แสดงถึงความต้องการของบริโภคนจะแสดงออกมาในรูปแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สามารถปรับการใช้งานได้ เช่น ปรับความหนืดในการเอนหลัง รองรับส่วนเว้าหลัง/เอว ปรับความสูง-ต่ำที่นั่งปรับที่วางแขนได้ในคำสะดวกสบาย คำการยศาสตร์ คำคุณสมบัติการทำงาน และคำเรียบง่าย ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุคูณกำลังสอง (MCC²) ของเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ

ค่าดัชนี	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์					ค่าดัชนี	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์				
	1	2	3	8	18		1	2	3	8	18
สมดุล	0.737	0.839*	0.760	0.726	0.646	คุณภาพดี	0.758	0.800*	0.671	0.578	0.646
สะดวกสบาย	0.826	0.832	0.793	0.403	0.839*	ผ่อนคลาย	0.768*	0.717	0.605	0.699	0.794
การยศาสตร์	0.656	0.441	0.650	0.758*	0.744	เรียบง่าย	0.603	0.691	0.779	0.748	0.649*
คุณสมบัติการทำงาน	0.581	0.754	0.624	0.738*	0.607	แข็งแรง	0.536	0.408	0.740	0.564	0.716

$$\text{สมดุล (Balance)} = 4.024 + 0.513 x_{26} - 0.621 x_{63} + 0.530 x_{71} \tag{2}$$

$$\text{สะดวกสบาย (Comfortable)} = 4.472 + 0.554 x_{17} - 0.474 x_{21} - 0.446 x_{61} \tag{3}$$

$$\text{การยศาสตร์ (Ergonomic)} = 4.360 - 0.533 x_{12} + 0.682 x_{26} - 0.502 x_{51} \tag{4}$$

$$\text{คุณสมบัติการทำงาน (Feature)} = 4.357 + 0.515 x_{21} - 0.578 x_{26} - 0.510 x_{62} \tag{5}$$

$$\text{คุณภาพดี (Good quality)} = 4.296 + 0.399 x_{27} + 0.548 x_{31} - 0.484 x_{52} - 0.455 x_{63} \tag{6}$$

$$\text{ผ่อนคลาย (Relaxation)} = 4.392 - 0.466 x_{22} - 0.441 x_{22} + 0.476 x_{23} + 0.530 x_{27} \tag{7}$$

$$\text{เรียบง่าย (Simple)} = 3.840 + 0.510 x_{24} + 0.214 x_{52} - 0.310 x_{63} \tag{8}$$



ตารางที่ 8 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ลำดับ	คำค้นหะ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						ภาพตัวอย่าง [27-32]
		คุณลักษณะหลัก	PCC	P-Value	คุณลักษณะย่อย	CS	P-Value	
1	สมดุล	การรับน้ำหนัก	0.369	0.02	รองรับน้ำหนัก ได้ 100-130 กิโลกรัม	0.530	0.02	
2	สะดวกสบาย	คุณสมบัติ ที่ปรับได้	0.384	0.01	ปรับความหนืด การเอนหลังได้	0.554	0.01	
3	การยศาสตร์	คุณสมบัติ ที่ปรับได้	0.433	0.04	ที่รองรับส่วนหัว หลัง/เอว	0.682	0.004	
4	คุณสมบัติ การทำงาน	คุณสมบัติ ที่ปรับได้	0.397	0.008	ปรับความ สูง-ต่ำที่นั่ง	0.515	0.008	
5	คุณภาพดี	วัสดุ	0.453	0.003	หุ้มด้วยผ้า ตาข่าย	0.548	0.003	
6	ผ่อนคลาย	คุณสมบัติ ที่ปรับได้	0.421	0.006	ปรับความหนืด การเอนหลังได้	0.530	0.006	
7	เรียบง่าย	คุณสมบัติ ที่ปรับได้	0.317	0.03	ที่วางแขน	0.510	0.03	



4.3 ผลลัพธ์ที่ต้นแบบ

ขั้นตอนการพัฒนาต้นแบบเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ ผู้วิจัยใช้ค่าดัชนีเซทุกค่าที่ผ่านการประเมินเพื่อเลือกกลุ่มคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักจากค่า PCC ที่มีค่าเป็นบวกและมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และพิจารณาลงไปถึงคุณลักษณะย่อยจากค่า CS ที่มีค่าเป็นบวกและมีค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรที่มากสุดในสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อใช้เป็นตัวแทนใน ส่วนประกอบของเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ โดยมี ส่วนประกอบพื้นฐานของเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ ประกอบด้วย ที่นั่ง พนักพิงหลัง พนักพิงศีรษะ ที่วาง แขน ฐานล้อ และจำนวนล้อเลื่อน ตัวอย่างเช่น คำสมมูล มีค่า PCC เท่ากับ 0.369 ของการรับน้ำหนัก (x_7) และมีค่า CS เท่ากับ 0.530 ของการรองรับ

น้ำหนักได้ 100-130 กิโลกรัม (x_{71}) ซึ่งหมายความว่า ถ้าต้องการให้เก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพแสดงออกถึงความรู้สึกว่าสมดุต้องมีการออกแบบที่นั่งให้รองรับ น้ำหนักได้ 100-130 กิโลกรัม ในทางกลับกัน คุณลักษณะย่อยมีค่าดัชนีเซที่แสดงความรู้สึกมากกว่า 1 ค่า ตัวอย่างเช่น ค่าดัชนีเซที่แสดงความรู้สึกว่า สะดวกสบายและผ่อนคลายมีค่า PCC สูงสุดในกลุ่ม คุณสมบัติที่ปรับได้ (x_2) เท่ากับ 0.384 และ 0.421 ตามลำดับ และมีค่า CS ของการปรับความหนืดการ เอนหลังได้ (x_{27}) เท่ากับ 0.554 และ 0.530 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า ถ้ามีฟังก์ชันการปรับความหนืดการ เอนหลังได้จะทำให้ผู้บริโภครู้สึกสะดวกสบายและผ่อนคลาย แสดงดังตารางที่ 9 แสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ

ลำดับ	คำค้นเซ	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ย่อย	ตัวอย่างแบบ	ลำดับ	คำค้นเซ	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ย่อย	ตัวอย่างแบบ
1	สมดุล	รองรับน้ำหนักได้ 100-130 กก.		4	คุณสมบัติการทำงาน	ปรับความสูง-ต่ำที่นั่ง	
2	สะดวกสบาย, ผ่อนคลาย	ปรับความหนืดการเอนหลังได้		5	คุณภาพดี	หุ้มด้วยผ้าตาข่าย	
3	การยศาสตร์	ที่รองรับส่วนหัวหลัง/เอว		6	เรียบง่าย	ที่วางแขนปรับได้	



รูปที่ 5 ตัวอย่างแบบผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาขึ้น

5. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้หลักวิศวกรรมคั่นร่วมกับแบบจำลองคานาเพื่อหาความต้องการของพนักงานธนาคารในการพัฒนาเก้าอี้สำนักงานเพื่อสุขภาพ โดยใช้ค้ำคั่นเซจำนวน 8 ค้ำ และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 7 คุณลักษณะและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย 20 คุณลักษณะ มาประเมินด้วยแบบสอบถามและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธี QT1 ผลการวิจัย พบว่า ค้ำคั่นเซประกอบด้วย ค้ำสมดุค ค้ำสะตวกลสบาย ค้ำผ่อนคลาย ค้ำการยศาสตร์ ค้ำคุณสมบัติการทำงาน ค้ำคุณภาพดี และค้ำเรียบง่าย และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย คุณสมบัติที่ปรับได้ การรับน้ำหนัก และวัสดุที่ใช้ในการออกแบบต้นแบบผลิตภัณฑ์ ในการศึกษาครั้งต่อไปสามารถประยุกต์วิธีการอื่น ๆ เช่น วิธีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ วิธีการยศาสตร์ หรือวิศวกรรมการออกแบบ ร่วมด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pochano, K. Choknumchaisiri, K. Sangtian, T. Wongkhuenkaew, WitayutNilrat and M. Charadram, Factors affecting risk behaviors of office syndrome in working age of metropolitan health and wellness institution personal during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak, Regional Health Promotion Center 9, 2023, 17(3), 882-893. (in Thai)
- [2] I. Ekmekci and E.E. Nebati, Triz methodology and applications, Procedia Computer Science, 2019, 158, 303-315.
- [3] R. Ginting, A. Ishak, A. F. Malik and M. R. Satrio Product development with quality function deployment (QFD): a literature review, Proceeding of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 012022.



- [4] M. Nagamachi, Y. Okazaki and M. Ishikawa, Kansei engineering and application of the rough sets model, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2006, 220(8), 763-768.
- [5] Y. Huang, C.-H. Chen and L.P. Khoo, Kansei clustering for emotional design using a combined design structure matrix, International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(5), 416-427.
- [6] S. Lin, T. Shen and W. Guo, Evolution and emerging trends of kansei engineering: A visual analysis based on citespace, IEEE Access, 2021, 9, 111181-111202.
- [7] C. Llinares and A.F. Page, Kano's model in kansei engineering to evaluate subjective real estate consumer preferences, International Journal of Industrial Ergonomics, 2011, 41(3), 233-246.
- [8] H. Quan, S. Li and J. Hu, Product innovation design based on deep learning and kansei engineering, Applied Sciences, 2018, 8(12), 2397.
- [9] M.Y. Ma, Y.C. Chen and S.R. Li, How to build design strategy for attractiveness of new products (DSANP), Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2011, 3(11), 1-10.
- [10] S. Rawangwong, C. Homkhiew, T. Pirom, A. Thongmung Kamnerwam and T. Boonyaso, An application of kansei engineering technique for the design and development of leather product: A case study of leather manufacture, mung district, songkhla province, Journal of Engineering and Innovation, 2022, 15(1), 144-156. (in Thai)
- [11] S. Rawangwong, C. Homkhiew, T. Pirom, J. Rodjananugoon and C. Laosat, Application of quality function deployment technique in combination with kansei engineering in the design and development of ceramic tea set products, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), (in Thai)
- [12] J. Rodjananugoon, S. Rawangwong, M. Haddadian, A. T. Kamnerdwam and P. Chumsri, Design and development of bamboo table and chair set products with the application of quality function deployment technique and kansei engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal, 2023, 15(2), 552-569. (in Thai)
- [13] K. Fu, S. Hu, X. Jiang and Q. Jia, Research on wardrobe design based on kansei engineering, International Journal of Smart Home, 2020, 14(2), 1-14.



- [14] I.P. Tama, W. Azlia and D. Hardiningtyas, Development of customer oriented product design using kansei engineering and kano model: case study of ceramic souvenir, *Procedia Manufacturing*, 2015, 4, 328-335.
- [15] X. Gong, Z. Guo and Z. Xie, Using kansei engineering for the design thinking framework: bamboo pen holder product design, *Sustainability*, 2022, 14(17), 10556.
- [16] M. Nagamachi and A.M. Lokman, *Innovations of kansei engineering*. CRC Press, FL, USA, 2016.
- [17] M. Haddadian, Visual assessment of methods of street furniture installation using kansei engineering (case study: benches in the historical-cultural area of tabriz), *Modern Applied Science*, 2016, 10(6), 171.
- [18] D. K. Yohanny and A. Mulyono An established scholar review towards kansei engineering for railway product design, *International Conference on Railway and Transportation (ICORT 2022)*, Proceeding, 2023, 67-77.
- [19] N. Kano, Attractive quality and must-be quality, *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, 1984, 31(4), 147-156.
- [20] K. Matzler, H. H. Hinterhuber, F. Bailom and E. Sauerwein, How to delight your customers, *Journal of Product & Brand Management*, 1996, 5(2), 6-18.
- [21] C.-C. Chen and M.-C. Chuang, Integrating the kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design, *International Journal of Production Economics*, 2008, 114(2), 667-681.
- [22] C. Berger, Kano's methods for understanding customer-defined quality, *Center for Quality Management Journal*, 1993, 2(4), 3-36.
- [23] F. Sayifoelida, S. Yahaya, H. Sihombing and M. Yuhazri The integration framework of kansei engineering (KE) and kano method (KM) for product development, *The International Conference on Advances in Civil Structural and Mechanical Engineering*, ACSME, Proceeding, 2014, 302-310
- [24] X. Kang and Z. Zhao, A study on kansei attraction of products' online reviews by using text mining and kano model, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2024, 18(2), 1-12.
- [25] M. Hartono, A proposed integrative framework of kansei engineering and kano model applied to services, *The Second International Research Symposium in Service Management-Service Imperatives in the New Economy*, Proceeding, 2011, 484-492.



- [26] M. Hartono, T. Chuan, D. N. Prayogo and A. Santoso An integrative fuzzy kansei engineering and kano model for logistics services, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Proceeding, 2017, 012027.
- [27] <https://www.iconic-office.com/product-category/all/chairs/office-chairs/>. (Accessed on 10 April 2024)
- [28] <https://www.ergotrend.com/our-products/adult/ergonomic-chair.html>. (Accessed on 10 April 2024)
- [29] https://www.workscape.co.th/product-category/ergonomic/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwIN6wBhCcARIsAKZvD5ivul1tyhd3UJPjC4KkTYm5A4BoQyYXdBaQdL_EfZubG4wphQ6IW08aAg85EALw_wcB. (Accessed on 10 April 2024)
- [30] <https://www.bewellstyle.com/bewell-ergonomic-chairs/>. (Accessed on 10 April 2024)
- [31] <https://www.ergohumanthailand.com/HOME/61bc943f5ca34920d48ef063>. (Accessed on 10 April 2024)
- [32] <https://modenafurniture.com/>. (Accessed on 10 April 2024)

การวิจัยและพัฒนาเตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอล เพื่อการใช้งานเอนกประสงค์

อุษา มากมูล กรราร์^{1*} และ กนกกาญจน์ จิรกุลสมโชค²

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: usa.mak@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 23 พฤษภาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 24 พฤษภาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: บทความนี้คือการพัฒนาและทดสอบสมรรถนะเตาหุงต้มเชื้อเพลิงคู่ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอล เพื่อการประกอบอาหารและใช้งานเอนกประสงค์ในครัวเรือนและร้านอาหาร มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่การเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน ไบโอเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาหุงต้มทดแทนก๊าซแอลพีจี เนื่องจากเอทานอลสามารถผลิตได้เองในประเทศจากพืชผลทางการเกษตรจึงให้การปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ เตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่นี้ หัวเผาประกอบด้วยโพรเซรามิกที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ มีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบา มีหัวฉีดร่วมเพียงตัวเดียวสำหรับการจ่ายเชื้อเพลิงสองชนิด การส่งเสริมการหมุนเวียนความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพรุนส่งผลให้เตาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ทั้งการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอลที่มีค่าความร้อนต่ำ อุณหภูมิการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนความร้อนที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มอากาศปฐมภูมิมีผลดีต่อการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลดลง แต่มีผลตรงกันข้ามกับการเผาไหม้เอทานอลที่ CO กลับเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้น การเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีมีการปลดปล่อยมลภาวะที่น้อยกว่าการเผาไหม้ไบโอเอทานอลที่ทุกอัตราส่วนผสม รวมถึงก๊าซแอลพีจีมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าไบโอเอทานอล สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเผาไหม้ไบโอเอทานอลของหัวเผาที่พัฒนาขึ้นนี้ คือที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5.50 กิโลวัตต์ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดใกล้เคียงกับการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจี

คำสำคัญ: เตาแผ่รังสี; เตาเอทานอล; เตาเชื้อเพลิงคู่; ก๊าซแอลพีจี; ไบโอเอทานอล

Research and Development of a Dual-Fuel Radiant Burner for Diverse Applications: Utilizing of Liquefied Petroleum Gas and Bio-Ethanol

Usa Makmool Grare^{1*} and Kanokkarn Jirakulsomchok²

¹ Combustion Technology Research Laboratory (CBT), Pilot Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

² Combustion Technology and Alternative Energy Research Center (CTAE), Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. Thailand

* Corresponding author, E-mail: usa.mak@kmutt.ac.th

Received: 26 February 2024; Revised 23 May 2024; Accepted: 24 May 2024

Online Published: 21 August 2024

Abstract: In this article, a dual-fuel radiant burner was developed and tested for home and restaurant cooking. It uses liquefied petroleum gas (LPG) and bioethanol with the aim of reducing reliance on fossil fuels, a primary source of greenhouse gas emissions. Bioethanol, as a renewable fuel, shows great promise in replacing LPG. It results in net zero carbon emissions because it can be domestically produced from agricultural waste and products. The burner head comprises lightweight, highly porous ceramic foam made of silicon carbide and incorporates a single conventional gas injector for supplying both fuels. The results showed that the burner provided relatively high stable combustion of both LPG and bioethanol with low calorific value. This is due to the advantage of internal heat circulation of combustion within a porous medium burner. The combustion temperature increases with the firing rate. Increasing primary air has a positive effect on LPG combustion, leading to reduced carbon monoxide (CO) emissions. However, it has the opposite effect on bioethanol combustion, resulting in increased CO emissions with higher primary air entrainments. Firing LPG yields higher combustion efficiency compared to bioethanol. Nevertheless, at a firing rate of 5.50 kW of bioethanol, the maximum temperature reached is similar to that of LPG at the same firing rate, representing the optimal condition for this developed burner using bioethanol as fuel.

Keywords: Radiant burner; ethanol burner; dual fuel burner; LPG; bioethanol



1. บทนำ

เตาแก๊สเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อประกอบอาหารที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในครัวเรือน ร้านอาหารทั้งในเขตเมืองและชนบท รวมถึงอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารขนาดกลางขนาดย่อม (SME) สำหรับภาคครัวเรือนของประเทศไทย เตาหุงต้มที่ใช้คือเตาก๊าซแอลพีจี หรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) มีสถานะเป็นของเหลวภายใต้แรงดันและบรรจุไว้ในถังทนแรงดันสูง เตาแก๊สแอลพีจีมีความเสถียรและความน่าเชื่อถือคือค่อนข้างสูง เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ จากการเผาไหม้ ที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อน หลาย ๆ ประเทศในภูมิภาคต่าง ๆ จึงมีความพยายามในการผลักดันนโยบายให้เกิดการใช้หรือลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิล เพื่อช่วยชะลอและลดอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก

ภาคครัวเรือนของไทย มีสัดส่วนการใช้แอลพีจีค่อนข้างสูง รายงานสถิติการใช้พลังงานจากก๊าซแอลพีจี ในไตรมาสแรกของปี 2566 กว่า 175 พันตันต่อเดือนหรือเท่ากับร้อยละ 32 ของการใช้ก๊าซแอลพีจีภายในประเทศ [1] ยิ่งไปกว่านั้น ปัจจุบันรัฐบาลยกเลิกการอุดหนุนราคาก๊าซแอลพีจีภาคครัวเรือน โดยมีนโยบายลอยตัวราคาก๊าซเพื่อให้เป็นไปตามกลไกราคาพลังงานของตลาดโลก ส่งผลให้ผู้บริโภคมีภาระด้านการใช้จ่ายเพื่อพลังงานเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้น การกระตุ้นและส่งเสริมให้ภาคครัวเรือนมีทางเลือกในการใช้พลังงานมากขึ้น เช่น การหันมาใช้เชื้อเพลิงประเภทแอลกอฮอล์ ได้แก่ ไบโเอทานอล เนื่องจากเอทานอล

เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถผลิตได้เองในประเทศ จากผลผลิตทางการเกษตร ทำให้การปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ อีกหนึ่งความข้อได้เปรียบของเอทานอลคือ ในสภาวะปกติ เอทานอลมีสถานะเป็นของเหลว ทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บและการขนส่ง นอกจากนี้ยังมีความหนาแน่นของพลังงานเชิงปริมาตรที่ค่อนข้างสูง (6.28 kWh/l) ในปี 2565 มีการผลิตเอทานอลมากกว่า 1,580 ล้านลิตร (4.5 ล้านลิตร/วัน) ในประเทศ และตั้งเป้าจะผลิตให้ได้กว่า 5.8 ล้านลิตรต่อวันภายในปี 2579 [2] ปัจจุบัน เอทานอลนอกจากจะถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมีแล้วยังถูกนำไปผสมเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ทั้งแบบเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซินเพื่อลดการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมลง อย่างไรก็ตาม การศึกษาและวิจัยการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเพื่อให้ความร้อนและปรุงอาหารในครัวเรือนยังมีการรายงานออกมาอย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงเสนอนวัตกรรมที่จะสามารถผลักดันให้เกิดการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลในภาคครัวเรือนมากขึ้น และเพื่อให้การใช้งานเตาให้ความร้อนมีความยืดหยุ่นด้านเชื้อเพลิงที่ใช้ทดแทนหรือทำให้เกิดการลดการใช้ก๊าซแอลพีจีในภาคครัวเรือน ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนในการประกอบอาหาร แต่เนื่องจากเอทานอลมีความไวไฟสูงและมีความหนืดต่ำ จึงมีการผสมกับสารทำให้ข้นกลายเป็นเจลเอทานอลเพื่อให้ความปลอดภัยมากขึ้นและนิยมนำไปใช้ในร้านอาหารเพื่อการอุ่นมากกว่าการประกอบอาหารในครัวเรือน นอกจากนี้ เอทานอลยังมีค่าความร้อนต่ำ (~29 MJ/kg) เมื่อเทียบกับก๊าซแอลพีจี (~50 MJ/kg)



งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบให้อุณหภูมิสูงกว่าทางทฤษฎี (Super Adiabatic Combustion) โดยทำให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในเตาด้วยการปรับแต่งห้องเผาไหม้หรือหัวเผาให้เป็นวัสดุพอร์ซเลน ช่วงการทำงานของหัวเผาแบบวัสดุพอร์ซเลนค่อนข้างกว้างโดยเฉพาะการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงเจือจาง (Lean Combustion) ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีข้อได้เปรียบเหนือการเผาไหม้แบบปกติ (Free-flame Combustion) หลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าเปลวไฟแบบปกติที่สภาวะเดียวกัน [3] ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) สูงขึ้น [4] ความเข้มของการเผาไหม้มีค่าสูง (High Combustion Intensity) ส่งผลให้สามารถออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กลง รวมถึงฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี (Radiative Heat Flux) มีค่าสูงและสม่ำเสมอ การปลดปล่อยมลพิษต่ำเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบปกติ สามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ [5] ซึ่งเตาเผาทั่วไปไม่สามารถเผาไหม้ได้เมื่อเร็วๆ นี้ งานวิจัยของ Goa et. al, 2023 [6] ทำการพัฒนาหัวเผาน้ำมันดีเซลโดยประยุกต์ใช้วัสดุพอร์ซเลนชนิดโพลีเซรามิก เพื่อศึกษาหลักการผลกระทบของโครงสร้างโพลีเซรามิก ลักษณะการระเหย และการแผ่รังสีของเชื้อเพลิงเหลวภายในวัสดุพอร์ซเลนโดยใช้น้ำมันดีเซลที่มีต่ออุณหภูมิและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างโพลีเซรามิกที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่ออุณหภูมิและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในห้องเผาไหม้ และก่อนหน้านั้น Sinha and Muthukumar [7] ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผาวัสดุพอร์ซเลนด้วยเตาชนิดอัดความดันที่ใช้น้ำมันก๊าดเป็น

เชื้อเพลิง (Kerosene Pressure Stove) และพบว่าเตาวัสดุพอร์ซเลนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นกว่า 15% เมื่อเทียบกับเตาแรงดันน้ำมันก๊าดทั่วไป (Conventional Kerosene Pressure Stove) สำหรับการใช้เชื้อเพลิงประเภทแอลกอฮอล์ Toledo et al. [8] ประยุกต์ใช้หัวเผาวัสดุพอร์ซเลนในระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยเมทานอลและเอทานอลโดยกระบวนการเผาไหม้บางส่วน อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวนี้ยังต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อระเหยเชื้อเพลิงเหลวก่อนป้อนเข้าสู่หัวเผา

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่เอนกประสงค์ สามารถใช้งานในการประกอบอาหารหลากหลาย ได้แก่ ต้ม ผัด ทอด อบ ปิ้งย่าง ที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถใช้งานได้ทั้งก๊าซแอลพีจีซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้อยู่ในครัวเรือนปัจจุบันและยังสามารถใช้เชื้อเพลิงไบโอเอทานอล โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากภายนอกเพื่อใช้ในการระเหย ใช้หัวฉีดรวมเพียงหนึ่งหัวฉีด และมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ซเลนที่ส่งเสริมให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในเพื่ออุณหภูมิผสมให้อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าการเผาไหม้แบบทั่วไป โดยคงรักษารูปแบบเตาที่ใช้งานกันทั่วไปในปัจจุบันและเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟหรือพลังงานความร้อนขนาดครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (5-15 kW) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การใช้งานเตาหุงต้มมีความยืดหยุ่นด้านเชื้อเพลิง ช่วยให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกในการจัดหาเชื้อเพลิงเมื่อเกิดวิกฤติด้านพลังงานขึ้น นอกเหนือจากนั้น ยังช่วยเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่สร้าง



ผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อม ส่งเสริมนโยบายของประเทศเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions)

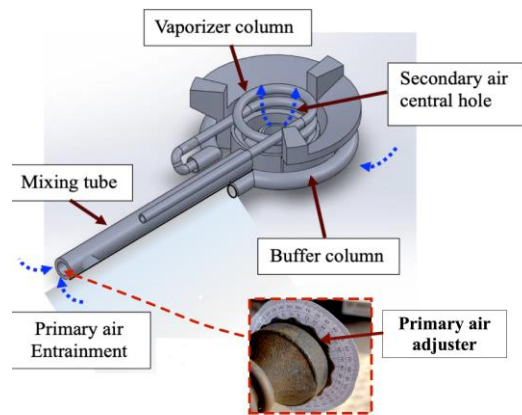
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 โครงสร้างเตาและอุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงวิธีการระเหยเอทานอลด้วยการจ่ายเอทานอลให้ไหลผ่านชุดท่อที่ติดตั้งรอบหัวเผาวัสดุพอร์ซันชนิดแผ่นโพลีเซรามิกที่มีโครงร่างตาข่ายแบบส้อมน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง ทำให้ช่วงเวลาในการติดไฟสั้น สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะมีการแผ่รังสีความร้อนจากหัวเผาวัสดุพอร์ซันไปยังชุดท่อเอทานอล ทำให้เอทานอลการระเหยก่อนจ่ายเข้าหัวฉีดแก๊ส การเผาไหม้เกิดภายในโพรงของวัสดุพอร์ซัน เกิดการถ่ายเทความร้อนที่แบบแผ่รังสีความร้อนให้กับภาชนะหุงต้ม ซึ่งแตกต่างจากเตาก๊าซแบบดั้งเดิมที่มีการพุ่งชนของเปลวไฟกับภาชนะหุงต้ม (Impinging Flame) ส่งผลให้เตาชนิดแผ่รังสีมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและการเผาไหม้สมบูรณ์เนื่องจากเปลวไฟไม่ได้ถูกรบกวนด้วยการถูกทำให้เย็นตัวจากการชนภาชนะผิวเย็นกว่า (Quenching) หัวเผา (รูปที่ 2) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ผนังเตาและห้องผสมทำมาจากเหล็กหล่อ หัวเผาถูกปรับเปลี่ยนจากเตาแก๊สทั่วไปที่มีรูทางออกเปลวไฟขนาดเล็กเรียงเป็นระนาบตามแนวเส้นรอบวงของวงแหวนเป็นวัสดุพอร์ซันโพลีเซรามิกที่มีความพรุนสูงทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) มีความหนา 12 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเชิงเส้นของช่องว่าง 10 ต่อนิ้ว (10 PPI) มีความพรุน (Porosity) โดยประมาณ 80% ทนความร้อนได้มากกว่า 1,200 องศาเซลเซียส และเพื่อป้องกัน



รูปที่ 1 ท่อระเหยเอทานอลที่รับความร้อนจากเตาวัสดุพอร์ซันแผ่รังสี



รูปที่ 2 โครงสร้างเตาเชื้อเพลิงร่วมเอทานอลและแอลพีจี

การเกิดเปลวไฟย้อนกลับ (Flame Flashback) ไปยังห้องผสมและหัวฉีด จึงทำการติดตั้งตาข่ายสแตนเลส 304 ความถี่สูง (60 mesh) ที่ทางออกจากห้องผสมด้านบน (ด้านล่างแผ่นโพลีเซรามิก) นอกจากนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยป้องกันไฟย้อนกลับ (Flame Arrestor) ตาข่ายลวดนี้ยังทำหน้าที่ช่วยดูดซับความร้อน (Heat Absorber) เพื่ออุ่นไอดีที่ไหลผ่านให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ [9] หัวฉีดก๊าซมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ติดตั้งบริเวณทางเข้าห้องผสมเพื่อจ่าย

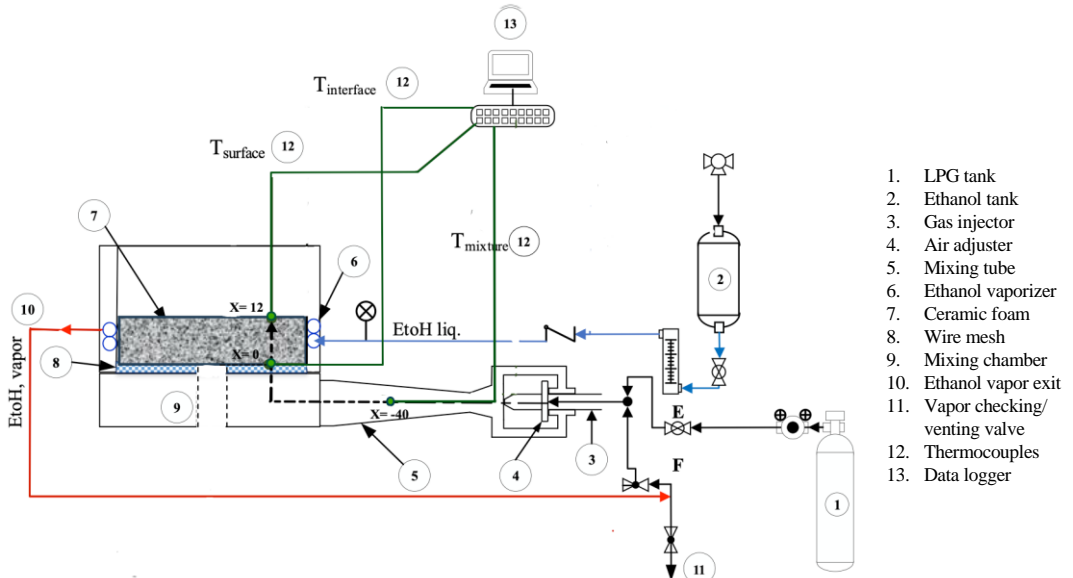


เชื้อเพลิงก๊าซเข้าไปผสมกับอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ที่ถูกเหนี่ยวนำ (Self-aspirating) จากการถ่ายเทโมเมนตัมจากการฉีดแก๊สด้วยความเร็วสูงเข้าท่อผสม โดยมีวาล์วที่สามารถหมุนปรับองศาการเปิดเพื่อควบคุมปริมาณอากาศ (แสดงในรูปที่ 2) ตามทฤษฎีอากาศส่วนนี้สามารถเหนี่ยวนำได้ไม่เกินร้อยละ 70 ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ต้องการเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [10, 11] นอกจากนี้ โครงสร้างของเตายังมีรูแกนกลางด้านล่างของหัวเผาเพื่อเป็นช่องทางเข้าของอากาศทุติยภูมิสำหรับการเผาไหม้ (รูปที่ 2) สำหรับงานวิจัยนี้อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงลอยตัว (Buoyancy Force) จากเปลวไฟที่ร้อนและมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศ โดยไม่ใช้เครื่องอัดอากาศ ที่ทางออกท่อระเหยเชื้อเพลิงจะเชื่อมต่อกับท่อที่มีการขยายหน้าตัดท่อให้มากขึ้น (Buffer Column) เพื่อทำหน้าที่ลดความปั่นป่วนของไอระเหยก่อนเข้าสู่หัวฉีดก๊าซต่อไป

2.2 วิธีการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัดเพื่อวัดอุณหภูมิการเผาไหม้และความร้อนภายในเตาด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล type-K (Inconel, Nickel-Chromium-Iron, \varnothing 1 mm, ± 1 °C) รวม 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรก ($x=0$) เพื่ออุณหภูมิที่รอยต่อ ($T_{interface}$) ระหว่างตาข่ายกับโฟมเซรามิก ตำแหน่งที่สอง ($x=-40$) เพื่อวัดอุณหภูมิของส่วนผสม ($T_{mixture}$) หรือไอดีระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศปฐมภูมิภายในท่อผสมทางต้นน้ำจากระยะอ้างอิงที่รอยต่อ interface และตำแหน่งที่สาม ($x=12$) เพื่อวัดอุณหภูมิผิวบนของโฟมเซรามิก ($T_{surface}$) และทำการ

ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสียผ่านปล่องควัน (ไม่ถูกแสดงในรูป) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ไอเสียแบบแห้ง (Testo Flue Gas Analyzer, Model 300) สำหรับตรวจวัด CO (0–10,000 ± 5 ppm) CO₂ และ O₂ ความคลาดเคลื่อน $\pm 0.1\%$ ก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในการทดลองนี้มีองค์ประกอบของโพรเพนและบิวเทนประมาณ 60 และ 40 โดยปริมาตร เอทานอลที่ใช้เป็นชนิดเปียก (Hydrous Ethanol) มีความบริสุทธิ์ 95.6% โดยปริมาตร ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทางกายภาพและความร้อนของแอลพีจีและเอทานอล อัตราการป้อนเชื้อเพลิงควบคุมด้วยวาล์ววูชมและสอบเทียบอัตราการไหลของเอทานอลและ LPG ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลความแม่นยำ 0.01 กรัม และ 0.05 กก. ตามลำดับ การจุดเตาเริ่มด้วยการจ่ายก๊าซแอลพีจีให้เผาไหม้จนอุณหภูมิที่หัวเผาเพิ่มขึ้นถึงค่ากำหนด 250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เอทานอลระเหยเป็นไอได้สมบูรณ์ จึงทำการสลับเชื้อเพลิงเป็นไอเอทานอลแทนก๊าซแอลพีจี เมื่อการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะสมดุล หรืออุณหภูมิคงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ทุกตำแหน่งวัดจึงทำการบันทึกผลและวัดปริมาณก๊าซไอเสีย ทดลองเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรควบคุม คือ ชนิดเชื้อเพลิงได้แก่ ก๊าซแอลพีจีและเอทานอล อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Firing Rate, FR) และองศาเปิดวาล์วสำหรับการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิ (θ) ตำแหน่งวาล์วอากาศปิดสุดคือ 0 องศา โดยทำการทดลองที่เปิด 90 องศา 180 องศา และ 360 องศา ตามลำดับ ที่มีต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตาและปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ในบทความนี้รายงานค่า CO ที่สภาวะปราศจากอากาศส่วนเกิน (0% Excess Air)



รูปที่ 3 แผนภาพชุดอุปกรณ์ทดลองและการติดตั้งเครื่องมือวัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเชื้อเพลิงแอลพีจีกับเอทานอล

Parameter	LPG	Ethanol
Chemical formula	60% C_3H_8 40% C_4H_{10}	95.6% C_2H_5OH
Oxygen, O, %by mass	-	34.73
Stoichiometric air ratio, A/F, by mass	15.7	9
LHV, MJ/kg	45.5	27.43
Boiling point at 1atm, °C	-42	78.5
Auto Ignition, °C	410-580	366

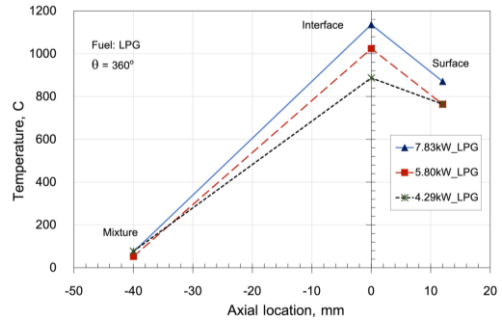
3. ผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของอัตราป้อนความร้อนและอากาศปฐมภูมิต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแอลพีจี

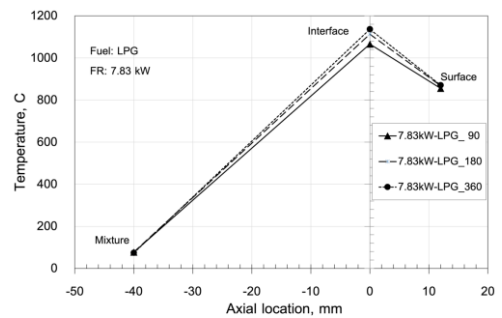
เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการพัฒนาเตาเชื้อเพลิงร่วมนี้ คือสามารถใช้เชื้อเพลิงหุงต้มดั้งเดิมคือก๊าซแอลพีจีร่วมกับเอทานอล ในการทดลองเริ่มต้นจะทำการทดสอบด้วยก๊าซแอลพีจีเพื่อใช้ผลการทดสอบเป็นสภาวะอ้างอิงของเตาที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างอุณหภูมิกายในเตาในการเผาไหม้แอลพีจีที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง $FR = 4.29 \text{ kW} - 7.83 \text{ kW}$ โดยมีการควบคุมองศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิให้คงที่ $\theta = 360^\circ$ จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นส่งผลให้



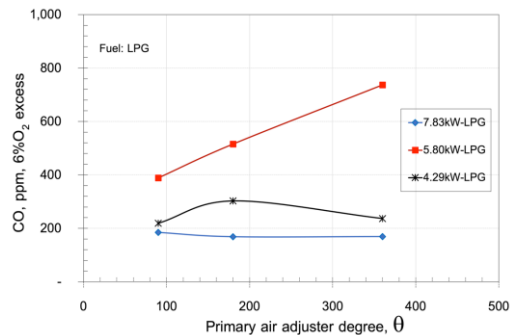
อุณหภูมิภายในเตาเพิ่มขึ้นทั้งที่บริเวณรอยต่อเหนือตาข่าย (Interface) และบนแผ่นวัสดุพูน (Surface) ในขณะที่อุณหภูมิของผสม (Mixture) แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากการบ้อนความร้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของการปรับองศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิ ($\theta = 90^\circ, 180^\circ, 360^\circ$) ที่ $FR = 7.83$ kW จากกราฟพบว่า เมื่อองศาเปิดช่องเหนี่ยวนำอากาศมากขึ้นทำให้สามารถเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิได้มากขึ้นส่งผลต่อการเผาไหม้ คืออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการเปิดองศาช่องเหนี่ยวนำอากาศนี้ไม่ได้ส่งเสริมต่อการเผาไหม้ที่ทุกอัตราการบ้อนเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่อัตราการบ้อนเชื้อเพลิงต่ำ $FR = 4.29$ kW พบว่าการเพิ่มองศาเปิดอากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้หัวความดัน (Pressure Head) ของช่องไหลรวมที่เข้าสู่ระบบลดลง การเหนี่ยวนำอากาศจึงมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์เวนทูรี (Venturi Effect) โดยที่อัตราการบ้อนเชื้อเพลิง 5.80 kW มีการปลดปล่อย CO ที่สูงที่สุด ถึงแม้ว่าที่อัตราการบ้อนเชื้อเพลิง 4.29 kW จะมีความดันรวมของช่องไหลน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 อัตราการบ้อนเชื้อเพลิงก็ตาม แต่ปริมาณของอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ก็น้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งปริมาณของอากาศที่น้อยลงนี้ก็ยังคงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทำให้ที่อัตราส่วนการบ้อนเชื้อเพลิงที่ 4.29 kW นี้ก็ยังคงมีการปลดปล่อยก๊าซ CO ต่ำกว่าที่ 5.80 kW



รูปที่ 4 อัตราบ้อนความร้อนและโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตา: เชื้อเพลิงแอลพีจี



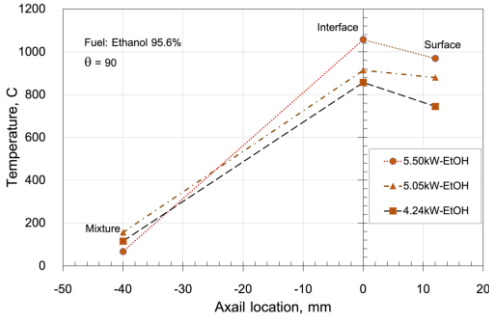
รูปที่ 5 อิทธิพลขององศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตา: เชื้อเพลิงแอลพีจี



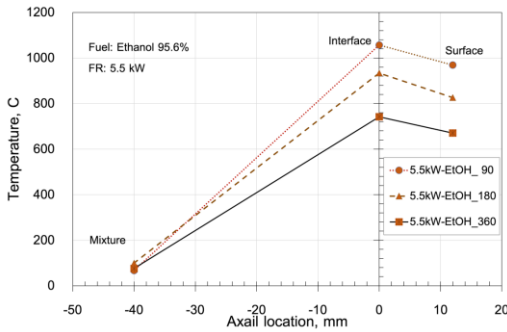
รูปที่ 6 อิทธิพลขององศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิต่อ CO: เชื้อเพลิงแอลพีจี



บทความวิจัย



รูปที่ 8 อิทธิพลของอัตราป้อนเชื้อเพลิงต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้: เชื้อเพลิงเอทานอล



รูปที่ 9 อิทธิพลขององศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิต่อโครงสร้างอุณหภูมิการเผาไหม้: เชื้อเพลิงเอทานอล



(ก) $\theta = 90^\circ$ (ข) $\theta = 180^\circ$ (ค) $\theta = 360^\circ$

รูปที่ 10 เปลวไฟปรากฏของเตาเผ่าง๊าสเชื้อเพลิงเอทานอลที่องศาเปิดวาล์วอากาศปฐมภูมิต่างๆ

3.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจีและเอทานอล

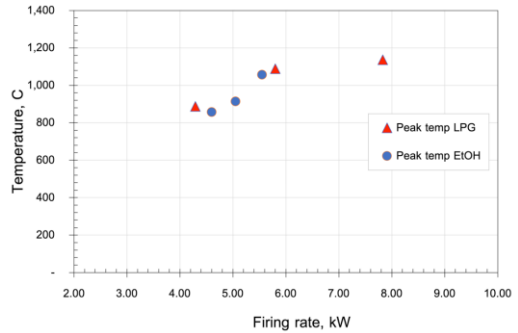
รูปที่ 11 และรูปที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ (Peak Temp.) และ CO ตามลำดับระหว่างป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจีและเอทานอลในเตาที่พัฒนาขึ้นนี้ เนื่องจากเตาถูกพัฒนาขึ้นจากเตาตั้งเดิมที่ใช้ก๊าซแอลพีจี โดยยังคงโครงสร้างหลักและองค์ประกอบหัวเผาเดิมชนิดแรงดันสูงขนาด KB5 จึงพบว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแอลพีจีมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลทั้งด้านอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่า (รูปที่ 11) และการปลดปล่อย CO ต่ำ ไม่เกิน 1,000 ppm (รูปที่ 12) ที่ทุกอัตราป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดของ CO ที่กำหนดในมาตรฐานเตาหุงต้มของไทย มอก.2312-2545 [12] CO ไม่เกิน 2,000 ppm และของสหภาพยุโรป EN 203-1:1992 [13] CO ไม่เกิน 1,000 ppm ที่สภาวะปราศจากอากาศส่วนเกิน (0% excess air) ในขณะที่การเผาไหม้ของเอทานอลมีค่า CO มากกว่า 1,000 ppm ที่ทุกอัตราป้อนเชื้อเพลิง โดยเฉพาะที่อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, ϕ) ต่ำ เนื่องจาก การเผาไหม้มีความเงิองจางของเชื้อเพลิงสูง อย่างไรก็ตาม CO จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราป้อนเชื้อเพลิงเอทานอลสูงขึ้นหรือมีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในส่วนผสมหรือไอดีมากขึ้น หมายเหตุอัตราส่วนสมมูลแสดงในรูปที่ 12 คืออัตราส่วนสมมูลโดยรวม (Overall Equivalence Ratio, $\phi_{overall}$) ซึ่งเป็นอัตราส่วนจากประเมินจากมวลอากาศรวมทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เหนี่ยวนำหลังจากการเผาไหม้ส่วนแรก คำนวณโดยวิธีทางอ้อมจากการวัดก๊าซไอเสียที่บริเวณเหนือหัวเผา ตามสมการที่ 1 [14, 15]

$$\phi_{overall} = \frac{(21 - O_2)}{21} \quad (1)$$

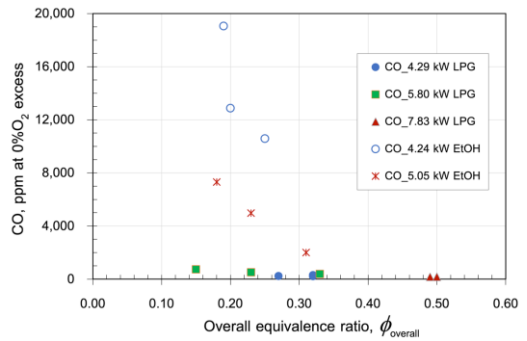
ซึ่งอัตราส่วนสมมูลโดยรวมจะมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนสมมูลที่แท้จริงจากปริมาณอากาศปฐมภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ห้องผสม นอกจากนี้ การเผาไหม้ด้วยก๊าซแอลพีจีให้ช่วงการทำงานที่กว้างมากกว่าอัตราป้อนความร้อนสูงสุดของแอลพีจีมากกว่า 7.83 กิโลวัตต์ แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือวัด จึงไม่ทำการทดสอบที่อัตราป้อนมากกว่านี้ ในขณะที่อัตราป้อนความร้อนสูงสุดของเอทานอล คือ 5.50 กิโลวัตต์เนื่องจากเอทานอลมีค่าความร้อนต่ำกว่าก๊าซแอลพีจีจากขีดจำกัดของขนาดหัวฉีดที่ใช้ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเท่ากับ 0.5 mm ซึ่งจะสามารถเพิ่มอัตราป้อนความร้อนของเอทานอลให้สูงขึ้นได้เมื่อปรับเปลี่ยนหัวฉีดก๊าซให้มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างไรก็ตาม พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ของเอทานอลมีค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้แอลพีจีที่อัตราป้อนความร้อนใกล้เคียงกัน คือ 1,089 °C และ 1,056 °C สำหรับแอลพีจี (FR = 5.80 kW) และ เอทานอล (FR= 5.50 kW) ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงสภาวะการทำงานที่พึงประสงค์ของหัวเผาเมื่อป้อนเชื้อเพลิงเอทานอล คือให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงและปลดปล่อยก๊าซไอเสียหรือ CO ต่ำ เทียบเท่ากับแอลพีจี

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเตาหุงต้มเชื้อเพลิงร่วมที่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งก๊าซแอลพีจีและเอทานอล เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลในภาคครัวเรือน จากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ซิมเซรามิก SiC ที่มีความพรุนสูงและน้ำหนักเบา ส่งเสริมให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในทำให้



รูปที่ 11 อิทธิพลของอัตราการป้อนความร้อนต่ออุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้



รูปที่ 12 อิทธิพลของอัตราการป้อนความร้อนและอัตราส่วนสมมูลต่อการปลดปล่อย CO

เตาเผาไหม้ได้อุณหภูมิสูงถึงแม้จะใช้เอทานอลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเปรียบเทียบกับการป้อนเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีและเอทานอล ให้ผลสำคัญดังนี้

4.1 เมื่ออัตราป้อนเชื้อเพลิงทั้งแอลพีจีและเอทานอลสูงขึ้นอุณหภูมิการเผาไหม้ในหัวเผาสูงขึ้น การปลดปล่อยก๊าซ CO ลดลง

4.2 อิทธิพลขององศาเปิดอากาศปฐมภูมิส่งผลต่อการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีและเอทานอลในทิศทางตรงกันข้าม องศาเปิดมากขึ้นการเผาไหม้แอลพีจีให้อุณหภูมิสูงขึ้นและปลดปล่อยก๊าซ CO ลดลง แต่ส่งผล



ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ของเอทานอลลดลงและปลดปล่อยก๊าซ CO เพิ่มขึ้น

4.3 การป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจีให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าป้อนเอทานอลทั้งอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าและปลดปล่อยก๊าซ CO ต่ำกว่า

4.4 สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผาเมื่อใช้เชื้อเพลิงเอทานอล คือ อัตราป้อนความร้อน 5.50 กิโลวัตต์ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ใกล้เคียงกับก๊าซแอลพีจีที่อัตราป้อนความร้อนใกล้เคียงกัน

ผลจากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือนสูงทั้งด้านอุณหภูมิการเผาไหม้สูงและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม แต่การปลดปล่อยก๊าซ CO ยังค่อนข้างสูงจึงยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปเพื่อให้เตามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้ สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] http://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Energy_Statistics/00All.pdf. (Accessed on 1 June 2023)
- [2] https://www.dede.go.th/more_news.php?cid=81&filename=index. (Accessed on 20 June 2023)

- [3] F.J. Weinberg; Heat-recirculating burners: principles and some recent developments, *Combustion Science and Technology*, 1986, 121, 3-22.
- [4] S.B. Sathe; M.R. Kulkarni, R.E. Peck and T.W. Tong, An experimental and theoretical study of porous radiant burner performance, *Symposium (International) on Combustion*, 1991, 1011-1018.
- [5] S.A. Lloyd, and F.J. Weinberg, A burner for mixtures of very low heat content, *Nature*, 1974, 251, 47-49.
- [6] H. Gao, Y. Wang, S. Zong, Y. Ma, and C. Zhang, Experimental investigation of a self-sustained liquid fuel burner using inert porous media, *Energies*, 2023, 16, 5564.
- [7] G.S. Sinha, P. Muthukumar, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1240, 012136.
- [8] M. Toledo, F. Gonzalez, J. Ellzey, Hydrogen production from methanol and ethanol partial oxidation, *Energy Fuels*, 2014, 28(5), 3453-3459.
- [9] A. Chaelek, U.M. Grare, and S. Jugjai, Self-aspirating/air-preheating porous medium gas burner, *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153, 181-189.



- [10] R. Pritchard, J.J. Guy and N.E. Connor, Handbook of industrial gas utilization: engineering principles and practice, Van Nostrand Reinhold Co., NY, USA, 1977.
- [11] A. Namkhat and S. Jugjai, Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner, Model and Experiments, 2010, 35(4), 1701–1708.
- [12] TIS 2312-2549, Standard specification for domestic gas stoves for using liquefied fuel, 2006. (in Thai).
- [13] EN 203-1:1992, European committee for standardization. Specification for gas heated catering equipment- Part 1: Safety requirements, 1992.
- [14] J. X. Zhou, B. Moreau, C. Mounaïm-Rousselle and F. Foucher, Oil and Gas Science and Technology, Revue d'IFP Energies Nouvelles, 2016, 71, 49.
- [15] S. Jugjai, Combustion, Chulalongkorn University Press, Bangkok, Thailand, 2004. (in Thai).

การพัฒนาต้นแบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะ

พันธ์พิศ จุลพันธ์วัฒนา¹ ทิพทัษิม สรรเพชดาศิลป์¹ จิตพัต ฉอเรืองวิวัฒน์¹
ภัทรารัตน์ ตันนุกิจ¹ และ สิงห์ อินทรชูโต^{1,2}

¹ ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมเพื่อความยั่งยืน, บริษัท แมกโนเลีย ควอลิตี้ ดีเวล็อปเม้นต์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

² ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: panpisu_ju@dtgo.com

วันที่รับบทความ: 13 พฤศจิกายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 1 เมษายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 4 มิถุนายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในพื้นที่ห้องน้ำอาคารสาธารณะให้สามารถทำลายเชื้อที่ปนเปื้อนมากับขยะเพื่อลดความเสี่ยงของการแพร่ระบาดของโรคติดต่อ โดยทำการสำรวจถังขยะในห้องน้ำของห้างสรรพสินค้าและออกแบบต้นแบบถังขยะโดยบูรณาการความรู้ด้านการออกแบบกับหลักการทำลายเชื้อขยะที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่ง ซึ่งถังขยะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ถังชั้นบนสุดสำหรับทิ้งขยะกระดาษชำระ ฝาถังเปิดปิดอัตโนมัติเพื่อลดการสัมผัส (2) ถังชั้นกลางเป็นชั้นที่รวบรวมขยะและทำลายเชื้อ โดยการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อให้ทั่วถึงพื้นที่ผิวขยะทั้งหมด ด้วยสารประกอบโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 0.1% ผ่านหัวพ่นหมอก 2 ตำแหน่ง ซึ่งวัสดุเป็นทองเหลืองมีอัตราการไหล 7 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถพ่นกระจายน้ำยาได้ทั่วถึงภายในระยะเวลา 45 วินาที และกักขยะส่วนนี้ไว้อีก 15 นาที เพื่อประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อแล้วจึงนำส่งขยะไปยังถังชั้นล่าง (3) ถังชั้นล่างซึ่งออกแบบเป็นลักษณะลิ้นชักสำหรับเปิดจัดเก็บขยะที่ผ่านการทำลายเชื้อแล้วเพื่อนำไปกำจัดเหมือนขยะทั่วไป และผลิตต้นแบบเพื่อประเมินผลการใช้งานจากเจ้าหน้าที่บริหารจัดการอาคารและบุคคลทั่วไป ผลการประเมินพบว่า (1) ถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องน้ำสาธารณะต้องสามารถวัดผลด้านการทำลายเชื้อได้จริง (2) บุคคลทั่วไปมีความพึงพอใจในด้านการใช้งาน ความสวยงาม การรับรู้ถึงประโยชน์ของการใช้งาน และการตัดสินใจซื้ออยู่ในระดับมาก (3) สามารถกำจัดเชื้อ *E. Coli* ได้ทั้งหมด และทำลายเชื้อ *B. subtilis* ได้มากกว่า 99.995%

คำสำคัญ: ถังขยะ; ขยะมูลฝอยติดเชื้อ; การฆ่าเชื้อ; เชื้อไวรัสโควิด-19; อาคารสาธารณะ

Development of Infectious Waste Prototype Bin for Public Toilets in Commercial Buildings

Panpisu Julpanwattana^{1*}, Tiptaptim Sunpaechudasil¹, Jittapat Choruengwiwat¹,
Pattrarat Tannukit¹ and Singh Intrachooto^{1,2}

¹ Research and Innovation for Sustainability Center, Magnolia Quality Development Corporation Limited

² Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: panpisu_ju@dtgo.com

Received: 13 November 2023; Revised: 1 April 2024; Accepted: 4 June 2024

Online Published: 22 August 2024

Abstract: The research aims to create a prototype infectious waste bin for public toilets in commercial buildings to automatically disinfect contaminated toilet paper to prevent the spread of diseases. This study explores commercial buildings to analyze toilet waste management and to design a bin prototype with 3 sections. (1) The first level is a touchless lid for receiving toilet paper waste. (2) The second level is to be sprayed thoroughly over its entire surface with disinfectant (0.1% or 1000 ppm sodium hypochlorite) via 2 positions of fog nozzles made of brass with a flow rate of 7 liters per hour spread disinfectant evenly cover all of the waste within 45 seconds and retrained for 15 minutes to eliminate germs. (3) The waste then passes to the third or bottom level, which operates as a drawer that staff opens to retrieve the waste. The study gathers feedback from facility managers to evaluate the innovative product and establish its credibility. The first factor to be considered is its effectiveness in disinfection. User feedback on functionality, aesthetics, usefulness, and purchase decision is positive. The results of the prototype bin disinfection test showed that it could completely eliminate *E. coli*. and 99.995% to eliminate *B. subtilis*.

Keywords: Bin; Infectious Waste; Disinfection; Coronavirus Disease 2019 (COVID-19); Commercial Building



1. บทนำ

การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือโรค COVID-19 สามารถแพร่กระจายได้ทั้งทางฝอยละออง การสัมผัสสารคัดหลั่งของผู้ติดเชื้อ การสัมผัสเชื้อที่ปนเปื้อนตามพื้นผิวของสิ่งของเครื่องใช้ต่าง ๆ [1] ข้อมูลจากศูนย์ปฏิบัติการภาวะฉุกเฉินด้านการแพทย์และสาธารณสุข กรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข พบว่าเชื้อโควิดสามารถสะสมในน้ำมูกมากที่สุด 97.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือน้ำลาย 88.6 เปอร์เซ็นต์ และลำดับสามคืออุจจาระ 70.8 เปอร์เซ็นต์ และเชื้อสามารถแพร่กระจายผ่านสิ่งของที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่งเหล่านี้ได้ [2] พื้นที่สาธารณะถือเป็นจุดอันตรายที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการสะสมของเชื้อโรครวมถึงห้องน้ำสาธารณะที่เป็นแหล่งสะสมเชื้อโรคเช่นกัน โดยเฉพาะขยะกระดาษชำระที่ใช้เช็ดสิ่งปฏิกูลดังกล่าว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของ COVID-19 คือ ขยะติดเชื้อไม่ได้จำกัดพื้นที่เฉพาะสถานพยาบาลเท่านั้น แต่กลับพบได้ในชุมชน ทั้งยังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ขยะติดเชื้อในสถานพยาบาลมีมาตรฐานการบริหารจัดการอย่างชัดเจน [3] แต่การบริหารจัดการขยะติดเชื้อในชุมชนไม่ได้บริหารจัดการเหมือนขยะติดเชื้อในสถานพยาบาล แต่เป็นการบริหารจัดการที่ขาดความรู้และปฏิบัติไม่เหมาะสม [4, 5] ถึงแม้ว่ากรมอนามัยได้แนะนำการรวบรวมขยะติดเชื้อและขยะที่มีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อในชุมชน แต่กลับพบว่ามีการทิ้งขยะเหล่านี้ปะปนกับขยะทั่วไป เช่น กระดาษชำระที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่งจากผู้ติดเชื้อที่มีการทิ้งในอาคารสาธารณะโดยเฉพาะขยะภายในห้องสุขาสาธารณะ แต่การบริหารจัดการขยะ

ภายในห้องน้ำอาคารสาธารณะ เช่น ห้องสรรพสินค้า ศูนย์การค้า คอมมูนิตี้มอลล์ ในปัจจุบันยังคงเป็นการบริหารจัดการแบบขยะทั่วไป ดังนั้นเมื่อเกิดสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัส ทำให้ขยะเหล่านี้เป็นแหล่งแพร่กระจายเชื้อโรคได้ ซึ่งพบว่าการระบาดในเดือนสิงหาคม 2564 มีมูลฝอยเข้าสู่ระบบกำจัดรวม 14 แห่ง เป็นปริมาณสูงถึง 13,297 ตัน ซึ่งมากเกินศักยภาพของระบบกำจัดที่รองรับได้ เพียง 8,340 ตัน/เดือน และยังมีมูลฝอยที่ตกค้างที่แหล่งกำเนิดอีกจำนวนหนึ่ง [6]

การบริหารจัดการขยะมูลฝอยภายในห้องสุขาอาคารสาธารณะเพื่อลดความเสี่ยงที่เกิดจากการแพร่กระจายเชื้อจากขยะมูลฝอยในห้องสุขาอาคารสาธารณะที่อาจปนเปื้อนสารคัดหลั่งจากผู้ใช้บริการ จึงควรมีมาตรการการบริหารจัดการขยะภายในห้องสุขาแตกต่างจากขยะมูลฝอยทั่วไปหรือมีการทำลายเชื้อที่อาจปนเปื้อนกับขยะมูลฝอยตั้งแต่แหล่งกำเนิด เพื่อให้ขยะจากห้องสุขาซึ่งเป็นขยะติดเชื้อหรือขยะเสี่ยงต่อการติดเชื้อ ได้ผ่านการทำลายเชื้อก่อนนำส่งไปกำจัดเหมือนขยะทั่วไป แต่จากการสำรวจห้องสุขาอาคารสาธารณะในปัจจุบันยังคงใช้ถังขยะแบบที่เสี่ยงต่อการกระจายเชื้อโรค เช่น ถังขยะที่ไม่มีฝาปิด หรือถังขยะแบบใช้เท้าเหยียบเปิดฝาดัง แต่ไม่พบถังขยะที่มีการใช้ระบบตรวจจับอัตโนมัติ (Sensor) เพื่อเปิดฝาดังขยะแบบไร้การสัมผัส และมีเพียงถังสำหรับทิ้งขยะผ้าอนามัยในห้องสุขาหญิงเท่านั้นที่แยกชัดเจน และมีกำจัดแบบเฉพาะทาง

คณะผู้วิจัยประกอบด้วยนักออกแบบ พยาบาล วิชาชีพด้านการป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ จึงต้องการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมต้นแบบถังขยะ



มูลฝอยติดเชื้อที่สามารถทำลายเชื้อโรคได้อัตโนมัติ เพื่อทำลายเชื้อตั้งแต่แหล่งกำเนิดขยะ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ได้กับพื้นที่ห้องสุขาอาคารสาธารณะที่สามารถทำลายเชื้อตั้งแต่แหล่งกำเนิดขยะและสามารถย่อยออกเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งต้นแบบถังขยะดังกล่าวจะช่วยลดการแพร่กระจายเชื้อไวรัส COVID-19 โดยทำการประเมินผลประสิทธิภาพการทำลายเชื้อจากเชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่มีกปนเปื้อนมากับขยะกระดาษชำระภายในห้องสุขา ได้แก่ *Escherichia coli* และเชื้อแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ *Bacillus subtilis* ซึ่งแบคทีเรียมีพันธุ์ที่แข็งแรงกว่าเชื้อไวรัสเป็นตัวแทนในงานวิจัย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 ศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาในการบริหารจัดการขยะเสี่ยงติดเชื้อในช่วงสถานการณ์โรคติดต่อระบาด

งานวิจัยนี้ใช้อาคารห้างสรรพสินค้า 101 True Digital Park เป็นอาคารตัวอย่างในการศึกษา โดยดำเนินการดังนี้

1. ทำการสัมภาษณ์บุคลากรในหน่วยงานที่บริหารจัดการอาคารและพนักงานทำความสะอาด จำนวน 10 ท่าน
2. เข้าสำรวจอาคารและบันทึกปริมาณขยะกระดาษชำระจากภายในห้องน้ำอาคาร ที่บริเวณชั้น 1 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีผู้ใช้งานมากที่สุดในอาคาร เป็นระยะเวลา 3 วัน โดยแบ่งเป็น ห้องสุขาหญิงมีห้องสุขาย่อย 8 ห้อง และสุขาชาย มีห้องสุขาย่อย 3 ห้อง
3. วิเคราะห์ปัญหาและเป็นแนวทางในการออกแบบต้นแบบถังขยะติดเชื้อในงานวิจัย

2.2 วิเคราะห์แนวทางจัดการความเสี่ยงของการแพร่ระบาดโรคติดต่อจากขยะติดเชื้อ

วิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) จากขยะกระดาษชำระซึ่งใช้ชำระส้วมหลังที่เชื้ออาจสะสมอยู่ ตั้งแต่ขั้นตอนการใช้งานถึงขยะต่อเนื่องกันของผู้ใช้บริการอาคารไปจนถึงขั้นตอนการจัดเก็บขยะของพนักงาน ซึ่งนำมาสู่การพัฒนาาระบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อสำหรับขยะที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่งในห้องน้ำอาคารสาธารณะ

2.3 กำหนดแนวทางแก้ไข

กำหนดแนวทางแก้ไขโดยพัฒนาระบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อสำหรับขยะที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่งในห้องน้ำอาคารสาธารณะ ตามขั้นตอนการใช้งาน ดังนี้

1. บูรณาการเทคโนโลยีการเปิดปิดฝาดังด้วยระบบเซ็นเซอร์อัตโนมัติเพื่อลดการสัมผัส
2. ออกแบบถังขยะเพื่อทำลายเชื้อที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่งให้กลายเป็นขยะทั่วไปโดยใช้การพ่นสารประกอบโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 0.1% ให้ทั่วถึงพื้นผิวทั้งหมดของขยะกระดาษชำระ ดังนี้
 - เปรียบเทียบรูปทรงถังขยะที่เอื้อต่อการกระจายตัวของน้ำยาทำลายเชื้อถึงพื้นผิวขยะกระดาษชำระภายในถัง 3 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอก ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส
 - เปรียบเทียบการกระจายตัวของน้ำยาทำลายเชื้อและระยะเวลาการพ่นน้ำยาให้ทั่วถึงพื้นผิวขยะจากหัวพ่นน้ำยาต่างรูปแบบ ได้แก่ หัวพ่นสเปรย์ทั่วไป (Foggy) หัวพ่นละอองฝอย (Nano Mist) และหัวพ่นหมอก



2.4 ดำเนินการพัฒนาและผลิตต้นแบบถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อ

1. พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับควบคุมการทำงานของถึงขยะ

การทำงานของถึงขยะต้องทำการทำลายเชื้อได้โดยอัตโนมัติ และลดการสัมผัสของผู้ใช้งาน ซึ่งต้องใช้ Motion Sensor เพื่อสั่งการการเปิดปิดฝาถึงขยะและระบบตรวจวัดปริมาณขยะภายในถึงและ Timer เพื่อควบคุมระยะเวลาการทำลายเชื้อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อได้จริง

2. ผลิตต้นแบบถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อ

- ออกแบบถึงขยะให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการทำลายเชื้อและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในห้องน้ำสาธารณะ
- ชี้นำรูปต้นแบบถึงขยะด้วยวัสดุที่ทนต่อการใช้งาน และไม่เกิดการกัดกร่อนจากน้ำยาทำลายเชื้อ
- ติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์และเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของถึงขยะ

2.5 ประเมินผลการใช้งาน และตรวจวัดประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ

1. ทำแบบสอบถามความคิดเห็นจากเจ้าหน้าที่บริหารจัดการอาคารสาธารณะ จำนวน 10 ท่าน ถึงการจัดทำมาตรการต่างๆ ในช่วงโรคระบาด COVID-19

2. ทดลองใช้งานต้นแบบถึงขยะและสอบถามความคิดเห็นจากผู้ใช้งานอาคารทั่วไป จำนวน 20 ท่าน

3. ประเมินประสิทธิภาพการทำลายเชื้อของต้นแบบถึงขยะ โดยใช้เชื้อตัวอย่าง 2 ชนิด ได้แก่

- เชื้อ *Escherichia coli* (*E. coli*) เป็นเชื้อประจำถิ่นในระบบทางเดินอาหาร ไม่สร้างสปอร์ พบว่า *E. coli* เป็นสาเหตุของการติดเชื้อในโรงพยาบาลที่พบใน

ทางเดินปัสสาวะได้บ่อยที่สุด [7] ซึ่งมีโอกาสปนเปื้อนมาในขยะกระดาษชำระในห้องสุขา

- เชื้อ *Bacillus subtilis* (*B. Subtilis*) เป็นเชื้อที่ใช้ตรวจสอบว่า มูลฝอยติดเชื้อได้ผ่านการกำจัดเชื้อโรคได้ตามเกณฑ์มาตรฐานทางชีวภาพ [8]

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

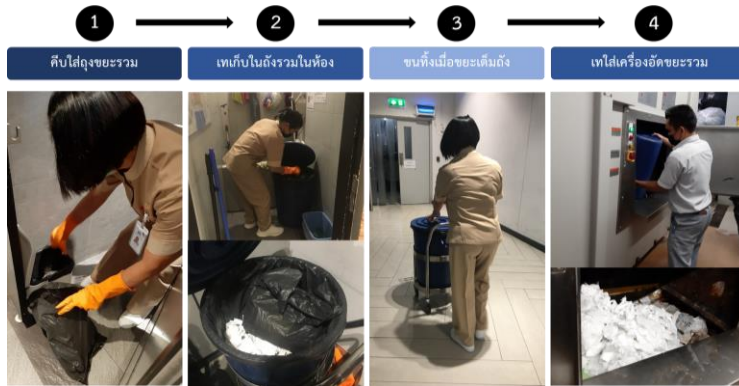
3.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการบริหารจัดการขยะเสี่ยงติดเชื้อในสถานการณ์การระบาดของโรคติดต่อ

1. การบริหารจัดการขยะจากห้องสุขาในอาคารห้างสรรพสินค้า 101 True Digital Park ดังนี้

- (1) การบริหารจัดการขยะจากห้องสุขาในพื้นที่สาธารณะ เป็นการบริหารจัดการเหมือนขยะทั่วไป
- (2) ทางโครงการได้เตรียมภาชนะที่มีถึงขยะสีแดงบรรจุอยู่เพื่อรองรับขยะหน้ากากอนามัย และรวบรวมถึงขยะสีแดงนำส่งให้ทางเจ้าหน้าที่สำนักงานเขตพระโขนงที่เข้ามาให้บริการจัดเก็บขยะนำไปคัดแยกและจัดการด้วยวิธีที่เหมาะสม

(3) การบริหารจัดการขยะผ้าอนามัย ดำเนินการโดยบริษัทเอกชนที่ให้บริการถึงสำหรับทั้งผ้าอนามัยโดยเฉพาะ โดยการนำถึงขยะใหม่มาเปลี่ยนทุก ๆ 15 วัน และนำขยะไปกำจัดนอกโครงการ

2. การรวบรวมขยะจากห้องสุขาดำเนินการโดยพนักงานทำความสะอาด ซึ่งจะรวบรวมขยะจากห้องสุขาย่อยทุกห้องทุก 1 ชั่วโมง ตั้งแต่ 10:00 น. ถึง 22:00 น. ส่วนในช่วงที่มีผู้ใช้งานอาคารจำนวนมากได้แก่ ช่วงพักกลางวันและหลังเลิกงาน พนักงานทำความสะอาดจะรวบรวมขยะจากห้องสุขาย่อยทุก 15 นาที ขั้นตอนการรวบรวมขยะ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจัดเก็บขยะจากห้องสุขาห้องสรรพสินค้า

(1) คีบขยะออกจากถังขยะย่อยในแต่ละห้องสุขา รวบรวมใส่ถุงดำ

(2) นำขยะที่รวบรวมในถุงดำไปเทในถังขยะรวม ภายในห้องเก็บอุปกรณ์

(3) เมื่อขยะเต็มถังจึงจะเข็นไปเทลงเครื่องอัดขยะรวมภายในห้องขยะใหญ่ของอาคาร แล้วจึงมีรถจากเขต มาจัดเก็บออกไปจากอาคารวันละ 1 รอบ

ซึ่งกระบวนการรวบรวมขยะจากห้องสุขาเป็น กระบวนการที่มีความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายเชื้อของ ขยะจากห้องสุขาสู่พนักงานและสิ่งแวดล้อมได้

3. บันทึกข้อมูลน้ำหนักขยะ โดยรวบรวมข้อมูล ปริมาณขยะมูลฝอยภายในห้องสุขาอาคารสาธารณะ ในช่วงที่มีการใช้งานมากที่สุด ได้แก่ 11.00-13.00 น. และ 16.30-18.30 น. เป็นเวลา 3 วัน เพื่อนำปริมาณ ขยะที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบถังขยะ ฆ่าเชื้อ พบว่าปริมาณขยะมากที่สุดที่เกิดขึ้นในช่วง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง (120 นาที) ประมาณ 375 กรัม ซึ่ง ในทางปฏิบัติช่วงที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก พนักงานจะ ทำการรวบรวมขยะจากถังขยะย่อยในทุก ๆ 15 นาที ดังนั้น จึงประมาณได้ว่าในหนึ่งรอบ (15 นาที) จะมีขยะ อยู่ในห้องสุขาย่อย 47 กรัมภายในถังขยะขนาด 10 ลิตร

3.2 ผลการพัฒนาถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องสุขา อาคารสาธารณะ

เมื่อเกิดการระบาดของโรค COVID-19 มีการนำ เทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้ฆ่าเชื้อบนพื้นผิววัสดุต่าง ๆ เช่น การใช้รังสีฉายเพื่อกำจัดเชื้อโรค (UVGI) แต่มี ข้อจำกัดที่เป็นอันตรายหากดวงตาและผิวหนังมีการ สัมผัสกับแสงโดยตรง ทำให้ยังต้องใช้งานภายใน ระบบปิดเท่านั้น [9] และการพัฒนาตู้อบฆ่าเชื้อด้วย Ozone Disinfector โดยใช้หลักการนำอิเล็กตรอนออก จากตัวทำปฏิกิริยาอื่น ๆ ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา รีดอกซ์ (Oxidation-Reduction (Redox) Reaction) แต่การสัมผัสก๊าซโอโซนที่มีค่าความเข้มข้นสูงจะเป็น อันตรายต่อสุขภาพหากมีการสูดดมโดยตรง จึงต้องมี การควบคุมปริมาณที่เหมาะสม [10]

นอกจากนี้ยังมีผู้พัฒนาถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วย โอโซนระบบพลาสติกความดันสูง เพื่อจัดการมูลฝอย ติดเชื้อที่เกิดจากสถานพยาบาลขนาดเล็กและ ห้องปฏิบัติการทดลอง โดยทดลองฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella sp.* ได้ร้อยละ 100 [11]



จากการนำเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมมาใช้ในการทำลายเชื้อไม่ว่าทั้งการใช้รังสีฉายเพื่อทำลายเชื้อโรค (UVGI) หรือการใช้ก๊าซโอโซน ต่างมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานหากไม่มีความรู้เพียงพอ ดังนั้นในการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ผู้ใช้งานจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับข้อจำกัดของเทคโนโลยีนั้นๆ หรือต้องมีผู้เชี่ยวชาญคอยกำกับดูแลอย่างใกล้ชิด ทั้งยังจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบอย่างสม่ำเสมอ จึงเป็นข้อพิจารณาที่ทำให้ยากต่อการนำไปใช้ในที่สาธารณะ

การพัฒนาถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องสุขาอาคารสาธารณะจึงควรพิจารณาวิธีการที่ง่ายต่อการใช้งานและการดูแลบำรุงรักษาที่ง่าย โดยมีการออกแบบ 2 ส่วน ประกอบด้วย การออกแบบถังขยะ และการออกแบบระบบการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อในถังขยะควบคู่กับรูปทรงถังขยะ (รูปที่ 2) ดังนี้

1. การออกแบบถังขยะ คณะผู้วิจัยกำหนดให้ถังขยะมี 3 ชั้น ได้แก่

- ชั้นบนสุด เป็นชั้นสำหรับทิ้งขยะที่อาจปนเปื้อนสารคัดหลั่ง ควรมีระบบเปิดปิดฝาแบบอัตโนมัติ หรือรูปแบบการเปิดปิดที่ลดการสัมผัสของผู้ใช้งาน
- ชั้นกลาง เป็นชั้นที่รวบรวมขยะที่เสี่ยงติดเชื้อและทำการพ่นหรือทำลายเชื้อที่พื้นผิวขยะด้วยสารประกอบโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 0.1% และกักขยะไว้ไม่ต่ำกว่า 15 นาที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อ ตามคำแนะนำจากกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข [12]
- ชั้นล่างสุด เป็นชั้นสำหรับเปิดและจัดเก็บขยะที่ผ่านการทำลายเชื้อแล้ว เพื่อนำไปบริหารจัดการตามขั้นตอนทั่วไปของพื้นที่อาคารนั้น ๆ

2. การออกแบบระบบการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อในถังขยะควบคู่กับการออกแบบรูปทรงถังขยะเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานภายในถังขยะ

การทดลองครั้งที่ 1

1.1 เพื่อหารูปทรงของถังขยะที่เอื้อต่อการกระจายตัวของน้ำยาทำลายเชื้อต่อพื้นผิวของกระดาดชำระ โดยจำลองถังขยะปริมาตร 10 ลิตร 3 รูปทรง ได้แก่ สีเหลี่ยมจัตุรัส สีเหลี่ยมผืนผ้า และทรงกระบอก โดยมีความสูงเท่ากันคือ 25 เซนติเมตร เพื่อควบคุมระยะห่างจากตำแหน่งพ่นน้ำยาถึงพื้นผิวของขยะภายในถังในการทดลอง ทำการเปรียบเทียบการกระจายน้ำยาทำลายเชื้อซึ่งในการทดลองได้ใช้น้ำผสมสีผสมอาหารทดแทนเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบพื้นที่ที่ได้รับน้ำยาทำลายเชื้อได้ชัดเจน โดยจำลองปริมาณขยะกระดาดชำระภายในถัง 47 กรัมเท่ากันทุกกรณี

1.2 เพื่อหาอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการกระจายน้ำยาได้ทั่วถึงพื้นผิวกระดาดชำระมี 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์หัวสเปรย์ทั่วไป (Foggy) และอุปกรณ์เครื่องพ่นละอองฝอย (Nano Mist) ทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์หัวสเปรย์ทั่วไป (Foggy) ในอัตราการพ่นเฉลี่ย 12.13 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้อุปกรณ์เครื่องพ่นละอองฝอย (Nano Mist) ในอัตราการพ่นเฉลี่ย 2.59 มิลลิลิตรต่อนาที โดยทำการทดลองแต่ละกรณีเป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกระจายตัวของน้ำยาโดยใช้หัวพ่นที่มีลักษณะแตกต่างกัน แล้วพิจารณาสัดส่วนของกระดาดชำระที่ได้รับน้ำยาในปริมาณ 100% 75% 50% 25% และ 0% ดังรูปที่ 3

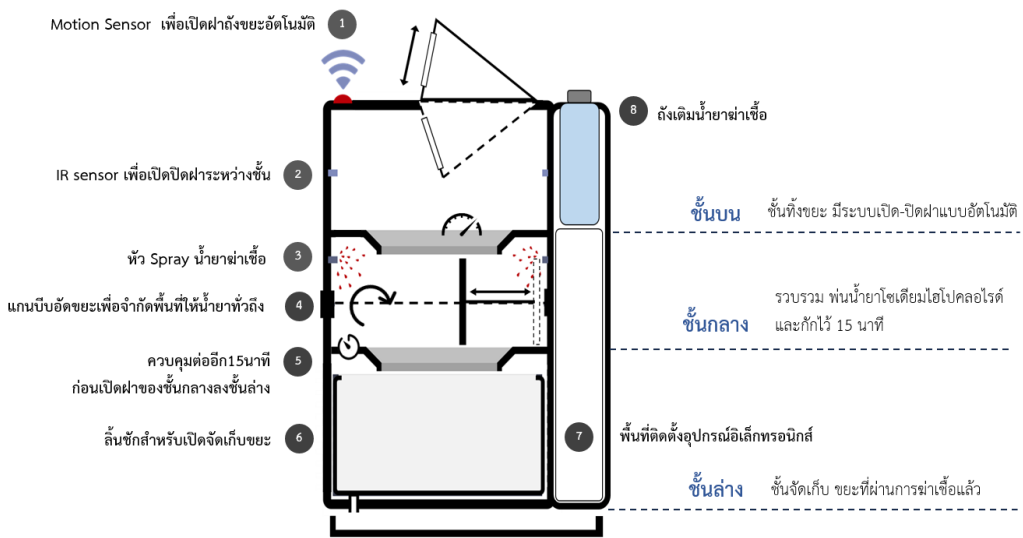
จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าจำนวนแผ่นกระดาดชำระที่ได้รับน้ำยาทั่วถึง (100%) จากการพ่นน้ำยาด้วยหัวสเปรย์ละอองฝอยมีปริมาณมากกว่าการพ่นน้ำยา



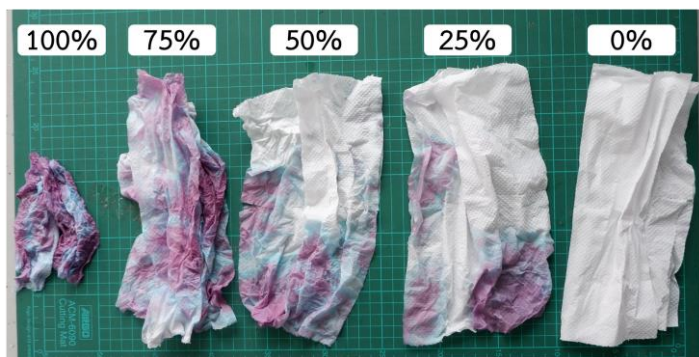
ด้วยหัวสเปรย์ทั่วไป และจำนวนกระดาษชำระที่ไม่ได้รับน้ำยาเลย (0%) จากการพ่นน้ำยาด้วยหัวสเปรย์ละอองฝอยน้อยกว่าการพ่นน้ำยาด้วยหัวสเปรย์ทั่วไป ในลักษณะทั้ง 3 รูปทรง

เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่พ่นน้ำยาด้วยหัวสเปรย์ละอองฝอย พบว่าจำนวนกระดาษชำระที่ไม่ได้รับน้ำยาเลย (0%) ในถึงทรงกระบอกมีปริมาณสูงสุด (43.67%)

รองลงมา ได้แก่ ภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (39.67%) และภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (38.67%) และพบว่าจำนวนแผ่นกระดาษชำระที่ได้รับน้ำยาทั่วถึง (100%) ในถึงทรงกระบอกและถึงทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีปริมาณเท่ากันคือ (18.33%) ซึ่งมากกว่าในถึงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (14.67%) ดังแผนภูมิที่ 1



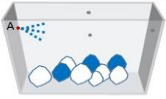

รูปที่ 2 รายละเอียดรูปแบบถังขยะ 3 ชั้น



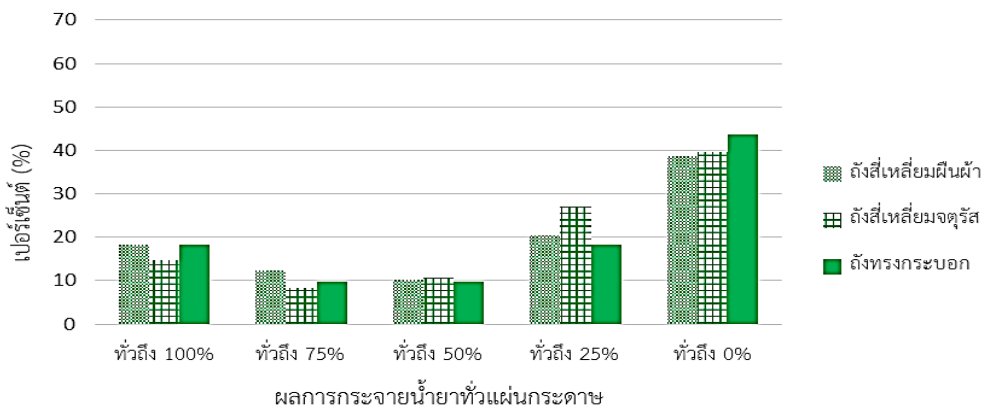
รูปที่ 3 ลักษณะกระดาษชำระที่ได้รับการกระจายน้ำยา 100% 75% 50% 25% และ 0%



ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการกระจายน้ำยาภายในถังกรณีใช้ foggy และ Nano Mist

รูปทรง	รูปแบบอุปกรณ์พ่นน้ำยา	ผลการกระจายน้ำยาทั่วแผ่นกระดาษ (คิดเป็นสัดส่วนจากกระดาษทั้งหมดในถัง (%))				
		100%	75%	50%	25%	0%
	สเปรย์ทั่วไป (foggy)	10.33	7.33	8.67	16	58
	ละอองฝอย (Nano Mist)	18.33	12.33	10.33	20.33	38.67
	สเปรย์ทั่วไป (foggy)	10.67	5.67	7.33	17.67	58.33
	ละอองฝอย (Nano Mist)	14.67	8.33	10.67	27	39.67
	สเปรย์ทั่วไป (foggy)	10	6.67	7	15	61.67
	ละอองฝอย (Nano Mist)	18.33	9.67	9.67	18.33	43.67

กรณีทดลองใช้ละอองฝอย (Nano Mist)



แผนภูมิที่ 1 กรณีใช้หัวสเปรย์ละอองฝอย (Nano Mist)

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงนำรูปทรงสี่เหลี่ยมฝอยฝอยไปพัฒนาต่อเป็นรูปแบบถังขยะเช่า และทำการศึกษารูปแบบหัวพ่นน้ำยาแบบอื่น ๆ เพื่อปรับปรุง

ประสิทธิภาพการกระจายน้ำยาและลดระยะเวลาในการพ่นน้ำยา



การทดลองครั้งที่ 2

จากการทดลองครั้งที่ 1 ทำให้ทราบได้ว่าการพ่นละอองน้ำยาทำลายเชื้อหรือน้ำผสมสีที่ใช้ทดแทนในการทดลองนั้นมีความเป็นไปได้น้อยที่จะกระจายได้ทั่วถึงพื้นผิวกระดาษชำระทั้งหมดภายในถึงภายในระยะเวลาที่ยอมรับได้ เนื่องจากการใช้งานถึงขยะจริงในอาคารห้างสรรพสินค้าหรืออาคารสาธารณะมักมีการใช้งานที่ต่อเนื่อง จึงต้องคำนึงถึงระยะเวลาการทำงานของกระบวนการทั้งหมดในถึงให้เหมาะสมต่อปริมาณการทิ้งกระดาษชำระที่เกิดขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้ปรับเปลี่ยนวิธีการในการพ่นน้ำยาจากหัวสเปรย์ทั่วไปและหัวสเปรย์ละอองฝอย เป็นการใช้ระบบหัวพ่นหมอกคล้ายแบบที่มีการนำไปพัฒนาซุ่มประตู่มาใช้อัตโนมัติ [13] ซึ่งรับแรงดันได้ 1.5-3.0 บาร์ ด้านในมีการออกแบบเป็นเกลียวเพื่อป้องกันการติดตะกอนที่อาจปะปนมากับน้ำ สามารถปรับระยะการกระจายได้ที่ 0.5 - 0.9 เมตร อัตราการไหล 7 ลิตรต่อชั่วโมง วัสดุเป็นทองเหลือง ดังรูปที่ 4 ดังนั้น การทดลองครั้งที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถึงขยะติดเชื้อในห้องสุขาและประสิทธิภาพของหัวสเปรย์พ่นหมอก



รูปที่ 4 หัวพ่นหมอก

คณะผู้วิจัยได้นำผลการทดลองครั้งที่ 1 มาใช้ในการประกอบถึงต้นแบบโดยการนำขนาดและรูปทรงถึงสีเหลืองฝีมืมาใช้เป็นส่วนถึงชั้นกลาง ซึ่งเป็นชั้นที่ทำการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อ และทดลองใช้หัวสเปรย์พ่นหมอก ในการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อ ดังนี้

1.1 ทำการทดลองพ่นน้ำยาทำลายเชื้อผ่านหัวพ่นหมอกเป็นระยะเวลา 2 นาที โดยอ้างอิงมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการพ่นสเปรย์ทั่วไป (Foggy) และใช้กระดาษชำระปริมาณ 47 กรัม ตามการทดลองครั้งที่ 1 ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนกระดาษชำระที่ไดรับน้ำยาเป็นพื้นที่ทั่วถึง 100% มีสัดส่วนร้อยละ 30.67 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากขึ้นหากเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของหัวสเปรย์ Foggy และ Nano mist ในการทดลองครั้งที่ 1 แต่ยังมีกระดาษชำระที่ไม่ไดรับน้ำยาเลย 0% อยู่ร้อยละ 52

1.2 เพิ่มระบบการมีบัตต์ โดยเพิ่มแผ่นมีบัตต์ขึ้นภายในถึงชั้นกลางของถึงขยะนี้ เพื่อจำกัดพื้นที่ปริมาตรของขยะให้น้อยลงและให้สามารถเข้าถึงน้ำยาได้มากขึ้นจากการทดสอบ 3 ครั้ง พบว่ามีกระดาษชำระที่ไดรับน้ำยาทั่วถึงเต็มแผ่นเป็นสัดส่วนมากขึ้น คือร้อยละ 46 และกระดาษชำระที่ไม่ไดรับน้ำยาเลยลดลงเหลือร้อยละ 17.46 หากเทียบกับผลในข้อ 1.1

1.3 ทดลองลดปริมาณขยะกระดาษชำระในถึงชั้นกลางหรือชั้นพ่นน้ำยาทำลายเชื้อลงร้อยละ 50 เนื่องจากการสังเกตผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่ายังคงมีขยะกระดาษชำระส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถเข้าถึงน้ำยาได้ ซึ่งถึงแม้ว่าลดปริมาณกระดาษชำระลง ถึงขยะนี้ก็ยังคงสามารถรองรับขยะได้มากถึง 47 กรัม ภายใน 15 นาที ตามปริมาณและระยะเวลาต่อรอบของการจัดเก็บของเจ้าหน้าที่ทำความสะอาดที่ได้จากขั้นตอนแรกของการ

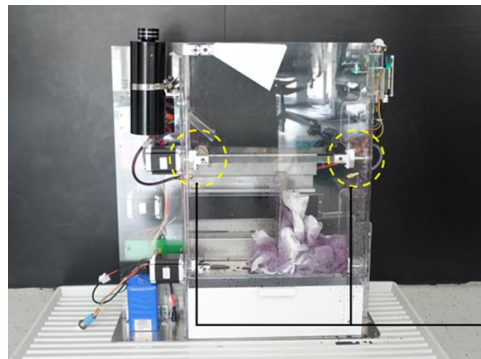


วิจัย โดยการแบ่งรองรับขยะที่ถึงชั้นบนครึ่งหนึ่งและปล่อยขยะกระดาษชำระลงมาชั้นกลางเพียงครึ่งเดียวหรือประมาณ 24 กรัม ฝนนํ้ายาเป็นเวลา 2 นาทีเช่นเดิม จากการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง พบว่ามีกระดาษชำระที่ได้รับนํ้ายาทั่วถึงเต็มแผ่นหรือ 100% เป็นสัดส่วนร้อยละ 63 และกระดาษที่ไม่ได้รับนํ้ายาเลยหรือ 0% เหลือเพียงแค่ร้อยละ 1

1.4 ทดลองเพิ่มตำแหน่งสเปรย์นํ้ายาทำลายเชื้อจากเดิม 1 ตำแหน่งเป็น 2 ตำแหน่งที่ด้านซ้ายและขวาของถึงชั้นกลาง (รูปที่ 5) ทำการทดลองฝนนํ้ายาที่ระยะเวลา 2 นาทีเท่าเดิม จำนวน 3 ครั้ง พบว่ากระดาษทั้งหมดได้รับการกระจายนํ้ายาได้ทั่วถึง

100% เป็นร้อยละ 100 ทั้ง 3 ครั้ง และมีลักษณะจับตัวเป็นก้อน (รูปที่ 5)

1.5 การทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการฉีดฝนนํ้ายาทำลายเชื้อของถึง เพื่อให้ถึงขยะมีความพร้อมและรองรับการใช้งานที่ต่อเนื่องได้เร็วที่สุด โดยได้ทดลองทำการฉีดฝนนํ้ายาจำลองให้กระดาษชำระปริมาณ 24 กรัม และสังเกตผลการกระจายนํ้ายาที่พื้นผิวกระดาษชำระ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการฉีดฝนนํ้ายา 1.30 นาที 1.00 นาที 45 วินาที และ 30 วินาทีตามลำดับ พบว่าระยะเวลาต่ำสุดที่สามารถฝนนํ้ายาได้ทั่วถึงกระดาษชำระ 24 กรัม คือ 45 วินาที



รูปที่ 5 ทดลองฝนนํ้ายาด้านซ้ายและขวาของถึงชั้นกลาง และภาพกระดาษชำระที่ผ่านการฝนนํ้ายา



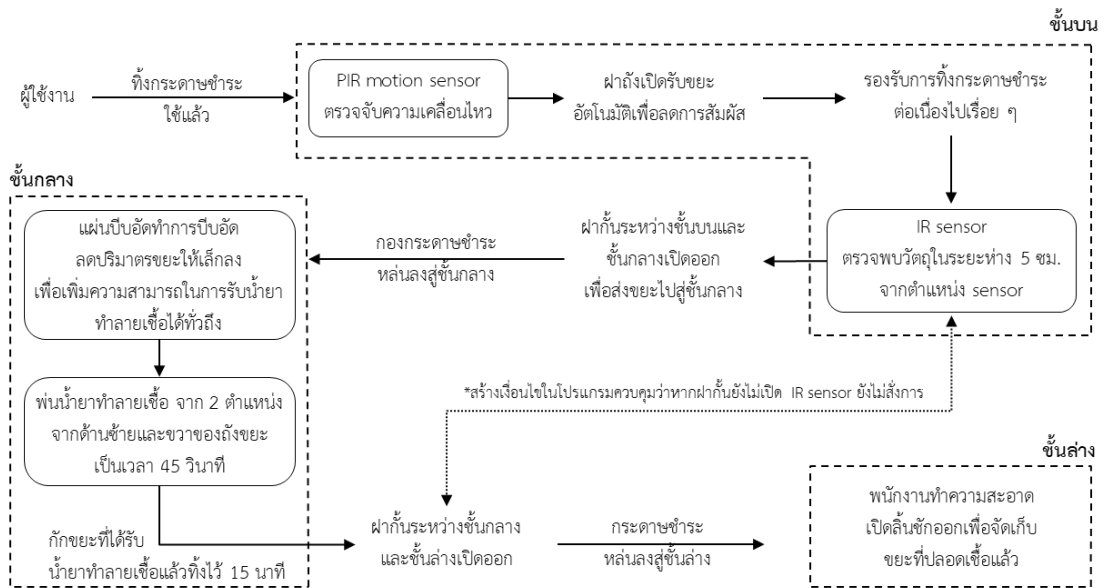
3.3 จัดทำต้นแบบถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อ และประกอบอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานถึงขยะต้นแบบ

1. แนวทางการพัฒนาต้นแบบถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อและกระบวนการทำงานของถึงต้นแบบ

ทำการวางแผนและออกแบบกระบวนการทำงานของถึงขยะในส่วนชั้นอื่น ๆ ได้แก่ ชั้นบนและชั้นล่างต่อไป เพื่อให้มีความสัมพันธ์กันในกระบวนการทำงานทั้งหมดของถึงขยะ โดยถึงชั้นบนต้องควบคุมการเปิดปิดฝาถังแบบอัตโนมัติเพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสของผู้ใช้งานที่ใช้งานต่อเนื่องกัน และร่างแนวทางการควบคุมการเปิดปิดฝากั้นระหว่างแต่ละชั้นโดยต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการที่ผิววัตถุต้องสัมผัสน้ำยาทำลายเชื้อและกักเก็บไว้ในระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ปลอดภัยแล้วจึงส่งต่อไปยังชั้นเปิดจัดเก็บขยะหรือชั้นล่างของถึงขยะ เพื่อให้พนักงานทำความสะอาดที่ทำหน้าที่จัดเก็บขยะ

เหล่านี้ปลอดภัยจากการสัมผัสเชื้อหรือเกิดความเสี่ยงต่อการฟุ้งกระจายของเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมากับขยะได้ กระบวนการทำงานของต้นแบบถึงขยะดังรูปที่ 6

เมื่อร่างกระบวนการทำงานของถึงขยะแล้วจึงได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานจริง และประกอบรายการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ รวมทั้งเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานภายในถึงให้เป็นแบบอัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดและตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังรูปที่ 7 และนำข้อมูลจากแบบจำลองมาร่างและออกแบบต้นแบบถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อเพื่อใช้เป็นแบบในการผลิตต้นแบบจริงในลำดับถัดไป โดยแนวคิดของต้นแบบจริงนั้นต้องมีการคำนึงถึงขนาดโดยรวมของถึง โดยมีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และสูง 65 เซนติเมตร รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้สามารถ

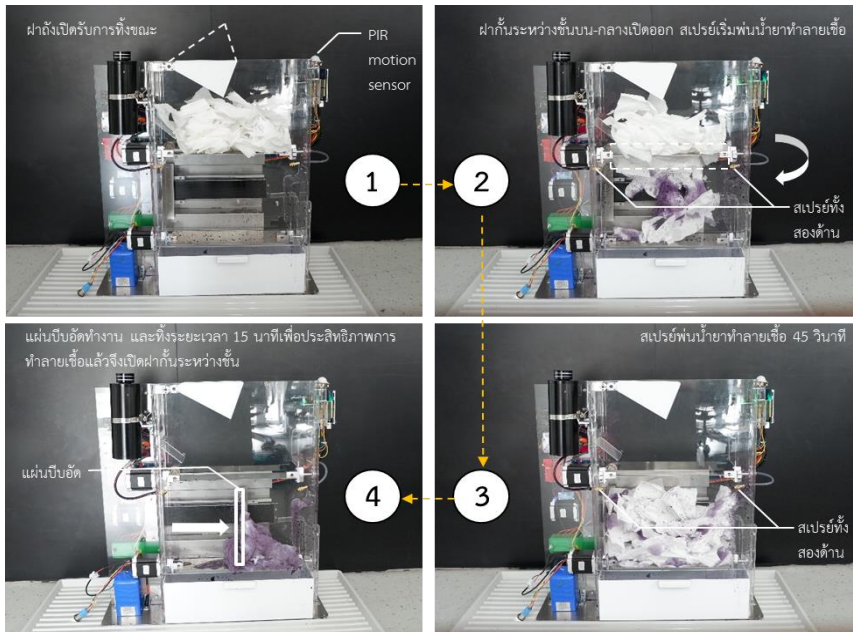


รูปที่ 6 กระบวนการทำงานของถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อสำหรับอาคารสาธารณะ



จัดวางในห้องน้ำสำหรับอาคารสาธารณะซึ่งมีพื้นที่ค่อนข้างจำกัดได้ และเสนอแนะตำแหน่งจัดวางภายในห้องน้ำสาธารณะให้สัมพันธ์ต่อการใช้งานจริง นอกจากนี้การออกแบบต้องคำนึงถึงการซ่อมบำรุงที่สะดวกและการเปิดเติมน้ำยาทำลายเชื้อโดยพนักงาน

ทำความสะอาดของอาคารทั่วไป และวิธีการเปิดเก็บรวบรวมขยะเพื่อนำไปจัดการต่อตามแนวทางของอาคารนั้น ๆ ได้ง่าย และตำแหน่งนั้นต้องปลอดภัยจากการสัมผัสน้ำซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ (รูปที่ 8)



รูปที่ 7 อธิบายขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองถังขยะต้นแบบ



รูปที่ 8 ตำแหน่งวางถังขยะต้นแบบในห้องน้ำ



- หมายเลข 1 ตำแหน่งเสียบสาย Adapter สำหรับชาร์จแบตเตอรี่
- หมายเลข 2 ปุ่มสำหรับเปิด/ปิด ถังขยะ
- หมายเลข 3 ตำแหน่ง PIR Motion Sensor สำหรับเปิดฝาถังขยะ และหน้าจอแสดงสถานะการทำงานของถัง
- หมายเลข 4 ตำแหน่งเปิดฝาเกลียวเพื่อเติมน้ำทำละลายเชื้อ
- หมายเลข 5 ลึนชักชั้นล่างของถังขยะสำหรับเปิดจัดเก็บขยะที่ผ่านการทำละลายเชื้อแล้ว

รูปที่ 9 ส่วนประกอบการใช้งานถังขยะมูลฝอยติดเชื้อ

3.4 การประเมินผลการใช้งาน

ทำการประเมินผลความต้องการและการใช้งานนวัตกรรมถังขยะทำลายเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะ โดยแบ่งออกเป็นส่วนความเห็นจากเจ้าหน้าที่บริหารจัดการอาคารสาธารณะ และความคิดเห็นจากผู้ใช้งานโดยตรง

1. จากการสอบถามความเห็นเจ้าหน้าที่บริหารจัดการอาคารสาธารณะ เช่น อาคารสำนักงาน อาคารห้างสรรพสินค้า จำนวน 10 ท่าน พบว่า

1.1 ร้อยละ 60 ให้ความเห็นว่ามีนวัตกรรมถังขยะทำลายเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะสำหรับทั้งขยะจำพวกกระดาษชำระใช้แล้ว มีความจำเป็นอย่างมากต่ออาคารสาธารณะ และร้อยละ 80 คิดว่าหากในห้องน้ำอาคารสาธารณะที่บริหารจัดการอยู่ได้มีการใช้

นวัตกรรมถังขยะทำลายเชื้อ จะสร้างความน่าเชื่อถือต่อผู้ใช้บริการอาคารเป็นอย่างมาก

1.2 จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาจัดหาถังขยะทำลายเชื้อมาใช้ในห้องน้ำอาคารสาธารณะ โดยการให้คะแนนปัจจัยแรก 8 คะแนน และลดลงไป 7 และ 6 คะแนน ในปัจจัยที่ให้ความสำคัญเป็นลำดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยที่ได้น้ำหนักมากที่สุด ได้แก่ ต้องสามารถวัดผลได้ว่ามีประสิทธิภาพในการทำละลายเชื้อโรคได้จริงเป็นสัดส่วนคะแนนร้อยละ 62.5 รองลงมาคือพิจารณาจากการใช้งานง่ายและการดูแลบำรุงรักษาบ่อย เป็นสัดส่วนคะแนนร้อยละ 57.5 ปัจจัยที่สามคือราคาหรือมูลค่าในการลงทุนเป็นสัดส่วนคะแนนร้อยละ 45 ตามลำดับ



ตารางที่ 2 ลำดับคะแนนที่ผู้บริหารจัดการอาคารใช้พิจารณาในการจัดหาถังขยะทำลายเชื้อในห้องน้ำ

ปัจจัยที่จะพิจารณาเลือกจัดหาถังขยะทำลายเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะ (สำหรับถังขยะจำพวกกระดาษชำระใช้แล้ว)	สำนักงาน								ห้างฯ		รวมคะแนน
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ราคาหรือมูลค่าในการลงทุน		8	8	6	7				7		36
ความสวยงาม								6	6	8	20
การใช้งานง่ายและดูแลบำรุงรักษาต่ำ		6	7		6	6	7		8	6	46
การใช้งานแพร่หลายในอาคารอื่น ๆ											0
จำเป็นต้องทำตามกฎหมายหรือข้อบังคับ								8			8
ลูกค้าหรือผู้ใช้งานอาคารให้ความสำคัญ	6			8					7		21
สามารถวัดผลได้ว่ามีประสิทธิภาพฆ่าเชื้อโรคได้จริง	8		6	7		8	8	6		7	50
สามารถจัดทำได้ง่าย สะดวกต่อใช้งานในพื้นที่เดิม	7	7			8	7					29

2. ประเมินความคิดเห็นจากผู้ทดลองใช้งานถังขยะต้นแบบ จำนวน 20 ท่าน ในปีวิจัยความพึงพอใจด้านการใช้งาน, ความพึงพอใจด้านความสวยงาม, การรับรู้ถึงประโยชน์ของการใช้งาน และปัจจัยต่อการตัดสินใจซื้อ พบว่ามีความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก คิดเป็นคะแนนเฉลี่ย 4 คะแนน จากคะแนนเต็ม 5 คะแนน ($\bar{X}=4.00$, S.D.=0.79) โดยมีความพึงพอใจต่อขนาดของถังขยะต้นแบบต่ำสุด คิดเป็นคะแนนเฉลี่ย 3.45 ($\bar{X}=3.45$, S.D.=0.83) จากการสัมภาษณ์เพิ่มเติมพบว่าผู้ทดลองส่วนใหญ่เห็นว่าถังขยะต้นแบบมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับพื้นที่ห้องสุขาในอาคารสาธารณะทั่วไปที่มีพื้นที่ภายในจำกัด จึงเห็นว่ากรรณาดังขยะต้นแบบนี้ไปใช้งานอาจทำได้ไม่แพร่หลาย และความพึงพอใจที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{X}=4.35$, S.D.=0.81) ได้แก่ผู้ทดลองสามารถใช้งานถังขยะต้นแบบนี้ได้ด้วยตนเอง

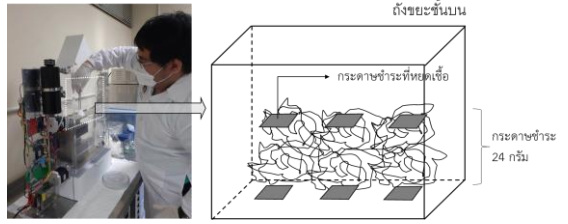
ตั้งแต่ครั้งแรกที่ได้ใช้งาน และความพึงพอใจเฉลี่ยของถังขยะต้นแบบ

เมื่อศึกษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์ถังขยะที่สืบค้นจากร้านจำหน่ายสินค้าและบริการเกี่ยวกับอาคารโฮมโปรพบว่าสินค้าถังขยะในปัจจุบันเริ่มมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้ เช่น มีระบบเซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวเพื่อควบคุมการเปิดปิดของฝาถังอัตโนมัติลดการสัมผัสด้วยมือ แต่ราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับถังขยะรูปแบบอื่น ๆ ในขนาดใกล้เคียงกัน และวัสดุหลักของถังขยะที่แตกต่างกันมีผลต่อราคาของสินค้า โดยถังขยะที่ใช้สแตนเลสเป็นวัสดุหลักจะมีราคาสูงกว่าถังขยะที่ใช้พลาสติกเป็นวัสดุหลักถังขยะขนาด 12 ลิตร ที่มีระบบเซ็นเซอร์ ราคา 1,390 บาท แต่ยังไม่ถังขยะที่มีนวัตกรรมทำลายเชื้อจำหน่าย



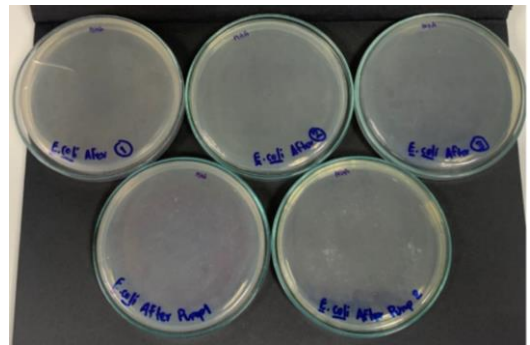
3.5 การตรวจวัดประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ

คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการทำลายเชื้อของถังขยะต้นแบบโดย ผศ.ดร.อดิศักดิ์ รัมแสง หน่วยวิจัยโรคอุบัติใหม่และอุบัติซ้ำแบบที่เรีย ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ ม.มหิดล โดยนำเชื้อ ได้แก่ เชื้อ *Escherichia coli* และเชื้อ *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มข้น 10^8 CFU/mL ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาหยดบนกระดาษชำระจำนวน 6 แผ่น แล้วนำกระดาษชำระที่หยดเชื่อนี้ผสมกับกระดาษชำระอื่น ๆ ให้ได้น้ำหนัก 24 กรัม ไปผ่านการทิ้งลงถังขยะต้นแบบให้ผ่านกระบวนการทำลายเชื้อในถังแล้วเปรียบเทียบปริมาณเชื้อก่อนและหลัง โดยมีตำแหน่งการวางแผ่นกระดาษชำระที่ปนเปื้อนเชื้อ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตำแหน่งการวางกระดาษชำระที่ปนเปื้อนเชื้อ

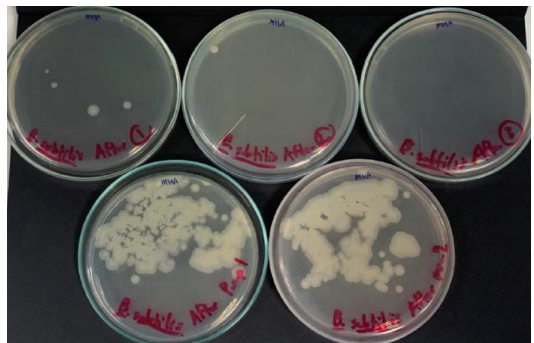
จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำลายเชื้อพบว่า กระบวนการทำลายเชื้อภายในถังนั้น มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อโรคได้จริง ซึ่งสามารถกำจัดเชื้อ *E. Coli* ได้ทั้งหมด (รูปที่ 11) และลดปริมาณเชื้อ *B. subtilis* มากกว่า 99.995% แต่ยังไม่สามารถกำจัดเชื้อ *B. subtilis* ได้อย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 12) ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์หาแนวทางการพัฒนาต่อไปอาจเกิดจากการได้รับน้ำยาที่ไม่ทั่วถึง หรือได้รับน้ำยาในระยะเวลาที่น้อยเกินไป เป็นต้น



รูปที่ 11 เชื้อ *E. coli* หลังผ่านถังขยะทำลายเชื้อ

4. บทสรุป

โครงการการพัฒนาถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในพื้นที่ห้องน้ำอาคารสาธารณะให้สามารถทำลายเชื้อที่อาจปนเปื้อนมากับขยะ เพื่อเป็นการลดความเสี่ยงของการแพร่ระบาดของโรคติดต่อโดยบูรณาการความรู้ด้านการออกแบบกับ



รูปที่ 12 เชื้อ *B. subtilis* หลังผ่านถังขยะทำลาย

การป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ และออกแบบถังขยะให้มีระบบทำลายเชื้อจากสารคัดหลั่งที่ปนเปื้อนขยะมูลฝอยก่อนการส่งไปกำจัด ทำให้ขยะติดเชื้อที่ผ่านกระบวนการทำลายเชื้อภายในถังขยะเปลี่ยนเป็นขยะทั่วไป การออกแบบถังขยะมูลฝอยติดเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด



กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และสูง 65 เซนติเมตร เพื่อความเหมาะสมในการวางภายในห้องน้ำสาธารณะที่พื้นที่จำกัด และเหมาะสมต่อระดับการใช้งานจริง ไม่กระทบต่อความสวยงามในการมองเห็น รวมทั้งยังออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโดยออกแบบให้ถึงระยะมี 3 ชั้น ได้แก่ ถึงชั้นบนสุด เป็นชั้นทิ้งขยะกระดาษชำระที่ปนเปื้อนสารคัดหลั่ง ใช้ระบบเปิดปิดฝาแบบอัตโนมัติ ถึงชั้นกลาง เป็นชั้นที่รวบรวมขยะที่เสี่ยงติดเชื้อซึ่งรับมาจากถึงชั้นบนและทำการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อไปที่พื้นผิวขยะโดยใช้สารประกอบโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 0.1% ส่วนถึงชั้นล่างสุดออกแบบเป็นลิ้นชักเพื่อรองรับขยะกระดาษชำระที่ผ่านการพ่นน้ำยาทำลายเชื้อแล้ว ทำให้ขยะส่วนนี้เป็นขยะทั่วไปและเจ้าหน้าที่ทำความสะอาดทำการเปิดจัดเก็บขยะต่อไป นอกจากนี้ยังออกแบบให้สะดวกต่อการเติมน้ำยาทำลายเชื้อโดยเจ้าหน้าที่ทำความสะอาดของอาคาร

การประเมินผลจากการสอบถามเจ้าหน้าที่บริหารจัดการอาคารสาธารณะอย่างห้างสรรพสินค้าและอาคารสำนักงาน เห็นว่าปัจจัยที่จะใช้พิจารณาในการเลือกจัดทำมาตรการถึงขยะทำลายเชื้อในห้องน้ำอาคารสาธารณะที่สำคัญลำดับแรกคือสามารถวัดผลได้ว่ามีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคได้จริง ซึ่งจากการทดสอบประสิทธิภาพการทำลายเชื้อโดยถึงขยะต้นแบบในงานวิจัยพบว่าสามารถกำจัดเชื้อ *E. Coli* ได้ทั้งหมด และลดปริมาณเชื้อ *B. subtilis* ให้ลดลงได้ แต่ยังไม่สามารถกำจัดเชื้อ *B. subtilis* ได้อย่างสมบูรณ์ และได้มีการทดลองใช้งานเพื่อประเมินผลการใช้งานถึงต้นแบบโดยบุคคลทั่วไปพบว่าความพึงพอใจที่ได้รับคะแนนสูงสุดคือสามารถ

ใช้งานถึงขยะต้นแบบนี้ได้ด้วยตนเองตั้งแต่ครั้งแรกที่ใช้งาน และความพึงพอใจในสีของถึงขยะต้นแบบในขณะ que ความคิดเห็นที่ได้รับคะแนนต่ำสุดคือความพึงพอใจในขนาดของถึงขยะต้นแบบ

ต้นแบบถึงขยะฆ่าเชื้ออัตโนมัติที่เป็นผลผลิตจากงานวิจัยสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ในระบบอุตสาหกรรม เหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารสาธารณะทั่วไป ทำให้มีปริมาณและความต้องการค่อนข้างสูง ดังนั้นในอนาคตสามารถเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นไปได้ในทางธุรกิจ ช่วยลดความเสี่ยงต่อการกระจายเชื้อโรคจากขยะที่ปนเปื้อนสิ่งปนเปื้อนในห้องน้ำ สร้างความปลอดภัยให้ทั้งผู้ใช้งานอาคารและเจ้าหน้าที่บริหารจัดการอาคาร สร้างความมั่นใจให้ผู้บริหารมากขึ้น ทำให้ผู้ประกอบการมีภาพลักษณ์ที่ดีจากการใส่ใจและรักษาสุขภาพอนามัยของลูกค้า และช่วยลดปริมาณขยะติดเชื้อที่อาจกระจายในชุมชนและนำไปจัดการได้อย่างปลอดภัย

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 ดำเนินการและได้รับความร่วมมือจากหน่วยงานผู้ให้ทุนเป็นอย่างดี รวมทั้งผู้ร่วมงานและหน่วยงานอื่น ๆ ภายในองค์กร บริษัท แมกโนเลีย ควอลิตี้ ดีเวล็อปเม้นต์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยประสานงานตลอดการดำเนินโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณบริษัท อินทิเกรท โซลูชัน จำกัด ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์จากงานวิจัยฉบับนี้ ทำให้ผลงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ รวมทั้งขอขอบคุณโครงการวัน-โอ-วัน ทูติจิทัลพาร์ค



(101 True Digital Park) และเจ้าหน้าที่ทุกคนที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นอาคารตัวอย่าง และสนับสนุนข้อมูล และ ผศ.ดร.อดิศักดิ์ ร่มแสง ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ ม.มหิดล ซึ่งเป็นผู้อนุเคราะห์การตรวจวัดเชื้อจุลชีพเพื่อประเมินประสิทธิภาพต้นแบบในงานวิจัยนี้

คณะผู้วิจัยหวังว่าผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสาธารณะ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจต่อไป และขอขอบคุณงามความดีและประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ให้กับผู้มีพระคุณทุกท่าน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] https://ddc.moph.go.th/viralpneumonia/faq_more.php. (Accessed on 25 May 2022)
- [2] https://www.anamai.moph.go.th/ewt_dl_link.php?nid=16722. (Accessed on 7 July 2020)
- [3] P. Akkajit, Infectious waste and infectious waste management in hospitals. *Environmental Journal*, 2019, 21(1), 31-39. (in Thai)
- [4] R. Takoporn, Infectious waste management behaviors within household: a case study of Chombueng, Ratchaburi province, Thesis, Silpakorn University, Thailand, 2015.
- [5] W. Khawboonchu, The factors that have an effect on infectious waste management by public health personnel in Kanchanaburi, Thesis, National Institute of Development Administration, Thailand, 2009.
- [6] S. Chandanachulaka, S. Tookaew, P. Krabkran, T. Hirunrueng, P. Sridaromont, Study for improving infectious waste management efficiency in Thailand, *Thailand Journey of Health Promotion and Environmental Health*, 2021, 44(3), 115-128. (in Thai)
- [7] N. Indrawattana, M. Vanaporn, Nosocomial infection, *Journal of Medicine and Health Sciences*, 2015, 22(1), 81-92.
- [8] <https://hpc2service.anamai.moph.go.th/envdata/files/8.pdf> (Accessed on 7 June 2023)
- [9] <https://web.tcdc.or.th/th/Articles/Detail/Covid-UV-C> (Accessed on 9 July 2020)
- [10] <https://siamrath.co.th/n/149956> (Accessed on 9 July 2020)
- [11] H. Jatana, M. Jongsuphanphong, T. Pankrib, P. Chantawon, Design and development of disinfected bin using ozonization with high pressure plasma system, *The Journal of Applied Science*, 2016, 15(2), 1-11.
- [12] https://covid19.anamai.moph.go.th/web-upload/2xdccaaf3d7f6ae30ba6ae1459eaf3dd66/m_document/6736/34126/file_download/49d59084c556cf0dea1d97c97d4cb0e0.pdf (Accessed on 7 July 2020)
- [13] C. Polpong, C. Ngamsang, W. Polpong, K. Buapha, Automatic sterilization arched entrance, *Industrial Technology Journal Surindra Rajabhat University*, 2022, 7(1), 58-65.

Application of Failure Mode Effect and Critical Analysis for Risk Management: A Case of Road-rail Transport at the Thai-Lao PDR Cross Border

Jirapan Liangrokapart* and Surangkana Rungwattanataratorn

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

* Corresponding author, E-mail: jirapan.lia@mahidol.edu

Received: 7 March 2024; Revised: 27 May 2024; Accepted: 18 June 2024

Online Published: 22 August 2024

Abstract: Globalization is the process of increased interconnectedness among countries, resulting in the growth of international trade, investment, and cultural exchange. Transport and Logistics are important for economic growth and development, allowing industries to enter potential customers, reduce costs, and enhance efficiency. The cross-border trade requires good transportation and logistics systems to move products and services across borders through road, rail, air, and water transport. As the railway is an environmentally friendly and sustainable mode of transport, but cannot provide transportation service alone without other modes of transport, this study focuses on risk management in road-rail freight transport. The objectives of the study are to identify risks with respect to road-rail freight transport at the cross border between Thailand and Laos PDR and to provide a guideline for risk management for the case study. The risks were prioritized based on the Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) concept. Findings from this research present that the technology risk, the equipment and operations risk, and the organization and personal risk are among the top priorities in need of risk management. Lastly, this research suggests proper risk mitigation guidelines to manage those risks.

Keywords: Risk Management; Risk Assessment; Road-Rail Transport; Failure Mode and Effects Analysis (FMEA); Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA)



1. Introduction

No one can discard the fact that rail transportation for freight service is the cheapest mode, especially for international freight transport and it is another option to diversify transportation risks. Comparing the transportation costs between the four routes from China to Thailand, it was found that the estimated transportation costs via train is much cheaper than the truck-only transport [1]. Therefore, many countries have issued their national policy to support the shift to rail in order to reduce the transport cost. In addition, rail transport is the most eco-friendly mode among the land transports and good for sustainability.

However, despite the benefit of the rail transport, the operations of international rail freight transport are challenging. Challenging for international rail includes the infrastructure, the missing link, the international cooperation, and the technical problems. Cross-border trains are complicated due to different gauges and interoperability of signaling and electrification systems between neighboring countries. The challenges for rail freight include economy, intermodal, modal shift, consolidation, the last mile, liberalization, access charge, and capacity [2]. According to the fact that rail freight transport cannot run alone, the other mode of transportation like road is needed to complete the service from the suppliers to the customers. Hence, it is interesting to explore the challenges and the associated risks

with respect to the road-rail freight transport. As the Bilateral Agreement between Thailand and Lao PDR on 'Joint Traffic Working Over Railway' had been signed several years ago and the Thailand-Laos cross border in Nong Khai province is in operations, this research chose this cross border as the case study. The research questions are:

RQ1: What are the risks related to road-rail freight transport?

RQ2: How to manage the risks?

Multimodal transportation refers to logistics transport and freight processes that require two or more modes of transport including road, air, marine and railway transport. These days, multimodal transport is the dominant mode for the global supply chain and logistics. It requires the coordination of multiple modes of transport. In this study, the focus is only on the road-rail transportation which is a kind of multimodal transportation. The road-rail process for cargo transport of the case study is illustrated in Fig. 1.

From Fig.1, the process shows a combination of Road-Rail transport starting from the containers were shipped by truck to freight station in Thailand, then the unloading and loading process was performed, the containers were shipped by train to the borders and cross the borders to Lao PDR and unloaded at the terminal station before being shipped by truck to the destinations. However, the

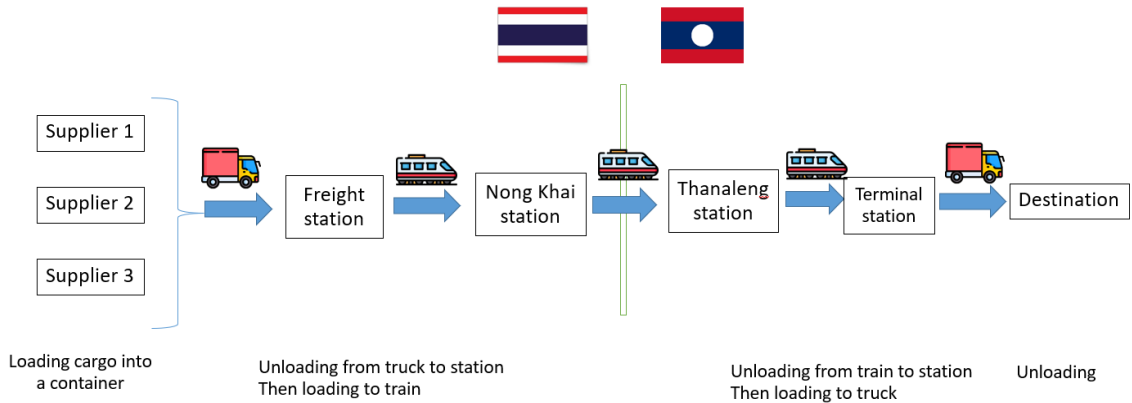


Fig. 1 The road-rail cargo transport process of the case study

container transport may face a number of uncertainties during the process and may result in the delay of shipments.

The case study at Nong Khai station was used as a case for identifying failure modes with respect to Road-Rail transportation for freight. From observation during preliminary study, during the process of cargo shipment by truck to freight station, sometimes problems occur due to insufficient number of trucks, rise of energy cost, delay from road accidents, etc. For the loading cargo process at the station, problems related to technology, equipment, labor staff, container/packaging, and storage of hazard materials may be found. For railway transport, the failures are from the technology for handling cargoes and the delay in transport. The problems for unloading process are similar to the loading process. Lastly, the last-mile connection to the customers may concern transport risk.

Therefore, the objective of this study is to identify risks in the road-rail transportation at the cross border between Thailand and Laos PDR as a case study and to suggest the guidelines to manage the risks.

2. Risk management and Risk factors related to international rail freight

Risk management is a set of activities within an organization undertaken to carry the most positive outcome and decrease the volatility of that outcome. Wei [3] studied the risk and found that technology, equipment, operations, environment, and transport risks are the major concern for multimodal transport. In 2013, safety, technology, transport, and time are the most important risks for transportation in Chiang Rai and Kunming [4]. These risks were confirmed later in 2020 for the import-export logistics of agricultural products from Thailand to China [5].



Another research, Reis et.al. [6] concluded that operation, environment, and personnel are the key issues for multimodal transport. Later in 2019, Liebchen and Schülldorf [7] confirmed that the operation, personal, organization, and business strategy are among the important risks for railway transportation. In 2014, Shi and Zhou [8] has conducted research with respect to railway freight transport market. The authors conducted a study to analyze the factors influencing market share of the railway and found the means to increase competitiveness of the rail freight comparing to other modes of transport. The results of the study provided an avenue to increase the railway freight transport services and the market share.

Therefore, from the review of literature, it can be concluded that the initial risks associated to multimodal transportation include technology, equipment, operations, environment, transport, safety, time, personal, organization, and business strategy.

The concept of risk management can be applied in the Road-Rail freight transport as it is a way to assess the specific risks and suggest strategies to deal with those risks. The risk management process starts from Risk identification, Risk mapping, Risk analysis, and Risk treatment. it is challenging for any freight transportation service to ship their cargoes to the destination safely, efficiently and on time due to uncertainty in the shipment process.

Hence, this study applied the risk management concept to identify risks, map the risks, analyze the risk and suggest mitigation strategies.

The failure mode and effects analysis (FMEA) is a method of analysis that identifies failure modes. An extension of failure mode and effects analysis (FMEA) by including a criticality analysis which quantifies the level of risks associated with failure modes against the severity is called the failure mode effects, and criticality analysis (FMECA). The critical analysis might be based on the failure mode probability. The result can be summed up to quantitative data which is able to measure and then it can be improved. The benefits of FMECA are increase quality and reliability during the development, reduce wastes in the operations, and minimize cost. The risk evaluation of each failure is determined by three factors namely severity, occurrence, detection. Severity (S) is failure consequences. Occurrence (O) is the failure probability. Detection (D) is the failure probability which can be found before a bad result happens. The risk priority number, called RPN, will be determined by occurrence x severity x detection. Occurrence (O) came from data driven, but severity (S) and detection (D) was by expert driven. Firstly, the highest RPNs should be managed and then all failure modes should continuously improve till result will be at an acceptable level. Certainly, the aim is process and product problem prevention before they



happen. Company, which used FMEA in both the design and manufacturing process, can decrease cost and become more robust process due to the reduced or eliminated crises. On the other hand, if they focused on wrong failure modes that become the biggest problem and opportunities missing to improve the failure modes [11].

In 2021, Filz, et.al. applied FMEA with data-driven tools such as deep learning models using data from the usage of industrial investment goods. This method deepens learning models on historical and operational data [12]. In 2022, FMEA also applied when designing a bicycle brake cable [13].

In 2022, Sakly, et.al. applied FMECA for the pharmaceutical process for medicines which sensitive to temperature at a hospital and the results were interesting [14]. Two rounds of FMECA were performed. The first round showed the prioritized areas for further improvement including the documentation, human resource development, and procurement. For continuous improvement process, a second FMECA had been done to detect

other remaining risks and identify new potential risks.

3. Research Methodology

The steps of research methodology are shown in Fig. 2.

3.1 Step 1: Risk identification

The first step includes identification of risks associated to multimodal transportation from literature review followed by expert opinion to narrow down the risks to specific to road-rail transportation. Three experts who have experience in multimodal transportation were asked to give inputs. The experts are the persons who have at least three year experience with relevant to the Road or Rail freight transport which include a professor in logistics services, a specialist in multimodal transport, and a specialist in railway services. This study used the convenience sampling method to select participants based on their accessibility and availability to the researcher during the study period.

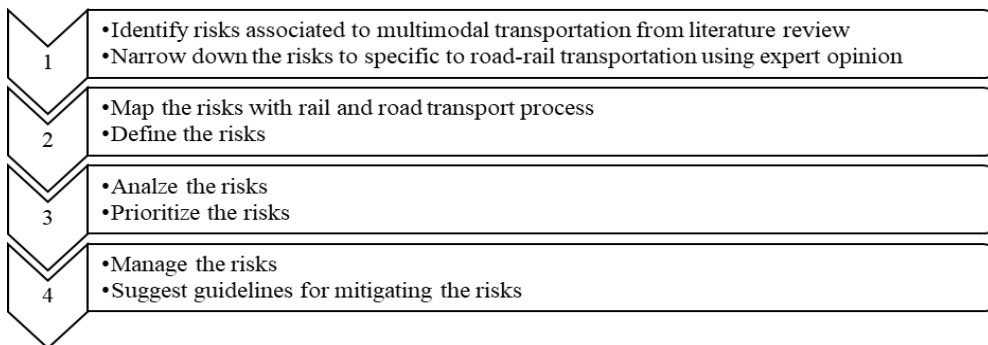


Fig. 2 Steps of Research methodology



3.2 Step 2: Risk mapping

This step includes mapping of the risks with road and rail transport processes and defining the risks. The disruption of multimodal transport and the risks associated with each process are identified and mapped. Then the risks are defined properly.

3.3 Step 3: Risk analysis

This step starts from analyzing the risks. Then the risks are prioritized based on failure mode effects and criticality analysis (FMECA) concept. For the FMECA, a criticality analysis which quantifies the level of risks associated with failure modes against the severity of their consequences is added to the common FMEA.

The FMECA contains two main activities: 1) to create the FMEA and 2) to perform the criticality analysis. At the beginning, the FMEA explores the likelihood of product failures or not function properly, shorten product life cycle, and detection of unsafety process. Then the criticality analysis is based on failure mode probability, which can be summed up to quantitative data [10]. The analysis consists of four levels: catastrophe, critical, marginal, and negligible, respectively. The severity and the probability matrix for risk assessment is shown in Table 1.

From Table 1, FMECA analyzes risk, which is measured by the combination of severity and probability to determine criticality in order to provide a priority way to reduce the possibility of failure.

'Catastrophic' refers to the extremely severe risk which could cause death or permanent total disability. In term of financial amount, it refers to the loss of more than \$1 million. It also causes irreversible severe environmental damage and illegal matters.

'Critical' refers to the high risk that cause injuries or permanent partial disability and 3 or more persons got admitted to hospital. In term of financial amount, it refers to loss of more than \$200,000 but less than \$1 million. It also causes environmental damage and illegal matters.

'Marginal' refers to the risk that results in minor injuries which requires at least 1 day leave from work. In term of financial amount, it refers to the loss between \$10,000 and \$200,000. It also causes some environmental damage without violation of law.

Table 1 A risk assessment matrix adapted from MIL-STD-882E [9]

Severity \ Probability	Severity			
	Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
	1	2	3	4
Frequent A	High	High	Serious	Medium
Probable B	High	High	Serious	Medium
Occasional C	High	Serious	Medium	Low
Remote D	Serious	Medium	Medium	Low
Improbable E	Medium	Medium	Medium	Low
Eliminated F	Eliminated			



'Negligible' refers to the minor risk that results in minor injuries which do not require any leave from work. In term of financial amount, it refers to the loss between \$2,000 and \$10,000. It may also causes a little environmental damage [15].

The questionnaires were distributed to two main groups of stakeholders: one is the customers, and the other is the transport providers. The customers are the persons who have products to be transported using Road-Rail transport and the providers include the staff of the State Railway of Thailand and the logistic service providers. In total, six respondents answered the survey with three participants from each group.

The survey consists of two parts. The first part is the information on personal characteristics of the respondents and the second part includes their opinions on the Occurrence (O), Severity (S), and Detection (D) of each risk. Occurrence (O) refers to the probability of failure or problem occurrence; Severity (S) refers to the degree of impact and consequences of failures; and Detection (D) is the probability of the failure being detected before the impact of the failure to the system. The Likert scale of 1-5 which 1 refer to the lowest score and 5 is the highest score is used in this study. Then the risk priority number based on the FMEA is calculated by multiplying O by S by D. Then the criticality analysis was applied further by asking experts' opinions.

3.4 Step 4: Risk management

This step includes suggestions on how to manage the risks and a guideline for mitigating the risks for improving road-rail transportation.

4. Findings

After completing the research Steps 1-4, the results are as follows.

4.1 The risk factors

The risk factors for Road-Rail transportation identified from literature review were considered and selected by experts for the cross border risks. In total, six risk factors including Transport risk, Technology risk, Equipment and operations risk, Organization and personal risk, Packaging hazard risk, and Storage hazard risk were identified. Then the risks were mapped with the process flow of the Road-Rail transportation starting from transport by truck, loading at freight station, transport by railway, unloading at terminal station, and lastly transport by truck to the customers. The result of the failure mode and process mapping is shown in Table 2. Then the relevant risks were defined as shown in Table 3.

4.2 The application of FMECA

The application of FMECA helps to prioritize the risks based on failure mode effects and criticality analysis (FMECA) concept. The initial finding shows FMEA result in Tables 4 and 5. Customers think the FM2: Technology risk is the most



important risk followed by FM1: Transport risk and FM6: Storage hazard risk.

Providers have the same idea that FM2: Technology risk is the most important risk, but they think FM5 Packaging hazard risk and FM3 Equipment and operations risk are also important.

Referring to Table 1, FM3 Equipment and operations risk got the '2' in term of severity and 'C' in term of probability. FM4 Organization and personal risk got the '2' in term of severity and 'C' in term of probability. Therefore, FM3 and FM4 were considered as 'serious' risks. The other like FM1 Transport risk got the '3' in term of severity and 'C' in term of probability, hence it is classified as 'medium' risk. For other factors, the results are also 'medium' that shown in Table 6.

4.3 The findings from this research

The findings from this research show that from both the customer's and provider's views, the FM2: Technology risk is the top priority in need for risk management. Road-Rail transportation involves the cargo handling equipment and the technology helps to make efficient handling and shipment. In addition, traceability is important and a good cargo tracking system is in need. The Artificial Intelligence and cloud-based freight management systems will also help smooth operations for Road-Rail transportation.

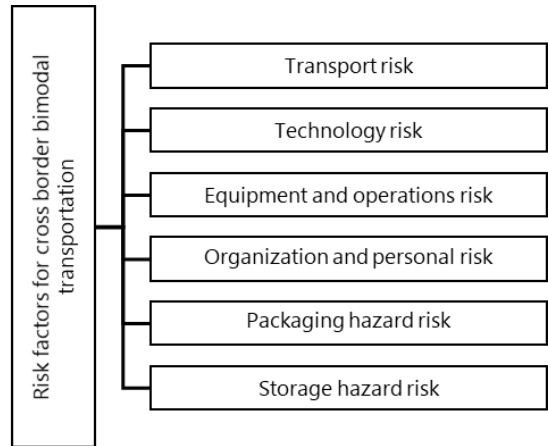


Fig. 3 Risk factors for cross border transportation

Lastly, due to the issue of international connectivity at the cross borders, the challenge is in the technical specifications for managing the difference in the gauging system.

For customers, they are aware of their cargoes whether or not they will be delivered as planned without any disruption or delay. The FM1: Transport risk is the second concern for them. Also, the quality of the merchandise inside the containers is important. Some goods like fresh agricultural products, seafood and pharmaceuticals need special temperature-controlled containers in order to keep the quality of the products. Hence, the FM6: Storage hazard risk with relevant to the cold storage is also significant for them.

**Table 2** Failure mode (FM) identified in this study

No.	Process	Failure mode
1	Cargoes are transited to freight station by truck	● Transport risk
2	Cargoes are loaded in the freight station	● Technology risk ● Equipment and operations risk ● Organization and personal risk ● Packaging hazard risk ● Storage hazard risk
3	Cargoes are transported by railway	● Technology risk ● Transport risk
4	Cargoes are unloaded in terminal station	● Technology risk ● Equipment and operations risk ● Organization and personal risk ● Packaging hazard risk ● Storage hazard risk
5	Cargoes are transported to destination	● Transport risk

Table 3 Definition of risk factors

Failure mode	Risk factor	Definition
FM1	Transport risk	Risk related to transportation capacity, cost, and delivery of the cargoes as well as the transport mode change.
FM2	Technology risk	Risk related to technology failure to disrupt a business due to cyber-attack, service outages, old equipment, and others.
FM3	Equipment and operations risk	Risk related to availability and efficiency of equipment and operations.
FM4	Organization and personal risk	Risk related to organization culture and staff performance.
FM5	Packaging hazard risk	Risk related to the packaging of goods.
FM6	Storage hazard risk	Risk related to the storage of goods, especially the one requiring special storage facilities and management



From Table 4, for the customers of freight transport service, the average RPNs are calculated for each failure mode. For customers, they are aware of their cargoes whether or not they will be delivered as planned without any disruption or delay. The FM2: Technology risk is their priority. The FM1: Transport risk is the second concern for them. Also, the quality of the merchandise inside the containers is important. Some goods like fresh agricultural products, seafood and pharmaceuticals need special temperature- controlled containers in order to keep the quality of the products. Hence, the FM6: Storage hazard risk with relevant to the cold storage is also significant for them.

From Table 5, for freight transport providers, the average RPNs for each failure mode is calculated. For freight providers, the FM2: Technology risk is shown to be the priority. The FM5: Packaging hazard risk is the second concern. In order to win the customers' mind, their service must be professional, and the quality of the shipment must be in the high priority. They have to be aware of the fragile goods and handle the goods with special care during the shipment. Hence, the packaging is of their concern. In addition, the modern equipment and the efficient operation process are essential for the service at the cross border. It confirms the importance of FM3: Equipment and operations risk.

Table 4 Risk priority numbers from Customer's perspective.

Failure mode	Customer's perspective			
	Avg. S	Avg. D	Avg. O	RPN
FM1	3.00	3.67	3.00	33.03
FM2	2.67	4.33	3.00	34.68
FM3	2.67	3.67	3.00	29.40
FM4	3.00	3.33	3.00	29.97
FM5	3.00	3.67	2.67	29.40
FM6	3.67	3.33	2.67	32.63

Table 5 Risk priority numbers from Provider's perspective

Failure mode	Provider's perspective			
	Avg. S	Avg. D	Avg. O	RPN
FM1	3.00	3.67	2.00	22.02
FM2	2.67	4.67	3.33	41.52
FM3	2.67	3.33	3.67	32.63
FM4	3.00	3.00	3.00	27.00
FM5	3.00	4.33	2.67	34.68
FM6	3.67	3.67	2.33	31.38



After the FMEA, the Criticality Analysis was performed and the result is shown in Table 6. The table illustrates that for the risks related to the cross border freight transportation, FM3: Equipment and operations risk and FM4: Organization and personal risk are in the 'serious' zone while the others are in the 'medium' zone.

5. Risk management

Guidelines for risk management is based on the concept of Treat, Transfer, Take and Terminate (4T) and made by experts. The concept of 4T is the key components for effective risk management.

Treat: To manage the impact and possibility of the risk or reduce the risk by several measures including adding precautions, initiating contingency plans, diversifying resources, or training staff.

Transfer: To transfer risk by moving the risk to another person through insurance policies, contracts, or outsourcing agreements.

Take: To take risk by accepting the possible impact which is relatively minimal, but still monitoring the risk.

Terminate: To eliminate risk by the removal of the activity, task, or process which may cause risk.

Organizations or Industries wish for risk management should follow the 4T concept of risk management including tolerate, terminate, treat, and transfer. However, these risk management tactics are not mutually exclusive. It is a guideline and the

Table 6 Criticality analysis

Failure mode	Risk factor	Criticality analysis
FM1	Transport risk	medium
FM2	Technology risk	medium
FM3	Equipment and operations risk	serious
FM4	Organization and personal risk	serious
FM5	Packaging hazard risk	medium
FM6	Storage hazard risk	medium

actual implementation requires a combination of strategies depending the risk. To manage the risk effectively, involved stakeholders should be aware of the risks, evaluate the risks and choose the suitable mitigation alternatives to manage the risk.

5.1 Technology risk

The failure effect from technology risk is the mal-function and inefficiency. The suggested risk mitigation strategies are as follows.

a. **Treat:** Treating or controlling risk can be done by reducing the likelihood of the risk occurring or minimizing its impact. The update and implementation of new technology is necessary as well as the proper and continue maintenance of the system. The availability of the equipment and technology should be monitored.



Once the failure occurs, the malfunction or errors must be treated immediately.

b. Transfer: Allocating or transferring risk can be performed by purchasing insurance policies, or hiring third parties to do the tasks and take the risk instead of the organization. The risk can be transferred to the consulting companies who own the technology and offer maintenance service.

c. Take: Admitting or taking risk means do nothing to mitigate the risk. If it happens, let it be. Advanced technology is costly and needs a big capital investment. Sometimes, the operators need to accept the failure and do corrections afterwards.

d. Terminate: Stopping or terminating risk can be another measure to ensure the discontinuing of the processes and activities that create risks. In case the technology risk has a severe impact on the organization, it may be the time to terminate such technology and implement the new one.

5.2 Equipment and operations risk

The equipment and operations risk may affect the quality of the products in the containers. The risk mitigation is suggested as follows.

a. Treat: The availability and quality of the equipment should be checked regularly. The equipment should be standardized in order to avoid mistakes. The operations process should

also be reviewed and improved. Once a failure occurs, immediate corrective action is needed.

b. Transfer: The risk can be transferred to the suppliers of the equipment, and they must guarantee the quality and offer corrective action.

c. Take: Sometime the operator needs to take risk of the failure and solve the problems.

d. Terminate: Some equipment is too old and should be terminated and replaced with new ones in order to provide good and continue operations.

5.3 Organization and personal risk

The organization and personal risk may affect the efficiency of the entire process. The risk mitigation is suggested as follows.

a. Treat: As Road-Rail transportation involves different organizations and people with different backgrounds, the risk of failure in terms of organization and human resources should be treated with care and confidentiality. This action may include fair treatment for all employees and the appropriate income and fringe benefits.

b. Transfer: The risk can be transferred to the experts by outsourcing. Also, the system for inspection and the quality-concern organization culture may help to re-duce human error.

c. Take: The risk from human error may happen. The service providers may take risks and prepare for action as soon as possible. Put the right man in the right job may help.



d. Terminate: In case the above effort to mitigate the risk is not possible, the termination of the staff who is responsible on the malfunction may be a good option.

6. Conclusion

For Road-Rail transportation, using road transport for short distance and rail service for long distance is often more efficient than other modes of transport. Trucks are essential for the last mile of local pickups and deliveries. Rail terminals with technical equipment of the transshipment systems to transfer loading units between two modes of transport is needed. This research has explored the challenges of Road-Rail transportation and suggests avenues for development.

Findings from this research give answers to the research questions. The answer for RQ1: What are the risks related to Road-Rail freight transport? is the six risks including Transport risk, Technology risk, Equipment and operations risk, Organization and personal risk, Packaging hazard risk and Storage hazard risk. Then the priority has been analyzed using the FMECA method.

The answer for RQ2: How to manage the risks? is focused on the priority risks which are Technology risk, Equipment and operations risk, and Organization and personal risk. The 4T measures are suggested for mitigating the risks. Overall, efficient transportation and logistics operations using proper technology and equipment

which provides quality, safety and reliability service are the major concern for decision making. Standardization should be implemented. Organizational culture and human resource development must be in place. Lastly, the risks causing the delay in transportation and the damage of the cargoes and products must be managed properly.

The contribution of this study is the application of FMECA in assessing the risks of Road-Rail Transportation for Freight service. The risks, which are identified 'severe', will be of concern as priority to find recommendations to mitigate the risks. The FMECA has some advantages as it begins with FMEA and follows by the critically analysis. FMEA considers only qualitative information while FMECA considers both qualitative and quantitative information. In addition, FMECA measures criticality level for the failure modes and classify them based on the importance. The criticality level is the combination of severity and probability and contains Catastrophic', 'Critical', 'Marginal', and 'Negligible' levels.

The result from this research provides a guideline for Road-Rail Transport improvement using the FMECA approach to identify the risk priority and risk management approach to mitigate the risks. Among all risks, the Technology risk, Equipment and operations risk, and Organization and personal risk are priorities.



The technology risk involves the information flow of the freights from the suppliers along the way to the customers and the technology used for cargo handlings to load and unload at stations. It is suggested that the implementation of new technology should be in the plan in order to treat the risk. For Equipment and operations risk which may cause delay in transportation or affect the quality of the products in the containers, it is suggested that the risk should be transferred to the suppliers or the insurance companies. For the Organization and personal risk, it may affect the entire Road-Rail transportation process as it involves several stakeholders and the staff is an important factor for operations. In this case, the take strategy is suggested as miscommunications and human errors may be difficult to prevent and may probably does not cause major disruptions.

This research is limited to the study of the customers and providers at the cross border in Nong Khai province only. Exploration of the same methodology at stakeholders at other cross borders may result in different perspectives. Other international cross border comparisons are recommended for future research as the national context will be considered. Finally, other risk management tools and strategies can also be implemented to provide different results and improvement plan.

7. Acknowledgments

This project is partially supported by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program under grant agreement no. 823759 (REMESH).

8. References

- [1] <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33891>. (Accessed on 22 November 2022).
- [2] https://www.railjournal.com/in_depth/8-big-challenges-for-european-railfreight/ (Accessed on 25 September 2023).
- [3] S. Wei, The effect of the development of china-laos railway on Thailand's export trade to china, Thesis, Naresuan University, Phisanulok, Thailand, 2021.
- [4] K. Kongdee, The study on transportation between chiangrai and kumming, Thesis, Burapha University, Thailand, 2013.
- [5] P. Fuggate, Logistics system development of import-export agricultural products among Thailand and China: A case study of Thailand – Yunnan Province in Mekong River and 3A route system (R3A), Journal of Management Science Chiangrai Rajabhat University, 2020, 15(2), 182-208.
- [6] V. Reis, F. Meier, G. Pace and R. Palacin, Rail and multi-modal transport, Research in Transportation Economics, 2013, 41(1), 17-30.



- [7] C. Liebchen and H. Schülldorf, Collection of aspects why optimization projects for railway companies could risk not to succeed – A multi-perspective approach, *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 2019, 11, 100-149.
- [8] S. Shi and Y. Zhou, Research on railway freight market share based on the whole process of transport, *Procedia-Social and Behavioral Science*, 2014, 138, 298-304.
- [9] J. Lamb and J. Jeevarajan, New developments in battery safety for large-scale systems, *MRS Bulletin*, 2021, 46, 395-401.
- [10] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/fmea-vs-fmea#Whatarethemaendifferences>. (Accessed on 30 November 2022)
- [11] R. McDermott, R. Mikulak and M. Beauregard, *The basics of FMEA*, Productivity Press, NY, USA, 2009.
- [12] M. Filz, J. Langner, C. Herrmann and S. Thiede, Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning, *Computers in Industry*, 2021, 129, 103451.
- [13] Limble CMMS, FMEA and FMECA: How to Perform Failure Mode and Effects Analysis, <https://limblecmms.com/blog/fmea-and-fmeca/>. (Accessed on 20 Jan 2022)
- [14] H. Sakly, I. Chakroun and K.B. Jeddou Application of failure mode, effects, and criticality analysis to the medication-use process for temperature-sensitive drugs in a University Hospital, *Canadian Journal of Hospital Pharmacy*, 2022, 75(3), 159-168.
- [15] J. Piampiano and S. Rizzo, Safe or safe enough? measuring risks & its variables objectively, *Professional Safety*, 2012, 36-43.

ผลของความดันฉีดต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล สูบเดี่ยวเพื่อการเกษตร

วุฒิชัย สิทธิวงษ์*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

วันที่รับบทความ: 21 กุมภาพันธ์ 2567 ; วันที่ทบทวนบทความ: 30 พฤษภาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานกับระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร ในการทดลอง ทำการปรับเปลี่ยนระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยใช้ปั๊มแรงดันสูงกับรางร่วมความดันสูง (Common Rail) การฉีดเชื้อเพลิงของหัวฉีดถูกควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ปั๊มแรงดันสูงถูกขับด้วยเครื่องยนต์ทดสอบ ทำการทดลองเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานกับระบบฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูง นอกจากนี้ ทำการเปลี่ยนแปลงความดันฉีดเชื้อเพลิงจาก 300 bar 400 bar และ 500 bar ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm 1,600 rpm และ 1,800 rpm ผลการวิจัยพบว่าความดันฉีดเชื้อเพลิงมีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์นั้น การฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่ากรณีการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานเมื่อเครื่องยนต์มีภาระ ในส่วนของผลการปล่อยมลพิษนั้นพบว่า หากเครื่องยนต์ได้รับภาระระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงจะมีมลพิษต่ำกว่าระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นหากเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์

คำสำคัญ: รางร่วมความดันสูง; สเปร์ยน้ำมัน; ระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูง

Effect of Injection Pressure to Fuel Consumption of Single Cylinder Diesel Engine for Agriculture

Wuttichai Sittiwong*

Division of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan

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

Received: 21 February 2024; Revised: 30 May 2024; Accepted: 1 July 2024

Online Published: 22 August 2024

Abstract: The aim of this research is to compare fuel consumption from standard fuel injection systems with high-pressure fuel injection systems in agricultural single-cylinder diesel engines. In the experiment, modifications were made to the fuel injection system by using a high-pressure pump and a high-pressure rail (common rail). The fuel injection of the injector is electronically controlled. The high-pressure pump is driven by a test engine, Experiments were conducted to compare fuel consumption between standard fuel injection systems and high-pressure fuel injection systems. In addition, the fuel injection pressures were varied from 300 bar, 400 bar, and 500 bar at engine speeds of 1,200 rpm, 1,600 rpm, and 1,800 rpm. The results showed that fuel injection pressure affects the fuel consumption rate and emissions of the engine. High-pressure fuel injection will have lower fuel consumption than standard fuel injection cases when the engine is loaded. In terms of emission results, it was found that if the engine is loaded, the high-pressure fuel injection system would be less polluting than the standard fuel injection system, which will increase if the load on the engine is increased.

Keywords: Common rail; Fuel spray; High pressure fuel injection system



1. บทนำ

ในประเทศไทย เครื่องยนต์ดีเซลถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะภาคขนส่ง เช่นเดียวกับภาคเกษตรกรรมที่มีการใช้เครื่องยนต์ดีเซลโดยเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลสูบลมเดี่ยว เครื่องยนต์ดีเซลสูบลมเดี่ยวที่มีจำหน่ายในประเทศไทยมีกำลังถึง 20 แรงม้า ได้รับความนิยมเนื่องจากเคลื่อนย้ายได้สะดวก การบำรุงรักษาทำได้ง่าย ราคาไม่สูง เลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นเครื่องสูบน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ต้นกำลังของรถฟาร์มแทรกเตอร์ ต้นกำลังโรงสีข้าว เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความพยายามศึกษา วิจัย เครื่องยนต์ดีเซลสูบลมเดี่ยวให้มีประสิทธิภาพลดมลพิษ ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้เชื้อเพลิงทางเลือก เชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซล [1, 2] พัฒนาระบบฉีดเชื้อเพลิงให้ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ [3] เป็นต้น

เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับยานยนต์สมัยใหม่ใช้ระบบการฉีดเชื้อเพลิงความดันสูง ที่ควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบรวมร่วมความดันสูง หรือ Common Rail ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดเชื้อเพลิงและลดมลพิษ แต่เครื่องยนต์ดีเซลสูบลมเดี่ยวยังคงใช้ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบกลไกพื้นฐานที่พัฒนาขึ้นเมื่อกว่า 30 ปีที่แล้ว [4]

ดังที่กล่าวในข้างต้น ปัจจุบันระบบการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ยังเป็นการฉีดเชื้อเพลิงแบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ (Direct Injection, Di) ด้วยระบบกลไก ความดันฉีดเชื้อเพลิงสูงสุดประมาณ 200 bar ซึ่งต่างจากเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ หรือยานพาหนะสำหรับงานหนัก (Heavy Duty

Vehicles) ที่ใช้ระบบ Common Rail ที่มีความดันสูงกว่า 2,000 bar [5] ซึ่งความดันฉีดเชื้อเพลิงที่สูงนี้จะทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่มีขนาดเม็ดน้ำมันเล็กลงส่งผลให้เกิดการผสมกับอากาศได้ดีขึ้น นอกจากนี้หากความดันฉีดน้ำมันสูงมากจนทำให้ความเร็วของสเปรย์น้ำมันสูงกว่าความเร็วเสียง (Supersonic) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่แกนกลางของลำพ่นน้ำมัน (Core Fuel Jets) และอุณหภูมิน้ำมันจะสูงขึ้นทำให้การระเหยตัวของน้ำมันดีขึ้น [6] นอกจากนี้การฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงจะเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งจะเพิ่มสมรรถนะเครื่องยนต์แล้วยังลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้อีกด้วย [7, 8]

นอกจากนี้ เมื่อเครื่องยนต์สามารถฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงขึ้นได้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันทางเลือก เช่น น้ำมันสบู่ดำที่มีความหนาแน่น ความหนืดจลน์ จุดวาบไฟ จุดติดไฟ สูงกว่าน้ำมันดีเซล ได้ดีกว่าที่ความดันฉีดปกติ และเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติ น้ำมันสบู่ดำก็สามารถแตกตัว (Atomization) ได้ดีขึ้น [9]

จากข้อดีของการฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงและระบบฉีดเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบที่ยังมีความดันต่ำ มีนักวิจัยพยายามที่จะพัฒนาระบบฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบนี้ Sittichompoo *et.al.* [10] ได้ทำการดัดแปลงระบบฉีดเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ ยี่ห้อ YANMAR TF-DI90 ให้ปรับแรงดันน้ำมันเชื้อเพลิงระหว่าง 500 bar ถึง 1,100 bar ควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ จากการทดลอง พบว่า NO_x น้อยกว่าเครื่องยนต์เดิมประมาณ



50% แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มิได้ใช้ต้นกำลังจากเครื่องยนต์โดยตรง แต่ใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งทำให้เครื่องยนต์ไม่ได้รับการชะงักจากการขับปั้มน้ำมันแรงดันสูงโดยตรง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว และศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงเปรียบเทียบกับระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานจากผู้ผลิตเครื่องยนต์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วิธีการทดลอง

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย การทดลองระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานจากผู้ผลิตเปรียบเทียบกับระบบฉีดเชื้อเพลิงแรงดันสูงที่ทำการพัฒนาขึ้นโดยใช้ต้นกำลังขับจากเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ ดังนั้นภาระของเครื่องยนต์คือปั้มน้ำมันแรงดันสูงที่เปลี่ยนแปลงตามความดันฉีดซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่เกิดขึ้นจะเป็นพลังงานที่ใช้ขับปั้มน้ำมันแรงดันสูงด้วย ดังนั้นภาระของเครื่องยนต์จะไม่คงที่หรือภาระของเครื่องยนต์จะเปลี่ยนแปลงตามความดันของระบบฉีดเชื้อเพลิง ภาระของเครื่องยนต์จะสูงขึ้นเมื่อความดันในระบบฉีดเชื้อเพลิงสูงขึ้น และระบบควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงเป็นแบบควบคุมหัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น

การทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความดันในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ในสภาวะห้องเผาไหม้จริงเปรียบเทียบกับความดันฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันใช้กับเครื่องยนต์มาตรฐาน (ความดันของระบบเดิมที่ติดตั้งมาพร้อมเครื่องยนต์) โดยมีรายละเอียด คือ เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ความดันฉีดสูงกว่าความ

ดันมาตรฐานจนถึงความดันสูงสุดที่สามารถทำการทดลองได้ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ เครื่องยนต์ไม่มีภาระจากภายนอกอื่น โดยเครื่องยนต์มาตรฐานใช้การสร้างแรงดันฉีดด้วยปั้มเชื้อเพลิงที่สร้างแรงอัดหรือความดันจากลูกเบี้ยวของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 1 ในส่วนของหัวฉีดของเครื่องยนต์มาตรฐานเป็นแบบ Multiple Hole ดังรูปที่ 2

หัวฉีดทำหน้าที่ฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ด้วยความดันที่ปั้มเชื้อเพลิงที่สูงพอที่จะยกเข็มหัวฉีด นั่นคือ ความดันปั้มจะทำให้ควบคุมการเปิดของเข็มหัวฉีดและเป็นแรงดันฉีด ซึ่งแรงดันส่วนหนึ่งที่ปั้มเชื้อเพลิงสร้างขึ้นจะสูญเสียไปกับการชนะแรงสปริงของหัวฉีด



รูปที่ 1 ปั้มเชื้อเพลิงเดิมของเครื่องยนต์



รูปที่ 2 หัวฉีดเชื้อเพลิงเดิมของเครื่องยนต์



2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิง หัวฉีด จากเครื่องยนต์เดิมออก ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย

1. เครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ กำลัง 7HP ระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ Di ยี่ห้อ BENTO รุ่น BT-DE-7HP-HS ดังรูปที่ 3 มีรายละเอียดของเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 1
2. ปั๊มจ่ายน้ำมัน หรือปั๊มแรงดันสูง (High Pressure Pump) ที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ระบบ Common Rail ยี่ห้อ DENSO รุ่น 4HK1/6HK1 ทำหน้าสร้างแรงดัน 500 - 1,900 bar จ่ายไปสะสมที่รางร่วม การทดลองนี้ปั๊มจะถูกเครื่องยนต์ขับโดยตรง
3. รางร่วมทำหน้าที่จัดเก็บเชื้อเพลิงแรงดัน (0 - 1,600 bar) [11] ที่ส่งจากปั๊มแรงดันสูงและจ่ายเชื้อเพลิงไปยังหัวฉีดแต่ละกระบอกสูบ รางร่วมความดันสูงจะประกอบด้วย

- ท่อจ่ายน้ำมันไปยังหัวฉีดทั้ง 4 หัว การทดลองนี้จะปิดท่อให้เหลือเพียง 1 หัวเท่านั้น

- ตัวจำกัดความดัน (Pressure Limiter) ทำหน้าที่ระบายแรงดันสะสมภายในรางร่วม หากความดันสูงถึง 2,000 bar และตัวจำกัดความดันจะปิด เมื่อความดันลดลงเหลือ 500 bar งานวิจัยนี้จะทำการดัดแปลงตัวจำกัดความดันให้สามารถควบคุมความดันระบายได้ด้วยการปรับความแข็งของสปริงวาล์วและวัดความดันรางด้วยเครื่องวัดความดันรางและเซ็นเซอร์ความดัน (Pressure Sensor) รางร่วมทำหน้าที่ตรวจวัดแรงดันน้ำมันเชื้อเพลิงในรางร่วมและส่งสัญญาณไปยัง ECU ของเครื่องยนต์ ในการทดลองนี้จะถอดออกและติดตั้งเซ็นเซอร์ของเครื่องวัดความดันแทน ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ข้อมูลเฉพาะของเครื่องยนต์

Item	Technical specification
Engine	BENTO
Model	BT-DE-7HP-HS
Type	Single cylinder, 4-stroke, air-cooled, direct
Bore x Stroke(mm)	injection
Speed (rpm)	78 x 62
Consumption rate (g/kW)	3,600
Cooling type	≤ 4.08
Starting type	Forced air-cooled system
	Electric start



รูปที่ 3 ชุดทดลอง



รูปที่ 4 เซ็นเซอร์เครื่องวัดความดันราง



4. หัวฉีดเชื้อเพลิง ทำหน้าที่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ในจังหวะระเบิด หัวฉีดเดิมของเครื่องยนต์เป็นหัวฉีดแบบรูที่เปิดด้วยความดันของปั๊ม แต่เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการเปิดได้เนื่องจากแรงดันที่สะสมในรางร่วมในการทดลองมีความดันสูงกว่าความดันเปิดของหัวฉีดเดิม ดังนั้นการทดลองจึงใช้หัวฉีดแบบรูที่ควบคุมการเปิดด้วยไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 เป็นหัวฉีดคอมมอนเรล ชนิด 6 รู ที่ใช้กับปั๊ม DENSO รุ่น 4HK1/6HK1 ขนาดรูฉีด 0.09 mm รูปร่าง (Nozzle Shaping) แบบ Smoothed Hydro-erosion ปริมาตร Mini-sac 0.2 mm³



รูปที่ 5 หัวฉีดคอมมอนเรล

5. เครื่องวัดความดันรางร่วม FOXWELL รุ่น CRD 700 สามารถวัดความดันที่ช่วง 0 – 2,000 bar Sensor Accuracy: +/- 1% ทำหน้าที่วัดความดันรางหัวฉีดเพื่อให้ทราบค่าความดันสะสมในรางร่วม ดังแสดงในรูปที่ 6 เครื่องวัดความดันรางจะแตกต่างจากเครื่องวัดความดันโดยทั่วไป คือ สามารถวัดความดันที่เป็น Dynamics Pressure ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องมือวัดความดันจะวัด Statics Pressure



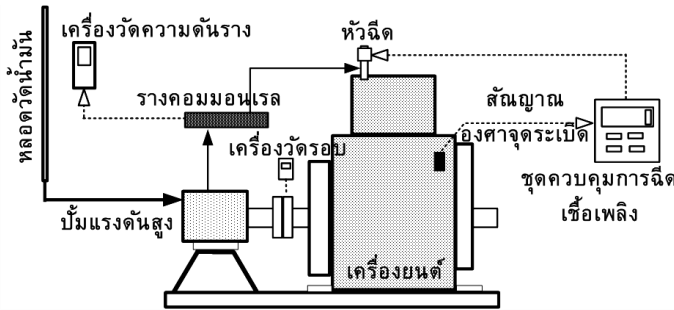
รูปที่ 6 เครื่องวัดความดันราง

6. ชุดควบคุมการฉีดเชื้อเพลิง ในรูปที่ 7 ถูกออกแบบและสร้างขึ้นให้สามารถควบคุมเวลาการเปิดของหัวฉีดได้ โดยการรับสัญญาณจากเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์และควบคุมการทำงานของหัวฉีดโดยตรง ชุดควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงรับสัญญาณจากเซนเซอร์ ที่ติดตั้งที่เพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ที่ตำแหน่ง 20° BTDC ซึ่งเป็นจังหวะฉีดเชื้อเพลิงเดิมของเครื่องยนต์ ค่าความถี่ (F) ของการยกเข็มหัวฉีดได้ 1- 40 Hz และค่าพัลส์ (P) เป็นเวลาที่หัวฉีดเริ่มยกจนถึงสุดการยกอยู่ที่ 100-6,000 ไมโครวินาที



รูปที่ 7 ชุดควบคุมการฉีดเชื้อเพลิง

โดยการทดลองจะตั้งความถี่ในการยกเข็มหัวฉีดไว้ที่ 40 Hz หรือ 40 ครั้งต่อวินาที และควบคุมเวลาในการยกหรือค่าพัลส์ ให้ได้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ต้องการทดลองและปรับตัวจำกัดความดันรางให้เหมาะสมไปพร้อมกันก่อนเริ่มบันทึกผลการทดลอง โดยที่อุปกรณ์ถูกติดตั้งดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

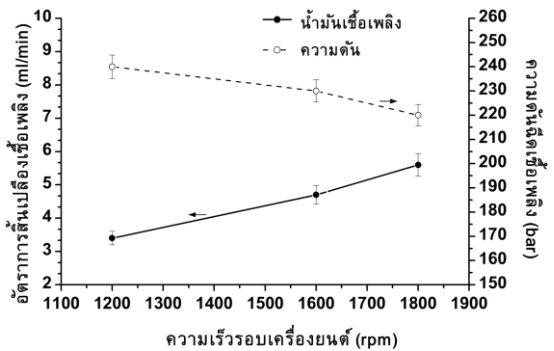
การทดลองจะทำการปรับตั้งความดัน โดยเริ่มต้นให้ความดันฉีดสูงกว่าความดันฉีดของระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน (ความดันของระบบเดิมที่ติดตั้งมาพร้อมเครื่องยนต์) และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเครื่องยนต์ด้วยการควบคุมปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานไม่มีภาวะ

การทดลองหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วยระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm 1,600 rpm และ 1,800 rpm ที่สภาวะเครื่องยนต์ไม่มีภาระจากภายนอก ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 แสดงผลการทดลองอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบฉีดมาตรฐานจากผู้ผลิต จากการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm ความดันฉีดของปั๊มที่ 240 bar อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง เฉลี่ยอยู่ที่ 3.4 ml/min ที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm ความดันฉีดลดลงเหลือ 230 bar อัตรา



รูปที่ 9 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน

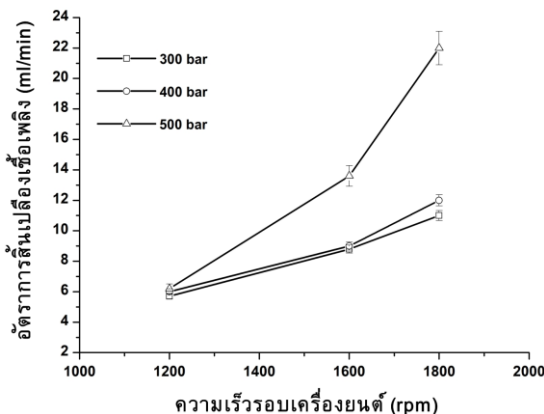
การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เฉลี่ยอยู่ที่ 4.7 ml/min และที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1800 rpm ความดันฉีดเป็น 220 bar อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 5.6 ml/min นั้นแสดงว่า เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตาม และความดันของปั๊มลดลงซึ่งเกิดจากเวลาในการสะสมความดันในท่อส่งน้ำมันลดลงทำให้ความดันในระบบลดลง และเวลาในการอัดน้ำมันของลูกปั๊มลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การแตกตัว (Atomization) ของน้ำมันลดลง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการสเปรย์น้ำมันเข้าห้องเผาไหม้



3.2 อัตราการสิ้นเปลืองของระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานที่มีภาวะขับปั๊ม

การทดลองนี้จะใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงเดิมของเครื่องยนต์ และให้ภาวะจากภายนอกด้วยการติดตั้งปั๊มจ่ายน้ำมัน (Supply Pump) หรือปั๊มแรงดันสูงที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ระบบ Common Rail ยี่ห้อ DENSO รุ่น 4HK1/6HK1 ซึ่งจะใช้ทดสอบเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ภาวะเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อถัดไป

ภาวะของเครื่องยนต์ คือ ภาวะในการเป็นต้นกำลังขับปั๊มที่ควบคุมความดันในรางไว้เพียง 300 bar 400 bar และ 500 bar เท่านั้น เนื่องจากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าหากเพิ่มความดันรางขึ้นจะไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ได้ หรือเครื่องยนต์ไม่สามารถรับภาวะจากภายนอกได้ ดังนั้นผลการทดลองต่อจากนี้ไปจึงควบคุมความดันรางที่ 300 bar 400 bar และ 500 bar ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm 1,600 rpm และ 1,800 rpm เท่านั้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันได้ผลดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ภาวะ 300 bar 400 bar และ 500 bar

ในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm อัตราการสิ้นเปลืองของเครื่องยนต์ระบบฉีดมาตรฐานที่ภาวะขับปั๊มให้มีความดัน 300 bar (ภาวะของเครื่องยนต์เป็นต้นกำลังขับปั๊มที่ควบคุมความดันในรางไว้ 300 bar) เฉลี่ยอยู่ที่ 5.7 ml/min ที่ภาวะ 400 bar เป็น 6.0 ml/min และที่ภาวะความดัน 500 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 6.2 ml/min

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,600 rpm อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานที่ภาวะ 300 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 8.8 ml/min ที่ภาวะ 400 bar เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9.0 ml/min และที่ภาวะ 500 bar อยู่ที่ 13.6 ml/min

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm อัตราการสิ้นเปลืองของเครื่องยนต์ที่ภาวะ 300 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 11.0 ml/min ที่ภาวะ 400 bar เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12 ml/min และที่ภาวะ 500 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 22 ml/min

จากผลการทดลอง เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์และความดันรางร่วมสูงขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น และที่ความดันรางร่วม 300 bar และ 400 bar แนวโน้มของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไม่ต่างกัน แต่ที่ความดันรางร่วม 500 bar อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงขึ้น นั่นแสดงว่าความดันสะสมในรางร่วมอาจเป็นภาวะที่ไม่จำเป็นของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งต่างจากความดันฉีดของระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานของเครื่องยนต์ในรูปที่ 9 ที่ความเร็วรอบสูงขึ้นความดันฉีดจะลดลงเนื่องจากเวลาของการอัดลูกปั๊มของปั๊มจ่ายน้ำมันเร็วขึ้น ความดันสะสมในระบบท่อฉีดเชื้อเพลิงจึงลดลงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่ระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงที่พัฒนาขึ้นใช้รางร่วมสะสมความดัน ความดันในราง



ร่วมจึงไม่ลดลง เมื่อเวลาในการเผาไหม้ลดลงเนื่องจากความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงขึ้นตาม ถึงแม้จะลดเวลาในการเปิดหัวฉีดให้น้อยที่สุด แต่ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงยังสูงเนื่องจากแรงดันฉีด

อีกประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาคือ จะเห็นได้ว่ากรณีใช้ปั๊มมาตรฐานจากผู้ผลิต ที่ภาวะของความดันรางที่ 500 bar อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะสูงมากจึงต้องพิจารณาต่อไปว่าหากจะนำระบบฉีดเชื้อเพลิงแรงดันสูงกับรางร่วมมาใช้แทนระบบเดิมจะมีความเหมาะสมกว่า

3.3 อัตราการสิ้นเปลืองของระบบฉีดเชื้อเพลิงแรงดันสูง

จากผลการทดลองระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน (ระบบเดิมที่ติดตั้งจากผู้ผลิต) ที่มีภาวะจากการขับปั๊มแรงดันสูงสามารถทำงานที่ภาวะจากความดันรางร่วม 300 400 และ 500 bar ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm 1,600 rpm และ 1,800 rpm นั้น ผลการทดลองในส่วนนี้จึงทำการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงและรางร่วมที่ความดันและความเร็วรอบเดียวกัน โดยไม่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงของเดิม

ผลการทดลองจากรูปที่ 11 เป็นผลจากการหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากปั๊มแรงดันสูงกับรางร่วมโดยไม่ใช้ระบบปั๊มเดิม พบว่า ที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm อัตราการสิ้นเปลืองของเครื่องยนต์ที่ความดันราง 300 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 3.3 ml/min ที่ความดันราง 400 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 4.2 ml/min และที่ความดันราง 500 bar เฉลี่ยที่ 5.2 ml/min

ที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm อัตราการสิ้นเปลืองของเครื่องยนต์ที่พัฒนาระบบฉีดเชื้อเพลิง ที่ความดันราง 300 bar อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 5.0 ml/min ที่ความดัน 400 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 6.2 ml/min และที่ความดันราง 500 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 8.4 ml/min

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm อัตราการสิ้นเปลืองของเครื่องยนต์ ที่ความดันราง 300 bar เฉลี่ยอยู่ที่ 7.8 ml/min ที่ความดันราง 400 bar เฉลี่ยที่ 10.1 ml/min และที่ ความดัน 500 bar เฉลี่ยที่ 12.4 ml/min

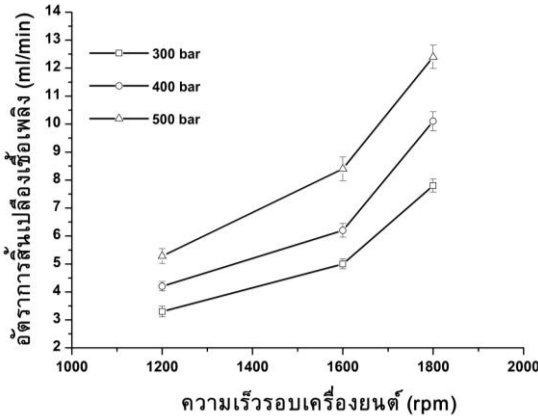
3.4 เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองกรณีเครื่องยนต์ดีเซลใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบฉีดตรงมาตรฐาน (std) กับเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงแรงดันสูงที่ความดันราง 300 bar (300, Common Rail) 400 bar (400, Common rail) และ 500 bar (500, Common Rail)

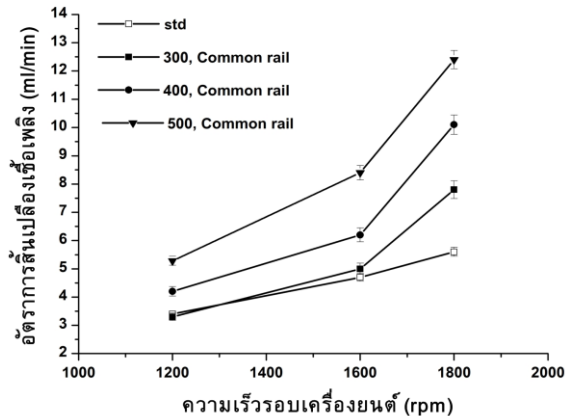
จากรูปที่ 12 จะเห็นว่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่เกิดจากระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานจากผู้ผลิตโดยที่การทดลองไม่มีภาวะ ที่ความเร็วรอบต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้ปั๊มแรงดันสูงร่วมกับรางร่วม โดยเฉพาะที่ความดันราง 300 bar (300, Common Rail) นั้นแสดงว่าการใช้แรงดันสูงขึ้นจากความดันมาตรฐาน (ประมาณ 240 bar) มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองน้อยมาก หากเพิ่มความดันฉีดสูงขึ้นเป็น 400 bar อัตราการสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก ในทุกความดันราง แต่ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,600 rpm เป็น 1,800 rpm แนวโน้มอัตราการสิ้นเปลืองสูงขึ้นมาก



บทความวิจัย

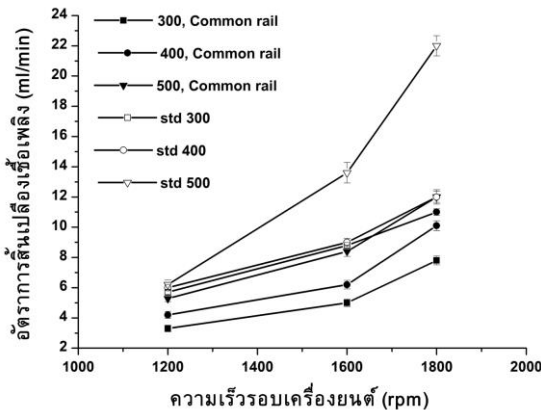


รูปที่ 11 อัตราการสั้่นเปลือ้งเชื้อเพลิงแรงดันสูง



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราการสั้่นเปลือ้งเชื้อเพลิง

รูปที่ 13 เปรียบเทียบอัตราการสั้่นเปลือ้งเชื้อเพลิงกรณีเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบฉีดตรงมาตรฐาน (std) ที่มีภาระจากการขับปั้มเชื้อเพลิงแรงดันสูงที่ 300 bar (std 300) 400 bar (std 400) และ 500 bar (std 500) กับเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงแรงดันสูงที่ความดันราง 300 bar (300, Common rail) 400 bar (400, Common Rail) และ 500 bar (500, Common Rail)



รูปที่ 13 เปรียบเทียบอัตราการสั้่นเปลือ้งเชื้อเพลิงเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระ

จากผลการทดลองพบว่า หากใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานที่มีภาระขับปั้มแรงดันสูงให้มีความดันรางร่วมต่างๆ ในเบื้องต้น อัตราการสั้่นเปลือ้งจะสูงกว่าการใช้เครื่องยนต์ขับปั้มแรงดันสูงและใช้รางร่วมฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องสันดาป ซึ่งสรุปได้ว่าหากเครื่องยนต์มีภาระ ระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงจะยังคงประหยัดเชื้อเพลิงกว่าระบบมาตรฐาน โดยเฉพาะที่รอบเครื่องยนต์สูงขึ้นและภาระเครื่องยนต์มากขึ้น

3.5 ผลการปลดปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้

จากการผลการทดลองวัดค่าการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ในรูปที่ 14 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในรูปที่ 15

ค่าของ CO และ CO₂ ของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน (std) และเครื่องยนต์ไม่มีภาระที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ มีระดับต่ำกว่ากรณีการฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูง ซึ่งสาเหตุที่เป็นไปได้คือการฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันต่ำเกิดการกระจายของน้ำมัน (Atomization) และระยะของการฉีด

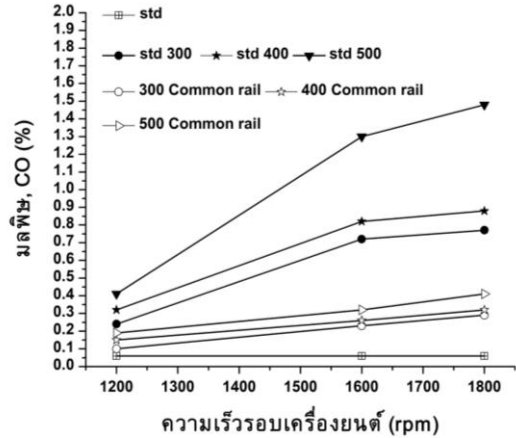


(Penetration) อยู่ในวงที่แคบ และการสะสมของน้ำมันในห้องเผาไหม้น้อย หากเมื่อเปรียบเทียบกับเพิ่มความดันฉีด แต่อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ในกรณีการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานที่เครื่องยนต์มีภาระ 300 bar (std 300) 400 bar (std 400) และ 500 bar (std 500) กับกรณีการฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูง 300 bar (300 Common rail) 400 bar (400 Common rail) และ 500 bar (500 Common Rail) จะพบว่า การฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงนั้นปลดปล่อยมลพิษน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณควันดำที่เครื่องยนต์มาตรฐานที่ไม่มีภาระมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20% แต่เมื่อเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานมีภาระค่าความดันสูงถึง 58% (std 500) ส่วนเครื่องยนต์ฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงมีค่าความดำสูงสุดเพียง 28% (500 Common Rail)

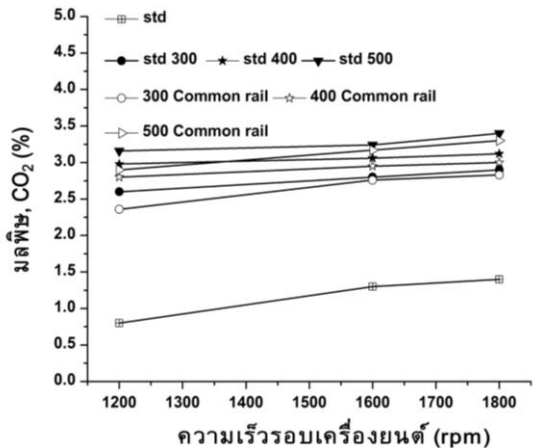
4. บทสรุป

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มีสมมุติฐานเบื้องต้นว่าการเพิ่มความดันฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้เครื่องยนต์ดีเซลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง การทดลองเครื่องยนต์สูบเดี่ยว ขนาด 7 HP จะใช้ปั๊มแรงดันสูงและวางร่วมที่ความดันสูงกว่าความดันของระบบฉีดเชื้อเพลิงจากระบบฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เดิม (240 bar) เป็น 300 bar 400 bar และ 500 bar เท่านั้น เครื่องยนต์จึงจะสามารถขับปั๊มได้ด้วยการขับโดยตรง (อัตราทด 1:1)

จากผลการทดลองพบว่าที่ความดันฉีดเชื้อเพลิง 300 bar ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 rpm และ 1,600 rpm มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เดิม แต่จะ



รูปที่ 14 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันฉีดต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์



รูปที่ 15 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันฉีดต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สูงมากหากความเร็วรอบสูงขึ้น หากเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของระบบฉีดเชื้อเพลิงเดิมที่มีภาระในการขับปั๊มพบว่าระบบฉีดเชื้อเพลิงความดันสูงมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่า ซึ่งจะ เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาระบบฉีดเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ เพื่อการเกษตรด้วยการฉีด



เชื้อเพลิงให้มีความดันสูงขึ้น ควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า

นอกจากอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแล้ว การฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงยังมีผลโดยตรงกับการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ นั่นคือระบบการฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันต่ำหรือความดันมาตรฐานของเครื่องจะยิ่งปลดปล่อย CO และ CO₂ หากเครื่องยนต์ได้รับการดูแลและความเร็วรอบที่สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากน้ำมันไม่เกิดการแตกตัวเป็นละออง (Atomization) ของแก๊สเปรี๊ยน้ำมัน และเกิดการสะสมน้ำมันที่ผนังห้องเผาไหม้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณวิจัย ตลอดจนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์ที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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)
- [2] N. Krasaelom, C. Damrongkijkosol and C. Trakunsaranakom, 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. (in Thai)

- [3] Y.H. Teoh, H.G. How, C.G. Peh, T.D. Le, and H.T. Nguyen, Implementation of common rail direct injection system and optimization of fuel Injector parameters in an experimental single-cylinder diesel engine, Processes, 2020, 8(9), 1-21.
- [4] E.A. Salykin, A.A. Skorobogatov and V.I. Lipilin, Method of fuel injection in small diesel engines, Procedia Engineering, 2017, 206, 1552-1557
- [5] M.K. Yesilyurt, The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends, Renewable Energy, 2019, 132, 649-666.
- [6] W. Sittiwong, K. Pianthong, W. Seehanam, A. Matthujak and C. Kasemnitporn, Effect of temperature on the high speed diesel fuel jets behaviors, Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University, 2011, 13(2), 33-43. (in Thai)
- [7] S.S. Alwashdeh, Investigation of the effect of the injection pressure on the direct-ignition diesel engine performance, AIMS Energy, 2022, 10(2), 340-355.



- [8] T.M.K. Yesilyurt, The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends, *Renewable Energy*, 2019, 132, 649-666.
- [9] W. Sittiwong, K. Pianthong and W. Sehanam, Effect of test chamber temperature on the high speed jatropha oil blends with diesel fuel behaviors, *The Journal of Industrial Technology*, 2015, 11(3), 11-26. (in Thai)
- [10] S. Sittichompoo, K. Theinnoi and B. Sawatmongkhon, Design and development of electronic fuel injection control system program for single cylinder diesel engine, *ASIAN International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing Engineering*, 2013, 6(1), 11-17.
- [11] C. Showa, S. Kariya, K. Aichi, *Common Rail System (CRS) Service Manual*, Denso Corporation, Japan, 2011.



การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวสำเร็จอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 7075 ด้วยกระบวนการล้อเดียวกดรีดปิดเงา

ธนวันต์ บุญเพ็ญ ณิชฐสุดา สงมา ศุภณัฐ ฤทธิ์ประเสริฐ และ พีรพงษ์ กาสุริยะ*

สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Peerapong.kas@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 22 มกราคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 16 พฤษภาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งดำเนินการออกแบบและพัฒนากระบวนการกดรีดปิดเงาอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 7075 แบบล้อเดี่ยวในกระบวนการปรับผิวสำเร็จแบบอัตโนมัติ ซึ่งกระบวนการปรับผิวสำเร็จวัสดุดังกล่าวแบบปกตินั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่ซับซ้อน ทั้งกระบวนการกลึง การเจียรระไน และการขัดเงา อีกทั้งกระบวนการขึ้นรูปด้วยงานกลึงไม่สามารถทำให้พื้นผิวสำเร็จมีความหยาบผิวต่ำได้ ดังนั้นวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดกดรีดปิดเงาแบบล้อเดี่ยวที่สามารถติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีได้ พร้อมทั้งศึกษากลไกพื้นฐานในการปรับปรุงพื้นผิวสำเร็จด้วยกระบวนการกดรีดปิดเงา บนชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 7075 และศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อคุณภาพพื้นผิวชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 7075 ด้วยการรวมทั้งสองกระบวนการอัตโนมัติ ได้แก่ กระบวนการกลึงและกระบวนการกดรีดปิดเงา ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนในการปรับปรุงพื้นผิวที่ซับซ้อนในการทดลองได้ประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการกดรีดปิดเงาประกอบด้วยแรงกดสปริงแบบคงที่ 3 ระดับ ได้แก่ 150, 300 และ 450 นิวตัน อัตราป้อน 3 ระดับ ได้แก่ 0.05, 0.1 และ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วรอบ 2 ระดับ ได้แก่ 600 และ 1,200 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า อัตราป้อนเป็นอิทธิพลหลักที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งอัตราป้อนที่ดีที่สุดคือ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ จะได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ 0.078 ไมโครเมตร ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังจากกระบวนการกลึงมีค่า 0.371 สามารถทำให้ค่าความหยาบผิวลดลง 4-5 เท่า ยิ่งไปกว่านั้น ค่าความแข็งของอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการกดรีดปิดเงา ทำให้ได้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 34% แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าว นอกจากจะทำให้คุณภาพความหยาบผิวดีขึ้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ผิวชิ้นงานมีค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิวมากขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: กดรีดปิดเงาแบบล้อเดี่ยว; ความแข็งผิว; ความหยาบผิว; กระบวนการปรับผิว AI 7075

An Optimization Process of Automatic Finishing Surface Treatment Al 7075 by a Single Roller Burnishing Tool

Thanawan Bunpheng, Nutsuda Songma, Supanut Ritpraseart and Peerapong Kasuriya*

Division of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding author, E-mail: Peerapong.kas@kmutt.ac.th

Received: 22 January 2024; Revised: 16 May 2024; Accepted: 1 July 2024

Online Published: 22 August 2024

Abstract: This research designed and developed a single-roller burnishing tool for the automatic finishing surface of 7075 aluminum alloy (Al 7075). The conventional finishing process for such materials requires complex processes such as turning, grinding, and polishing. In addition, the turning process cannot achieve a surface finish with a low roughness. Therefore, the purpose of this research aims to design and fabricate a single-roller burnishing tool that can be installed on a CNC lathe. In addition, the research will study the fundamental mechanisms of surface finishing improvement using a single-roller burnishing tool on Al 7075 and study the parameters that affect the surface quality of Al7075 by combining two automatic processes. This process includes turning and roller Burnishing, which will reduce the complex steps in surface finishing. In the experiment, the following parameters were used in the roller burnishing process: three levels of constant spring force 150, 300, and 450 Newtons, feed rate 0.05, 0.1, and 0.15 mm/rev, and rotational speed 600 and 1,200 rpm. The results of the experiment showed that the feed rate was the main factor that affected the surface roughness of the workpiece with a statistical significance of 95%. The best feed rate was 0.05 mm/rev, which resulted in a surface roughness of 0.078 μmRa . The surface roughness after the turning process was 0.371 μmRa , which means that the surface roughness was reduced about 4-5 times. In addition, the hardness of Al 7075 after roller burnishing increased by 34%. This shows that the process not only improves the surface roughness quality but also increases the residual stress on the surface of the workpiece.

Keywords: Roller burnishing; surface hardness; surface roughness; Finishing process of Al 7075



1. บทนำ

วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับงานวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์กับการบิน ต้องการวัสดุที่แข็งแรง น้ำหนักเบา และ มีความสวยงามทางด้านพื้นผิว รวมถึงในแง่ของการใช้พลังงานต่อน้ำหนัก โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและส่วนประกอบของเครื่องยนต์โดยมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ดีเยี่ยม ซึ่งสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงสูง อลูมิเนียมอัลลอยนั้นถือว่าเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนยานพาหนะเนื่องจากมีความแข็งแรงต่ออัตราส่วนน้ำหนักที่สูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมซึ่งความหลากหลายของเกรดอลูมิเนียมอัลลอยขึ้นอยู่กับลักษณะความสำคัญของการใช้งาน และขีดความสามารถในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนต่าง ๆ ของยานพาหนะ [1]

อลูมิเนียมอัลลอยเกรด 7075 เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุดที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมการผลิต และเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ การบิน และอวกาศ เนื่องจากมีความแข็งแรงและต้านทานการเสีรูปร่างได้ดี เหมาะกับงานที่ต้องการโลหะที่มีความเหนียวแต่มีน้ำหนักเบาซึ่งกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวอลูมิเนียม อัลลอยเกรด 7075 จำเป็นจะต้องผ่านกระบวนการที่ซับซ้อนเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปเพลาด้วยงานกลึงไม่สามารถทำให้พื้นผิวสำเร็จมีความเรียบสูงได้จากงานวิจัยหลายแห่งแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถของงานกลึงซึ่งได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยประมาณ $0.3-0.5 \mu\text{mRa}$ [2-4] เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการสุดท้ายคืองานเจียรไนเพื่อทำให้ได้ผิวสำเร็จที่ได้ตรงตามเป้าหมาย ทำให้กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวเพลาลูมิเนียมอัลลอย

7075 นั้นมีความซับซ้อน ด้วยเหตุนี้กระบวนการกัดรีดขัดเงาจึงสำคัญ [5] โดยเครื่องมือกัดรีดขัดเงา (Burnishing tool) เป็นเครื่องมือที่ปรับปรุงผิวสำเร็จที่สมบูรณ์แบบ อาทิเช่น ความแข็งผิว, ความหยาบผิว และเพิ่มความเครียดตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงาน เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการกัดรีดขัดเงาพื้นผิวด้วยแรงอัดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก แตกต่างจากกระบวนการกลึง ซึ่งการกัดรีดขัดเงาจะไม่มีเศษออกในกระบวนการแต่จะทำการกัดผิวชิ้นงานทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเครื่องมือกัดรีดขัดเงายังเป็นเครื่องมือที่สามารถติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีได้และทำงานต่อเนื่องหลังจากกระบวนการกลึงได้โดยอัตโนมัติ ดังนั้น กระบวนการดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการค่าความหยาบผิวในระดับนาโนเมตร

ผู้วิจัยจึงเห็นว่ากระบวนการดังกล่าวจะสามารถทำให้ผิวสำเร็จของอลูมิเนียมอัลลอยเกรด 7075 มีความเรียบผิวมากยิ่งขึ้นได้ อย่างไรก็ตามความท้าทายที่จะทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีความเรียบนั้นจำเป็นต้องอาศัยแรงกดอัดและสภาวะการกัดรีดที่เหมาะสม จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เครื่องมือ กัดรีดขัดเงาหลายงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่สำคัญของการกัดรีดขัดเงาคือแรงในการกัดที่มีอัตราคงที่ ค่าแรงกดของสปริง (นิวตัน) ต่อระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ที่มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร โดยจะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีคุณภาพความเรียบที่สม่ำเสมอ ทางผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องมือกัดรีดขัดเงาด้วยการใช้แรงกดสปริงคงที่ที่สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนปรับพื้นผิวชิ้นงาน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพพื้นผิวสำเร็จที่เหมาะสมที่สุดของการขึ้นรูปอลูมิเนียมอัลลอยเกรด



7075 ด้วยการผสมผสานขั้นตอนอัตโนมัติของกระบวนการกลึง และกระบวนการกัดรีดปิดเงาด้วยแรงคงที่ของสปริง ให้ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยในระดับต่ำกว่า $0.1 \mu mRa$ และใช้เป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการปรับปรุงผิวชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยด์โดยอัตโนมัติบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยของตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ด้วยกระบวนการกลึงแบบผสมผสานการใช้ลูกกลิ้งกัดรีดปิดเงาที่ถูกออกแบบมาใช้ติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 7075 เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองคือ เครื่องกลึงซีเอ็นซี (Mazak nexus 150 II) โดยเครื่องจักรดังกล่าวมีความสามารถที่อัตราป้อนต่ำสุดของแกน X อยู่ที่ 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ แกน Z อยู่ที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และมีความเร็วรอบสูงสุดอยู่ที่ 5,000 รอบต่อนาที ขั้นตอนในการทำวิจัยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก (2.1) การออกแบบและสร้างชุดกัดรีดปิดเงาสำหรับการทดลอง (2.2) การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการกลึง และ (2.3) การหาอิทธิพลที่ส่งผลกระทบ รวมถึงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการกัดรีดปิดเงา ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอน ดังนี้

2.1 การออกแบบและสร้างชุดกัดรีดปิดเงา

การเลือกชนิดของหัวกัดรีดชนิดลูกกลิ้งจากการศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า เครื่องมือดังกล่าวได้มีการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการกลึง และปรับปรุงพื้นผิวด้วยหัวกัดรีดหลากหลายรูปแบบ เช่น การปรับปรุงคุณภาพผิว และ

ความแข็งผิวชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 7075-T6 โดยการใช้เครื่องมือขัดผิวด้วยหัวบอลกัดรีดปิดเงา [6]. การใช้เครื่องมือขัดผิวด้วยล้อเดี่ยวกัดรีดปิดเงาแบบใหม่ด้วยหัวสลักทรงกระบอกทำการกัดรีดปิดเงาด้วยการเอียงตามแนวแกนที่ 45 องศาบนชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด ASTM2017 [7]. การประยุกต์ใช้หัวบอลที่ทำมาจากเซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยใช้แรงดันในการกัดรีดชนิดไฮดรอลิกพร้อมทั้งประยุกต์ใช้ในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี [8] การใช้หัวบอลกัดรีดปิดเงา สามารถสร้างชั้นผลกระทบบนพื้นผิวจากกระบวนการได้ลึก 1.5 ถึง 3 มิลลิเมตร [9] ล้อเดี่ยวกัดรีดปิดเงาแบบวงแหวน หรือล้อกัดรีดแบบวงแหวนที่มีรัศมีความโค้งของแหวนที่ 5 มิลลิเมตร ให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ดีที่สุดและสามารถทำการกัดรีดชิ้นงานได้หลากหลายรูปทรง [10]

ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้หัวกัดรีดชนิดลูกกลิ้งรูปทรงวงแหวน แสดงดังรูปที่ 1 พร้อมทั้งได้ออกแบบชุดกัดรีดด้วยสปริงคงที่ที่ใช้ในการติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ประกอบด้วย แกนเพลลาสวมสปริง, แหวนรองสปริง, สปริง, ฝาครอบสปริง, แกนต้นสปริง, สลักลูกปืน, ล้อเดี่ยวกัดรีดปิดเงา

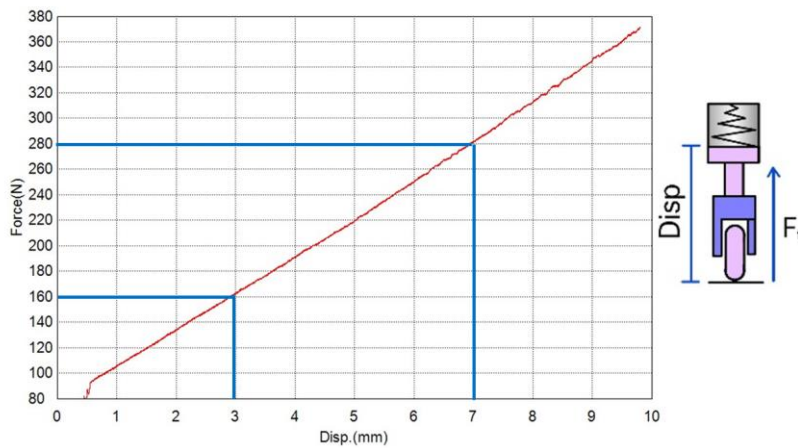
2.2 การทดสอบแรงกดสปริงคงที่สำคัญ

กระบวนการกัดรีดปิดเงา

การทดสอบแรงกดสปริง จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด (Precision Universal Tester : SHIMADZU เพื่อหาค่าแรงกดของสปริง (นิวตัน) ต่อระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ที่มีหน่วยนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/displacement (mm)) จากนั้นจะนำค่าดังกล่าวไปเป็นค่าสำหรับกำหนดระยะการกัดรีด ซึ่งจะใช้สูตรในการคำนวณ (1)



รูปที่ 1 การแสดงส่วนประกอบของชุดครีตปิดเงา



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงกดสปริง และระยะเคลื่อนที่

$$\frac{\Delta F}{\Delta D} = \frac{F_2 - F_1}{D_2 - D_1} \quad (1)$$

จากรูปที่ 2 ผลการกดสปริงจะแสดงผลเป็นค่าแรงกดต่อระยะทาง จะมีค่าแรงกดสปริงอยู่ที่ 30 นิวตัน / มิลลิเมตร (N/mm)

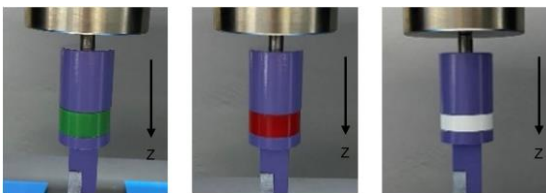
การตั้งค่าแรงกดสปริงดังกล่าวเมื่อต้องการแรงกดที่สูงจำเป็นต้องใช้ระยะกดที่ยาว จะทำให้เกิดปัญหาการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเกินระยะด้วยเหตุนี้จึงได้ออกแบบแหวนรองฝากรอบสปริง

เพื่อทำการตั้งค่าระดับเริ่มต้นของแรงกดสปริง 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 ได้แก่ 40 นิวตัน (ก) สำหรับแรงกดที่ 150 นิวตัน, 90 นิวตัน (ข) สำหรับแรงกดที่ 300 นิวตัน และ 250 นิวตัน (ค) สำหรับแรงกดที่ 450 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งแหวนรองจะทำให้ระยะกดรีดปิดเงามีระยะใกล้เคียงกัน และสามารถตั้งระยะการกดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีได้โดยไม่เกิดปัญหาการเคลื่อนที่เกิน ดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 แสดงระยะการกัดที่ส่งผลต่อแรงกดสปริงของแต่ละแหวนรอง

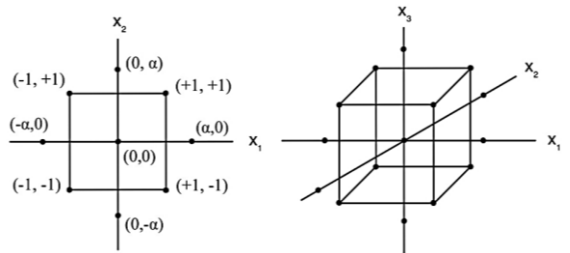
แหวนรองแบ่งตามสี (รูปที่ 3)	แรงกดรีดที่ได้ (N)	ระยะการกัดรีด (mm)
เขียว (40 นิวตัน)	150	3.6
แดง (90 นิวตัน)	300	7.0
ขาว (250 นิวตัน)	450	6.6



รูปที่ 3 แหวนรองปรับระดับแรงกดสปริง 3 ระดับ

2.3 การหาพารามิเตอร์ในงานกลึง

การทดลองการกลึงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของงานกลึง กระบวนการกลึงใช้เม็ดอินเสิร์ตคาร์ไบด์ รุ่น VCGT 160404 รัศมีปลายคมตัด 0.4 มิลลิเมตร การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการศึกษานี้จะใช้วิธีการทางสถิติเป็นการออกแบบเพื่อค้นหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยการออกแบบส่วนประสมกลางเมื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ในสมการที่อยู่ในรูปกำลังสอง และเป็นหนึ่งในการหาพื้นผิว(Response surface design) ที่เหมาะสำหรับการหากระบวนการที่เหมาะสม โดยนำไปสานประสมกลาง ประกอบด้วยปัจจัย 2^k ที่มี n_f ซึ่ง 2^k รันในแนวแกน หรือรูปดาว และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 4 โดยที่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งได้ของเขตมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2-4]



รูปที่ 4 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$

นำพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab จากนั้นนำค่าพยากรณ์ หรือค่าการคาดการณ์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในทางสถิติ มาเปรียบเทียบกับ การประยุกต์ใช้พารามิเตอร์จริง จำนวน 10 ชิ้น เพื่อหาค่าความเที่ยงตรงและแม่นยำของการพยากรณ์

2.4 ขั้นตอนหาพารามิเตอร์ในงานกดรีดบิดงา

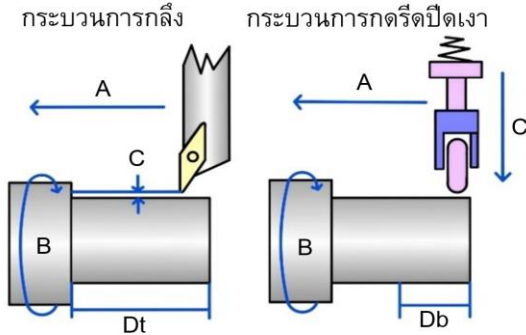
ขั้นตอนการกดรีดบิดงาจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของการกลึงที่เหมาะสมที่สุดเพื่อตั้งค่าเป็นพารามิเตอร์ในการกลึง หลังจากนั้นจะทำการทดลองการกดรีดบิดงาดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง[2] พบว่า ความเร็วรอบไม่ส่งผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกดรีดบิดงา อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการกดรีดบิดงาโดยใช้สปริงคงที่

ตารางที่ 2 ตารางแสดงพารามิเตอร์งานกลึง

Machining parameter	Low	Center	High
Feed rate (mm/rev) (A)	0.1 (-1)	0.175 (0)	0.25 (1)
Spindle speed (RPM) (B)	500 (-1)	850 (0)	1200 (1)
Depth of cut (mm) (C)	0.05 (-1)	0.075 (0)	0.1 (1)



บทความวิจัย



รูปที่ 5 กระบวนการกลึงและกระบวนการกดรีดปิดเงา

ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกตัวแปรทั้งสองระดับคือ 600 รอบต่อนาที เป็นค่าต่ำสุด และ 1,200 รอบต่อนาที เป็นค่าสูงสุด การทดลองภายใต้กระบวนการดังกล่าว จึงมีจำนวน 36 ชั้น มาจากจำนวนการทดลองทั้งหมด แยกออกตามพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองกดรีด ปิดเงา ประกอบด้วย อัตราการป้อน 3 ระดับ 0.05, 0.1 และ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วรอบ 2 ระดับ 600 และ 1,200 รอบต่อนาที และแรงกดของการกดรีดปิดเงา 150, 300 และ 450 นิวตัน ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3

นำพารามิเตอร์ของกระบวนการกดรีดปิดเงามาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab จากนั้นนำค่าพยากรณ์ หรือค่าการคาดการณ์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในทางสถิติ นำมาเปรียบเทียบกับ การประยุกต์ใช้พารามิเตอร์จริง จำนวน 10 ชั้น เพื่อหาค่าความเที่ยงตรง และแม่นยำของการพยากรณ์

2.5 การวัดความหยาบผิว

ขั้นตอนการวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว MarSurf PS 10 เป็นการวัดความขรุขระบนพื้นผิวโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดลองมาวัดค่าความหยาบผิว ในการทดสอบใช้ความยาว

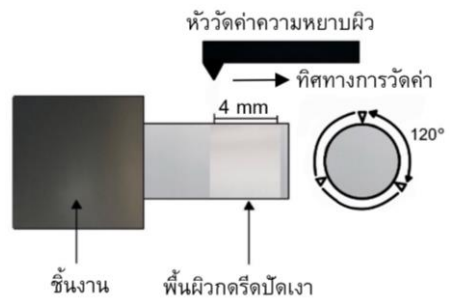


รูปที่ 6 กระบวนการติดตั้งชุดกดรีดปิดเงา และทดลอง

ตารางที่ 3 ตารางแสดงพารามิเตอร์งานกดรีดปิดเงา

Machining Parameter	Low	Center	High
Feed rate (mm/rev) (A)	0.05 (-1)	0.1 (0)	0.15 (1)
Spindle speed (RPM) (B)	600 (-1)	1200 (0)	1200 (1)
Burnishing force(N) (C)	150 (-1)	300 (0)	450 (1)

ในการวัด 4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 (ก) ค่าที่วัดได้คือค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว (R_a) ทำการวัดโดยการแบ่งพื้นที่ผิวออกเป็น 3 ส่วน จากนั้นทำการวัดค่าความหยาบผิวทั้ง 3 จุด ดังรูปที่ 7 (ข) นำค่าที่วัดได้หาค่าเฉลี่ย และจัดบันทึกผลจากการวัดค่าความหยาบผิวที่ได้จากกระบวนการกลึง และกระบวนการกดรีดปิดเงา



รูปที่ 7 การวัดค่าความหยาบผิวในการทดลอง

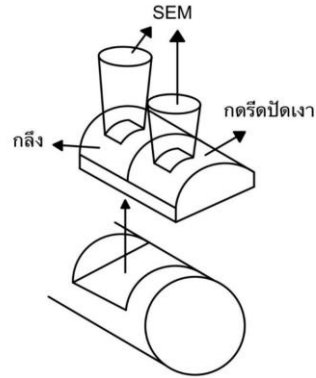


2.6 การส่องลักษณะผิวด้วยเทคนิคจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM (Scanning

Electron Microscopy)

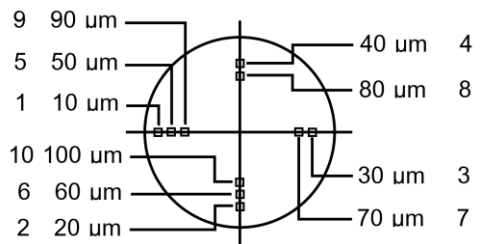
นำชิ้นงานที่ผ่านการทดลองมาตัดให้ได้ขนาด 10x10 มิลลิเมตร โดยใช้เป็นกล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษา ลักษณะพื้นผิวหลังกระบวนการกลึงและกระบวนการ กัดรีดปิดเงาของชิ้นงาน โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราด ไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ โดยใช้กำลังขยาย 4 ระดับ ดังนี้ 1,000 2,500 5,000 และ 10,000X ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การส่องลักษณะผิวด้วยเทคนิคจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.7 การวัดค่าความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการทดลองมาวัดความแข็งโดยใช้ เครื่องไมโครวิกเกอร์ เลือกใช้หัวกดแบบทรงเพชร พีรามิดฐานสี่เหลี่ยม แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์สังเกต รอยกด ดูแนวเส้นทแยงมุม เรียกว่าดูความแข็งของ วัสดุในระดับไมโครเมตร ซึ่งแรงกดในการวัดที่ใช้ 50 แกร์กิโลกรัม ระยะห่างจากขอบของชิ้นงานเพิ่มครั้ง ละ 10 μm จำนวน 10 ตำแหน่ง ดังแสดงรูปที่ 9



รูปที่ 9 วิธีการวัดค่าความแข็งผิวชิ้นงาน

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองของกระบวนการกลึง

ตารางที่ 4 แสดงผลของการวิเคราะห์ การทดลองการกลึงก่อนการทดลองการกัดรีดปิดเงา พบว่าค่า P-value ของตัวแปรมากกว่า 0.05 แสดง ให้เห็นว่าไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อคุณภาพพื้นผิว ในกระบวนการกลึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่สุดโดยใช้โปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 10 พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่คาดการณ์ ประกอบด้วย ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ

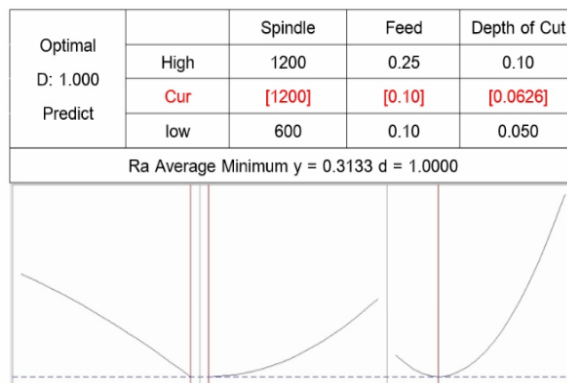
และระยะป้อนลึก 0.075 มิลลิเมตร จะให้ค่าความหยาบ ผิวที่ต่ำที่สุดคือ 0.313 μmRa

เมื่อทำการประยุกต์พารามิเตอร์ในกระบวนการกลึง อลูมิเนียมอัลลอยเกรด 7075 บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี จำนวน 10 ชิ้น พบว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $0.378 \pm 0.04 \mu\text{mRa}$ ดังแสดงรูปที่ 11 ซึ่งผลจากการประยุกต์ใช้จริงมีค่าความหยาบผิวต่าง จากค่าพยากรณ์ อยู่ที่ 0.058 μmRa ทั้งนี้ขีด ความสามารถในการทดลองกระบวนการกลึงด้วย พารามิเตอร์ที่แนะนำได้ค่าความหยาบผิวอยู่ในเกณฑ์ วิจัยที่ได้ศึกษาก่อนหน้า [2-4] จึงสามารถนำ ค่าพารามิเตอร์นี้ไปใช้ในกระบวนการกัดรีดปิดเงาได้

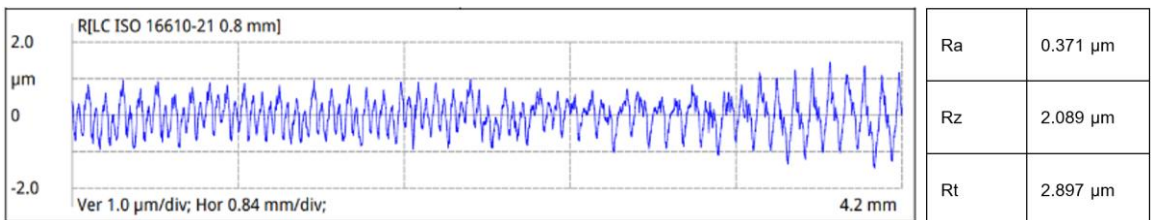


ตารางที่ 4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองการกลึง

Model	0.11194	9	0.01243	1.08	< 0.0001
A-Feed rate	0.01034	1	0.01034	0.90	0.387
B-Spindle speed	0.00956	1	0.00956	0.83	0.404
C-Depth of cut	0.00210	1	0.00210	0.18	0.687
AB	0.00023	1	0.00023	0.02	0.892
AC	0.00446	1	0.00446	0.39	0.561
BC	0.02260	1	0.02260	1.96	0.221
Residual	0.05774	5	0.01154		
Lack of Fit	0.05189	3	0.01729	5.91	0.148
Pure Error	0.00584	2	0.00292		
Cor Total	0.16968	14			
S 1.07466	R-sq 65.97%		R-sq (adj) 4.71%		



รูปที่ 10 ค่าพยากรณ์หรือค่าคาดการณ์ในกระบวนการกลึงที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 11 ค่าความหยาบผิวของกระบวนการกลึง



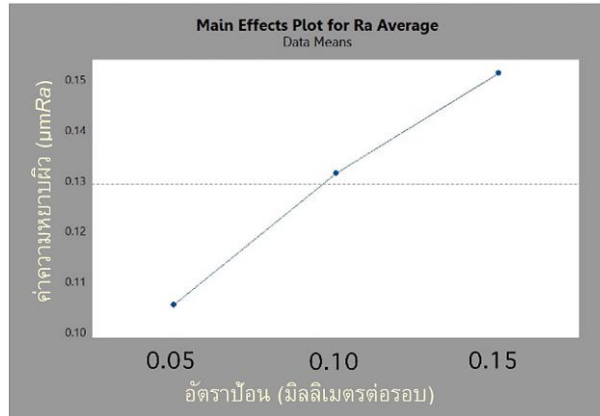
3.2 ผลการทดลองของกระบวนการกัดรีดบิดเงา

ตารางที่ 5 เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง จากวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักได้แก่ อัตราป้อนและปัจจัยร่วม ได้แก่ อัตราป้อน กับแรงกด แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดรีดบิดเงาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลักนั้นพบว่าอัตราการป้อนที่ส่งผลทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดคือ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และจะทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อน ดังแสดงในรูปที่ 12

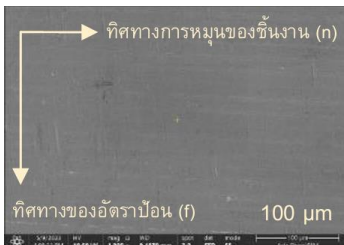
จากการเปรียบเทียบด้วยรูปภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 13) อัตราป้อน 3 ระดับได้แก่ 0.05, 0.1 และ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ดังแสดงรูปที่ 13 จากรูปแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวหลังจากกระบวนการกัดรีดบิดเงา จากการสังเกตอัตราป้อนที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ จะพบว่าที่อัตราป้อนดังกล่าว สามารถกัดรีดพื้นผิวหลังจากกระบวนการกลึงได้ดี ทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากกว่า อัตราป้อนที่ 0.1 และ 0.15 ตามลำดับ จากลักษณะพื้นผิวระยะขยับหรืออัตราป้อนส่งผลต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากยิ่งระยะขยับน้อยจะทำให้ความต่อเนื่องของการกัดรีดบิดเงามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองการกัดรีดบิดเงา

Model	0.02053	17	0.00120	4.54	< 0.05	significant
A-Feed rate	0.01276	2	0.00638	23.99	< 0.05	sig
B-Spindle speed	0.00374	1	0.00374	1.41	0.251	
C-Burnishing Forces	0.00065	2	0.00032	1.22	0.317	
AB	0.00021	2	0.00010	0.40	0.637	
AC	0.00455	4	0.00113	4.28	0.013	sig
BC	0.00051	2	0.00025	0.97	0.397	
ABC	0.00146	4	0.00036	1.37	0.282	
Residual	0.00478	18	0.00026			
Cor Total	0.02532	35				
S 1.0163074	R-sq 81.10%		R-sq (adj) 63.25%		R-sq (pred) 24.39%	



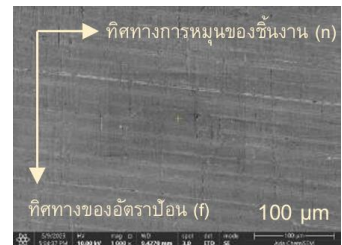
รูปที่ 12 อิทธิพลหลักของค่าความหยาบผิวกับ อัตราป้อน



(ก) อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ



(ข) อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ

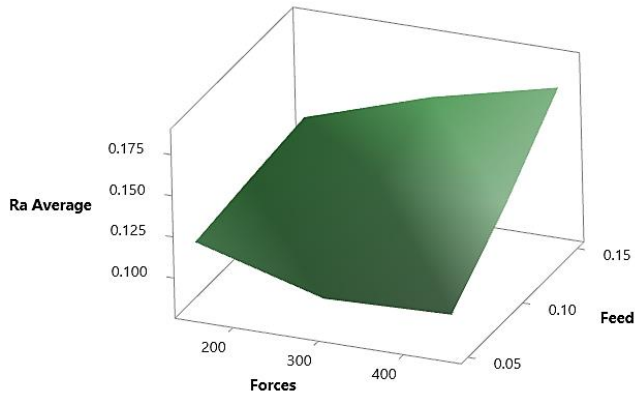


(ค) อัตราป้อน 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ

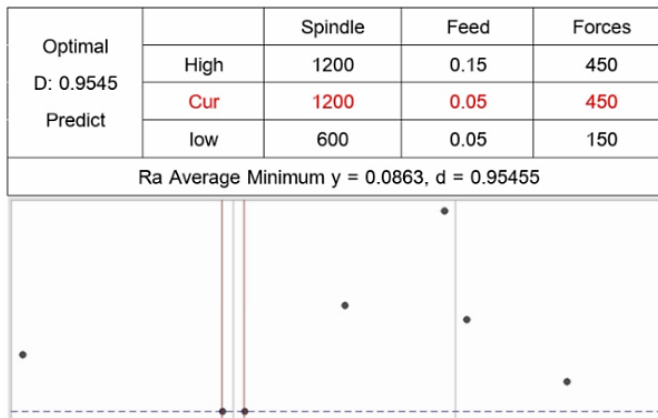
รูปที่ 13 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในแต่ละอัตราป้อน

ปัจจัยร่วมของกระบวนการกัดรีดปัดเงาคือ อัตราป้อนกับ แรงกด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดรีดปัดเงาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์เมื่อใช้อัตราป้อนที่เข้าจำเป็นต้องใช้แรงกัดรีดที่สูง ยกตัวอย่างเช่นอัตราป้อนที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ จะให้ค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุดเมื่อใช้แรงกัดรีดที่ 300 และ 450 นิวตัน ในทางกลับกันเมื่อใช้อัตราป้อนที่ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ จะให้ค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุดเมื่อใช้แรงกัดรีดที่ 150 นิวตัน ดังแสดงรูปที่ 14 หลังจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ทางผู้วิจัยจึงได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้โปรแกรม

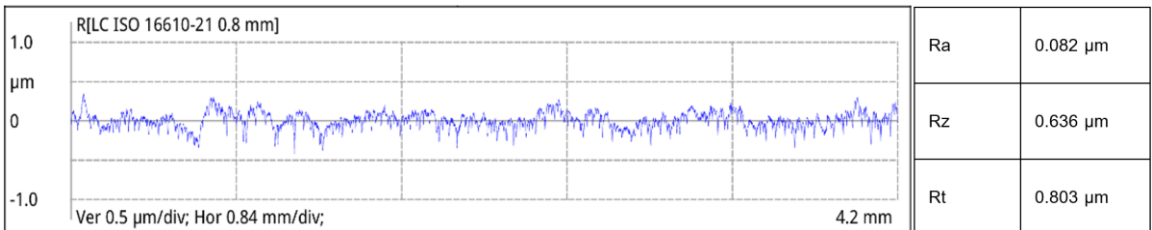
Minitab พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่คาดการณ์ในกระบวนการกัดรีดปัดเงาคือความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และแรงกัดรีดด้วยสปริงที่ 450 นิวตัน จะทำให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดคือ 0.0863 µmRa ดังแสดงรูปที่ 15 จากนั้นได้ทำการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์จากการคาดการณ์ในกระบวนการกัดรีดปัดเงาบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีจำนวน 10 ชิ้น พบว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $0.083 \pm 0.013 \mu\text{mRa}$ ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งผลจากการประยุกต์ใช้จริงมีค่าความหยาบผิวต่างจากค่าพยากรณ์อยู่ที่ 0.0033 µmRa



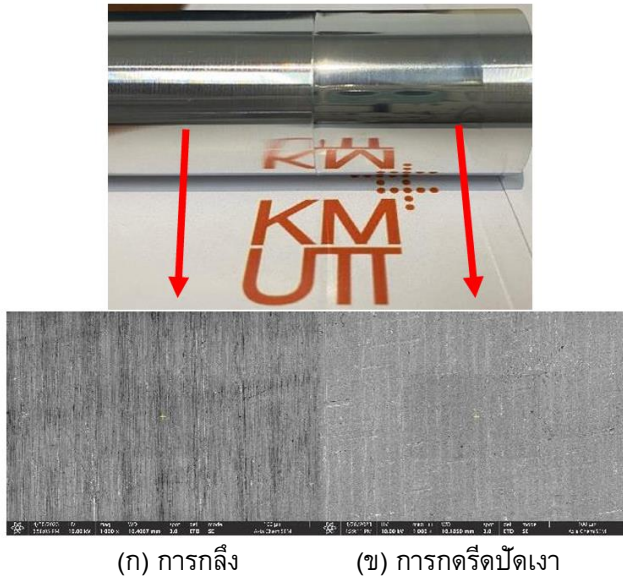
รูปที่ 14 อิทธิพลร่วมกันระหว่างอัตราป้อนกับแรงกดรีดบิดเงา



รูปที่ 15 การพยากรณ์ของค่าพารามิเตอร์กระบวนการกดรีดบิดเงา



รูปที่ 16 ค่าความหยาบผิวของกระบวนการกดรีดบิดเงา

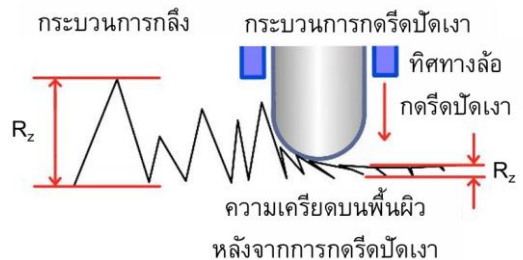


รูปที่ 17 ภาพพื้นผิวของชิ้นงาน กระบวนการกรกลึง และกระบวนการกรดรีดขัดเงา

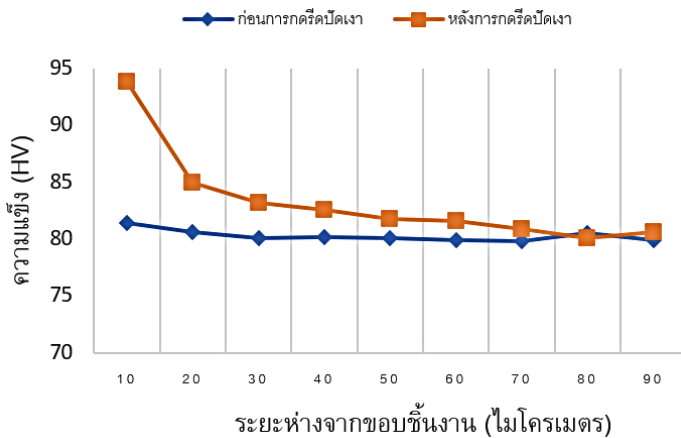
หลังจากผ่านทั้งสองกระบวนการจะเห็นได้ว่าเกิดการสะท้อนรูปภาพได้อย่างชัดเจนบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการดรีดขัดเงา ดังแสดงในรูปที่ 17 เมื่อทำการส่องกำลังขยายด้วยอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่ากระบวนการดรีดขัดเงานั้นสามารถทำให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบผิวที่น้อยลง และไม่เกิดคลื่นกลไกของกระบวนการเป็นที่เข้าใจได้ว่าแรงกดของสปริงจะส่งผลทำให้ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกรกลึงที่ปลายยอดของความหยาบผิว Peak to Valley ถูกกดทับอย่างสม่ำเสมอหลังจากผ่านกระบวนการดรีดขัดเงาจึงทำให้พื้นผิวมีความเรียบมากยิ่งขึ้น ดังแสดงรูปที่ 18

นอกจากนี้ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากการทดสอบหาค่าความแข็ง ซึ่งวัดจากขอบของชิ้นงานเข้ามาครั้งละ $10\ \mu\text{m}$ จากการทดสอบได้

ค่าความแข็งก่อนกระบวนการดรีดขัดเงามีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 80 HV หลังจากผ่านกระบวนการดรีดขัดเงา ได้ค่าความแข็งเฉลี่ย 107.5 HV ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 4-5 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 19 เนื่องจากกระบวนการดรีดขัดเงาไม่ได้เป็นกระบวนการกำจัดเศษแต่แรงกดรีดจะกดพื้นผิวที่บดลงไปบนผิวชิ้นงาน ทำให้ชั้นพื้นผิวของชิ้นงานเกิดความเค้นความเครียดลึกลงไปประมาณ $50\text{-}60\ \mu\text{m}$



รูปที่ 18 กลไกของกระบวนการกรดรีดขัดเงา



รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าความแข็งผิวของอลูมิเนียม เกรด 7075 หลังกรัดขัดเงา

4. สรุปผลการทดลอง

4.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการแปรรูปผิวที่เหมาะสมต่อกระบวนการกลึงได้รับการกำหนดโดยใช้การทดลอง CCD และการทำนายจากแบบจำลองโดยใช้อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความเร็วรอบที่ 1200 รอบ ต่อ นาที และ ระยะป้อน ลีค 0.075 มิลลิเมตร คาดว่าจะได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ $0.03133 \mu mRa$ พารามิเตอร์ของการพยากรณ์ได้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดเฉลี่ย $0.0371 \pm 0.04 \mu mRa$ ซึ่งผลจากการประยุกต์ใช้มีค่าความหยาบผิวต่างจากค่าพยากรณ์อยู่ที่ $0.058 \mu mRa$

4.2 พารามิเตอร์ของกระบวนการแปรรูปผิวที่เหมาะสมต่อกระบวนการกรัดขัดเงาได้รับการกำหนดโดยใช้การทดลอง Factor และการพยากรณ์จากแบบจำลอง โดยใช้ความเร็วรอบที่ 1200 รอบต่อนาที, อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และ แรงกด 450 นิวตัน คาดว่าจะได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ $0.0863 \mu mRa$ ดังพารามิเตอร์ของการพยากรณ์ได้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดเฉลี่ย

$0.083 \pm 0.013 \mu mRa$ ซึ่งผลจากการประยุกต์ใช้จริงมีค่าความหยาบผิวต่างจากค่าพยากรณ์อยู่ที่ $0.0033 \mu mRa$

4.3 อัตราป้อนส่งผลต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกรัดขัดเงาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าอัตราการป้อนที่ส่งผลทำให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดคือ 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และจะทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อน

4.4 กระบวนการกรัดขัดเงานั้นนอกจากจะสามารถทำให้ผิวชิ้นงานมีความหยาบผิวที่น้อยลงและไม่เกิดคลื่น ยังทำให้เกิดความเค้นตึงค้างใต้พื้นผิวของกระบวนการกรัดขัดเงาโดยแรงกดของสปริงจะส่งผลทำให้ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่ปลายยอดของความหยาบผิว Peak to Valley ถูกกดทับอย่างสม่ำเสมอหลังจากผ่านกระบวนการกรัดขัดเงาจึงทำให้พื้นผิวมีความเรียบมาก และมีความเค้นตึงค้างใต้พื้นผิวเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น



4.5 กระบวนการกัดรีดบิดเงานั้นสามารถลดขั้นตอนในการปรับปรุงพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงานทรงกระบอกได้ เนื่องจากขั้นตอนในการทำงานของทั้ง 2 กระบวนการทำงานอย่างต่อเนื่องกันทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปได้ ทั้งนี้กระบวนการกัดรีดบิดเงานั้นสามารถลดขั้นตอนในการปรับปรุงพื้นผิวสำเร็จพร้อมทั้งสามารถเพิ่มความเค้นความเครียดได้พื้นผิวของชิ้นงาน ทำให้มีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดทุนวิจัยเพื่อพัฒนา นักศึกษาด้านงานวิจัยภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัย พระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT Fund) รหัส 26843 จากสำนักงานวิจัย นวัตกรรม และพันธมิตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และขอขอบคุณแผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือเครื่องจักรใช้ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A survey of the status of the non-ferrous metals industry, aluminum, by the Center for Steel and Metals Industry Insight Analysis Iron and Steel Institute of Thailand, 2014. (in Thai)
- [2] S. Ramesh, L. Karunamoorthy and K. Palanikumar, Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5). *Measurement*, 2012, 45(5), 1266-1276.
- [3] M.V. Ramana and Y.S. Aditya, Optimization and influence of process parameters on surface roughness in turning of titanium alloy, *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2), 1843-1851.
- [4] A. Yang, Y. Han, Y. Pan, H. Xing, and J. Li, Optimum surface roughness prediction for titanium alloy by adopting response surface methodology, *Results in Physics*, 2017, 7, 1046-1050.
- [5] J. P. Ajithkumar, and M.A. Xavior, Cutting force and surface roughness analysis during turning of Al 7075 based hybrid Composites, *Procedia Manufacturing*, 2019, 30, 180-187.
- [6] H. Basak and H.H. Goktas, Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic, *Materials and Design*, 2009, 30(4), 1275-1281.
- [7] M. Okada, S. Suenobu, K. Watanabe, Y. Yamashita and N. Asakawa, Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects, *Mechatronics*, 2015, 29, 110-118.
- [8] V. Chomienne, F. Valiorgue, J. Rech, and C. Verdu, Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, 13, 90-96.



- [9] A.S. Maheshwari and R.R. Gawande, Influence of stiff ball burnishing process parameters on surface roughness of AA 6063, International Journal of Applied Engineering Research, 2018, 13(8),30-35.
- [10] G.V. Duncheva, J.T. Maximov, V.P. Dunchev, A.P. Anchev, T.P. Atanasov, and J. Capek, Single toroidal roller burnishing of 2024-T3 Al alloy implemented as mixed burnishing process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111, 3559-3570.



การศึกษากระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในโยเกิร์ตโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยการแช่แข็งสำหรับใช้ในครัวเรือน

วสันต์ เอียรสุวรรณ¹ สานนท์ ว่องมงคลฤทธิ์¹ สุรัชชัย เหมหิรัญ¹ และ ภาวิณี ตักดีสุนทรศิริ^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² ภาควิชาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author) อีเมล: pawinee@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 เมษายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 13 มิถุนายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 4 กรกฎาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: การอบแห้งด้วยการแช่แข็งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ลงโดยกระบวนการเทอร์โมไดนามิกส์ที่ทำให้น้ำหรือสารละลายในอาหารถูกแช่แข็งแล้วทำให้ระเหิด ผลผลิตจากการการอบแห้งด้วยการแช่แข็งยังคงมีคุณภาพที่สูงเนื่องจากสามารถลดการเสื่อมสภาพและปฏิกิริยาทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตที่ได้จากการอบแห้งด้วยเทคโนโลยีแบบอื่น ในการศึกษาเป็นการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งของโพรไบโอติกจากโยเกิร์ตในกระบวนการต่อเนื่องในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งขนาดครัวเรือนที่การออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการแช่แข็งและอบแห้งในภาวะสุญญากาศ ใช้สารทำความเย็น R-410A เป็นสารทำความเย็นในกระบวนการทำความเย็นเพื่อแช่แข็ง มีวิสัยสามารถทำความเย็น 3 kW ในกระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกจากโยเกิร์ตมีอุณหภูมิกับดักความเย็น -40°C และอุณหภูมิผลิตภัณฑ์แช่แข็ง -20°C ในการทดลองได้วัตถุดิบโพรไบโอติกเหลวจากโยเกิร์ต 3000 g มาจัดวางบนถาดขนาด 250 mm × 400 mm × 20 mm จำนวน 6 ถาดบรรจุในห้องอบแห้งแบบแช่แข็ง ทำการวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน วิเคราะห์วัฏจักรการทำความเย็น หาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะทำความเย็น หาระยะเวลาในการแช่แข็งและเวลาในการแห้ง อัตราการอบแห้ง และค่าพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์จากการทดลองเพื่อพิจารณาผลของการรักษาคุณภาพของโพรไบโอติกก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็งซึ่งพบว่าเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกหลังการอบแห้งแบบแช่แข็งยังมีมากเพียงพอต่อการบริโภคเพื่อดำเนินประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์

คำสำคัญ: โพรไบโอติกจากโยเกิร์ต; การอบแห้งแบบแช่แข็ง; เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งขนาดครัวเรือน

A Study of the Freeze-Drying Process for Probiotics in Yogurt Produced from a Typical Household Freeze Dryer

Wasan Theansuwan¹, Sanon Wongmongkolrit¹, Surachai Hemhirun¹ and Pawinee Suksuntornsiri^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

* Corresponding Author, E-mail: pawinee@eng.buu.ac.th

Received: 10 April 2024; Revised: 13 June 2024; Accepted: 4 July 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: The freeze-drying process is a method to reduce moisture in products through a thermodynamics stage that involves freezing the water or solution in food, followed by sublimation. This process results in high-quality products as it effectively minimizes degradation and microbiological reactions compared to other drying technologies. The study focuses on the freeze-drying process of probiotics from yogurt in a continuous operation using an in-house, household-scale, freeze-dryer designed for vacuum freeze-drying. The refrigerant used is R-410A, with a cooling capacity of 3 kW, achieving a condenser temperature of -40°C and a product temperature of -20°C . In the experiment, 3000 g of liquid probiotic from yogurt was spread across six trays measuring 250 mm \times 400 mm \times 20 mm and dried in the freeze dryer. The study measured temperature, pressure, analyzed the refrigeration cycle, determined the coefficient of performance for cooling, freezing and drying times, drying rates, and electrical energy consumption. It also examined the microbiological content to assess the effect of freeze-drying on probiotic quality before and after drying. It found that the probiotic microorganisms remained sufficiently abundant post-drying for consumption with health benefits.

Keywords: Probiotics from yoghurt; Freeze drying; In-house freeze-drying



1. บทนำ

การอบแห้งด้วยการแช่แข็ง (Freeze Drying) เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำหรือสารละลายในผลิตภัณฑ์ถูกแช่ให้เป็นของแข็งจากนั้นทำให้ระเหิด (Sublimation) เป็นก๊าซโดยไม่ผ่านสถานะของเหลว กระบวนการนี้ช่วยให้สินค้าเก็บรักษาได้นาน ทำให้สามารถรักษาคุณภาพ กลิ่น สี และรสชาติของผลิตภัณฑ์ได้ดี

ขั้นตอนกระบวนการ เริ่มจากการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ไว้ในห้องเย็น จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาลดความชื้นด้วยการระเหิดเป็นไอในสภาวะสูญญากาศ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ระเหิดเป็นไอจะเคลื่อนตัวไปควบแน่นที่อุปกรณ์ควบแน่น ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงที่อุณหภูมิต่ำ

ในปัจจุบันผู้บริโภคอาหารมีความต้องการบริโภคอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากอาหารเหล่านี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อตอบสนองความหิวโหยและให้สารอาหารที่จำเป็นแก่มนุษย์เท่านั้น แต่ยังเพื่อป้องกันโรคที่เกี่ยวข้องกับโภชนาการ รวมถึงจุลินทรีย์ และเพิ่มความเป็นอยู่ที่ดีทางร่างกายและจิตใจของผู้บริโภค [1, 2]

โพรไบโอติกเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่มีชีวิตซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกายเนื่องจากทำหน้าที่ต่อสู้กับแบคทีเรียที่เป็นอันตราย ลดอาการท้องร่วง ท้องเสีย และโรคเกี่ยวกับลำไส้ เมื่อรับประทานโพรไบโอติกในปริมาณที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย โพรไบโอติกจึงมักบรรจุในผลิตภัณฑ์นมหมัก เช่น โยเกิร์ต [3, 4] โดย *Bifidobacterium spp.* และ *Lactobacillus acidophilus* เป็นโพรไบโอติกที่สำคัญที่สุดที่เติมลงในนมหมัก [5] ในบรรดาผลิตภัณฑ์หมัก

จากนม การบริโภคผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกสูงสุดนั้นสัมพันธ์กับโยเกิร์ตโพรไบโอติก [6]

หนึ่งในขอบเขตที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการพัฒนาอาหารเพื่อสุขภาพคือการปรับเปลี่ยนกิจกรรมของระบบทางเดินอาหารโดยใช้โพรไบโอติก พรีไบโอติก และซินไบโอติก นอกจากนี้โพรไบโอติกยังถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยด้านการรักษาทางการแพทย์ เช่น ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร ท้องเสียรุนแรง ท้องเสียในทารก ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร และการเสียชีวิตของทารกที่คลอดก่อนกำหนด และกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย [7, 8]

เนื่องจากโพรไบโอติกเป็นแบคทีเรียที่มีชีวิตในโยเกิร์ตซึ่งได้รับความนิยมสูงขึ้นจากผู้บริโภค ในการผลิตจะต้องทำการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมทำการเพาะเชื้อและหมักเพื่อเพิ่มจำนวนเชื้อโพรไบโอติก ทำการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาเชื้อโพรไบโอติกให้เสถียร

การอบแห้งแบบแช่แข็งเป็นหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีล่าสุดในการเก็บรักษาจำนวนเชื้อโพรไบโอติก [9, 10] แต่อุตสาหกรรมการผลิตจะใช้เงินลงทุนเริ่มแรกที่สูงมากในการลงทุนเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง [11, 12] จึงมีเพียงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีอัตราการผลิตขนาดใหญ่จึงสามารถลงทุนในธุรกิจนี้ โดยการอบแห้งด้วยการแช่แข็งเชิงพาณิชย์มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าถึง 85%

สำหรับผู้ผลิตที่มีปริมาณของการผลิตขนาดเล็กหรือผู้เริ่มต้นธุรกิจการผลิตโยเกิร์ตเพื่อสุขภาพของผู้ผลิตในประเทศไทยนั้น การลงทุนในอุปกรณ์การ



อบแห้งด้วยการแช่แข็งจึงถือเป็นความท้าทายอย่างยิ่งในการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดเวลาในการอบแห้งด้วยการแช่แข็งโพรไบโอติกในโยเกิร์ตด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งขนาดครัวเรือนที่การออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการแช่แข็งและอบแห้งในภาวะสูญญากาศ ทำการทดสอบแช่แข็งและอบแห้งโพรไบโอติกในโยเกิร์ต โดยการปรับปรุงกระบวนการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ยังคงต่ำกว่าอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเก็บรักษา ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำแห้งแช่แข็งขนาดครัวเรือนอย่างเป็นทางการผลิตโพรไบโอติกจากโยเกิร์ต เพื่อให้คำแนะนำและข้อมูลเชิงลึกที่ชัดเจนสำหรับผู้มีโอกาสเป็นผู้ผลิตอาหารอบแห้งด้วยการแช่แข็งเพื่อสุขภาพภาคอุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 โพรไบโอติกในโยเกิร์ต (Probiotics in Yogurt)

โยเกิร์ตได้มาจากการหมักนมด้วยแบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria: LAB) โดยการทำให้จุลินทรีย์ในนมด้วยความร้อน การพาสเจอร์ไรส์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 62.8°C เป็นเวลา 30 นาที หรือใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 77°C เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อฆ่าเชื้อแล้วลดอุณหภูมิลงเหลือ 45°C จากนั้นเติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นโดยใช้แบคทีเรีย LAB สองตัวคือ แลคโตบาซิลลัส บัลการิคัส (*Lactobacillus bulgaricus*) และสเตรปโตคอคคัส เทอร์โมฟิลัส (*Streptococcus thermophilus*)

แบคทีเรียหลักที่ใช้ในการผลิตโพรไบโอติกคือแลคโตบาซิลลัส บัลการิคัส คุณสมบัติทางความร้อนของโพรไบโอติกจากโยเกิร์ต คุณสมบัตินี้ใช้เพื่อกำหนดภาวะของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งด้วยการแช่แข็ง

การเตรียมโพรไบโอติกเหลวเพื่อใช้ในการทดลองโดยผสมนมวัวกับไลโอโพรเทคแทนต์ (กาแลคโตส (Galactose) นมผงพร่องมันเนย และซูโครส (Sucrose) บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง จะได้โพรไบโอติก จากนั้นเก็บในขวดแก้วที่มีสารปรับปรุงคุณสมบัติ (Deoxidant) และสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 4°C [1-2, 6] โดยโพรไบโอติกเหลวเพื่อใช้ในการทดลองจัดเตรียมโดย Welltech, Biotechnology Company Limited (รูปที่ 1)

2.2 เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Dryer)

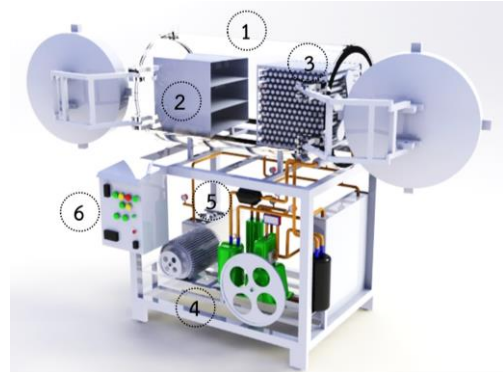
เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งซึ่งออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยนักวิจัย [13-14] โดยสรุปส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอบแห้งมีดังนี้คือ ห้องอบแห้ง (Drying Chamber (1)) จะมีรูปทรงทรงกระบอก ภายในประกอบด้วย ชั้นความร้อน (Heating Shell (2)) จำนวน 3 ชั้นเพื่อวางถาดสี่เหลี่ยมขนาด $250\text{mm}\times 400\text{mm}\times 20\text{mm}$ บรรจุวัสดุการทดลอง ชั้นละ 2 ถาด รวมเป็นจำนวน 6 ถาด และตัวควบแน่นหรือกักดักความเย็น (Evaporator or Cold Trap (3)) ของระบบทำความเย็นโดยมีพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งติดอยู่ด้านท้าย นอกจากนั้นแล้ว ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญคือ ระบบทำความเย็น (Refrigeration System (4)) ระบบทำสูญญากาศ (Vacuum System (5)) และตู้ควบคุม (Control Box (6)) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งในตารางที่ 2



รูปที่ 1 โพรไบโอติกเหลวถูกบรรจุในขวดเพื่อ
การขนส่งสำหรับการใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง

Component	Details/specifications
ระบบทำความเย็น	สารทำความเย็น R-404A
คอมเพรสเซอร์	3.5 kW of cooling capacity on -40°C evaporator unit and 40°C condenser unit, three phase (open reciprocating)
คอนเดนเซอร์	4.82 kW of heat rejection (water cooling)
วาล์วระเหยสารทำความเย็น	3.5 kW (Sportan, Model CG-032) thermostatic, thermostatic charges available -18°C to -40°C
เครื่องระเหย	Cooling capacity 3.75 kW, \varnothing 15 mm of tubing (50 × 50 mm aligned parallel), 10-mm fin spacing, 10 m ²
พัดลมทำความเย็น	1/3 hp, single phase, 1450 rpm
ถาดอบแห้ง	250 × 400 × 20 mm ³ (SS-304)
Receiver tank	3.5 kW, \varnothing 10 mm of tubing
ปั๊มสุญญากาศ	2.0×10^{-2} mbar (1.5×10^{-2} mmHg) of ultimate pressure (total), 3.3 m ³ /h of peak pumping speed (EDWARDS Model RV3 rotary vane pumps)



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งนี้มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ใช้งานโดยทั่วไปสามารถทำงานได้ทั้งสองกระบวนการอย่างต่อเนื่องคือกระบวนการแช่แข็งโดยเปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งทำหน้าที่เป็นเครื่องแช่แข็งแบบเป่าลมเย็น (Air Blast Freezer) และกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง เมื่อปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศและเปิดปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Dryer) โดยทั้งสองกระบวนการจะทำงานต่อเนื่องกันจนเสร็จสิ้นการอบแห้งผลิตภัณฑ์

2.3 วิธีการทดลอง (Experimental Method)

2.3.1 เตรียมโพรไบโอติกเหลวสำหรับการทดลอง

นำโพรไบโอติกเหลวในขวดที่ถูกเตรียมโดย Welltech, Biotechnology Company Limited จำนวน 3,000 g เติลงในถาดจำนวน 6 ถาด เท่าๆกัน (ถาดละ 500 g) และวางบนชั้นความร้อน ชั้นละ 2 ถาด จำนวนสามชั้นที่อยู่ในห้องอบแห้งแบบแช่แข็ง พร้อมติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (Thermo Couple Type T) ที่ถาดทั้งหมดและตัวควบคุมแรงดัน เพื่อเตรียมความพร้อมในการทดลองการอบแห้งแบบแช่แข็ง



2.3.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการแช่แข็ง โดยกระทำตามขั้นตอน ดังนี้ ปิดประตูห้องอบแห้ง เปิดระบบทำความเย็น เปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศในห้องอบแห้ง ตรวจวัด อุณหภูมิของการทดลองด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ แบบบันทึกค่า (Data Logger) Yokogawa MV2000 และวัดความดันของระบบทำความเย็นด้วย (Dry Pressure Gauge) โดยกระบวนการแช่แข็งเริ่มต้น จากอุณหภูมิโพรไบโอติกที่ $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ และดำเนิน ต่อไปจนถึงอุณหภูมิโพรไบโอติกสุดท้ายที่ $-20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$

2.3.3 ขั้นตอนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งเริ่มต้นด้วยการปิดพัดลมเวียนอากาศในห้องอบแห้ง เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อลดความชื้นและปรับสภาวะแวดล้อมภายในห้องอบแห้งให้เป็นความดันสุญญากาศเข้าใกล้ -760 mmHg เมื่อความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งคงที่จึงเปิดระบบควบคุมทำความร้อนที่ชั้นความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิของโพรไบโอติกให้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) $0.3^{\circ}\text{C} / \text{min}$ โดยขั้นตอนการอบแห้งแบบแช่แข็งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนอบแห้งขั้นต้น (Primary drying) มีอุณหภูมิสุดท้ายของขั้นตอนนี้คือ 0°C และขั้นตอนอบแห้งขั้นสุดท้าย (Secondary Drying) ซึ่งจะดำเนินการอบแห้งต่อไปจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ก็จะได้โพรไบโอติกที่แห้งเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

2.4 การประเมินผลการทดลอง (Evaluation of Experiments)

2.4.1 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) ของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง

ตรวจสอบ COP ของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยการวัดค่าความดันและอุณหภูมิของระบบทำความเย็น และวิเคราะห์โดยใช้แผนภาพแสดงความดันและเอนทาลปี (P-H Diagram Chart) ของวัฏจักรอัดไอในระบบทำความเย็นของสารทำความเย็น R-404A COP_C สำหรับการทำความเย็น และ COP_H สำหรับการทำความร้อนสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [15-16]

$$COP_C = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}} \quad (1)$$

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} \quad (2)$$

โดยที่ \dot{Q}_C และ \dot{Q}_H คือ ความร้อนที่ถูกดึงออกและถูกทิ้งจากระบบทำความเย็นตามลำดับ สามารถได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ดังนี้

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R (h_1 - h_4) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_R (h_2 - h_3) \quad (4)$$

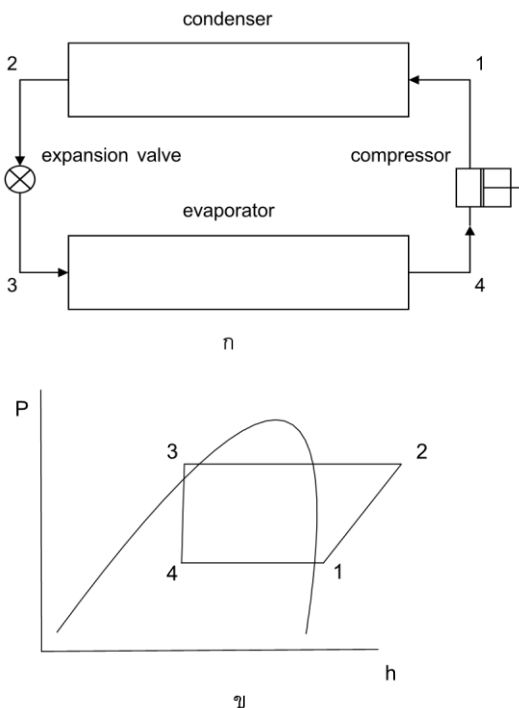
โดย \dot{m}_R คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น ส่วนค่า h_1 h_2 h_3 และ h_4 หาได้จากข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็น ณ ตำแหน่ง ที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามที่แสดงในแผนภาพวัฏจักรทำความเย็นดังในรูปที่ 3 ก. อ่านค่าสมบัติเอนทาลปีโมโนไมกส์ของสารทำความเย็น R-410A จากสมบัติสารทำความเย็น (ASHRAE fundamentals, 2021)



มาพล็อตแผนภูมิความดันเอนทัลปีจำเพาะ (P-h Diagram) แสดงได้ในรูปที่ 3

2.4.2 ตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก

โพรไบโอติกเหล่านี้จะถูกตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์จากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ Welltech, Biotechnology Company Limited ก่อนการส่งมาทำการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่สร้างขึ้น และภายหลังจากผลิตภัณฑ์ได้ผ่านการอบแห้งเสร็จสิ้นแล้วจะถูกนำไปตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์อีกครั้งหนึ่งในห้องปฏิบัติการเดิม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างโพรไบโอติกก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็ง



รูปที่ 3 (ก) วัฏจักรทำความเย็นของระบบทำความเย็น และ (ข) แผนภาพความดันและเอนทัลปีจำเพาะ

3. ผลการทดลอง (Results)

3.1 กระบวนการอบแห้งโพรไบโอติก

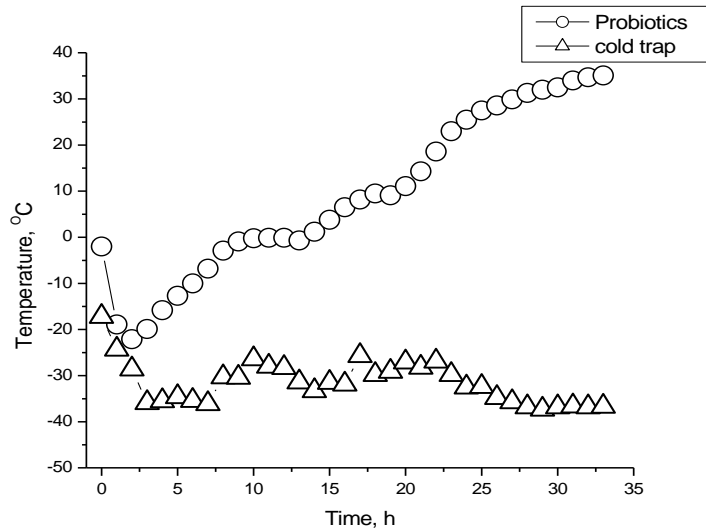
ผลการวัดค่าอุณหภูมิของโพรไบโอติกในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดกระบวนการแช่แข็งและเวลาในการแห้ง นำมาพล็อตกราฟ ตามที่แสดงในรูปที่ 4 พบว่า กระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง มี 2 กระบวนการที่สำคัญ คือ

(1) กระบวนการแช่แข็ง ตั้งแต่เริ่มกระบวนการดำเนินไปจนถึงอุณหภูมิโพรไบโอติกสุดท้ายที่ $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

(2) กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง เป็นกระบวนการต่อเนื่องจาก (1) จนไปถึงอุณหภูมิสุดท้าย $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยโพรไบโอติกที่สภาวะสุดท้ายจะมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นสภาพแห้งเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการทดลอง

ภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกที่สภาวะแช่แข็งจากขั้นตอนที่ (1) แสดงในรูปที่ 5 สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งเสร็จสิ้นจากขั้นตอนที่ (2) ที่พบในภาคทดลองและเมื่อนำมาใส่ถุงซิปล็อคเพื่อเตรียมนำส่งไปทดสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ แสดงในรูปที่ 6

สัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความเย็น (COP_c) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความร้อน (COP_h) ของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง อัตราการอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Electrical Load) ในกระบวนการย่อยของกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying Process) ประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการแช่แข็ง (Freezing) กระบวนการอบแห้งขั้นต้น (Primary Drying) และกระบวนการทำแห้งขั้นที่สอง (Secondary Drying) แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 4 อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง



รูปที่ 5 โพรไบโอติกสภาวะแช่แข็ง
ที่อุณหภูมิ -20°C



รูปที่ 6 โพรไบโอติกสภาวะอบแห้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 40°C
ในถาดทดลองและนำไปใส่ถุงซิปล็อคเพื่อเตรียมนำส่งทดสอบ

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะและการใช้พลังงานในการอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying Process)	COP		อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) ($^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Electrical Load) (kWh)
	COP_C	COP_H		
กระบวนการ แช่แข็ง (Freezing)	4.22	5.01	0.321	0.18
กระบวนการอบแห้งขั้นต้น (Primary Drying)	4.31	5.12	0.027	2.87
กระบวนการทำแห้งขั้นที่สอง	4.18	5.08	0.034	4.14



ก่อนการอบแห้งแบบแช่แข็งโพรไบโอติกเหลวมีน้ำหนัก 3,000 กรัม หลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่นำมาทดสอบพบว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือเพียง 530 กรัม คิดเป็น 17.67% ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามที่แสดงในตารางที่ 4

ผลการตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก ก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็งพบว่าก่อนทำการอบแห้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ประมาณ 1.03×10^{13} CFU/กรัม ภายหลังการอบแห้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณลดลงเหลือ 9.20×10^{11} CFU/กรัม

4. อภิปรายผลและสรุปผล (Discussion and Conclusion)

การทดลองอบแห้งแบบแช่แข็งโพรไบโอติกได้จากโยเกิร์ตจำนวน 3000 กรัม จากเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับครัวเรือนนี้ ได้ผลลัพธ์โดยมีค่าร้อยละของการผลิต 17.67% ผลการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก ก่อนและหลัง 1.03×10^{11} และ 9.20×10^9 CFU/g ซึ่งเป็นปริมาณที่ในโยเกิร์ตโพรไบโอติกยังคงเหลือเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังคงประโยชน์มากพอในการบริโภคเมื่อเทียบกับปริมาณจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่แต่ละชนิด ต้องคงเหลือไม่น้อยกว่า 10^6 CFU/g [17-19] ส่วนสัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความเย็น (COP_c) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความร้อน (COP_H) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.18 – 4.31 และ 5.01-5.12 ตามลำดับ เนื่องจากพลังงานของคอมเพรสเซอร์ (W) จะถูกใช้เป็นหลักในระบบทำความเย็น ปริมาณการทำ

ตารางที่ 4 น้ำหนักผลิตภัณฑ์และผลการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก ก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็ง

รายการ	ก่อนการอบแห้ง	หลังการอบแห้ง	% (Yield)
น้ำหนักโพรไบโอติกในโยเกิร์ต (กรัม)	3,000	530	17.67
ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (Bacteriological Analytical in Probiotic) (CFU/กรัม)	1.03×10^{13}	9.20×10^{11}	

ความเย็น (\dot{Q}_c) เพิ่มมากขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการระบายปริมาณความร้อนที่มากขึ้น (\dot{Q}_H) เป็นไปตามกฎข้อแรกของอุณหพลศาสตร์ ($\dot{Q}_H = \dot{Q}_c + \dot{W}$) [15,16]

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบอบแห้งแบบแช่แข็งโพรไบโอติกด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับครัวเรือนเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตโพรไบโอติก ยาและสมุนไพร และวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่ยังคงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงเดิม และผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับการดำเนินการวิจัยในลำดับต่อไปในด้านการศึกษาค่าตัวแปรของผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีผลต่อไปอบแห้งแบบแช่แข็งเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และ Welltech, Biotechnology Company Limited ในการสนับสนุนสถานที่และห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณภาพ



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. McGee et al., Fresh fermented milks and creams, in *Food and Cooking: The Science and Lore of the Kitchen*. New York, NY, USA: Scribner, 2004, 44-51.
- [2] W.A.D.V. Weerathilake, D.M.D. Rasika, J.K.U Ruwanmali and M.A.D.D Munasinghe, The evolution, processing, varieties and health benefits of yogurt, *International Journal of Scientific and Research Publication*, 2014, 4(4), 1-10.
- [3] Y. Karagül-Yüceer, J.C. Wilson and C. H. White, Formulations and processing of yogurt affect the microbial quality of carbonated yogurt, *Journal of Dairy Science*, 2001, 84(3), 543-550.
- [4] H. Korbekandi, A.M. Mortazavian and S. Iravani, Technology and stability of probiotic in fermented milks, in *probiotic and prebiotic foods: Technology, Stability and Benefits to the human health*, N.P. Shah, Ed., Nova Science Publishing Ltd, NY, USA, 2011, 121-146.
- [5] A.M. Mortazavian, R. Khosrokhavar, H. Rrastegar, and G.R. Mortazaei, Effects of dry matter standardization order on biochemical and microbiological characteristics of freshly made probiotic Doogh (Iranian fermented milk drink), *Italian Journal of Food Science*, 2010, 1(2), 98-104.
- [6] A. Lourens-Hattingh and C.B. Viljoen, Yoghurt as a probiotic carrier food, *International Dairy Journal*, 2001, 11(1-2), 1-17.
- [7] G. Perdigon, S. Alvarez, M. Rachid, G. Agüero, and N. Gobbato, Immune system stimulation by probiotics, *Journal of Dairy Science*, 1995, 78(7), 1597-1606.
- [8] C.M. Galdeano and G. Perdigon, The probiotic bacterium *Lactobacillus casei* induces activation of the gut mucosal immune system through innate immunity, *Clinical and Vaccine Immunology*, 2006, 13(2), 219-226.
- [9] J. Kieps and R. Dembczyński, Current trends in the production of probiotic formulations, *Foods*, 2022, 11(15), 2330.
- [10] N. Tyagi, Z. Gidlöf, D.T. Osanlóo, E.S. Collier, S. Kadekar, L. Ringstad, A.M. Fureby and S. Roos, The Impact of formulation and freeze drying on the properties and performance of freeze-dried *limosilactobacillus reuteri* R2LC, *Applied Microbiology*, 2023, 3(4), 1370-1387.
- [11] L.-G. Ooi and M.-T. Liong, Cholesterol-lowering effects of probiotics and prebiotics: A review of in vivo and in vitro findings, *International of Journal Molecular Sciences*, 2010, 11(6), 2499-2522.
- [12] L. Stratta, L.C. Capozzi, S. Franzino and R. Pisano, Economic analysis of a freeze-drying cycle, *Processes*, 2020, 8(11), 1399.



- [13] T. Wasan, K. Triratanasirichai and K. Tangchaichit, Continuous production of lime juice by vacuum freeze drying, *American Journal of Applied Sciences*, 2008, 5(8), 959-962.
- [14] T. Wasan, and K. Triratanasirichai, W., Air blast freezing of lime juice: Effect of processing parameters, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008, 1(1), 33-39.
- [15] I. Dinçer and M. Kanoglu, *Refrigeration Systems and Applications*, 2nd ED. Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2010.
- [16] L.O.S. Buzelin, S.C. Amico, J.V.C. Vargas, and J.A.R. Parise, Experimental development of an intelligent refrigeration system, *International Journal Refrigeration*, 2005, 28(2), 165-175.
- [17] R. Fuller, Probiotics in man and animals, *Journal of Applied Bacteriology*, 1989, 66(5), 365-378.
- [18] Ministry of Public Health, The use of probiotic microorganisms, *Royal Thai Government Gazette*, 128(346), Special Section 86N, 2011. (in Thai)
- [19] Ministry of Public Health, The use of probiotic microorganisms, 2Ed, *Royal Thai Government Gazette*, 129(346), Special Section 189N, 2012. (in Thai)

การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนออกซิเจนต่อการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวรากท่อไทเทเนียมเกรด 2 ASTM B861 ด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม

กฤษดา แก้วสุริวงษ์¹ ภูวิศ มีสันเทียะ¹ อำนาจ สอนวงษ์แก้ว¹ อติศักดิ์ อ่วมเปี่ยม²
ศิริพงศ์ ลัมพากวิวัฒน์¹ และ ปรียสุทธิ์ วัฒนธรรม^{1*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² บริษัทไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pariyasut@yahoo.com

วันที่รับบทความ: 22 กันยายน 2566 ; วันที่ทบทวนบทความ: 7 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 25 กรกฎาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: การศึกษานี้ตรวจสอบการเปลี่ยนสีผิวของท่อไทเทเนียมจากการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม (GTAW) โดยใช้มาตรฐาน Norsok M601:2016 เป็นแนวทางตรวจสอบ โดยการวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ความแม่นยำของการตรวจสอบด้วยวิธีตรวจพินิจ โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจสอบรอยเชื่อมรากภายในท่อ วัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างตารางอ้างอิงมาตรฐานสำหรับการประเมินการเปลี่ยนสีของท่อไทเทเนียมที่รอยเชื่อมรากด้านในท่อ โดยพิจารณาจากการตรวจสอบด้วยสายตาทั้งแบบใช้และไม่ใช้กล้องจุลทรรศน์ กำหนดกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมภายใต้สภาวะความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศอาร์กอนที่ 50, 100, 300, และ 700 ส่วนในล้านส่วน (ppm) นอกจากนี้ยังควบคุมความเร็วในการเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากความแตกต่างของค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน เปรียบเทียบภาพที่ได้จากภายในท่อโดยการใช้กล้องส่องกับภาพของแนวเชื่อมด้านในท่อจากการตัดตามยาว ผลการวิจัยพบว่าภาพจากกล้องมีสีเข้มกว่าแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความถี่ความถี่ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เกินกว่า 100 ppm บริเวณรอยเชื่อมแนวรากมีการเปลี่ยนสีผิวอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในทุกความเร็วการเชื่อม

คำสำคัญ: ท่อไทเทเนียมเกรด 2; ความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สรองหลัง; การเปลี่ยนสีที่ผิวหลังการเชื่อม; กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม; กล้องจุลทรรศน์

The Study of the Effect of O₂ Contamination on Discoloration at Root Pass Welding of Titanium Grade 2 Pipe ASTM B 861 Using Gas Tungsten Arc Welding

Kitsada Kaewsuriwong¹, Phuwit Meesanthia¹, Umnad Sornwongkaew¹, Adisak Aumpiem²
Siripong Lumpapiwat¹ and Pariyasut Wattanathum^{1*}

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

² Aibel (Thailand) Co., Ltd

* Corresponding author, E-mail: pariyasut@yahoo.com

Received: 22 September 2023; Revised: 7 February 2024; Accepted: 25 July 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: This study investigates the discoloration of as-welded titanium pipes using gas tungsten arc welding (GTAW) in accordance with the NORSOK standard M601:2016, which provides guidelines for welding and inspecting titanium piping. A key focus of this research centers on the precision of visual inspections, particularly when employing a borescope to examine the root weld within the pipe. The principal objective is to establish a standardized reference table for evaluating the discoloration of as-welded titanium pipes at the root, considering both visual inspections conducted with and without a borescope. The GTAW process was conducted under controlled conditions by deliberate manipulation of oxygen concentration in the Argon atmosphere, ranging from 50, 100, 300, to 700 parts per million (ppm). Furthermore, travel speed was regulated to create variations in heat input. A comparative analysis was conducted, contrasting images obtained inside the pipe using a borescope with images of the root after a lengthwise cut. The findings reveal that the images captured through the borescope exhibit darker shading; however, this divergence does not compromise the quality of interpretation. Notably, oxygen concentrations exceeding 100 ppm led to significant discoloration, rendering the material unsuitable for use at any travel speed.

Keywords: Titanium grade 2 pipe; oxygen concentration; discoloration; GTAW; borescope



1. บทนำ

การผลิตแท่นขุดเจาะน้ำมันจำเป็นต้องติดตั้งระบบการดับเพลิง โดยอุปกรณ์ดับเพลิงจะลำเลียงน้ำทะเลเพื่อดับเพลิงในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน เพื่อความคงทนต่อการกัดกร่อน และอายุการใช้งานที่นานขึ้น วัสดุไทเทเนียมจึงถูกเลือกใช้เป็นท่อดับเพลิงบนแท่นขุดเจาะน้ำมัน [1, 2] อย่างไรก็ตามไทเทเนียมมีความไวต่อการเกิดการเปลี่ยนสีที่ผิวบริเวณรอยเชื่อม (Discoloration) หากควบคุมแก๊สปกคลุม (Shielding Gas) และแก๊สรองหลัง (Purging Gas) ไม่ดีพอ หรือมีการปนเปื้อนของแก๊สออกซิเจนสูงเกินกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด [3, 4]

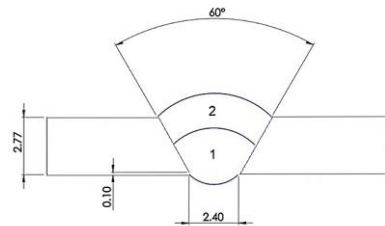
มาตรฐาน Norsok M-601 [5] กำหนดเกณฑ์การยอมรับการเปลี่ยนสีที่ผิวหลังการเชื่อมของวัสดุไทเทเนียมเกรด 1 และเกรด 2 ต้องได้รับการตรวจสอบด้วยสายตาทั้งภายนอก และภายใน ต้องเป็นไปตามเกณฑ์ดังนี้ 1. สีที่ยอมรับได้คือสีเงิน และสีฟางซีด 2. แถบสีเข้มที่ใกล้กับการป้องกันแก๊สเป็นที่ยอมรับได้ 3. ไม่ยอมรับสีน้ำตาลเข้ม สีม่วง สีน้ำเงิน สีเทา หรือสีขาวเป็นขุย โดยมีปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของผิวรอยเชื่อม [6] นอกจากนี้การตรวจสอบการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อโดยใช้กล้องจุลทรรศน์จะเกิดข้อถกเถียงในการตีความเพื่อยอมรับหรือปฏิเสธการใช้งาน นำไปสู่การตัดผ่าท่อและทำการตรวจพิ นิจ โดยตรง (Direct Visual Inspection) เพื่อยืนยัน โดยพบว่าสีของรอยเชื่อมด้านในเป็นไปตามมาตรฐานแม้จะพบว่าสีเข้มกว่าเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองร่วมกับบริษัทไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด โดยใช้ข้อกำหนดกรรมวิธีการเชื่อม (Welding Procedure Specification, WPS) No.P141-Ti-03 [7] ของบริษัทฯ มาเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานเชื่อม เพื่อให้การผลิตชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานและสามารถกำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนสีผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมได้อย่างแม่นยำ โดยผู้วิจัยมีเป้าหมายที่จะสร้างตารางเปรียบเทียบการเปลี่ยนสีที่ผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมตามมาตรฐาน Norsok M-601 โดยไม่ต้องทำการผ่าท่อตรวจยืนยัน เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายโดยในการตรวจสอบ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

วัสดุงานเป็นท่อไทเทเนียมเกรด 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ความหนา 2.77 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร บากทำมุม 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยวัสดุงานและลวดเติมมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 และสมบัติทางกลของวัสดุงานจะแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 1 รายละเอียดการเตรียมรอยต่อ และชั้นเชื่อมตามข้อกำหนดการเชื่อม WPS No.P141-Ti-03 [7]



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีไทเทเนียมเกรด 2 โดยน้ำหนัก (wt%) [8]

Grade	Ti	C	O	N	H	Fe
2	Bal.	0.08	0.25	0.03	0.015	0.30

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเติม ERTi-2 โดยน้ำหนัก (wt%) [8]

C	O	N	H	Fe
0.03	0.08-0.16	0.015	0.008	0.12

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของไทเทเนียมเกรด 2 [8]

Tensile Strength, min		Yield Strength				Elongation 2 in. or 50 mm
		Min.		Max.		Gage length, min%
ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	
50	345	40	275	65	450	20

2.2 การเตรียมอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล RILON TIG 300A (Down Slop) และอุปกรณ์การเชื่อมติดตั้งเข้ากับชุดถังแก๊สสเปคคูลุมอาร์กอนควบคุมด้วยชุดผสมแก๊ส (Gas mixer) เพื่อควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนภายในท่อ

2.2.2 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน (Oxygen Analyzer) ORBITEC OXY-EVO

2.2.3 อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสำหรับผู้ปฏิบัติงานเชื่อม

2.2.4 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Thermocouple R-type) สำหรับการวัดอุณหภูมิระหว่างเชื่อม

2.2.5 มัลติมิเตอร์ (Multimeter) สำหรับวัดค่าแรงดันอาร์กและกระแสไฟเชื่อม

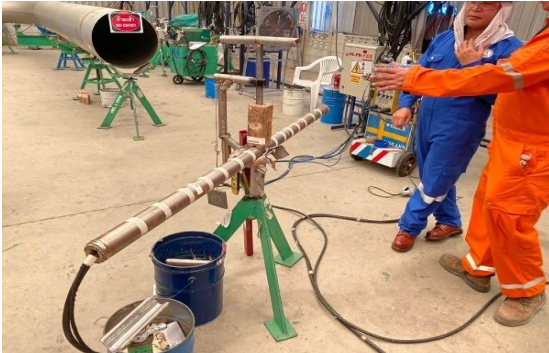
2.3 ขั้นตอนการเชื่อม

2.3.1 เช็ดทำความสะอาดรอยต่อชิ้นงานทดลองและลวดเชื่อมด้วยอะซิโตน (Acetone)

2.3.2 ทำการปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าภายในท่อและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 50, 100, 300 และ 700 ppm ด้วยชุดผสม (Gas mixture) โดยทำการวัดปริมาณออกซิเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นของออกซิเจน (Oxygen Analyzer) โดยติดตั้งเซนเซอร์ในท่อให้อยู่ใกล้กับจุดที่ทำการเชื่อมมากที่สุด ดังรูปที่ 2

2.3.3 ในหนึ่งรอยต่อจะทำการเชื่อมทั้งหมด 2 แนว ประกอบด้วยแนวราก (Root Pass) และแนวทับหน้า (Cover Pass) โดยแนวรากจะควบคุมกระแสไฟไว้ที่ 63 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 10 โวลต์ และแนวทับหน้าจะควบคุมกระแสไฟไว้ที่ 80 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 10.8 โวลต์ คงที่ โดยทุกรอยต่อจะควบคุมความเร็วในการเชื่อมที่ความเร็วสูงและต่ำ ซึ่งจะหาได้จากกราฟจับเวลาในการเชื่อมที่ความยาวแนวเชื่อมเท่ากัน

2.3.4 ก่อนทำการเชื่อมต้องติดตั้งอุปกรณ์ปกคลุมแก๊ส (Trailer Shielding) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การควบคุมบรรยากาศภายในท่อไทเทเนียม



รูปที่ 3 การเชื่อมแบบใช้มือ (Manual) ที่หัวเชื่อมต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ปกคลุมแก๊ส (Trailer Shielding)

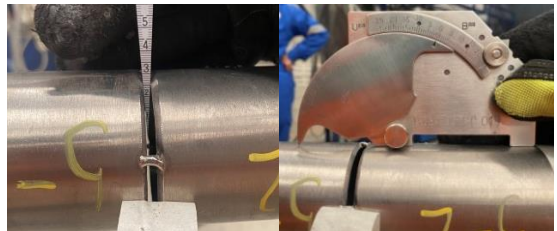
2.3.5 ทำการเชื่อมโดยรักษาอุณหภูมิระหว่างเชื่อม (Interpass Temperature) ที่ 65 องศาเซลเซียส

2.3.6 เมื่อเชื่อมจนถึงจุดหยุด (Stop Weld) ต้องรอให้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส จึงหยุดการจ่ายแก๊สปกคลุม

2.4 การตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อม

เพื่อให้การผลิตชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานและสามารถกำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนสีผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมได้อย่างแม่นยำ ผู้วิจัยได้แบ่งการตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อมออกเป็นสามขั้นตอน คือ การตรวจสอบก่อนการเชื่อม การตรวจสอบระหว่างการเชื่อม และการตรวจสอบหลังการเชื่อม

2.4.1 เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดความแตกต่างในด้านองค์ประกอบของรอยต่อ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบก่อนการเชื่อม โดยควบคุมรอยต่องานเชื่อมให้มีระยะห่างแนวรอกคองที่และไม่มีค่าการเยื้องระหว่างชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 (A) และ (B) ตามลำดับ



(A)

(B)

รูปที่ 4 การควบคุมองค์ประกอบของรอยต่อ: (A) การวัดระยะห่างแนวรอก, (B) การวัดการเยื้องระหว่างชิ้นงาน

2.4.2 ขณะทำการเชื่อม ผู้วิจัยได้ทำการเฝ้าพินิจปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งเป็นเงื่อนไขหลักที่สร้างความแตกต่างต่อการเปลี่ยนสีผิวของท่อไทเทเนียมภายหลังการเชื่อม โดยปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5% ตลอดการเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 4

2.4.3 ก่อนการตรวจพินิจภายในท่อด้วยกล้องงู ต้องทำการวัดค่าความส่องสว่างสามช่วงโดยห่างจากจุดที่จะทำการตรวจสอบ 10, 20, และ 30 มิลลิเมตร ได้ค่าความส่องสว่าง 1,335, 743, และ 445 ลักซ์ (Lux) ตามลำดับ จากนั้นทำการบันทึกภาพจากกล้องงูที่แสดงผลบนหน้าจอตั้งแสดงในรูปที่ 5



บทความวิจัย

ตารางที่ 4 การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนภายในท่อ

OCC	Low Welding Speed	High Welding Speed
50 ppm		
100 ppm		
300 ppm		
700 ppm		
No control	ไม่มีรูปเพราะไม่ควบคุม	
	Joint 5L	Joint 5H

2.4.4 ตัดผ้าท่อไทเทเนียมเพื่อตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตาและบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล โดยใช้เกณฑ์การตรวจสอบตามมาตรฐาน NORSOK M-601:2016 [5] ดังแสดงในรูปที่ 6

2.4.5 ตัดแนวเชื่อมตามขวาง ทำการขึ้นรูป (Mounting) เพื่อให้สะดวกต่อการจับขัดผิว (Polishing) ด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 120, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1,200 1,500 และ 2,000 จากนั้นขัดมันด้วยผ้าสักหลาดร่วมกับผงอลูมิเนียมขนาด 0.25 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 5 การตรวจสอบในท่อด้วยกล้องงู



รูปที่ 6 ท่อไทเทเนียมที่ผ่านการตัดตามยาวเพื่อตรวจพินิจโดยตรงภายในท่อ

2.4.6 ทำการกัดกรด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ตามมาตรฐาน ASTM E470-99 [9] ใช้กรดไนตริก (HNO₃) 5 มิลลิลิตร (mL) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 10 มิลลิลิตร และน้ำ 85 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3-20 วินาที

3. ผลการทดลอง

3.1 การตรวจพินิจรอยเชื่อมแนวรากด้านในท่อด้วยกล้องงูและการตัดผ้าท่อ

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีผิวบริเวณแนวเชื่อมแนวรากและบริเวณข้างเคียงของชิ้นทดสอบที่มีค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานและปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนแตกต่างกัน โดยใช้เกณฑ์การยอมรับของการตรวจพินิจตามมาตรฐาน NORSOK M-601: 2016 [5]



ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ 50 ppm ภาพแสดงผลจากกล้องจุลทรรศน์แบบเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนสี แต่มีแถบสีน้ำตาลอ่อนด้านข้างของรอยเชื่อม ขณะที่ภาพที่ได้จากท่อที่ทำการตัดผ่าโดยบันทึกภาพผ่านกล้องดิจิทัลแสดงให้เห็นถึงแถบสีม่วงอ่อน โดยที่ชั้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมต่ำ จะเกิดแถบสีน้ำตาลในเขตที่เชื่อมและมีพื้นที่ที่กว้างกว่า การเชื่อมด้วยความเร็วสูง เมื่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 100 ppm ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสดงผลว่าไม่เกิดการเปลี่ยนสีที่บริเวณแนวเชื่อม แต่ด้านข้างแนวเชื่อมจะเกิดแถบสีฟ้าอ่อน ซึ่งตรงกับภาพดิจิทัลที่ได้จากการตัดผ่าท่อ โดยความกว้างของแถบสีที่เกิดด้านข้างแนวเชื่อมมีขนาดแคบลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อม ผลการตรวจพินิจชิ้นงานตามมาตรฐานฯ ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 50 และ 100 ppm คือยอมรับการใช้งาน (Accept)

ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 300 ppm ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบเชื่อมที่แนวเชื่อมร่วมกับแถบสีน้ำตาลที่ด้านข้างแนวเชื่อม แต่ภาพถ่ายดิจิทัลของการผ่าชิ้นตัวอย่างพบว่าการเปลี่ยนสีที่บริเวณแนวเชื่อมเป็นสีน้ำตาลผสมสีม่วงเป็นแถบกว้าง ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ 700 ppm ภาพแสดงผลจากกล้องจุลทรรศน์ที่บริเวณรอยเชื่อมเป็นสีน้ำตาล และสีน้ำเงิน ในขณะที่ภาพถ่ายดิจิทัลของการผ่าชิ้นตัวอย่างพบว่าการเปลี่ยนสีที่บริเวณแนวเชื่อมเป็นสีน้ำตาลเข้ม และน้ำเงินเข้ม ผลการตรวจพินิจชิ้นงานตามมาตรฐานฯ ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 300 และ 700 ppm คือไม่ยอมรับการใช้งาน (Reject)

ในกรณีที่ไม่ทำการใช้แก๊สรองหลัง (No control) ภาพแสดงผลจากกล้องจุลทรรศน์ และจากภาพถ่ายดิจิทัล บริเวณรอยเชื่อมมีสีขาวเป็นขุยและขอบด้านข้างรอยเชื่อมมีแถบสีน้ำเงินและสีน้ำตาล ผลการตรวจพินิจชิ้นงานตามมาตรฐานฯ คือไม่ยอมรับการใช้งาน

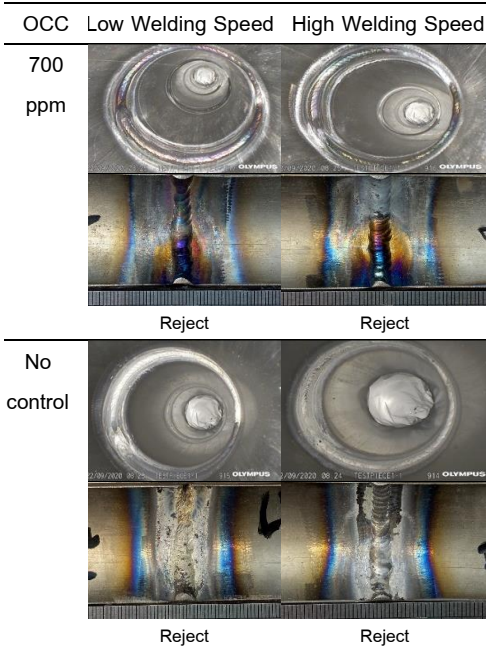
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวรากภายในท่อจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์และภาพถ่ายดิจิทัลภายในท่อที่ทำการตัดผ่า

	OCC	Low Welding Speed	High Welding Speed
50 ppm			
	Accept	Accept	
100 ppm			
	Accept	Accept	
300 ppm			
	Reject	Reject	

*Oxygen Concentration Content



ตารางที่ 5 (cont.)



*Oxygen Concentration Content

ตารางที่ 6 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) กรณีความเร็วในการเชื่อมต่ำ

Speed	joint	Position	Time (min)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
Low Welding Speed	1L (50 ppm)	Root Pass	4.22	44.88	0.50
		Cover Pass	3.14	60.32	0.51
	2L (100 ppm)	Root Pass	4.34	43.64	0.51
		Cover Pass	3.21	59.01	0.52
	3L (300 ppm)	Root Pass	4.28	44.25	0.51
		Cover Pass	3.39	55.87	0.55
	4L (700 ppm)	Root Pass	3.16	59.94	0.37
		Cover Pass	2.55	74.28	0.41
	5L (No Control)	Root Pass	3.29	57.57	0.39
		Cover Pass	3.05	62.10	0.50

3.2 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)

ผลที่ได้จากการตรวจพินิจด้วยกล้องจุลทรรศน์และตัดผ่าท่อแสดงให้เห็นถึงความหนาของแถบสีด้านข้างแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาความแตกต่างในเชิงปริมาณ ผู้วิจัยได้คำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานตามมาตรฐาน BS EN 1011-1:1998 [10] โดยใช้สมการที่ (1) กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนคงที่ 0.6 เนื่องจากใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สคลูมเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบค่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานจากการใช้ความเร็วเชื่อมต่ำและสูง ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$Heat\ Input(kJ/mm) = k \frac{V \times A \times 60}{Welding\ Speed \times 1,000} \quad (1)$$



ตารางที่ 7 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) กรณีความเร็วในการเชื่อมสูง

Speed	joint	Position	Time (min)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
High Welding Speed	1H (50 ppm)	Root Pass	3.41	55.55	0.40
		Cover Pass	3.00	63.14	0.49
	2H (100 ppm)	Root Pass	3.14	60.32	0.37
		Cover Pass	2.38	79.59	0.39
	3H (300 ppm)	Root Pass	2.52	75.17	0.30
		Cover Pass	2.16	87.69	0.35
	4H (700 ppm)	Root Pass	2.39	79.25	0.28
		Cover Pass	2.19	89.49	0.35
	5H (No Control)	Root Pass	2.32	81.65	0.27
		Cover Pass	2.33	81.30	0.38

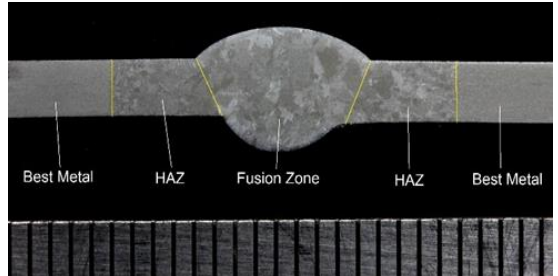
3.3 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

ผลการถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมท่อไทเทเนียม เกรด 2 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณกระแทกร้อน และบริเวณหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 7

3.4 โครงสร้างจุลภาค (Micro Structure)

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณวัสดุฐานแสดงถึงโครงสร้างพื้นฐานของไทเทเนียมเกรด 2 ที่มีลักษณะเกรนแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Equiaxed α) หรืออัลฟาเฟส (Alpha Phase) และมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซาโกนอล (Hexagonal Close-Packed: HCP) [11] ดังแสดงในรูปที่ 8

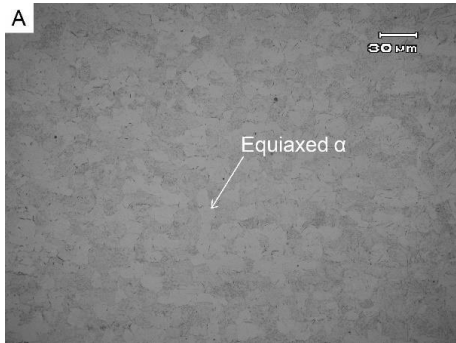
ขณะที่บริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมพบว่าเกรนมีลักษณะใหญ่ขึ้นและมีโครงสร้างผลึกเป็นบอดีเซนเตอร์คิวบิก (Body-Centered Cubic: BCC) ซึ่งเรียกว่าเบต้าเฟส (Beta phase)



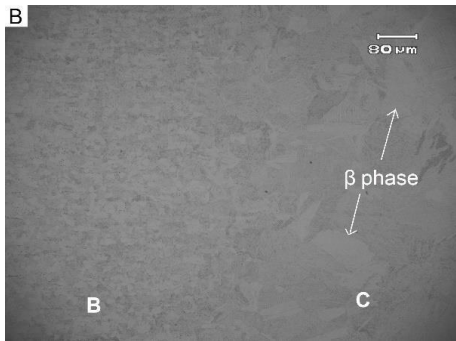
รูปที่ 7 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) ของรอยเชื่อมท่อไทเทเนียม เกรด 2

โดยเงื่อนไขที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นเบต้าเฟสคือต้องได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงกว่า 915 องศาเซลเซียส [11] ดังแสดงในรูปที่ 9

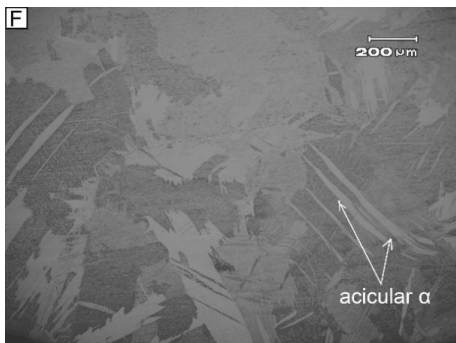
โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อมด้วยลวดเชื่อม AWS ERTi-2 โครงสร้างจะเป็นเบต้าเฟส และอัลฟาเฟส โดยแถบของอัลฟาแบบเข็มจะเป็นแผ่นขนาดใหญ่กว่าที่ปรากฏในบริเวณกระแทกร้อนเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวช้าที่สุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุงานกำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณวัสดุ (B) และพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (C) กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่หลอมละลาย กำลังขยาย 100 เท่า

4. การอภิปรายผล

ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศอาร์กอน ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนสีภายหลังการเชื่อม จากสีน้ำตาล เพิ่มเป็นสีน้ำเงินและสีม่วง โดยจะมีเฉดสีที่เข้มขึ้น และความกว้างของแถบสีที่มากขึ้นในบางตำแหน่งเมื่อความเร็วในการเชื่อมลดลง โดยสาเหตุที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีที่แตกต่างกันนั้น เกิดจากที่อุณหภูมิเผาไหม้ของออกซิเจนบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 600 องศาเซลเซียส และจะแพร่เข้าสู่ไทเทเนียมเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผิวของไทเทเนียมหลุดออกในรูปของผงหรือเศษโลหะ [10] ดังนั้นจึงต้องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนให้ต่ำกว่า 100 ppm และต้องมีการปกคลุมแก๊สเอาไว้ที่จุดหยุดเชื่อมจนกว่าโลหะงานมีอุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส

เพื่อให้ผลการตรวจพินิจผ่านตามมาตรฐานฯ ยอมรับการใช้งาน การตรวจสอบภายในท่อไทเทเนียมจริงผ่านกล้องที่แม้จะให้เฉดสีที่คล้ำแต่เมื่อพิจารณาร่วมกับตารางเปรียบเทียบที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้น ช่วยลดเวลาและลดการผ่าพิสูจน์ เป็นการเพิ่มความสามารถในการผลิตและลดค่าใช้จ่ายของการตรวจสอบอย่างมาก

อย่างไรก็ตามค่าความเร็วในการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดยังอยู่ในช่วงที่ข้อกำหนดกรรมวิธีการเชื่อม No.P141-Ti-03 [7] กำหนดไว้ กล่าวคือจะมีสมบัติของเนื้อเชื่อมไม่แตกต่างกันมากนักเพราะต้องได้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงการยอมรับเดียวกัน และเมื่อพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนสีผิวภายหลังจากการเชื่อมพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเดียวกันที่ความเร็วในการเชื่อมไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฉดสีอย่างมีนัยสำคัญ จึงกล่าวได้ว่าค่าความเข้มข้นของ



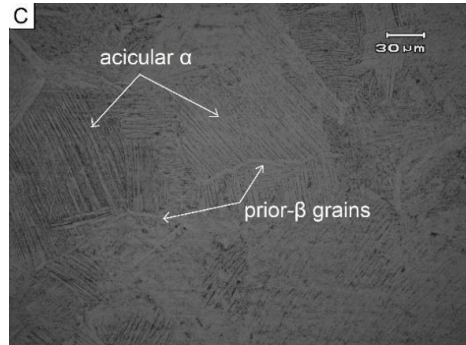
ออกซิเจนและคุณภาพของการควบคุมบรรยากาศ การเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการเกิดการเปลี่ยนสีผิว ภายหลังการเชื่อม

นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค บริเวณกระแทกร้อนที่เกิดการเปลี่ยนสี พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากอัลฟาเฟสเป็นเบต้าเฟสเกรนใหญ่ เป็นผลมาจากได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกินกว่า 915 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังเกิดโครงสร้างอัลฟาเฟส แบบเข็ม (acicular α) ในเบต้าเมทริกซ์ (β matrix) ถัดจากขอบเกรนของเฟสเบต้าก่อนหน้า (Prior- β grains) [12] ดังแสดงในรูปที่ 11, 12 และ 13 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างข้างต้นเกิดขึ้นกับทุกสภาวะ การเชื่อมในการทดลอง แม้ว่าจะมีปริมาณความเข้มข้น ของออกซิเจนแตกต่างกัน

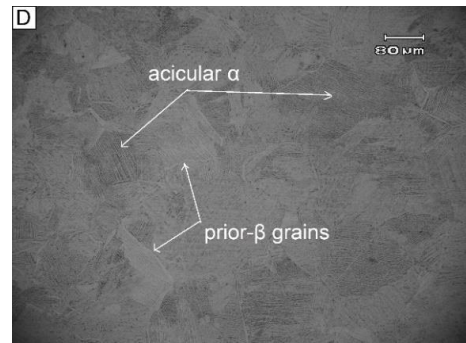
5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวราบ ท่อไทเทเนียม เกรด 2 ASTM B861 ด้วยการเชื่อม อาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุมที่ออกแบบและควบคุมการ ทดลองร่วมกับ บริษัท ไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด โดยใช้ข้อกำหนดดรรชนีวิธีการเชื่อม (Welding procedure specification, WPS) No.P141-Ti-03 [7] ของบริษัทฯ มาเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานเชื่อม สามารถกำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนสี ผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมได้อย่าง แม่นยำ โดยผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นข้อได้ดังนี้

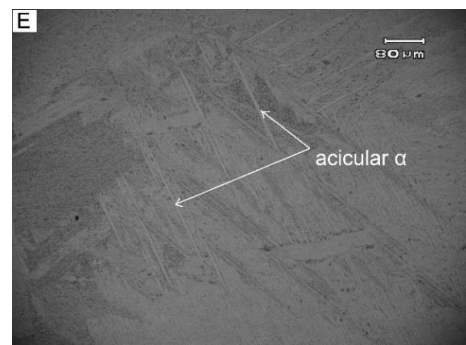
- ผู้วิจัยสามารถสร้างตารางเปรียบเทียบการ เปลี่ยนสีที่ผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียม ตามมาตรฐาน NORSOK M-601 โดยไม่ต้องทำการ ผ่าท่อตรวจยืนยัน



รูปที่ 11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 13 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน กำลังขยาย 200 เท่า



- แนวเชื่อมที่ควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่น้อยกว่า 100 ppm ให้ผลจากตรวจสอบที่ยอมรับได้

- แนวเชื่อมที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเกินกว่า 100 ppm ให้ผลการตรวจสอบที่ไม่สามารถยอมรับได้ และเกิดการเปลี่ยนสีเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะที่ไทเทเนียมได้รับความร้อนสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ทำให้ผิวโลหะหลุดออกในรูปของผงหรือเศษโลหะไททาเนียม

- แนวเชื่อมที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนสูงจะเกิดการเปลี่ยนเฉดสีหลังจากการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน

- เมื่อหยุดเชื่อมยังต้องคงสภาวะอาร์กอนไว้จนกว่าอุณหภูมิจะลดลงต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส เพื่อลดโอกาสในการเปลี่ยนสีภายหลังการเชื่อม

- ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนสีที่ผิวต่อไทเทเนียมภายหลังการเชื่อม

6. แนวทางการวิจัยในอนาคต

การสร้างมาตรฐานในการตรวจพินิจผ่านกล้องจุลทรรศน์เป็นก้าวแรกสู่การสร้างระบบการตรวจพินิจแบบอัตโนมัติ ในขั้นต่อไปผู้วิจัยมุ่งหวังจะรวบรวมผลการตรวจพินิจเพื่อสร้างคลังข้อมูลเพื่อใช้ระบบสมองกลในการประเมินผล และสร้างรายงานการผลตรวจสอบเพื่อยอมรับ หรือปฏิเสธการใช้งานโดยอัตโนมัติ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ เครื่องจักร สถานที่ รวมถึงบุคลากรในการดำเนินการทดลองจากบริษัทไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัททีไลน์คอนสตรัคชั่น จำกัด

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] I.V. Gorynin, Titanium alloys for marine application, Materials Science and Engineering, 1999, 263(2), 112-116.
- [2] D.A. Shifler, Marine and offshore piping systems, LaQue's Handbook of Marine Corrosion, 2002, 667-689.
- [3] S. Min, S. An, J. Park, Y. Park and N. Kang, Effects of GTAW pulse condition on penetration, discoloration and bending property for titanium tube, Journal of Welding and Joining, 2014, 32(6), 583-591.
- [4] R.W. Erskine, Design, fabrication, installation, and operation of titanium seawater piping systems, Journal of Ship Production, 1997, 13(04), 270-289.
- [5] NORSOK Standard M-601: Welding and Inspection of Piping, 2016.
- [6] S. Lathabai, B.L. Jarvis and K.J. Barton, Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium, Materials Science and Engineering, 2001, 299(1-2), 81-93.
- [7] WPS No. P141-Ti-03, IBEL Thailand, 2019.
- [8] ASME BPVC Section II Part B, Nonferrous Material Specification, 2019.



- [9] ASTM E407-99, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, 1999.
- [10] BS EN1011-1, Welding Recommendations for Welding of Metallic Materials, Part 1: General Guidance for Arc Welding, 1998.
- [11] Metallography and microstructures, ASM handbook, ASM International, MI, USA, 1985.
- [12] G. Lutjering, J.C. Williams, and A. Gysler, Microstructure and mechanical properties of titanium alloys, Lawrence Berkeley National Laboratory, CA, USA, 2003, 6-10.

การปรับปรุงสถานีนงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อลดความเหนื่อยล้าใน การทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน

วีรชัย มัฏฐารักษ์^{1*} รังสิมา หอมเศรษฐี¹ และ อ่องุ่น สังขพงศ์²

¹ สาขาวิชาจิตวิทยาอุตสาหกรรมและองค์การ, คณะศึกษาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

วันที่รับบทความ: 8 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 10 กรกฎาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 5 สิงหาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาสุขภาพ ความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าในการทำงาน ก่อนและหลังการออกแบบปรับปรุงสถานีนงาน โดยเปรียบเทียบจากปัจจัยส่วนบุคคลและปัจจัยสภาพแวดล้อม ตัวอย่างคือพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน สหกรณ์กองทุนสวนยาง ตำบลไม้เรียง อำเภอดงจาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ผลการศึกษาปัญหาสุขภาพ พบค่าดัชนีความผิดปกติ (AI) มีค่าที่ต้องเอาใจใส่และระมัดระวัง และเป็นค่าที่รับไม่ได้ให้แก่ไขทนต์ ผลการศึกษาภาระงานต่อกล้ามเนื้อ พบว่ามีความเสี่ยงต่อสุขภาพสูง ส่วนผลการศึกษาความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ก่อนปรับปรุง จากการประเมินด้วยวิธี RULA มีค่าเฉลี่ย 10 ส่วนวิธี REBA มีค่าเฉลี่ย 13 หมายถึงมีระดับปัญหาทางการยศาสตร์ที่ควรทำการปรับปรุง ส่วนผลการศึกษาความเหนื่อยล้าด้วยแบบสอบถามของไปเปอร์ ก่อนปรับปรุง มีคะแนนเฉลี่ยรวมทุกด้าน 139 คะแนน มีค่าเฉลี่ย 6.32 แสดงว่าพนักงานมีความเหนื่อยล้าระดับปานกลาง จากการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงสถานีนงานโดยการออกแบบอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นซึ่งใช้ข้อมูลขนาดสัดส่วนร่างกายตัวอย่าง ปัจจัยส่วนบุคคลและปัจจัยสภาพแวดล้อม ประกอบการปรับปรุงผลการประเมินอุปกรณ์จากผู้เชี่ยวชาญ/ผู้ชำนาญการ โดยรวมมีค่าเฉลี่ย 4.20 ซึ่งอยู่ในระดับความเหมาะสมมาก ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าการประเมินด้วยวิธี RULA จากเดิม มีค่าเฉลี่ย 10 ลดเหลือ 7 สอดคล้องกับผลการประเมินด้วยวิธี REBA จากเดิม มีค่าเฉลี่ย 13 ลดเหลือ 6.67 ซึ่งหมายถึงงานนั้นยังมีปัญหาที่ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมและปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าวต่อไป ส่วนผลการศึกษาความเหนื่อยล้า ก่อน-หลัง การปรับปรุง จากเดิม ค่าเฉลี่ย 6.32 ลดเหลือ 4.80 โดยผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าพบว่ามีค่าระดับคะแนนลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุงสถานีนงานตามหลักการยศาสตร์

คำสำคัญ: การยศาสตร์; ความเหนื่อยล้า; ยางแผ่นรมควัน; รูลาร์; รีบาร์; ไปเปอร์

The Work Station Improvement by Ergonomics Principle to Reduce Fatigue from Work of Worker's in Smoked Rubber Sheets Processing

Weerachai Madtharak^{1*}, Rungsima Homsettee¹ and Angoon Sungkhapong²

¹ Industrial and Organization Psychology Program, Faculty of Education, Ramkhamhaeng University

² Industrial Engineering Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University

* Corresponding author, E-mail: weerachai.ma@skru.ac.th

Received: 2 February 2024; Revised 10 July 2024; Accepted: 5 August 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: This research aimed to assess health problems, ergonomics, and fatigue from work to improve workstations by comparing personal and environmental factors and comparing the ergonomics risk and fatigue from work before and after improving the workstation. The sample comprises workers in a rubber smoked sheet processing factory from Maireang rubber plantation fund cooperation in Chawang District, Nakhonsithammarat Province. The results showed that the Abnormality Index (AI) score was a value to be careful of and it is an unacceptable value. So, it must be corrected immediately. It should improve the workstation, meanwhile, the mean value of RULA was 10, while the REBA was 13, indicating ergonomic problems that required workstation improvement. The Piper fatigue assessment indicated a score of 139 and an average of 6.32, signifying that the worker experienced moderate levels of fatigue from work. From presenting a guideline to improve the workstation by designing a rubber sheet conveying tool that uses the body size data of the sample. Personal factors, environmental factors, and tool evaluation results of experts in terms of an average of 4.20 which is a very reasonable level. The results showed that fatigue and work-related risks, assessed by ergonomic principles, decreased from a RULA score of 10 to 7 and a REBA score from 13 to 6.67. This indicates that there are still unresolved issues in the work environment that require further investigation and improvement. The score was an average of 6.32 down to 4.80. By comparing the results, there was a decrease in the score level due to improvements made to the workstation based on the ergonomics principle.

Keywords: Ergonomics; Fatigue; Smoked Rubber Sheets; RULA; REBA; Piper



1. บทนำ

ความเหนื่อยล้าเป็นธรรมชาติของอาการที่เกิดจากการทำงานและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน สภาพแวดล้อมต่างๆ ในการทำงานสามารถส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพ อาทิเช่น ความเหนื่อยล้า ความปลอดภัย รวมถึงประสิทธิภาพการทำงาน การเพิ่มผลผลิตในงานอุตสาหกรรมเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพนักงานด้วยการคำนึงถึงปัจจัยทางจิตวิทยา อาทิเช่น ความเครียดและความเหนื่อยล้าในการทำงาน อันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น เช่น การก้มตัว บิดตัว หมุนตัว เป็นต้น [1] การออกแบบสถานที่ทำงานตามหลักการยศาสตร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดความเครียดจากการทำงานได้ การศึกษาเพื่อการปรับปรุงงานตามหลักการยศาสตร์จะช่วยให้ทำทางการเคลื่อนไหวร่างกายในการทำงานดีขึ้น อาการเหนื่อยล้ารวมถึงการปวดเมื่อยจากการทำงานนั้นถือได้ว่าเป็นตัวชี้หลักที่แสดงให้เห็นว่ามีปัญหาด้านการยศาสตร์ [2] อาการเหนื่อยล้าก็จะเกิดความผิดพลาดในการทำงานส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุ การบาดเจ็บและเจ็บป่วย ทำให้เกิดปัญหาผลผลิตและค่าใช้จ่าย

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันผู้ประกอบการอุตสาหกรรมยางมีจุดอ่อนในหลายด้าน ยังมีข้อจำกัดด้านเงินทุนและเทคโนโลยีการผลิต จากการศึกษาข้อมูลของกลุ่มสหกรณ์กองทุนสวนยาง การดำเนินงานอยู่ภายใต้การดูแลของสำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำงานสวนยาง (สกย.) การสร้างโรงรมควันยางแผ่นของสหกรณ์กองทุนสวนยางมี 2 รุ่นคือโรงรมควันรุ่นปี 2537 และปี 2538 โดยมีโรงงานผลิตรวมของสหกรณ์กองทุนสวนยางทั่วประเทศ

โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นกรณีศึกษาโรงงานสหกรณ์ไม่เรียง ตำบลไม่เรียง อำเภอฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยปัจจุบันมีพนักงานทั้งหมดจำนวน 16 คน มีสมาชิกกลุ่มสหกรณ์ของโรงงาน จำนวนทั้งสิ้น 172 ราย (ข้อมูลวันที่ 10 มกราคม 2560) และในแต่ละวันมีปริมาณน้ำยางดิบเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3,000 กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของแต่ละวัน ซึ่งมีกำลังการผลิตต่อวัน ระหว่าง 3,000-5,000 แผ่น ถึงแม้ปัจจุบันโรงงานผลิตรวมแผ่นรมควันส่วนหนึ่งจะมีมาตรฐาน GMP ซึ่งเป็นระบบการจัดการด้านคุณภาพการผลิตของยางแผ่นรมควัน ที่ครอบคลุมสถานที่ประกอบการ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร กระบวนการผลิตบุคลากร การจัดเก็บ การขนส่งและระบบสุขาภิบาล โดยจากการศึกษาภาวะสุขภาพและพฤติกรรมการป้องกันสุขภาพของผู้ประกอบอาชีพสวนยางพารา [3] ส่วนหนึ่งพบว่าโอกาสการสัมผัสปัจจัยอันตรายด้านการยศาสตร์ยังมีเปอร์เซ็นต์สูง ยังพบว่ากลุ่มตัวอย่างรับรู้ว่ามีอาการเจ็บป่วยในระบบโครงร่างกล้ามเนื้อขา ปวดกล้ามเนื้อหลัง และการเจ็บป่วยอื่นๆ จากการศึกษาค้นคว้าวิจัยเรื่องปัจจัยคุณภาพสุขภาพจากการทำงานและภาวะสุขภาพตามความเสี่ยงของคนงานโรงงานยางแผ่นรมควัน [4] พบว่ากลุ่มตัวอย่างรับรู้เกี่ยวกับการสัมผัสปัจจัยคุณภาพในสภาพแวดล้อมการทำงานและสภาพการทำงานของกระบวนการผลิตรวมแผ่นรมควัน ที่เกี่ยวข้องกับท่าทางการทำงานที่ไม่เหมาะสม เช่น ก้มหรือเงยศีรษะถึงร้อยเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มตัวอย่าง ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อพฤติกรรมการทำงานที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการยศาสตร์



การให้ความสำคัญกับพฤติกรรมการทำงานที่เกี่ยวข้องกับความเหนื่อยล้าในการทำงานหรือท่าทางการทำงานที่เหมาะสมตามหลักการยศาสตร์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานจึงเป็นเรื่องที่ควรศึกษา ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการปรับปรุงสถานีงานตามหลักการยศาสตร์ เพื่อลดความเหนื่อยล้าในการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันเพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงการทำงานต่อไป

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัญหาสุขภาพ การยศาสตร์และความเหนื่อยล้าในการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน
2. เพื่อปรับปรุงสถานีงานตามหลักการยศาสตร์ของโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน
3. เพื่อเปรียบเทียบความเสี่ยงตามหลักการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าในการทำงาน ก่อนและหลังการปรับปรุงสถานีงานของโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน

3. วิธีการศึกษา

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาสุขภาพและภาระงานต่อกล้ามเนื้อในการทำงาน เลือกตัวอย่างสถานีงานที่มีปัญหาสูงสุด
2. ประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA และ REBA ประเมินความเหนื่อยล้าด้วยแบบประเมินของไปเปอร์
3. นำเสนอแนวทางการปรับปรุงสถานีงาน ออกแบบเครื่องมือ/อุปกรณ์ตามหลักการยศาสตร์ ประเมินผลตามหลักการยศาสตร์ด้วยแบบสอบถาม
4. ประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้า หลังการเสนอแนวทางปรับปรุงสถานีงาน

5. เปรียบเทียบผลการประเมินทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้า ก่อน-หลัง ปรับปรุงสถานีงาน

3.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการประเมินทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าเป็นพนักงานในสถานีงานลำเลียงยางแผ่น จำนวน 3 คน ของโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันของโรงงานสหกรณ์ไม้เรียง อำเภอฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีสภาพร่างกายปกติ

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวัดขนาดสัดส่วนร่างกายเป็นพนักงานในสถานีงานเดียวกันของโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันกรณีศึกษาและในพื้นที่ 5 จังหวัด ที่มีจำนวนโรงงานสูงสุด เป็น เพศชาย 30 คน และเพศหญิง 30 คน ที่มีสภาพร่างกายปกติ

กลุ่มตัวอย่างเพื่อการประเมินชิ้นงานสำหรับการทดลองเพื่อการปรับปรุงสถานีงาน ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 6 คน เป็นอาจารย์ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ในมหาวิทยาลัย จำนวน 3 คน และผู้ชำนาญการเป็นพนักงานในสถานีงานที่ปรับปรุง จำนวน 3 คน

3.3 เครื่องมือที่ใช้

1. แบบสำรวจสุขภาพวัดดัชนีความผิดปกติ (Abnormal Index --AI) แบบสอบถามเพื่อสำรวจภาระงานต่อกล้ามเนื้อ แบบสำรวจเพื่อบ่งชี้อันตรายที่เกี่ยวข้องกับการรับ/ออกแรงของกล้ามเนื้อ [5]
2. แบบประเมินทางการยศาสตร์ คือ แบบประเมิน RULA Employee Assessment Worksheet และแบบประเมิน REBA Employee Assessment Worksheet
3. แบบประเมินอาการเหนื่อยล้าของไปเปอร์ (Revised Piper Fatigue Scale) จำนวน 22 ข้อ



4. แบบประเมินการออกแบบสร้างชิ้นงานสำหรับการทดลองปรับปรุงการทำงานตามหลักการยศาสตร์

5. เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ คือ เครื่องมือวัดขนาดสัดส่วนร่างกาย Rosscraft Anthropometer Set เครื่องมือวัดแสงสว่าง ระดับเสียง อุณหภูมิ ความร้อน เครื่องมือสำหรับการศึกษาการทำงานและการทดลอง เช่น นาฬิกาจับเวลา แผนภูมิ กระบวนการผลิต ภาพถ่ายอย่างละเอียด วีดีโอ บันทึก เป็นต้น

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การแปลผลค่าดัชนีความผิดปกติของข้อมูล ความล่าช้าด้านร่างกายและจิตใจ โดยให้คะแนน 10 ระดับ (0-9) โดย 0 หมายถึง มีความรู้สึกน้อยที่สุด และ 9 หมายถึง มีความรู้สึกมากที่สุด การแปลความหมายแบ่งเป็น 5 ระดับ ตั้งแต่ 0 คือไม่มีปัญหาอะไร จนถึง 4 ขึ้นไป คือรับไม่ได้ให้แก้ไขทันที ส่วนการแปลผลแบบสอบถามเพื่อสำรวจภาระงานต่อกล้ามเนื้อ สอบถามความรู้สึกเหนื่อยหรือเจ็บปวดกล้ามเนื้อระหว่างทำหรือหลังเลิกงาน จำนวน 12 จุด โดยคำถามข้อที่ 1 มีระดับการบ่งชี้ความรุนแรง ส่วนคำถามข้อที่ 2-6 มีลักษณะของความพอใจ ความรู้สึกความถี่ จากมากไปหาน้อย

2. การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA [6] ก่อน-หลังปรับปรุงสถานีงาน การแปลความหมายแบ่งเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ส่วนการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี REBA [7] ก่อน-หลังปรับปรุงสถานีงาน การแปลความหมายแบ่งเป็น 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินผลด้วยวิธี RULA

คะแนน	การแปลความหมาย
1-2	งานนั้นยอมรับได้ แต่อาจเป็นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ได้ถ้ามีการทำงานดังกล่าว ซ้ำๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่าเดิม
3-4	งานนั้นควรได้รับการพิจารณา การศึกษาละเอียดขึ้นและติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่อง การออกแบบงานใหม่อาจมีความจำเป็น
5-6	งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม และรีบดำเนินการปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าว
7 ขึ้นไป	งานนั้นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ ที่ต้องได้รับการปรับปรุงโดยทันที

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินผลด้วยวิธี REBA

คะแนน	การแปลความหมาย
1	งานนั้นยอมรับได้ แต่อาจเป็นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ได้ถ้ามีการทำงานดังกล่าว ซ้ำๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่าเดิม
2-3	งานนั้นควรได้รับการพิจารณา ศึกษาละเอียดขึ้น ติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่อง ออกแบบงานใหม่ อาจมีความจำเป็น
4-7	งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม และรีบดำเนินการปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าว
8-11	งานนั้นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ ที่ต้องปรับปรุงโดยเร็ว
11 ขึ้นไป	งานนั้นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ ที่ต้องได้รับการปรับปรุงโดยทันที

3. การประเมินอาการเหนื่อยล้าของไปเปอร์ [8] ได้มีการตรวจสอบความเที่ยงพบค่าสัมประสิทธิ์ของความสอดคล้องภายในเท่ากับ .80 - .95 ค่าความเชื่อมั่นสัมประสิทธิ์อัลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) โดยรวมเท่ากับ .97 ลักษณะ



คำตอบเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 10 โดย “ 0 ” หมายถึง ไม่มีความรู้สึกต่อข้อความนั้นเลย ตั้งแต่ “ 1 ” ขึ้นไป หมายถึง มีความรู้สึกต่อข้อความนั้นเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และ “ 10 ” หมายถึง มีความรู้สึกต่อข้อความนั้นมากที่สุด โดยการแปลความหมายของคะแนนแบบประเมิณ มีค่าตั้งแต่ 0 - 220 คะแนน จากนั้นหารด้วย 22 การแปลผลการประเมิน คือ 0 คือไม่มีอาการ, 0.01 - 3.99 ระดับอาการเหน้อยล้าน้อย, 4 .00 - 6.99 ระดับอาการเหน้อยล้าปานกลาง 7.00 - 10.00 ระดับอาการเหน้อยล้ามาก

4. การแปลผลแบบประเมินการออกแบบสร้างชิ้นงานสำหรับการทดลองปรับปรุงการทำงาน โดยมีระดับความเหมาะสม คือ 5 หมายถึง ระดับมากที่สุด 4 หมายถึงระดับมาก 3 หมายถึงระดับปานกลาง 2 หมายถึงระดับน้อย และ 1 หมายถึงระดับน้อยที่สุด

5. การวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสัดส่วน ความเสี่ยงทางกายศาสตร์ และความเหน้อยล้า ใช้ค่าสถิติประกอบด้วย ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์

3.5 สถานีงานในการผลิตยางแผ่นรมควัน

จากการศึกษาข้อมูลในกระบวนการผลิตของตัวอย่าง จำนวน 600 แผ่น (1 ลีต) แบ่งเป็น 6 สถานีงาน คือ สถานีงานที่ 1 การรับน้ำยาง สถานีงานที่ 2 การทำยางแผ่น เป็นการผสมน้ำยาง การใส่/ถอดแม่พิมพ์ การเอายางออกจากแม่พิมพ์ สถานีงานที่ 3 การลำเลียงยางแผ่นขึ้นบราวฝั่ง มีพนักงาน สถานีงานที่ 4 การทำยางแผ่นให้แห้ง สถานีงานที่ 5 การตัดแต่งและสถานีงานที่ 6 การจัดเก็บ/ขนส่ง จากการศึกษาข้อมูลสุขภาพเบื้องต้นของตัวอย่างพบว่า สถานีที่ 2

การทำยางแผ่น และสถานีงานที่ 3 การลำเลียงยางแผ่นขึ้นบราวฝั่ง เป็นสถานที่พบปัญหาสุขภาพมาก

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ 3 ข้อ แบ่งเป็น 5 ส่วน ดังนี้

4.1 ผลการศึกษายัญหาสุขภาพ การยศาสตร์และระดับความเหน้อยล้าในสถานีงานของพนักงาน

ส่วนที่ 1 ผลการศึกษายัญหาสุขภาพเพื่อเลือกสถานีงานที่ต้องการปรับปรุงการทำงาน

จากผลการสำรวจสุขภาพวัดดัชนีความผิดปกติภาระงานต่อกล้ามเนื้อ และผลสำรวจเพื่อบ่งชี้อันตรายที่เกี่ยวข้องกับการรับ/ออกแรงของกล้ามเนื้อ ขั้นตอนการลำเลียงยางแผ่นขึ้นเก็บบนบราวฝั่งให้สะเด็ดน้ำ ซึ่งพบว่าขั้นตอนนี้มีดัชนีความผิดปกติสูงสุด [9] ที่มีค่าดัชนีความผิดปกติ (คะแนน 2.63, 2.13 และ 4.13) มีเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 แปลความหมายว่าต้องเอาใจใส่และระมัดระวัง ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาข้อมูล AI รายบุคคล ของพนักงานลำดับที่ 1-8 ใน 2 สถานีงาน

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาข้อมูล AI รายบุคคล

สถานีงาน	ลำดับ	คะแนนแต่ละข้อ								คะแนน AI
		1	2	3	4	5	6	7	8	
ทำยางแผ่น	1	5	6	2	2	2	4	3	3	2.13
	2	6	4	3	2	4	3	3	4	1.88
	3	7	4	3	3	5	4	4	4	2.5
	4	7	4	3	3	5	4	4	4	2.5
	5	3	2	1	1	2	2	2	3	1
ลำเลียงยาง	6	6	5	5	6	4	4	5	4	2.63
	7	7	4	4	4	3	3	4	4	2.13
	8	8	9	5	5	7	6	7	4	4.13

ผลการศึกษาระงานต่อกล้ามเนื้อของพนักงานที่ บังชี้อันตรายที่เกี่ยวข้องกับการรับ/ออกแรงของ กล้ามเนื้อ ยังมีอาการปวดหลัง รองลงมาคือ ปวด กล้ามเนื้อ ข้อ กระดูก ปวดเอว เหนื่อยง่ายกว่าปกติ เป็นต้น โดยมีความรู้สึกเหนื่อยหรือเจ็บปวดกล้ามเนื้อ ระหว่างทำหรือหลังเลิกงาน บริเวณคอ ไหล่ และหลัง นอกจากนี้พบว่ายังมีชั่วโมงการทำงานที่ยาวนาน ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ มีการเคลื่อนย้าย ออกแรง งานซ้ำซาก ต้องเคลื่อนไหวมือบ่อยครั้ง มีงานที่ต้องใช้ สมาร์ท มีอิริยาบถท่าทางการเคลื่อนไหวที่ไม่ถนัด เปลี่ยนมุมบ่อยและต่อเนื่อง มีการปีนขึ้นที่สูง มีงานที่ ทำให้มีการเคลื่อนไหวมาก หรือท่าทางที่ไม่ถนัด

จากรูปที่ 1 เป็นสถานีงานลำเลียงยางแผ่นชั้นเก็บ บนราวฝั่ง ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยแทนกลุ่มตัวอย่าง เพื่อการวิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ และความเหนื่อยล้าของพนักงาน โดยการแทนกลุ่ม ตัวอย่างคือ พนักงานคนที่ 1 ทำหน้าที่ในการลำเลียง ยางแผ่นที่ผ่านเครื่องจักรรีดยาง พนักงานคนที่ 2 ทำ หน้าที่ในการลำเลียงยางแผ่นชั้นล่าง และพนักงานคน ที่ 3 ทำหน้าที่ในการลำเลียงยางแผ่นชั้นบน

ส่วนที่ 2 ผลการศึกษาระประเมินความเสี่ยง ทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อน ปรับปรุง มีดังนี้

ผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA ก่อนปรับปรุง คะแนนรวมมีค่าเฉลี่ย 10 ซึ่งเป็น ปัญหาทางการยศาสตร์ที่ต้องนำข้อมูลไปพิจารณา ประกอบการปรับปรุงสถานีงานต่อไป ดังผลการ ประเมินในตารางที่ 4

ผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี REBA ก่อนปรับปรุง คะแนนรวมมีค่าเฉลี่ย 13 ซึ่งเป็น

ปัญหาทางการยศาสตร์ที่ต้องนำข้อมูลไปตรวจสอบ เพื่อปรับเปลี่ยนท่าทางในการปรับปรุงสถานีงานต่อไป ดังผลการประเมินในตารางที่ 5

ผลการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงานรายคน ก่อนปรับปรุง พบว่าผลคะแนนค่าเฉลี่ยรวมด้าน พฤติกรรม มีค่า 38.99 แปลความหมายว่าพนักงานมี ระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง โดยมีค่าเฉลี่ย 6.49 ผล คะแนนค่าเฉลี่ยรวมด้านอารมณ์ มีค่า 32.33 แปล ความหมายว่าพนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปาน กลาง โดยมีค่าเฉลี่ย 7.63 ผลคะแนนค่าเฉลี่ยรวมด้าน ความรู้สึก มีค่า 30.32 แปลความหมายว่าพนักงานมี ระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง โดยมีค่าเฉลี่ย 6.06 และผลคะแนนค่าเฉลี่ยรวมด้านสติปัญญา แปล ความหมายว่าพนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปาน กลาง มีค่า 35.31 โดยมีค่าเฉลี่ย 5.88 ผลคะแนนเฉลี่ย รวมทุกด้าน มีค่า 139 คะแนน แปลความหมายว่า พนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง โดยมี ค่าเฉลี่ย 6.32 ดังตารางที่ 6

4.2 ผลการปรับปรุงสถานีงานของพนักงาน ที่ช่วย ลดความเหนื่อยล้าตามหลักการยศาสตร์

จากการวิเคราะห์แนวทางที่จะช่วยลดการ เคลื่อนไหวในรูปแบบต่างๆ รวบรวมแนวคิด ระดม ความคิดเห็น ศึกษาหลักการออกแบบเพื่อการปรับปรุง การทำงาน จากนั้นก็เริ่มสเก็ตช์แบบ ทำการคัดเลือก ปรับปรุงพัฒนาแบบ สร้างรูปแบบ กลั่นกรองแบบ ตาม หลักการยศาสตร์โดยประเมินในขั้นตอนการออกแบบ เบื้องต้น วัดขนาดสัดส่วนร่างกายเพื่อใช้ในการ ออกแบบโดยกำหนดให้ผู้ถูกทดสอบปฏิบัติท่าทางการ วัดขนาดสัดส่วนร่างกายตามมาตรฐานการวัดของ Pheasant (1988) ซึ่งมีทั้งหมด 17 ท่าทาง



รูปที่ 1 สถานีงานลำเลียงแผ่นยางขึ้นเก็บบนราวฝั่ง

ตารางที่ 4 ผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA ก่อนปรับปรุง

Step	คะแนน			ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	
Step 1 แขนส่วนบน	5	5	5	5
Step 2 แขนส่วนล่าง	2	2	2	2
Step 3 มือและข้อมือ	3	4	4	3.66
Step 4 การหมุนของข้อมือ	2	2	2	2
Step 5 คะแนนเปิดตาราง A	7	7	7	7
Step 6 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ	1	1	1	1
Step 7 การยกน้ำหนัก	2	2	2	2
Step 8 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	10	10	10	10
Step 9 ศีรษะและคอ	4	4	5	4.33
Step 10 ลำตัวเคลื่อนไหว	4	4	4	4
Step 11 ขาและเท้า	2	1	2	1.66
Step 12 คะแนนเปิดตาราง B	7	7	8	7.33
Step 13 การใช้แรงกล้ามเนื้อขา/เท้า	1	1	1	1
Step 14 การยกน้ำหนัก	2	2	2	2
Step 15 คะแนนรวม	10	10	11	10.33
Step 16 เปิดตาราง C สรุปคะแนน	10	10	10	10



ตารางที่ 5 ผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี REBA ก่อนปรับปรุง

Step	คะแนน			ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	
Step 1 ลักษณะการทำงานศีรษะ/คอ	3	3	3	3
Step 2 ท่าทางของลำตัว	4	4	4	4
Step 3 ท่าทางของส่วนขา	5	2	3	2.66
Step 4 คะแนนเปิดตาราง A	8	7	8	7.66
Step 5 ภาระงาน/น้ำหนัก	1	2	2	1.66
Step 6 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	9	9	10	9.3
Step 7 ท่าทางของแขนส่วนบน	5	5	5	5
Step 8 ท่าทางของแขนล่าง	2	2	2	2
Step 9 ท่าทางของมือ/ข้อมือ	3	3	3	3
Step 10 คะแนนเปิดตาราง B	8	8	8	8
Step 11 พิจารณาการจับยึดวัตถุ	2	2	2	2
Step 12 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	10	10	10	10
Step 13 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ	1	1	1	1
Step 14 คะแนนเปิดตาราง C	12	12	12	12
Step 15 สรุปคะแนนรวม	13	13	13	13

ตารางที่ 6 ผลการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงานรายคน ก่อนปรับปรุง

ข้อความ	พนักงาน			ค่าเฉลี่ย	ค่า SD	ผลรวม
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3			
ด้านพฤติกรรม	6.66	5.66	7.16	6.49	0.76	38.99
ด้านอารมณ์	6.44	8.66	7.8	7.63	1.11	32.33
ด้านความรู้สึกรู้สึก	6.2	5	7	6.06	1	30.32
ด้านสติปัญญา	5.66	5.66	6.33	5.88	0.38	35.31
ผลรวม 22 ข้อ	137	119	162	139	1.11	139
ผลหารด้วย 22	6.22	5.40	7.36	6.32	0.98	6.32

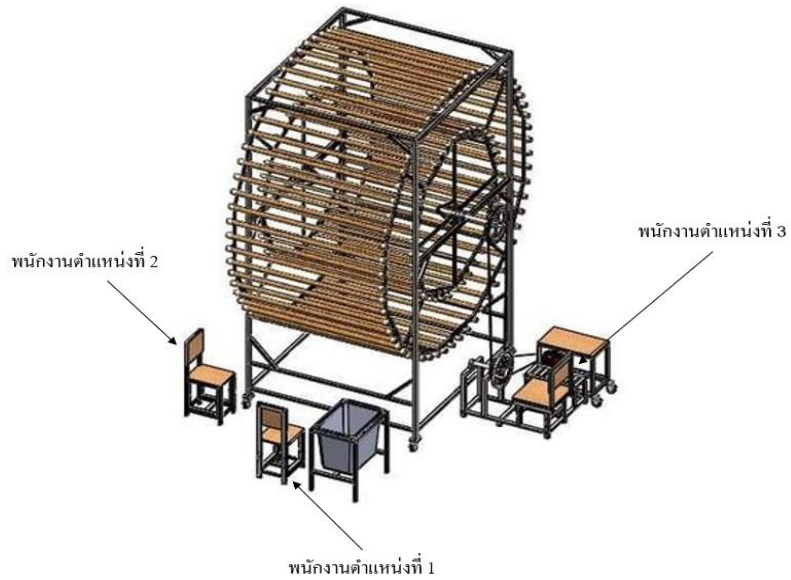


ผลการปรับปรุงสถานีนงานโดยการออกแบบชุดอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นตามหลักการยศาสตร์ ผู้วิจัยใช้ข้อมูลขนาดสัดส่วนร่างกาย [11] ของตัวอย่างโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันและในพื้นที่ 5 จังหวัด ที่มีจำนวนโรงงานสูงสุด เป็น เพศชาย จำนวน 30 คน และเพศหญิง จำนวน 30 คน โดยแต่ละจังหวัด เพศชาย จำนวน 6 คน และเพศหญิง จำนวน 6 คน ในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ตรัง สุราษฎร์ธานี และพัทลุง เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยมีรายละเอียดแสดงรายการวัดสัดส่วน ทั้งหมด 17 ส่วน มีค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปอร์เซ็นไทล์ที่ 5 และ เปอร์เซ็นไทล์ที่ 95 เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบทั้ง 3 ตำแหน่ง

ผู้วิจัยได้ศึกษาการทำงานเพื่อประกอบการนำเสนอแนวทางปรับปรุงจากการประยุกต์ใช้หลัก ECERS โดยได้ออกแบบชุดอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นตามหลักการยศาสตร์ การประเมินในขั้นตอนการปรับปรุงการออกแบบ โดยมีผู้เชี่ยวชาญและผู้ชำนาญการในกระบวนการผลิต ประเมินเพื่อปรับปรุงพัฒนาแบบในเบื้องต้น จำนวน 3 คน หลังจากการปรับปรุงโดยได้แสดงรายละเอียด (Details) ของแบบเพื่อดำเนินการสร้างชิ้นงานสำหรับการทดสอบ (Prototype) การประเมินขั้นตอนทบทวนการออกแบบปรับปรุงสถานีนงานที่ได้รับการคัดเลือก เมื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นสำหรับทดลองการปรับปรุงที่ผ่านการกลั่นกรองและปรับปรุงแก้ไขแล้วเสร็จ ผู้วิจัยจึงใช้แบบสอบถามประเมินอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นที่สร้างขึ้น โดยมีผู้เชี่ยวชาญเป็นอาจารย์ทางด้าน

วิศวกรรมศาสตร์ในมหาวิทยาลัย จำนวน 3 ท่าน และผู้ชำนาญการเป็นพนักงานในสถานีนงานที่ปรับปรุงจำนวน 3 ท่าน สรุปผลการประเมินหลังจากใช้แบบสอบถามประเมินอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นสำหรับการทดลองเพื่อการปรับปรุงสถานีนงานตามหลักการยศาสตร์ โดยรูปที่ 2 แสดงตำแหน่งในการปรับปรุงสถานีนงานของพนักงาน ทั้ง 3 ตำแหน่ง และรูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ลำเลียงที่สร้างโดยโครงสร้างมีความกว้าง 2.20 เมตร ความยาว 3.40 เมตร และความสูง 4.10 เมตร

ผลจากการประยุกต์ใช้หลัก ECERS ที่เป็นไปตามหลักการขจัดงานที่ไม่จำเป็น (Eliminate) เช่น การขจัดเครื่องเคลื่อนไหว เอื้อมหยิบและป้อนยางแผ่น การขจัดการบินไปยังชั้นบนเพื่อพาดยางแผ่น หลักการรวมขั้นตอนการปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน (Combine) เช่น การรวมขั้นตอนการยกหยิบราวไม้ไผ่ และการส่งต่อไปยังชั้นบน หลักการจัดใหม่ (Rearrange) เช่น การเปลี่ยนวิธีการบินไปยังชั้นบนเพื่อพาดยาง หลักการทำให้ง่ายขึ้น (Simplify) เช่น การใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนแทนการใช้แรงงานคน โดยผลการศึกษาการทำงานพบว่าขั้นตอนในการทำงาน ยังคงมีเวลาโดยรวมเท่าเดิม เนื่องจากการไหลของวัตถุดิบหรือยางแผ่นยังคงไหลโดยใช้เวลาปกติ และมีระยะทางในการเคลื่อนย้ายไม่ต่างกัน แต่จะพบว่าระยะทางในการเคลื่อนย้ายของพนักงานลดลงคือจากเดิมมีระยะทาง 51 เมตร ลดลงเหลือ 13 เมตร โดยแสดงลักษณะการทำงานของพนักงานในสถานีนลำเลียงยางแผ่น ทั้ง 3 ตำแหน่ง ตามรูปที่ 4 - 6



รูปที่ 2 ตำแหน่งพนักงานในการปรับปรุงสถานีงาน



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นที่สร้างขึ้น



(ก) ก่อนปรับปรุงสถานีงาน



(ข) หลังปรับปรุงสถานีงาน

รูปที่ 4 ก่อน-หลังปรับปรุงสถานีงานพนักงานคนที่ 1



(ก) ก่อนปรับปรุงสถานีงาน



(ข) หลังปรับปรุงสถานีงาน

รูปที่ 6 ก่อน-หลังปรับปรุงสถานีงานพนักงานคนที่ 3



(ก) ก่อนปรับปรุงสถานีงาน



(ข) หลังปรับปรุงสถานีงาน

รูปที่ 5 ก่อน-หลังปรับปรุงสถานีงานพนักงานคนที่ 2

จากรูปที่ 4 การปรับปรุงในตำแหน่งที่ 1 ในการลำเลียงยางที่ผ่านเครื่องจักรรีดเพื่อไปพาดบนราวผืน ออกแบบให้สามารถทำงานได้ทั้งเพศและสัดส่วนที่ต่างกัน ทั้งในทำยืนและทำนั่ง มีเก้าอี้รองรับถ้าต้องการนั่งสามารถปรับระยะและความสูงได้ ออกแบบชุดวงล้อที่หน้างานมีราวไม้พาดยางแผ่นสามารถเคลื่อนระดับไปตามระยะเอื่อมของพนักงานที่ต่างกัน โดยได้เพิ่มเติมการออกแบบถึงรับยางแผ่นที่ไหลผ่านมาจากเครื่องรีดที่มีระยะการเอื่อมหยิบชั้นงานแทนการก้มหยิบชั้นงานในรูปแบบเดิมจากรูปที่ 5 การปรับปรุงในตำแหน่งที่ 2 ในการลำเลียงยางชั้นล่าง ออกแบบให้สามารถทำงานได้ทั้งเพศและสัดส่วนที่ต่างกัน ทั้งในทำยืนและทำนั่ง มีเก้าอี้รองรับถ้าต้องการนั่ง สามารถปรับระยะและระดับได้ ออกแบบชุดวงล้อที่มีร่องเว้นระยะเท่ากันทุกราว โดยสามารถเคลื่อนระดับไปตามระยะเอื่อมบ่อนยางแผ่นได้ตามความเหมาะสม กรณียืนทำงานมีพื้นที่เพียงพอให้พนักงานปฏิบัติงานได้สะดวก



ในการออกแบบตำแหน่งที่ 1 และ 2 สามารถปรับเปลี่ยนตามความถนัดซ้ายขวา สามารถเคลื่อนย้ายเก้าอี้และอุปกรณ์ตามความถนัด สามารถย้ายเก้าอี้มาอยู่ในตำแหน่งด้านข้างวงล้อ ได้ทั้งซ้ายขวาตามความถนัด สามารถปรับระยะอุปกรณ์ได้

จากรูปที่ 6 การปรับปรุงในตำแหน่งที่ 3 ในการลำเลียงยางชั้นบน โดยจากเดิมที่ต้องปีนไปยังชั้นบน โดยออกแบบสถานีงานให้หนึ่งทำงานหมุนวงล้อที่ใช้ในการขับเคลื่อนลำเลียง ออกแบบให้สามารถทำงานได้ทั้งผู้หญิง ผู้ชาย ในท่านั่งมีเก้าอี้ที่สามารถปรับระยะและระดับได้ โดยสามารถใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนวงล้อได้กรณีที่พนักงานไม่เพียงพอหรือไม่ต้องการใช้แรงงานคนเพื่อลดปัญหาการยศาสตร์

ผู้วิจัยได้สร้างแบบสอบถามเพื่อการประเมินชิ้นงานตามขั้นตอนคือ ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี หลักทางกายศาสตร์ ความปลอดภัย และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม การยศาสตร์ และความปลอดภัยในการทำงาน และผู้จัดการโรงงาน ตรวจสอบคุณภาพแบบสอบถาม ความตรงเชิงเนื้อหา (Validity) หาดัชนีความสอดคล้อง (IOC)

นำแบบสอบถามไปทดลองใช้ (try-out) โดยมีค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ที่ 0.7 จากนั้นนำไปใช้สำหรับการประเมินชิ้นงานสำหรับการทดลองเพื่อการปรับปรุงสถานีงานโดยผู้ประเมิน ทั้ง 6 คน

จากตารางที่ 7 แสดงผลการประเมินพบว่าเมื่อรวมข้อคำถาม 20 ข้อ ใน 5 ด้าน มีค่าเฉลี่ยรวม 4.20 ระดับความเหมาะสมมาก โดยผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบเพื่อการปรับปรุงการทำงานมีความเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ได้ไป

4.3 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงตามหลักการยศาสตร์และความเหนื่อยล้า

ส่วนที่ 1 ผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้า หลังการปรับปรุง

จากตารางที่ 8 ผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA หลังปรับปรุง จากเดิมคะแนนรวมมีค่าเฉลี่ย 10 ลดเหลือ 7 สอดคล้องกับผลการประเมิน ด้วยวิธี REBA ที่แสดงในตารางที่ 9 ผลการประเมินจากเดิมคะแนนรวมมีค่าเฉลี่ย 13 ลดเหลือ 6.67 ซึ่งหมายถึงงานนั้นยังมีปัญหาที่ควรศึกษาเพิ่มเติมและปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าวต่อไป

ตารางที่ 7 ผลการประเมินชุดอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นที่สร้างขึ้น

ข้อคำถามด้าน	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
ความเหมาะสมกับขนาดสัดส่วนร่างกาย	4.20	0.59
ความเหมาะสมตามหลักชีวกลศาสตร์	4.12	0.41
ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานตามหลักการยศาสตร์	4.45	0.61
ความเหมาะสมของรูปแบบเครื่องมืออุปกรณ์	4.05	0.77
ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง	4.22	0.76
ค่าเฉลี่ยรวม	4.20	0.62



ตารางที่ 8 ผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA หลังปรับปรุง

Step	คะแนน			ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	
	Step 1 แขนส่วนบน	5	3	
Step 2 แขนส่วนล่าง	2	1	1	1.33
Step 3 มือและข้อมือ	3	2	2	2.33
Step 4 การหมุนของข้อมือ	1	1	1	1
Step 5 คะแนนเปิดตาราง A	6	7	4	5.66
Step 6 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ	1	1	1	1
Step 7 การยกน้ำหนัก	2	0	0	0.66
Step 8 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	9	5	5	6.33
Step 9 ศีรษะและคอ	2	2	2	2
Step 10 ลำตัวเคลื่อนไหว	3	3	3	3
Step 11 ขาและเท้า	1	1	1	1
Step 12 คะแนนเปิดตาราง B	4	4	4	4
Step 13 การใช้แรงกล้ามเนื้อขา/เท้า	1	1	1	1
Step 14 การยกน้ำหนัก	2	0	0	0.66
Step 15 คะแนนรวม	7	5	5	5.66
Step 16 เปิดตาราง C สรุปคะแนน	9	8	7	7

ส่วนผลการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงานรายคน หลังการปรับปรุงสถานีงาน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อนและหลังปรับปรุงสถานีงาน ทุกด้านมีค่าเฉลี่ยลดลง กล่าวโดยรวมก่อนการปรับปรุงสถานีงาน ผลคะแนนเฉลี่ยรวมทุกด้าน มีค่า 139 คะแนน แปลความหมายว่าพนักงานมีระดับความ

ตารางที่ 9 ผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี REBA หลังปรับปรุง

Step	คะแนน			ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	
	Step 1 ลักษณะการทำงาน ศีรษะ/คอ	2	2	
Step 2 ท่าทางของลำตัว	3	3	3	3
Step 3 ท่าทางของส่วนขา	1	1	1	1
Step 4 คะแนนเปิดตาราง A	4	4	4	4
Step 5 ภาระงาน/น้ำหนัก	1	0	0	0.33
Step 6 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	5	4	4	4.33
Step 7 ท่าทางของแขนส่วนบน	5	3	3	3.66
Step 8 ท่าทางของแขนล่าง	2	1	1	1.33
Step 9 ท่าทางของมือข้อมือ	2	1	2	1.66
Step 10 คะแนนเปิดตาราง B	8	3	4	5
Step 11 พิจารณาการจับยึดวัตถุ	2	0	0	0.66
Step 12 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	10	3	4	5.66
Step 13 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ	1	1	1	1
Step 14 คะแนนเปิดตาราง C	9	4	4	5.66
Step 15 สรุปคะแนนรวม	10	5	5	6.66

เหนื่อยล้าปานกลาง และมีค่าเฉลี่ย 6.32 ซึ่งหลังปรับปรุงสถานีงาน ผลคะแนนค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน มีค่าคะแนนลดลงเหลือ 105 คะแนน แปลความหมายว่าพนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง มีผลคะแนนเฉลี่ยทุกด้าน ก็มีค่าเฉลี่ย ลดลงเหลือ 4.80 โดยพบว่าด้านพฤติกรรม มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ต่างจากก่อนปรับปรุงที่ด้านอารมณ์ มีค่าเฉลี่ยสูงสุด โดยแสดงในตารางที่ 10



ตารางที่ 10 ผลการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงานรายคน หลังปรับปรุง

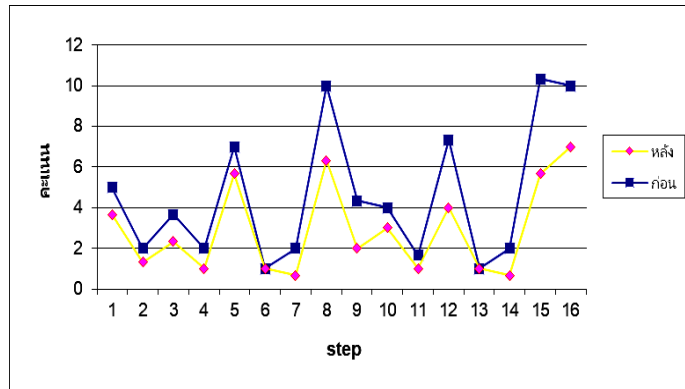
ข้อคำถาม	พนักงาน			ค่าเฉลี่ย	ค่า SD	ผลรวม
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3			
ด้านพฤติกรรม	6.16	4.5	5.33	5.33	0.83	31.99
ด้านอารมณ์	5	3.8	4.8	4.53	0.64	22.65
ด้านความรู้สึกร	5.2	3.4	5	5.53	0.98	22.65
ด้านสติปัญญา	6.16	3.83	4.16	4.71	1.26	28.31
ผลรวม 22 ข้อ	125	86	106	105	1.06	105
ผลหารด้วย 22	5.68	3.01	4.82	4.80	0.88	4.80

ส่วนที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ และผลการเปรียบเทียบความเหนื่อยล้า ก่อน-หลัง ปรับปรุงสถานการณ์งาน

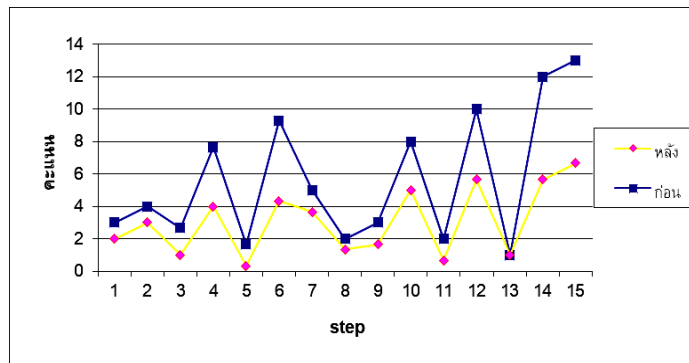
ผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA หลังปรับปรุงสถานการณ์งาน มีค่าคะแนนของแขนส่วนบนมีค่าคะแนนลดลงเหลือ 3.67 เนื่องจากโดยรวมมีการเคลื่อนไหวไปมาตำแหน่งเหนือไหล่ มีการยกหัวไหล่ลดลง ส่วนมือและข้อมือ มีการเคลื่อนไหวมีการเอียงข้อลดลง ทำให้มีค่า 2.33 ส่งผลให้ค่าคะแนนโดยรวมลดลงเหลือเท่ากับ 5.67 เมื่อมาดูค่าโดยรวม ศีรษะและคอ ที่มีการก้ม เงย และหมุนเอียงศีรษะลดลง ทำให้มีค่าลดลงเหลือ 2 ลำตัวก็มีการเคลื่อนไหวและหมุน ขาและเท้าก็ยังมึลักษณะสมดุลหรือเหมาะสม ส่งผลให้ค่าคะแนนโดยรวม มีค่าลดลงเหลือ 4 นอกจากนี้การปรับปรุงสถานการณ์งานทำให้การยกน้ำหนักของแผ่นยางที่ต้องออกแรงเข้าไปมาบอຍมีค่าลดลง ทำให้มีค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 0.67 ส่งผลให้คะแนนรวมเฉลี่ยรวม ลดลงเหลือ 5.67 ทำให้ค่าคะแนนโดยรวม มีค่าเฉลี่ย 7 ซึ่งตามการแปลความหมายถึงแม้ยังเป็น

ปัญหาที่ต้องนำข้อมูลไปพิจารณาเพื่อประกอบการปรับปรุง แต่จะเห็นได้ว่ามีค่าระดับความรุนแรงจากเดิม 10 เหลือ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง

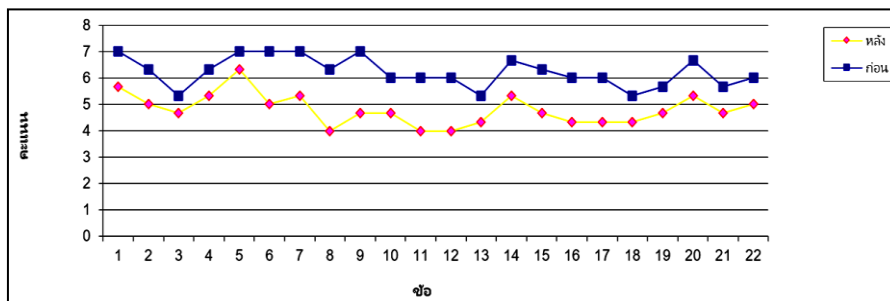
ส่วนผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA หลังการปรับปรุงสถานการณ์งาน มีค่าคะแนนลักษณะของศีรษะ/คอ ลดลงเหลือ 2 ท่าทางของลำตัวโดยรวมที่มีการโน้มตัว หมุนลำตัวก็มีค่าลดลงเหลือ 3 ท่าทางของส่วนขาสมดุลมากขึ้น ทำให้มีค่าเหลือ 1 ส่งผลให้มีค่าโดยรวม ลดลงเหลือ 4 โดยภาระงานยกน้ำหนักยางแผ่นที่ลดลงที่ค่า 0.33 ส่งผลให้คะแนนมีค่า 4.33 ส่วนท่าทางของแขนส่วนบนมีความเหมาะสมขึ้น การยกหัวไหล่ลดลง ทำให้มีค่าเฉลี่ย 3.67 ท่าทางของแขนล่าง การยก มือและข้อมือ การหมุนลดลง ทำให้มีค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 5 ส่งผลให้มีค่าลดลงเหลือ 5.67 ซึ่งทำให้มีค่าคะแนนโดยรวม มีค่า 6.67 ซึ่งตามการแปลความหมายถึงแม้ยังเป็นปัญหาทางการยศาสตร์ ควรศึกษาเพิ่มเติม แต่จะเห็นได้ว่ามีค่าระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA ก่อน-หลัง ปรับปรุง



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA ก่อน-หลัง ปรับปรุง



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลประเมินระดับความเหนื่อยล้า ก่อน-หลัง ปรับปรุง



ซึ่งผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าด้วยแบบประเมินของไปเปอร์ ก่อน-หลัง โดยก่อนการปรับปรุงสถานงาน มีผลคะแนนเฉลี่ยรวมทุกด้าน มีค่า 139 คะแนน แปลความหมายว่าพนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง โดยมีค่าเฉลี่ย 6.32 ซึ่งหลังจากการนำเสนอแนวทางการปรับปรุง มีผลคะแนนค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน มีค่า 105 คะแนน แปลความหมายว่าพนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง โดยมีผลคะแนนเฉลี่ยทุกด้าน มีค่าเฉลี่ย 4.80 จากผลการแปลความหมายถึงแม้ว่าพนักงานยังมีระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง แต่จะเห็นว่า มีค่าคะแนนลดลง เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลเป็นรายบุคคลของสถานงานลำเลียงยางแผ่นพบว่าพนักงานทั้ง 3 คน มีค่าคะแนนลดลง โดยพนักงานคนที่ 3 มีค่าคะแนนลดลงสูงสุด

5. สรุปผล

จากผลการศึกษาปัญหาสุขภาพ การยศาสตร์และความเหนื่อยล้าของตัวอย่างพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน ปัญหาสุขภาพ พบค่าดัชนีความผิดปกติ (AI) มีค่าที่ต้องเอาใจใส่และระมัดระวัง และเป็นค่าที่รับไม่ได้ให้แก่ไขทันทันที ผลการศึกษาระงานต่อกล่ามนี้พบว่ายังมีความเสี่ยงต่อสุขภาพสูง ผลการศึกษาความเสี่ยงทางการยศาสตร์ จากการประเมินด้วยวิธี RULA มีค่าเฉลี่ย 10 ซึ่งสอดคล้องกับการประเมินด้วยวิธี REBA มีค่าเฉลี่ย 13 ตามความหมายคือมีปัญหาทางการยศาสตร์ที่ต้องได้รับการปรับปรุง ส่วนความเหนื่อยล้า มีคะแนนเฉลี่ยรวมทุกด้าน 139 คะแนน มีค่าเฉลี่ย 6.32 ความหมายว่าพนักงานมีระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง โดยผลการนำเสนอแนวทางปรับปรุงสถานงานของพนักงานโดยการออกแบบอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นจากผลการเปรียบเทียบก่อน-หลังปรับปรุง พบว่าการ

ประเมินด้วยวิธี RULA จากเดิม มีค่าเฉลี่ย 10 ลดเหลือ 7 สอดคล้องกับผลการประเมินด้วยวิธี REBA จากเดิม มีค่าเฉลี่ย 13 ลดเหลือ 6.67 ซึ่งหมายถึงงานนั้นยังมีปัญหาที่ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมและปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าวต่อไป ส่วนผลการศึกษาความเหนื่อยล้าก่อน-หลัง การปรับปรุง จากเดิม ค่าเฉลี่ย 6.32 ลดเหลือ 4.80 โดยผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าพบว่า มีค่าระดับคะแนนลดลง

6. อภิปรายผล

ผลของการประเมินทางด้านกายศาสตร์หรือด้านปัจจัยมนุษย์เป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยในการวางแผนออกแบบงาน ขั้นตอนการทำงาน เครื่องมือ สถานงาน และสิ่งแวดล้อมในการทำงาน เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาด อุบัติเหตุจากการทำงานได้ จากการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วยวิธี RULA และ REBA รวมถึงการประเมินความเหนื่อยล้า ก่อน-หลัง การปรับปรุงสถานงาน โดยผลการเปรียบเทียบการประเมินจากวิธีการเดิมและวิธีการใหม่ที่ปรับปรุง มีคะแนนเฉลี่ยลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกัน จากการประยุกต์ใช้หลักการยศาสตร์ในการออกแบบปรับปรุงงาน ตามที่ Black [12] ได้กล่าวถึงการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าว่าในที่คนงานต้องใช้แรงกายและความเหนื่อยยาก การออกแบบทางการยศาสตร์ของสถานงานมีผลกระทบที่สำคัญต่อการปฏิบัติงานของคนงานและประสิทธิภาพในการผลิต โดยในการศึกษารั้งนี้จะเห็นได้ว่าถ้าความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลงจะส่งผลให้ความเหนื่อยล้าของพนักงานลดลงด้วย ซึ่งเป็นไปตามแนวคิด Likert [13] ที่ได้เสนอการเอาใจใส่ต่อพนักงาน คือการที่องค์กรดูแลเอาใจใส่ในความเป็นอยู่ของแต่ละบุคคล เช่น พยายามปรับปรุงสภาพการทำงานให้ดีมีความ



คล่องตัว จากผลการศึกษาระบบการปรับปรุงสถานีนงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อลดความเหนื่อยล้าในการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันได้ผลการวิจัยที่เปรียบเทียบให้เห็นได้ชัดเจนว่าปัญหาการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าในการทำงานมีความสัมพันธ์กันและพบว่าการปรับปรุงสถานีนงานจากการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์สามารถลดปัญหาการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าได้

จากผลการศึกษานำข้อมูลไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงงานได้ เช่น พนักงานในโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน นายจ้าง/สถานประกอบการ หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง เช่น สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน การยางแห่งประเทศไทย สมาคมส่งเสริมความปลอดภัยและอนามัยในการทำงาน สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร เป็นต้น

7. ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นเพิ่มเติมเพื่อการพัฒนาเป็นการใช้สายพานลำเลียงเข้าสู่ระบบการจับเก็บที่ดีซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้น
2. ควรศึกษาการปรับปรุงสถานีนงานของโรงงานภาคเอกชนที่มีเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากในปัจจุบัน นอกเหนือโรงงานของสหกรณ์กองทุนสวนยาง
3. ควรศึกษาการปรับปรุงสถานีนงานของพนักงานทุกสถานที่ที่มีผลการศึกษาข้อมูลดัชนีความผิดปกติ
4. ควรศึกษาเชิงเปรียบเทียบการปรับปรุงสถานีนงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันกับประเทศอินโดนีเซีย จีน มาเลเซีย เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันตัวอย่างในการทดลอง ผู้เชี่ยวชาญและผู้ชำนาญการทุกท่านในกระบวนการสร้างเครื่องมือ การประเมินชิ้นงานสำหรับการทดลอง

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] V.G. Duffy, The impact of organizational ergonomics on work effectiveness, *Ergonomics*, 1999, 42, 614-637.
- [2] K.Sutida, Indication and ergonomics task analysis for work condition improvement, Security Development Department, Institute for Occupational Safety Development, 2011. (in Thai)
- [3] J. Yupaporn, C. Chawapornpan, and T. Wanpen, Health status and health preventive behaviors among rubber plantation workers, *The Journal Public Health*, 2007, 3(1), 1-10. (in Thai)
- [4] A. Prapatsorn, S. Weeraporn, and L. Waraporn, Occupational health hazards and health status related to risk among workers in a smoked rubber sheet plan, *Nursing Journal*, 2012. 39(3), 27-37. (in Thai).
- [5] Muscle aches due to work and improvement of working conditions, Thailand Institute of Occupational Safety Department of Labor Protection and Welfare, 2008. (in Thai)



- [6] L. McAtamney and E.N. Corlett, RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *The Journal Applied Ergonomics*, 1993, 24(2), 91-99.
- [7] S. Hignett and L. McAtamney, Rapid Entire Body Assessment (REBA), *The Journal Applied Ergonomics*, 2000, 31(2), 201-205.
- [8] V. Carrieri-Kohlman, A.M. Lindsey, C.M. West, *Pathophysiological phenomena in nursing: Human responses to illness*, 2nd ed., WB Saunders, PA, USA, 1993, 279-302.
- [9] M. Weerachai, H. Rungsima, S. Mukda, and S. Angoon, The health problem and workload on muscles of worker's in smoked rubber sheets processing, *Thai Research Higher Education Institution Network Thailand International Conference, Proceeding*, 2021, 337-343.
- [10] S.T. Pheasant, *Antropometry, ergonomics and design*, Taylor Francis, London, UK, 1988.
- [11] M. Weerachai, H. Rungsima, and S. Angoon, Anthropometry for work station improvement design of worker's in smoked rubber sheets processing, *Research NCAME Thailand International Conference, Proceeding*, 2023, 76.
- [12] J.T. Black, *Design and implementation of lean manufacturing systems and cells*, In: S.A. Lrani, (Ed.), *Handbook of cellular manufacturing system*, Wiley & Sons, NY, USA, 1999, 453-496.
- [13] R. Likert, *The Human organization: Its management and value*, McGraw- Hill, NY, USA, 1976.

การระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ปพน งามประเสริฐ^{1*} ณัฏพล เรืองทรัพย์² และ หนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันโคเซ็น, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: papon@ieee.org, nattachote.r@mutp.ac.th

วันที่รับบทความ: 19 กรกฎาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 2 สิงหาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 7 สิงหาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอการระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า วัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวแบ่งออกเป็นสามชนิด ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม และพลังงานน้ำ การระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวใช้อัลกอริทึมการค้นหาตามระบบที่ทำการศึกษาคือ ระบบจำหน่ายของ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 ระบบจำหน่ายประกอบด้วยสายบัส 4 สาย และจุดโหลด 22 จุด ระดับโหลดสูงสุดของบัส 2 คือ 20 MW ดัชนีความน่าเชื่อถือที่ใช้พิจารณา มี 8 ตัวแปร คือ SAIFI SAIDI CAIDI ASAI ASUI ENS AENS และ ECOST ผลลัพธ์พบว่าตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว; ความน่าเชื่อถือ; ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Identifying the Optimal Location and Capacity of Distributed Generation for Improving Reliability in Distribution System

Papon Ngamprasert^{1*}, Natchapol Ruangsap² and Nattachote Rugthaicharoencheep²

¹ Department of Electrical and Electronic Engineering, Kosen Institute, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

* Corresponding author, E-mail: papon@ieee.org, nattachote.r@rmutp.ac.th

Received: 19 July 2023; Revised 2 August 2024; Accepted: 7 August 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: This paper presents identifying the optimal location and capacity of distributed generation for improving reliability in distribution system. The objective functions to improve reliability in the distribution system with distributed generators. The distributed generators considered are divided into three types viz photovoltaic, wind turbines, and hydropower. The technique identifies the location and capacity of distributed generation by the Tabu search algorithm. The system for the case study is the Roy Billinton Test System (RBTS) bus 2. The distribution system consists of 4 feed lines and 22 load points. The maximum load level of bus 2 is 20 MW. The reliability indices considered include eight variables: SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS, AENS, and ECOST. The results found that the optimal placement of distributed generators can increase the reliability of the distribution system.

Keywords: Distributed Generation; Reliability; Distribution System



1. บทนำ

การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหรือที่เรียกกันทั่วไปว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation: DG) ถูกใช้เพื่อติดตั้งในตำแหน่งปลายสายส่งกำลังไฟฟ้าหรือปลายระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นเครื่องสร้างกำลังไฟฟ้าแบบแอคทีฟหรือกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ขนาดเล็กที่ตั้งอยู่ใกล้กับสถานที่ที่จะใช้งาน ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เช่น แสงอาทิตย์ ลม พลังงานน้ำ ไฮโดรเจน ไบโอบีโกลี เป็นต้น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบ ตัวอย่างทั่วไปของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว คือ การสำรองพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเครื่องจะทำงานในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟหลักหยุดชะงัก การปล่อยพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเมื่อความจุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว สูงกว่าโหลดในเครื่อง ตัวอย่าง เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ซึ่งเจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะถูกเรียกเก็บเฉพาะส่วนต่างระหว่างพลังงานที่ระบายออกจากระบบจ่ายไฟฟ้าและปริมาณที่จ่ายเข้าไปในระบบ [1-3]

ในปี พ.ศ. 2552 N. Rugthaicharoencheep และ S. Sirisumrannukul ศึกษาการกำหนดค่าสายบ่อนใหม่ให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยใช้เทคนิคการค้นหาตาม ทดสอบในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์พบว่าสามารถลดการสูญเสียพลังงานและต้นทุน

การผลิตของระบบจำหน่ายไฟฟ้า [4] ในปี พ.ศ. 2552 N. Rugthaicharoencheep และ S. Sirisumrannukul ศึกษาการกำหนดค่าสายบ่อนที่เหมาะสมที่สุดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยเทคนิคการค้นหาแบบหลายวัตถุประสงค์แบบคลุมเครือและการค้นหาแบบตาม ทดสอบในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ผลการทดสอบสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้า [5] ในปี พ.ศ. 2554 O. Ausavanop และ S. Chaitusaney ศึกษาวิธีการประสานงานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวและเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบโดยใช้การค้นหาตาม ทดสอบในระบบจำหน่าย IEEE 34 บัส ผลการทดสอบสามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบ [6]

การค้นหาคำตอบในรูปของตำแหน่ง และขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวใช้การค้นหาตาม (Tabu Search) คำตอบที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เพื่อประเมินคุณภาพของคำตอบ และทำซ้ำจนกว่าจะพบคำตอบที่ดีที่สุด ในบทความวิจัยนี้ทดสอบในระบบจำหน่ายของ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 การวิเคราะห์ต้นทุนของการหยุดทำงาน (Outage) ของผู้ใช้ไฟฟ้าคำนวณจากดัชนีความน่าเชื่อถือของจุดโหลดในระบบ [7]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำรองเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า กล่าวคือจุดโหลดบางจุดสามารถจ่ายไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว



ดังนั้นความสูญเสียที่เกิดจากไฟฟ้าดับจึงลดลง ประสิทธิภาพของการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบ จำหน่ายไฟฟ้าขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และขนาดของเครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นบทความนี้จึงเสนอ การระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องก่อก่อเกิดไฟฟ้าแบบ กระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 ความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ดัชนีความน่าเชื่อถือของระบบการกระจายพื้นฐาน ที่จุดโหลด คือ อัตราความล้มเหลวโดยเฉลี่ย λ ด้วย ดัชนีจุดโหลดพื้นฐานทั้งสามนี้ ดัชนีความน่าเชื่อถือ ของระบบต่อไปนี้จะสามารถคำนวณได้ [10]

ดัชนีความถี่การขัดจังหวะโดยเฉลี่ย (SAIFI)

$$SAIFI = \sum \frac{\lambda_i N_i}{N_i} \quad (1)$$

ดัชนีระยะเวลาหยุดชะงักโดยเฉลี่ยของระบบ (SAIDI)

$$SAIDI = \sum \frac{U_i N_i}{N_i} \quad (2)$$

ดัชนีระยะเวลาหยุดชะงักโดยเฉลี่ยของลูกค้า (CAIDI)

$$CAIDI = \sum \frac{U_i N_i}{\lambda_i N_i} \quad (3)$$

ดัชนีความพร้อมในการให้บริการเฉลี่ย (ASAI)

$$ASAI = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad (4)$$

ดัชนีความพร้อมใช้งานเฉลี่ยของบริการ (ASUI)

$$ASUI = 1 - ASAI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad (5)$$

ดัชนีพลังงานที่ไม่ได้จ่าย (ENS)

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i \quad (6)$$

ดัชนีพลังงานที่ไม่ได้จัดหาโดยเฉลี่ย (AENS)

$$AENS = \frac{\sum L_{a(i)} U_i}{\sum N_i} \quad (7)$$

โดยที่

N_i คือ จำนวนจุดโหลดทั้งหมด i

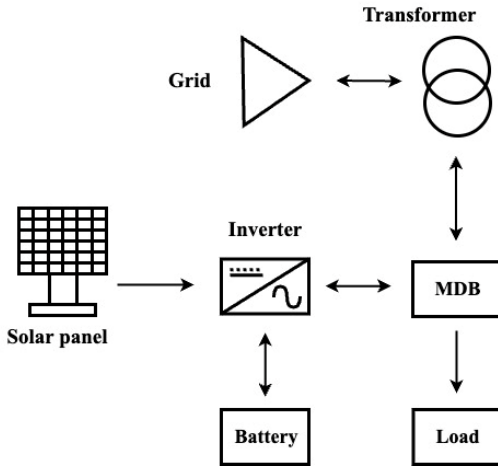
U_i คือ ระยะเวลาการหยุดทำงานประจำปี

$L_{a(i)}$ คือ อัตราความล้มเหลวของเหตุการณ์ฉุกเฉิน

วิธีการวัดมูลค่าความน่าเชื่อถือของบริการไฟฟ้า คือ การประมาณค่าการหยุดชะงักของผู้ใช้ไฟ เนื่องจากเหตุขัดข้องของการจ่ายไฟฟ้า ต้นทุนของ การเหตุขัดข้องของผู้ใช้ไฟของฟังก์ชันความเสียหาย ของลูกค้า ต้นทุนการหยุดทำงานของลูกค้าคำนวณ จากดัชนีความน่าเชื่อถือของจุดโหลดและฟังก์ชัน ความเสียหายของผู้ใช้ไฟ [11-12]

2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ [13-15] เป็นวิธีการผลิตไฟฟ้า โดยตรง ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ไฟฟ้าดับในเขตเมือง ขนาดใหญ่เกิดจากโหลดเกินของสายส่งซึ่งเชื่อมต่อ เครื่องข่ายตั้งแต่หนึ่งเครื่องข่ายขึ้นไปกับเครือข่ายการส่ง สัญญาณ แผนผังของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

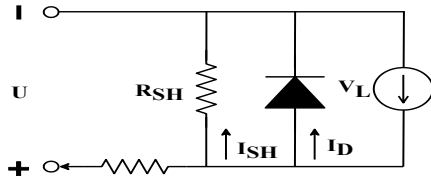
จากรูปที่ 1 หากระบบไม่มีพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานจากแบตเตอรี่ที่สำรองพลังงานไว้ในช่วงที่ความต้องการพลังงานเหลือในช่วงเวลาที่มีแสงจะชดเชยพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของระบบ แบบจำลองสมมูลของโซลาร์เซลล์โดยวงจรไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2 [16]

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต U_o และกระแสโหลดสามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้ [16]

$$I = I_L - I_o = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{U_o + R I_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

จากสมการที่ 8

- I คือ กระแสโหลด
- I_L คือ กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์
- I_o คือ กระแสอิ่มตัว
- U_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก
- R_s คือ ความต้านทานอนุกรม
- α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2 แบบจำลองสมมูลของโซลาร์เซลล์โดยวงจรไดโอด

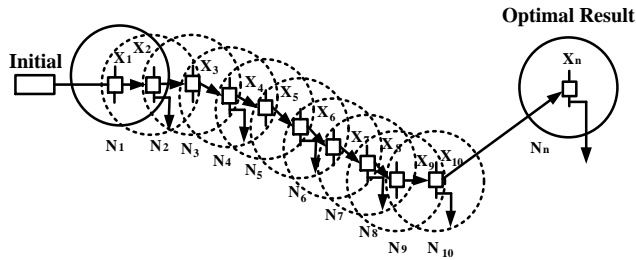
2.3 การค้นหาแบบตามู

การค้นหาแบบตามูเป็นเมตาฮิวริสติกเฉพาะที่เพื่อสำรวจพื้นที่คำตอบนอกเหนือจากการปรับให้เหมาะสมเฉพาะจุด [17] แนวคิดพื้นฐานของการค้นหา คือ การย้ายคำตอบปัจจุบันไปยังพื้นที่ใกล้เคียงโดยใช้หน่วยความจำเพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด หน่วยความจำนี้เรียกว่า “ตามู ลิส” ซึ่งเก็บคุณลักษณะของคำตอบในกระบวนการค้นหา คำตอบที่อยู่ในรายการตามู ไม่สามารถเป็นตัวเลือกของการทำซ้ำครั้งถัดไปได้ เป็นผลให้ช่วยยับยั้งการเลือกคำตอบเดียวกันหลายครั้งและหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในวงจรรอบคำตอบ

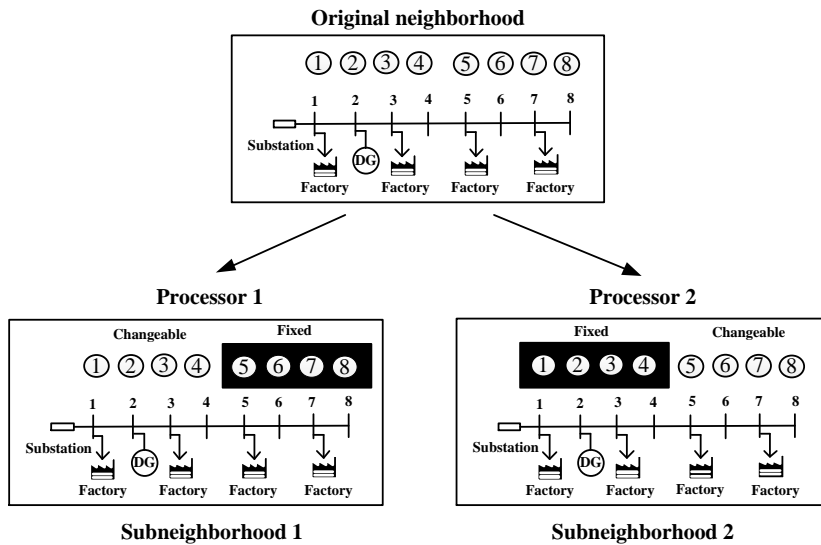
คุณภาพของพื้นที่คำตอบการย้ายเข้าได้รับการประเมินโดยเกณฑ์ในการแทนที่รายการตามูซึ่งคล้ายคลึงกับฟังก์ชันความเหมาะสมของอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ทิศทางการค้นหาของการค้นหาตามู ดังแสดงในรูปที่ 3

กระบวนการค้นหาไปยังคำตอบที่ดีที่สุดในระดับใกล้เคียง แม้ว่าคุณภาพจะแย่กว่าคำตอบเดิมกลยุทธ์นี้ช่วยให้หลีกเลี่ยงจากการเพิ่มประสิทธิภาพในพื้นที่ และสำรวจพื้นที่การค้นหาได้กว้างขึ้น

การเคลื่อนไหวที่อยู่ในรายการตามู จะได้รับการยอมรับก็ต่อเมื่อมีระดับที่ดีกว่าระดับขั้นต่ำจนถึงตอนนี้แนวคิดหลักของทิศทางการค้นหาในการค้นหาตามู ดังแสดงในรูปที่ 4 [18]



รูปที่ 3 ทิศทางการค้นหาของการค้นหาตาม



รูปที่ 4 ทิศทางการค้นหาของการค้นหาตาม

2.4 การกำหนดปัญหา

วัตถุประสงค์คือเพื่อลดต้นทุนการหยุดทำงานของลูกค้าให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้:

$$\text{Minimize } ECOST = \sum_{h=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_i} (L_{a(i)} C_{hi} r_h \lambda_h) \quad (9)$$

โดยที่

$L_{a(i)}$ คือ โหลดเฉลี่ยที่เชื่อมต่อกับจุดโหลด i

C_{hi} คือ ค่าไฟดับ (\$/kW) ของผู้ใช้ไฟเนื่องจากเหตุฉุกเฉิน h

l_h คือ อัตราความล้มเหลวของเหตุการณ์ฉุกเฉิน h

r_h คือ เวลาหยุดทำงานเฉลี่ยของเหตุการณ์ฉุกเฉิน h

n_h คือ จำนวนของภาวะฉุกเฉิน h

n_i คือ จำนวนจุดโหลดทั้งหมด i



การวนซ้ำสูงสุดสำหรับการค้นหาตาม คือ 100 รอบ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดสำหรับแต่ละบัส คือ 0.95 p.u. และ 1.05 p.u. ตามลำดับ

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

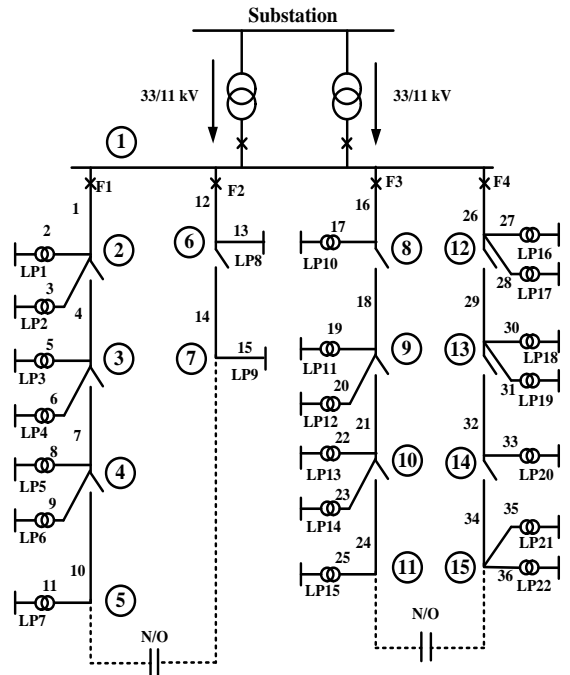
อัลกอริทึมการค้นหาตาม ที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบกับระบบจำหน่าย RBTS บัส 2 [19] เพื่อลดต้นทุนการหยุดทำงานของลูกค้า มีสายป้อน 4 สายและจุดโหลด 22 จุด ระดับโหลดสูงสุดของบัส 2 คือ 20 MW การกำหนดค่าของระบบแสดงในรูปที่ 5 ขนาดของ DGs แต่ละเครื่อง คือ 100 kW - 1,500 kW ความล้มเหลวของหม้อแปลงสามารถกู้คืนได้โดยการซ่อมแซม อุปกรณ์ป้องกันและ DG ทั้งหมดจะถือว่าเชื่อถือได้อย่างสมบูรณ์มีการตรวจสอบห้ากรณีในตารางที่ 1 ประเภท DG สำหรับการทดสอบ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์: PV, กังหันลม: WT และพลังงานน้ำ: HP

กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ ดังแสดงในตารางที่ 1 การจัดวางและขนาดของ DGs ที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2

ผลลัพธ์เปรียบเทียบ SAIFI SAIDI CAIDI ASAI และ AENS ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลลัพธ์เปรียบเทียบ ENS และ ECOST ดังแสดงในรูปที่ 7

จากรูปที่ 6 SAIDI สูงสุดที่ กรณีที่ 1 (3.732) และต่ำสุดที่ กรณีที่ 4 และ 5 (3.722) CAIDI สูงสุดที่ กรณีที่ 1 (15.036) และต่ำสุดที่ กรณีที่ 5 (14.995) ANES สูงสุดที่ กรณีที่ 1 (21.37) และต่ำสุดที่ กรณีที่ 5 (20.42)

จากรูปที่ 7 ENS สูงสุดที่ กรณีที่ 1 (40,775) และต่ำสุดที่ กรณีที่ 5 (38,965 kWh/year) ECOST สูงสุดที่ กรณีที่ 1 (49,922 \$/year) และต่ำสุดที่ กรณีที่ 5 (40,735 \$/year)



รูปที่ 5 ระบบจำหน่ายของ RBTS บัส 2

ตารางที่ 1 กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ

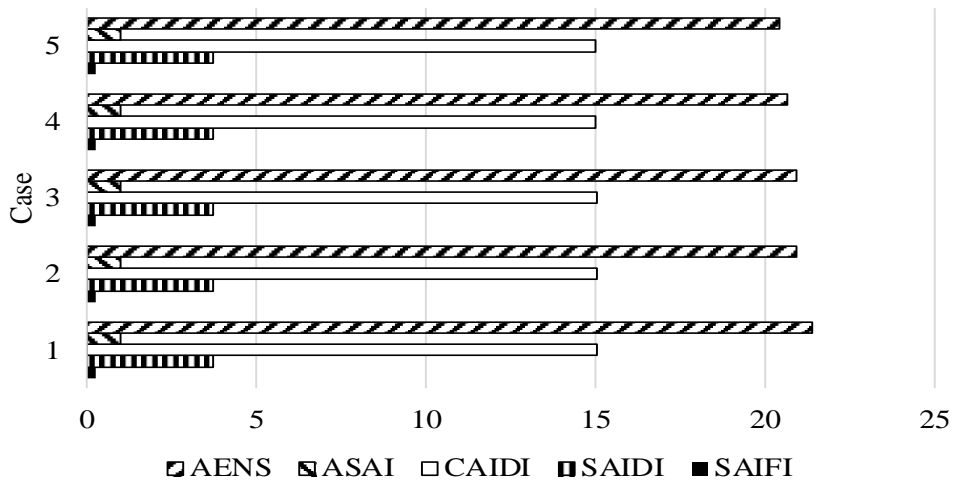
กรณี	ชนิด	จำนวน DG สูงสุด (เครื่อง)	ความจุทั้งหมด (kW)
1	-	-	-
2	เซลล์แสงอาทิตย์	2	≤ 2000
3	กังหันลม	3	≤ 3000
4	พลังงานน้ำ	4	≤ 4000
5	เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม พลังงานน้ำ	5	≤ 5000

ตารางที่ 2 การจัดวางและขนาดของ DG_s ที่เหมาะสมที่สุด

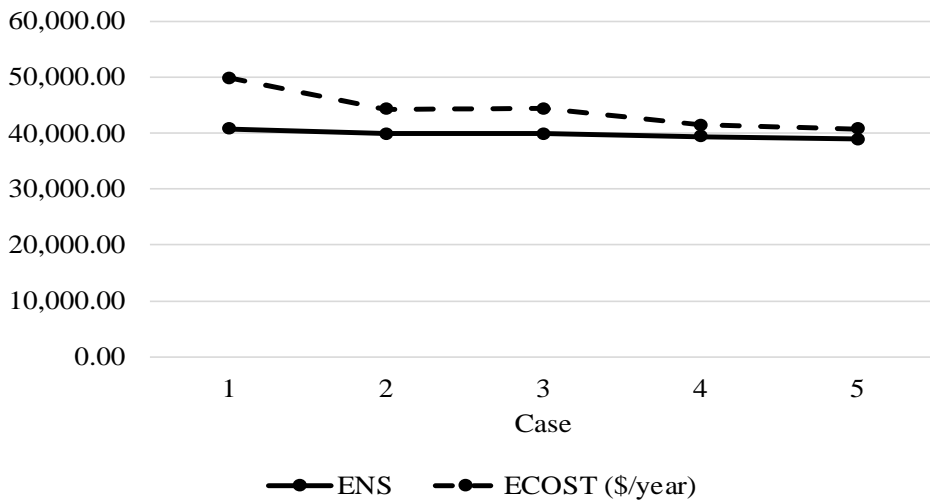
กรณี	ตำแหน่งของ DG (บัส)	ความจุของ DG (kW)	ความจุทั้งหมดของ DG (kW)
1	-	-	-
2	5, 15	600, 1200	1800
3	9, 11, 15	200, 600, 1200	2000
4	5, 11, 14, 15	600, 600, 400, 1200	2800
5	5, 7, 10, 11, 15	600, 1200, 600, 1000, 1200	4600

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาดัชนีความน่าเชื่อถือ

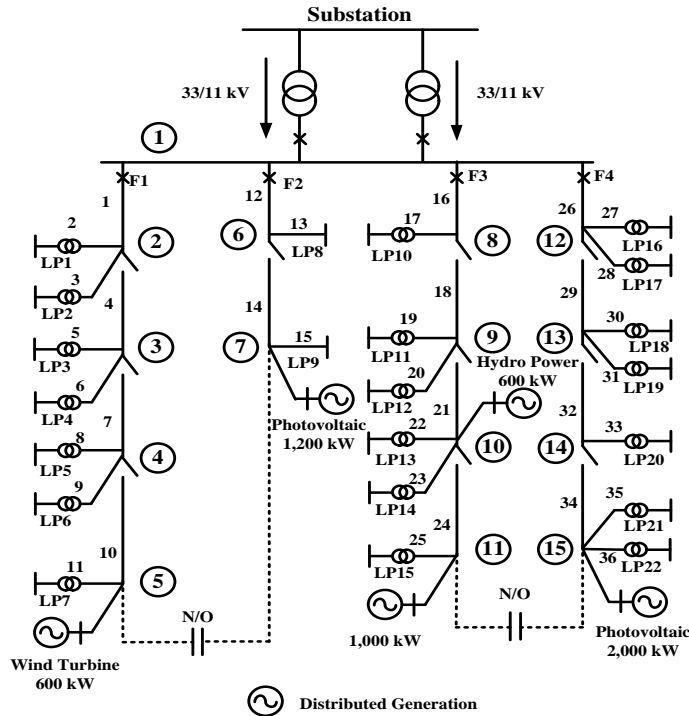
ดัชนีความน่าเชื่อถือ	กรณี				
	1	2	3	4	5
SAIFI (interruptions/customer)	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248
SAIDI (hours/customer)	3.732	3.725	3.725	3.722	3.722
CAIDI (hours/customer interruption)	15.036	15.009	15.010	14.997	14.995
ASAI	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
ASUI	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
ENS (kWh/year)	40,775	39,899	39,911	39,417	38,965
AENS (kWh/customer/year)	21.37	20.91	20.91	20.65	20.42
ECOST (\$/year)	49,922	44,290	44,395	41,459	40,735



รูปที่ 6 ผลลัพธ์เปรียบเทียบ SAIFI SAIDI CAIDI ASAI และ AENS



รูปที่ 7 ผลลัพธ์เปรียบเทียบ ENS และ ECOST



รูปที่ 8 ระบบการกระจายของบัส RBTS 2 พร้อมการสร้างแบบกระจายสำหรับกรณี 5

จากรูปที่ 8 กรณีที่ 5 ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 600, 1,200 และ 2,000 kW ที่บัส 5, 7 และ 15 ตามลำดับ ติดตั้งกังหันลมขนาด 1,000 kW ที่บัส 11 และ ติดตั้งพลังงานน้ำขนาด 600 kW ที่บัส 10

4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตามสำหรับการจัดวางที่เหมาะสมที่สุดของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า กรณีศึกษาของระบบจำหน่าย RBTS บัส 2 ผลลัพธ์จากกรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถลดค่าเฉลี่ยระยะเวลาในการเกิดไฟดับของผู้ใช้ไฟแต่ละรายในระบบ (SAIDI) ลดลง 0.01 ชั่วโมง/

ลูกค้า ในกรณีที่ 4 และ 5 ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งการเกิดไฟดับของผู้ใช้ไฟในระบบ (CAIDI) ลดลง 0.041 ชั่วโมง/การหยุดชะงักของลูกค้า ในกรณีที่ 5 ความเสียหายเนื่องจากไฟดับจากการขัดข้องของสายส่งไฟฟ้า (ECOST) ลดลง 9,187 ดอลลาร์/ปี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย และ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนสำเร็จเรียบร้อย



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Mourad and B. Mohamed, Impact of increased distributed photovoltaic generation on radial distribution networks, International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Proceeding, 2016, 292-295.
- [2] Y. Qi, F. Wang and D. Wang, Reliability analysis of distribution system with DG considering operation homogeneity, China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Proceeding, 2016, 1-5.
- [3] P. Wang and W. Li, Reliability evaluation of distribution systems considering optimal restoration sequence and variable restoration times, IET Generation, Transmission and Distribution, 2007, 1(4), 688-695.
- [4] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, Feeder reconfiguration with dispatchable distributed generators in distribution system by Tabu search, 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Proceeding, 2009, 1-5.
- [5] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, Optimal feeder reconfiguration with distributed generators in distribution system by fuzzy multiobjective and Tabu search, 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Proceeding, 2009, 1-7.
- [6] O. Ausavanop and S. Chaitusaney, Coordination of dispatchable distributed generation and voltage control devices for improving voltage profile by Tabu Search, The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011, Proceeding, 2011, 869-872.
- [7] D. Lindenmeyer, H.W. Dommel and M.M. Adibi, Power system restoration — a bibliographical survey, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(3), 219-227.
- [8] D.T. Wang, L.F. Ochoa and G.P. Harrison, DG impact on investment deferral: Network planning and security of supply, IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2), 1134-1141.
- [9] J. Zhang, H. Cheng and C. Wang, Technical and economic impacts of active management on distribution network, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2009, 31(2-3), 130–138.
- [10] R. Billinton and R.N. Allan, Reliability evaluation of power systems, 1st Ed., Pitman Advanced Publishing Program, Great Britain, UK, 1984.



- [11] L. Goel and R. Billinton, Procedure for evaluating interrupted energy assessment rates in an overall electric power system, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6(4), 1398-1403.
- [12] L. Goel and R. Billinton, Basic data and evaluation of distribution system reliability worth, *Computer, Power and Communication Systems in a Rural Environment, Proceeding*, 1991, 271-277.
- [13] P. Ngamprasert, N. Rugthaicharoencheep and S. Woothipatanapan, Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System, 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), *Proceeding*, 2019, 98-101.
- [14] P. Ngamprasert, P. Wannakarn and N. Rugthaicharoencheep, Enhance Power Loss in Distribution System Synergy Photovoltaic Power Plant, 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), *Proceeding*, 2020, 173-176.
- [15] P. Ngamprasert, S. Woothipatanapan, P. Wannakarn and N. Rugthaicharoencheep, Improvement for voltage sag with photovoltaic performance on distribution system, *IEET - International Electrical Engineering Transactions*, 2020, 6(1), 28-33. (in Thai)
- [16] O.Z. Nezhad, S.A.H. Zadeh, M. Mohammadian and A.A. Gharaveisi, The analysis of hybrid system as dg in smart grids by the use of loss sensitivity coefficient method, *Smart Grid Conference (SGC), Proceeding*, 2013, 246-251.
- [17] F. Glover, Tabu search-part I, *ORSA Journal on Computing*, 1989, 1(3), 190-206.
- [18] M. Hiroyuki and O. Yoshihiro, Parallel Tabu search for capacitor placement in radial distribution system, *Power Engineering Society Winter Meeting, Proceeding*, 2000, 4, 2334-2339.
- [19] Y. J. Jeon and J. C. Kim, Application of simulated annealing and Tabu search for loss minimization in distribution systems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2004, 26(1), 9-18.

การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนกำลังแบบอินดักทีฟที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่ด้วยการควบคุมความถี่ร่วมกับการปรับตัวชดเชย โซ่ชั้ย ซีเอ็นวีฒนาประณธิ¹ และ มัฒทนา รังสิโยภาส^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: montana@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 พฤษภาคม 2024; วันที่ทบทวนบทความ: 10 กรกฎาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 8 สิงหาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าแบบอินดักทีฟในการประจุแบตเตอรี่ช่วยทำให้เกิดความสะดวกและปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ขณะทำการประจุแบตเตอรี่กระแสหรือแรงดันของแบตเตอรี่จะแตกต่างกันออกไปตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ขณะนั้น ตัวควบคุมของระบบจะต้องสามารถรักษากระแสหรือแรงดันในขณะชาร์จให้คงที่ตามรูปแบบการชาร์จที่ถูกกำหนดมาสำหรับแบตเตอรี่แต่ละชนิด โดยทำการส่งคำสั่งที่เหมาะสมเพื่อไปควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังภายในตัวอินเวอร์เตอร์ บทความนี้นำเสนอเทคนิคในการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบอินดักทีฟด้วยการควบคุมความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ร่วมกับการปรับค่าตัวชดเชยเพื่อให้สามารถควบคุมกระแสหรือแรงดันชาร์จแบตเตอรี่ให้คงที่ในขณะที่สามารถรักษาประสิทธิภาพของระบบให้มีค่าสูงได้ ผลการทดลองที่ได้จากระบบทดสอบที่จัดทำขึ้นแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของระบบ โดยประมาณ 10 % สำหรับโหมดกระแสคงที่ และ 5% สำหรับโหมดแรงดันคงที่ เมื่อเทียบกับวิธีการที่ความถี่สวิตช์ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่

คำสำคัญ: การประจุแบตเตอรี่; กระแสคงที่; แรงดันคงที่; ระบบส่งกำลังไร้สายแบบอินดักทีฟ; การปรับปรุงประสิทธิภาพ

Efficiency Enhancement of An Inductive Power Transfer System Used for Battery Charging Through Frequency Control and Compensation Adjustment

Chokchai Chuenwattanapraniti¹ and Montana Rungsiyopas^{2*}

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

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

* Corresponding author, E-mail: montana@eng.buu.ac.th

Received: 25 May 2024; Revised 10 July 2024; Accepted: 8 August 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: Applying inductive power transfer (IPT) technologies for battery charging enhances user convenience and operational safety. While charging the battery, the current or voltage of the battery varies according to its state of charge. The system controller must be able to maintain a constant charging current or voltage according to the charging profile designated for each type of battery. This can be achieved by sending the appropriate commands to control the operation of the power switches inside the inverter. This article presents techniques for controlling an IPT system by varying the inverter's switching frequency along with adjusting compensation parameters in order to achieve constant current or voltage charging while maintaining high system efficiency. The experimental results obtained from the testing system indicate an approximate 10% improvement in system efficiency for the constant current mode (CC) and 5% for the constant voltage mode (CV), compared to a fixed switching frequency scheme.

Keywords: Battery charging; Constant current (CC); Constant voltage (CV); Inductive power transfer (IPT); Efficiency enhancement



1. บทนำ

ในปัจจุบันการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นทั้งในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม [1,2] เนื่องจากเป็นระบบที่มีความปลอดภัยสูงและสะดวกต่อการใช้งาน รูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบอินดักทีฟ (Inductive Power Transfer หรือ IPT) ใช้หลักการการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านช่องว่างอากาศระหว่างขดลวดต้านปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ โดยสามารถใช้ส่งกำลังไฟฟ้าที่มีระยะห่างในระดับมิลลิเมตร จนกระทั่งถึงหลายร้อยมิลลิเมตรได้ [3, 4]

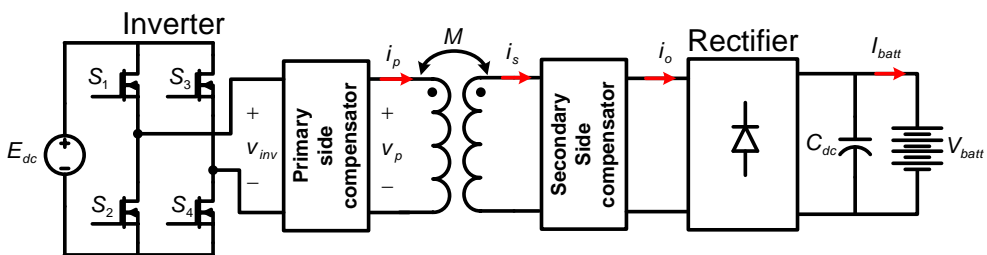
พื้นฐานระบบส่งกำลังไร้สายแบบอินดักทีฟ แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยแหล่งไฟตรง วงจรอินเวอร์เตอร์ ขดลวดต้านปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเพื่อป้องกันกับขดลวดต้านปฐมภูมิ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าให้เกิดขึ้นที่ขดลวดต้านทุติยภูมิ ซึ่งลักษณะการทำงานดังกล่าวคล้ายกับการทำงานของหม้อแปลงแต่มีความแตกต่างกันที่ระบบส่งกำลังไร้สายจะมีเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งระหว่างขดลวดทั้งสองมากกว่า โดยปกติจึงต้องมีการต่อตัวเก็บประจุชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าร์เอกทีฟเข้าไปกับขดลวดทั้งสองฝั่งในลักษณะอนุกรม (Series) หรือ

ขนาน (Parallel) ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมรรถนะและความสามารถในการส่งกำลังของวงจรให้ดีขึ้น [5-7]

การชดเชยแบบพื้นฐานมีอยู่ 4 รูปแบบ [8] คือ แบบอนุกรม-อนุกรม (SS) อนุกรม-ขนาน (SP) ขนาน-อนุกรม (PS) หรือ ขนาน-ขนาน (PP) ซึ่งพฤติกรรมด้านเอาต์พุตของระบบ(หรือวงจร) จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการชดเชยและความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดต้านปฐมภูมิ

การประยุกต์ระบบส่งกำลังแบบอินดักทีฟเพื่อนำมาใช้ในการประจุแบตเตอรี่ที่อยู่ในอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ หุ่นยนต์ขนส่งและลำเลียงสินค้าอัตโนมัติแบบไร้คนขับ (Automated Guided Vehicles) ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) จะช่วยทำให้เกิดความสะดวกสบายและความปลอดภัยในการทำงาน เนื่องจากไม่ต้องใช้สายไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและตัวอุปกรณ์ (โหลด)

โดยทั่วไปกระบวนการชาร์จประจุแบตเตอรี่จะเริ่มต้นการชาร์จด้วยโหมดการจ่ายกระแสเข้าแบตเตอรี่คงที่ (Constant Current Mode หรือ CC) หรือเรียกว่า “Bulk Charge” ทำให้แรงดันแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันที่แบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันหนึ่ง วงจรชาร์จจะเปลี่ยนเข้าสู่โหมดรักษาแรงดันคงที่ (Constant Voltage Mode หรือ CV) หรือ



รูปที่ 1 องค์ประกอบของระบบส่งกำลังไร้สายแบบอินดักทีฟสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่



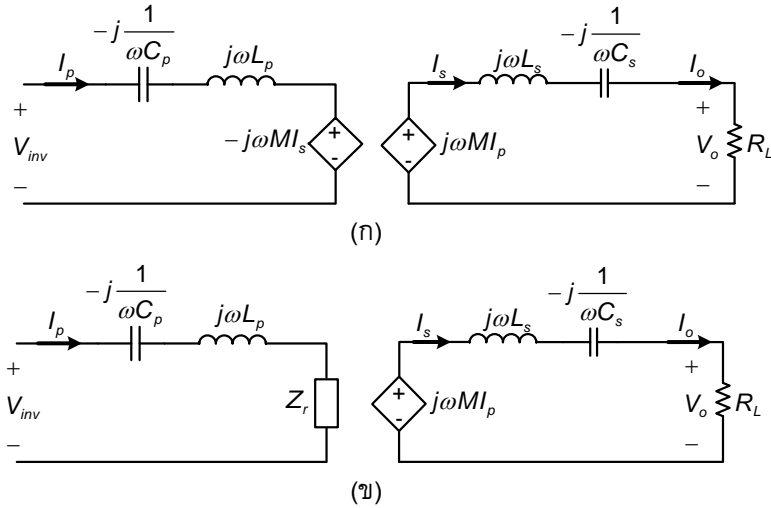
เรียกว่า “Absorption Charge” กระแสชาร์จจะค่อย ๆ ลดลง และจะสิ้นสุดการชาร์จเมื่อกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ประมาณ 0.02C) [9] ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่จะต้องสามารถควบคุมให้จ่ายกระแสและแรงดันคงที่ โดยเป็นอิสระจากโหลด (Load Independent Output) ในทางอุดมคติระบบส่งกำลังแบบไร้สายสามารถทำให้มีพฤติกรรมดังกล่าวได้โดยเลือกค่าความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดด้านปฐมภูมิอย่างเหมาะสม ในทางปฏิบัติความเป็นอิสระจากโหลดจะลดลงเมื่อความไม่เป็นอุดมคติขององค์ประกอบในวงจรเพิ่มมากขึ้น อาทิเช่นเมื่อความต้านทานของขดลวดเพิ่มมากขึ้น (มีความไม่เป็นอุดมคติ) [10] นอกจากนี้สำหรับรูปแบบการชดเชยหนึ่งที่มีความถี่ดังกล่าว เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงไปอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังของขดลวดมีค่าต่ำลง [11]

การใช้รูปแบบการชดเชย 2 รูปแบบที่แตกต่างกันตามโหมดการชาร์จที่ต้องการในขณะนั้น [12] จะช่วยให้สามารถรักษาประสิทธิภาพให้สูงได้ แต่ต้องเพิ่มจำนวนองค์ประกอบในการสวิตช์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างตัวชดเชย รวมทั้งเครือข่ายสวิตช์ที่ใช้ตัดต่อจะทำให้วงจรมีความซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ มากขึ้น บทความนี้นำเสนอการปรับความถี่ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของตัวชดเชยที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม-อนุกรม และใช้การควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feedforward) และป้อนกลับ (Feedback) เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสและแรงดันแบตเตอรี่ให้คงที่ ทั้งยังคงรักษาประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในระดับสูงได้

2. การวิเคราะห์วงจร IPT แบบอนุกรม-อนุกรม

ระบบ IPT ดังรูปที่ 1 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดเรโซแนนซ์(ขดลวดและตัวชดเชย) ซึ่งได้มาจากอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีความถี่การสวิตช์ (Switching Frequency) ในการวิเคราะห์วงจรจะใช้การประมาณให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันทั้งหมดในวงจรเป็นฟังก์ชันไซน์ชื่อยอดที่มีความถี่ฮาร์โมนิกพื้นฐาน (Fundamental Harmonic) เนื่องจากความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มักจะมีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลดเป็นผลให้โหลดมีการตอบสนองต่อฮาร์โมนิกลำดับอื่นๆ น้อยมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงสามารถแทนกระแสและแรงดันทั้งหมดด้วยเฟสเซอร์ขององค์ประกอบฮาร์โมนิกพื้นฐาน โดยกำหนดให้ขนาดของเฟสเซอร์เป็นค่ายอดของฮาร์โมนิกพื้นฐาน

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านขดลวดที่มีการคับปลิงกันทางแม่เหล็กต่ำจะต้องมีการต่อตัวเก็บประจุชดเชยทั้งสองด้านของวงจร โดยหากเลือกต่อตัวเก็บประจุชดเชยขนานกับขดลวดด้านปฐมภูมิจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter) ซึ่งจะต้องมีการเพิ่มเติมวงจรภาคข้างหน้าเพื่อควบคุมกระแสขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ทำให้เพิ่มความซับซ้อนในการควบคุมและทำให้มีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้น สำหรับการใส่ตัวเก็บประจุชดเชยด้านทุติยภูมิหากต่อกับขดลวดทุติยภูมิแบบขนานจะต้องเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ในวงจรกรองด้านไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ต่อตัวเก็บประจุชดเชยด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเป็นแบบอนุกรมทั้งสองด้านดังรูปที่ 2 (ก)



รูปที่ 2 (ก) วงจรสมมูลของ IPT ที่ชดเชยแบบ SS (ข) เมื่อแทนแหล่งจ่ายแบบไม่อิสระด้วย Z_r

จากวงจรสมมูลของ IPT ในรูปที่ 2 (ก) ซึ่งพิจารณาขดลวดเป็นอุดมคติ เนื่องจากละเลยค่าความต้านทานขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (r_p และ r_s) โดย L_p และ L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductances) ของขดลวดดำนปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ และ M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) เมื่อเลือกตัวเก็บประจุชดเชยดำนปฐมภูมิ (C_p) และกำหนดให้ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (f_{sw}) เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ดำนปฐมภูมิ (f_p) ดังสมการที่ (1)

$$f_{sw} = f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad (1)$$

จะทำให้ได้กระแสดำนทุติยภูมิ (I_s) หรือกระแสเอาต์พุต (I_o) มีค่าดังนี้

$$I_s = I_o = j \frac{V_{inv}}{\omega M} \quad (2)$$

โดย V_{inv} คือ ฮาร์มอนิกสี่มูลฐานของแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ และ $\omega = 2\pi f_{sw}$

สมการที่ (2) แสดงให้เห็นว่ากระแสขาออกสามารถควบคุมผ่านทาง V_{inv} โดยเป็นอิสระจากโหลด (Load Independent) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการชาร์จประจุแบตเตอรี่ในโหมด CC

ในการออกแบบระบบ IPT เพื่อให้ภาระ (Volt-Ampere หรือ VA) ของอินเวอร์เตอร์มีค่าต่ำสุด [5-7] ที่ความถี่ $f_{sw} = f_p$ ตามสมการที่ (1) จะต้องทำให้เกิดสภาวะที่กระแสอินพุต (I_p) มีเฟสตรงกัน กับ V_{inv} (สภาวะ Zero Phase Angle หรือ ZPA) ซึ่งหมายความว่าส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ดำนขาเข้าของวงจร (Z_{in}) จะต้องมิตค่าเท่ากับศูนย์

จากรูปที่ 2 (ก) เมื่อแทนแหล่งจ่ายแบบไม่อิสระ (Dependent Source) $-j\omega M I_s$ ที่อยู่ดำนปฐมภูมิด้วยอิมพีแดนซ์ Z_r ซึ่งสะท้อนมาจากฝั่งทุติยภูมิ (Reflected Impedance) จะได้วงจรสมมูลตามรูปที่ 2 (ข) โดย

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (3)$$



และ Z_s คือ อิมพีแดนซ์รวมด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ

$$Z_s = j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}\right) + R_L \quad (4)$$

อิมพีแดนซ์ด้านขาเข้าของวงจรจึงเท่ากับ

$$Z_{in} = Z_p + Z_r \quad (5)$$

$$\text{โดย } Z_p = j\left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p}\right)$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ $\omega = 1/\sqrt{L_p C_p}$ เงื่อนไขการเกิดสภาวะ ZPA จะเหลือเพียง

$$\text{Im}\{Z_{in}\} = \text{Im}\{Z_r\} = 0 \quad (6)$$

จากสมการที่ (3), (4) และ (6) สามารถสรุปเงื่อนไขการเกิด ZPA คือ $f_{sw} = f_s = 1/(2\pi\sqrt{L_s C_s})$ เมื่อประกอบกับเงื่อนไขการควบคุมให้วงจรทำงานในโหมด CC จะได้ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ

$$f_{sw} = f_p = f_s \quad (7)$$

เมื่อกำหนดค่าความถี่การสวิตช์ที่ต้องการสมการที่ (7) จะถูกใช้เพื่อเลือกตัวเก็บประจุชดเชยทั้งสองด้านของวงจร แต่โดยปกติจะกำหนดให้ f_{sw} มีค่าสูงกว่า f_p หรือ f_s อยู่เล็กน้อยเพื่อให้เกิดสภาวะการจ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์แบบตัวประกอบกำลังล่าช้า (Lagging Power Factor) ซึ่งจะทำให้สวิตช์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์เกิดการเริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (Zero-voltage Switching หรือ ZVS)[13] ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียที่ตัวสวิตช์กำลังลงได้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2 (ข) สามารถพิจารณาหาอัตราการแปลงแรงดันของวงจรได้ดังนี้

$$G_V(\omega) = \frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{\omega M}{\omega^2 M^2 + Z_s Z_p} R_L \quad (8)$$

$$\text{โดย } Z_p = j\left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p}\right)$$

สมการที่ (8) แสดงให้เห็นว่าอัตราการแปลงแรงดันของวงจรขึ้นกับค่าความต้านทานโหลด (Load Dependent) อย่างไรก็ตามสามารถพิจารณาหาเงื่อนไขที่อัตราการแปลงแรงดันวงจรเป็นอิสระจากโหลดได้โดยการปรับสมการที่ (8) เพื่อแยกเทอมที่เกี่ยวข้องกับ R_L ออกมา จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$G_V(\omega) = \frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{\omega M}{\frac{M^2}{R_L} \left[\left(\omega^2 - \frac{(\omega^2 - \omega_p^2)(\omega^2 - \omega_s^2)}{k^2 \omega^2} \right) \right] - jL_p \frac{(\omega^2 - \omega_p^2)}{\omega}} \quad (9)$$

โดย

$k = M/\sqrt{L_p L_s}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบ (Coefficient of Coupling)

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} \text{ และ } \omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

จากสมการที่ (9) อัตราการแปลงแรงดันของวงจรจะเป็นอิสระจากโหลดเมื่อ

$$\omega^2 - \frac{(\omega^2 - \omega_p^2)(\omega^2 - \omega_s^2)}{k^2 \omega^2} = 0 \quad (10)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (10) สำหรับกรณีนี้ที่ตัวเก็บประจุ C_s และ C_p ถูกเลือกเพื่อให้ $\omega_p = \omega_s$ ดังนั้นความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จะต้องทำให้ ω มีค่าเท่ากับ ω_1 หรือ ω_2 ดังสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ



$$\omega = \omega_1 = \omega_s \sqrt{\frac{1}{1-k}} \quad (11)$$

$$\omega = \omega_2 = \omega_s \sqrt{\frac{1}{1+k}} \quad (12)$$

จากเงื่อนไขการทำงานแบบ ZVS ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อ $\omega > \omega_s$ ดังนั้นอัตราการแปลงแรงดันของวงจรจะเป็นอิสระจากโหลดเมื่อทำงานที่ $\omega = \omega_1$ ตามสมการที่ (11)

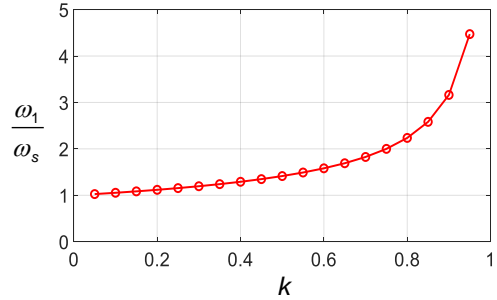
ω_1 มีค่าขึ้นอยู่กับ ω_s และ k เมื่อพิจารณาค่า ω_1 ในรูปแบบอัตราส่วน ω_1/ω_s เทียบกับกับค่า k จะมีลักษณะความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3 ซึ่งสังเกตได้ว่ากรณีที่ค่า k มีค่าน้อย อัตราส่วน ω_1/ω_s จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายความว่าความถี่ที่ทำให้วงจรมีพฤติกรรมในการคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulation) ได้ดีจะใกล้กันกับความถี่ที่ทำให้วงจรทำงานคุมค่ากระแสได้ดี (Current Regulation)

เมื่อแทน ω ในสมการที่ (9) ด้วย ω_1 (ที่ได้จากสมการที่ (11)) จะได้อัตราการแปลงแรงดันที่เป็นอิสระจากโหลดดังนี้

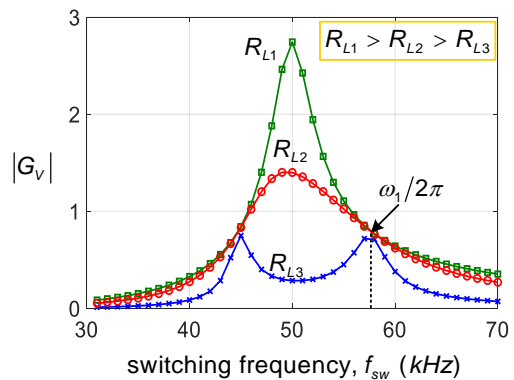
$$G_V(\omega_1) = j \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (13)$$

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างอัตราการแปลงแรงดันสำหรับกรณีที่ $L_p = L_s$ และกำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์ของขดลวดทั้งสองฝั่งมีค่าเท่ากับ 50 kHz โดยมีค่า $\omega_1 = 1.15\omega_s$ จะเห็นได้ว่าอัตราการแปลงแรงดันที่ ω_1 มีค่าเท่ากับ 1 คงที่ โดยเป็นอิสระจากโหลด

ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นที่ขดลวดทั้งสองด้านอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานของขดลวดทั้งสอง (r_p และ r_s) ดังนั้นประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังของชุดขดลวดสามารถคำนวณได้ดังนี้ (14)



รูปที่ 3 อัตราส่วน ω_1/ω_s ที่ค่า k ต่างๆ



รูปที่ 4 ลักษณะการเปลี่ยนอัตราการแปลงแรงดันกับความถี่ในอุดมคติของ IPT ที่ต่อตัวชดเชยแบบ SS

(กรณีที่ $L_p = L_s$)

$$\eta = \eta_p \eta_s \quad (10)$$

ประสิทธิภาพของขดลวดด้านปฐมภูมิ (η_p) คำนวณได้ดังนี้

$$\eta_p = \frac{\Re(Z_r)}{r_p + \Re(Z_r)} \quad (15)$$

โดย

$$\Re(Z_r) = \frac{\omega^2 k^2 L_p L_s (r_s + R_L)}{(r_s + R_L)^2 + X_s^2} \text{ คือ ส่วนจริงของ } Z_r$$

$$X_s = \omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \text{ คือ รีแอกแตนซ์รวมด้านทุติยภูมิ}$$

และ R_L คือ ความต้านทานโหลด



ประสิทธิภาพของขดลวดด้านทุติยภูมิ (η_s)
คำนวณได้ดังนี้

$$\eta_s = \frac{R_L}{r_s + R_L} \quad (16)$$

เมื่อแทนสมการที่ (15) และ (16) ลงในสมการที่
(14) จะได้

$$\eta = \frac{\omega^2 k^2 L_s L_p (r_s + R_L) \left(1 - \frac{R_s}{r_s + R_L}\right)}{R_p \left[(r_s + R_L)^2 + X_s^2 \right] + \omega^2 k^2 L_s L_p (r_s + R_L)} \quad (17)$$

กำหนดให้ ω_{opt} เป็นจุดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพ
สูงสุด ซึ่งเป็นจุดที่ค่าอนุพันธ์ (Differentiation) ของ
ฟังก์ชันตามสมการที่ (17) เทียบ ω มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\frac{d\eta}{d\omega} = 0 \quad (18)$$

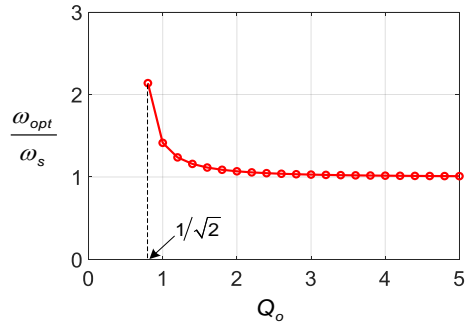
โดยการหาคำตอบของสมการที่ (18) จะได้จุดที่ทำให้
เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ตามสมการที่ (19)

$$\omega_{opt} = \frac{\omega_s}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q_o^2}}} \quad (19)$$

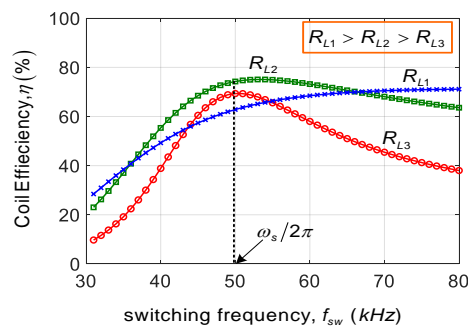
โดย

$$Q_o = \frac{1}{(r_s + R_L)} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad (20)$$

Q_o มีความสัมพันธ์ในลักษณะผกผันกับความ
ต้านทานโหลด จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ω_{opt} มีค่า
ใกล้เคียงกับ ω_s เมื่อ Q_o มีค่าสูง และจะเริ่มมีค่าห่าง
จาก ω_s เมื่อ Q_o มีค่าต่ำและเมื่อความต้านทานโหลด
มีค่าสูงจนทำให้ $Q_o < 1/\sqrt{2}$ ความถี่ที่ทำให้เกิด
ประสิทธิภาพสูงสุดตามสมการที่ (19) จะไม่สามารถ
คำนวณหาได้ ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น
เรื่อยๆ ตามความถี่ (เส้นกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 6)



รูปที่ 5 อัตราส่วน $\frac{\omega_{opt}}{\omega_s}$ ที่ค่า Q_o ต่างๆ



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพของขดลวดของระบบ IPT ที่ต่อ
ตัวขดเซยแบบ SS ที่ความถี่และโหลดค่าต่างๆ

3. วิธีการควบคุม

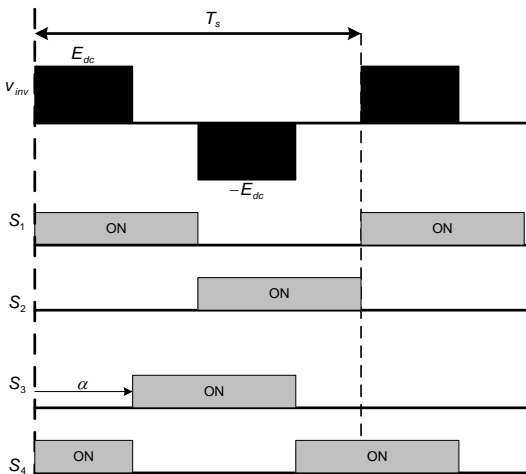
3.1 โหมดการประจุแบตเตอรี่แบบ CC

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2 เงื่อนไขที่ทำให้
พฤติกรรมด้านเอาต์พุตของวงจร IPT ที่ต่อตัวเก็บ
ประจุขดเซยแบบ SS มีการคุมค่า (Regulation)
กระแสที่ดี และวงจรทำงานในสภาวะ ZPA จะต้อง
เลือกความถี่ให้ $\omega = \omega_p = \omega_s$ ในทางอุดมคติ I_o
สามารถควบคุมได้โดยตรงผ่านการปรับเปลี่ยน
ขนาดฮาร์มอนิกสัมมูลฐานของแรงดันที่ออกจาก
อินเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (2) และกระแสชาร์จ
แบตเตอรี่ (I_{batt}) สัมพันธ์กับ $|I_o|$ ดังนี้

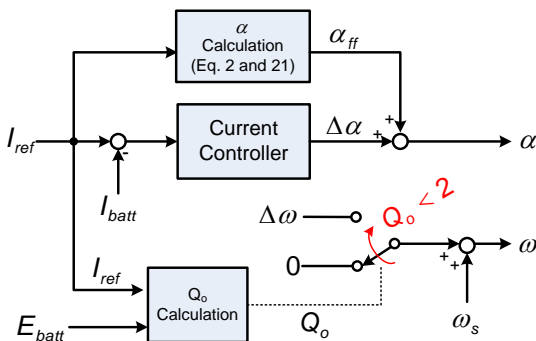
$$I_{batt} = \frac{2|I_o|}{\pi} \quad (21)$$

ขนาดฮาร์มอนิกสัมมูลฐานของ v_{inv} สามารถควบคุมได้ด้วยเทคนิคการเลื่อนมุมเฟส (α) ของพัลส์ (phase-shift) ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยคำนวณได้จาก

$$|V_{inv}| = \frac{4E_{dc}}{\pi} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (22)$$



รูปที่ 7 สัญญาณควบคุมสวิตช์และแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ (v_{inv}) ควบคุมด้วยเทคนิคเลื่อนมุมเฟส



รูปที่ 8 แผนผังการควบคุมในโหมด CC

เนื่องจากผลของความต้านทานในขดลวดปฐมภูมิ (r_p) การควบคุมกระแสโดยอาศัยการควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feedforward Control) จะไม่สามารถรักษากระแสให้คงที่ได้ จึงต้องทำการเพิ่มเติมการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อชดเชยผลของความต้านทานดังกล่าว โดยทำงานร่วมกับการควบคุมแบบไปข้างหน้าดังรูปที่ 8

สำหรับสภาวะการทำงานที่ความถี่ $\omega = \omega_s$ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของชุดขดลวดจะใกล้เคียงกับจุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อ Q_o มีค่ามากกว่า 2 ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อความต้านทานโหลดของวงจรมีค่าน้อย

สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ โหลดของวงจร IPT ประกอบไปด้วยไดโอดบริดจ์ ตัวเก็บประจุกรองแรงดันต่อขนานกับแบตเตอรี่ สามารถพิจารณาเป็นค่าความต้านทานโหลดได้ดังสมการ

$$R_L = \frac{8 E_{batt}}{\pi^2 I_{batt}} \quad (23)$$

กรณีที่กระแสชาร์จแบตเตอรี่ถูกกำหนดให้มีค่าต่ำจนทำให้ $Q_o < 2$ การกำหนดให้ $\omega > \omega_s$ เล็กน้อยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่งกำลังของชุดขดลวดให้สูงขึ้น แต่มีผลต่อการจ่าย VA ที่เพิ่มขึ้นของอินเวอร์เตอร์ให้น้อยที่สุด ซึ่งที่ความถี่ดังกล่าวส่วนควบคุมแบบป้อนกลับจะทำหน้าที่หลักในการควบคุมกระแส

3.2 โหมดการประจุแบตเตอรี่แบบ CV

เพื่อให้พฤติกรรมการด้านเอาต์พุตของวงจร IPT ที่ต่อตัวเก็บประจุชดเชยแบบ SS มีการคุมค่าแรงดันที่ดีจะต้องกำหนดให้ $\omega = \omega_1$ ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (11)



แรงดันที่แบตเตอรี่จะถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบไปข้างหน้า โดยอาศัยสมการที่ (13) และ (22) ทำให้ได้ค่า α_{ff} และใช้การควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อชดเชยความไม่เป็นอุดมคติต่างๆ ในวงจร(รูปที่ 9)

สำหรับโหมดการชาร์จแบตเตอรี่ในช่วง "Absorption Charge" เมื่อกำหนดแรงดันที่จ่ายให้แบตเตอรี่คงที่ กระแสชาร์จจะมีค่าสูงในช่วงแรกและจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาจนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อแบตเตอรี่ถูกชาร์จจนเต็ม ซึ่งเมื่อพิจารณาตามสมการที่ (23) จะหมายถึงค่าความต้านทานโหลด R_L ที่ระบบ IPT มองเห็นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา ทำให้ Q_o ที่สัมพันธ์แบบผกผันกับ R_L ลดลงตามเวลา ดังนั้นในช่วงแรกซึ่ง Q_o มีค่าสูง การทำงานที่ $\omega = \omega_1$ จะเป็นสภาวะที่ประสิทธิภาพขดลวดมีค่าต่ำ

สมการที่ (11) เกิดจากเงื่อนไขที่ตัวชดเชยถูกเลือกให้ $\omega_p = \omega_s$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการทำงานในโหมด CC แต่เงื่อนไขดังกล่าวไม่ได้จำเป็นสำหรับโหมด CV ดังนั้นหากกำหนดให้ ω_p กับ ω_s มีความแตกต่างกันเป็นสัดส่วน

$$\lambda = \frac{\omega_p}{\omega_s} \quad (24)$$

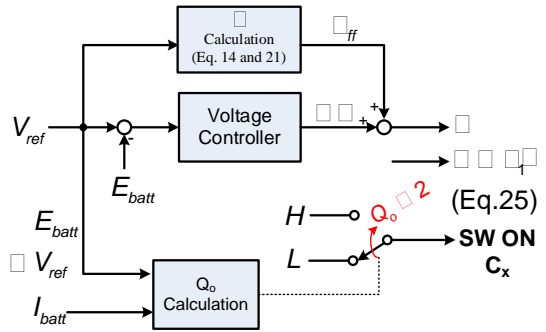
ω_1 ซึ่งเป็นจุดที่พฤติกรรมการทำงานของวงจรสามารถคุมค่าแรงดันได้ดี จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็น

$$\omega_1' = \delta_\omega \omega_s \sqrt{\frac{1}{1-k}} = \delta_\omega \omega_1 \quad (25)$$

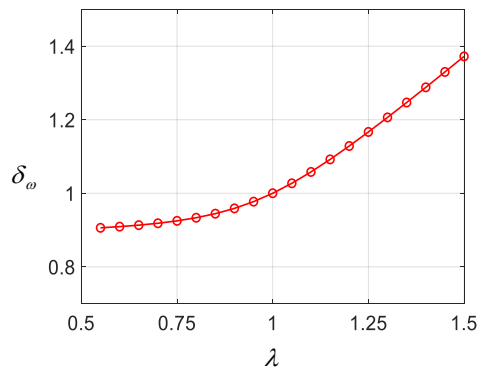
โดย

$$\delta_\omega = \sqrt{\frac{(\lambda^2 + 1) + \sqrt{\lambda^4 - 2\lambda^2(1-2k^2) + 1}}{2(1+k)}} \quad (26)$$

คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของ ω_1 ไปจากเงื่อนไขที่ $\omega_p = \omega_s$ (สมการที่ (11))



รูปที่ 9 แผนผังการควบคุมในโหมด CV



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ δ_ω

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า λ กับ δ_ω มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ω_1 สามารถปรับเปลี่ยนโดยการปรับค่า λ แนวคิดดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของขดลวดให้สูงขึ้น ในสภาวะที่กระแสชาร์จมีค่าสูง ($Q_o > 2$) จะต้องปรับค่า δ_ω (ให้น้อยกว่าหนึ่ง) โดยผ่านทาง λ เพื่อให้ ω_1' ตามสมการที่ (25) มีค่าเข้าใกล้ ω_s

การปรับค่า λ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่า ω_p ด้วยการสวิตช์ตัวเก็บประจุ C_x ขนานเข้ากับ C_p ที่มีอยู่เดิม



4. ผลการทดลอง

ระบบที่ใช้ทดสอบวิธีการควบคุม IPT ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 11 ประกอบไปด้วย อินเวอร์เตอร์แบบ H-Bridge ซึ่งใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์กำลัง วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ และชุดขดลวดส่งกำลัง โดยมีค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 1

ชุดขดลวดส่งกำลังเมื่อถูกชดเชยกำลังรีแอคทีฟโดยสมบรูณ์จะสามารถส่งกำลังได้สูงสุดเท่ากับ [14]

$$P_{\max} = \frac{(\omega M I_{p,\max})^2}{R_{L,\min}} = 104 \text{ W} \quad (27)$$

โดย

$I_{p,\max} = 3 \text{ A (rms)}$ คือ กระแสต้านปฐมภูมิสูงสุด

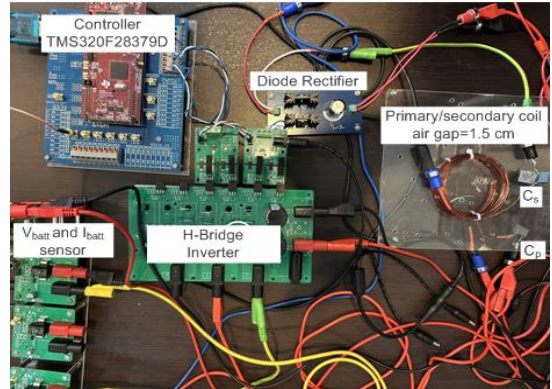
และ

$$R_{L,\min} = \frac{8 E_{\text{batt},\min}}{\pi^2 I_{\text{batt},\max}} = 4.05 \Omega \quad \text{คือ ค่าความ}$$

ต้านทานโหลดต่ำสุด

เพื่อให้ได้ $\omega_p = \omega_s \approx 49 \text{ k}/2\pi \text{ rad/sec}$ จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชดเชยแบบอนุกรมที่ต่ออยู่กับขดลวดต้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีค่าความจุ $C_p = 94 \text{ nF}$ และ $C_s = 147 \text{ nF}$ ตามลำดับ

เพื่อความสะดวกในการปรับเงื่อนไขการทดลองจะใช้โพลดิอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ ITECH รุ่น IT8512 เป็นตัวจำลองแบตเตอรี่ในสถานะต่างๆ โดยสำหรับโหมดการชาร์จประจุแบบ CC จะปรับให้อิเล็กทรอนิกส์โพลทำงานในโหมด CV ในทางตรงกันข้ามสำหรับการทดลองชาร์จประจุในโหมด CV จะกำหนดให้โพลดิอิเล็กทรอนิกส์ทำงานในโหมด CC



รูปที่ 11 ระบบ IPT ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบ IPT ที่ใช้ทดลอง

แรงดันอินพุต	$E_{dc} = 50 \text{ V}$
ขดลวดปฐมภูมิ	$L_p = 112 \mu\text{H}$ $L_s = 71 \mu\text{H}$
และ	$r_p = 1.15 \Omega$ $r_s = 0.91 \Omega$
ขดลวดทุติยภูมิ	$M = 22.3 \mu\text{H}$
(ที่ 50 kHz)	$(k = 0.25)$
ช่องว่างอากาศ	15 mm
ตัวเก็บประจุ	$C_p = 94 \text{ nF}$
ชดเชย	$C_s = 147 \text{ nF}$
	$C_x = 9.4 \text{ nF}$
ความถี่เรโซแนนซ์	$f_p = f_s \approx 49 \text{ kHz}$
แรงดันแบตเตอรี่	$E_{\text{batt}} = 24 \text{ V (nominal)}$
	20-28 V (CC Mode)
	28V (CV Mode)
กระแสชาร์จสูงสุด	4 A (CC Mode)



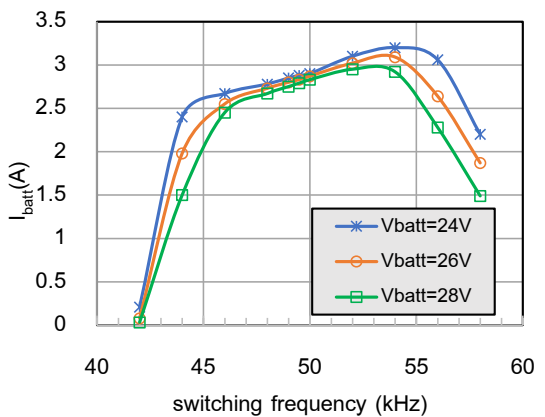
การควบคุมระบบใช้ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F28379D เป็นตัวควบคุมโดยรับสัญญาณป้อนกลับกระแสและแรงดันของแบตเตอรี่จากเซนเซอร์วัดกระแสและแรงดัน เพื่อประมวลผลและทำการส่งสัญญาณควบคุมการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ตามแผนผังการควบคุมในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 โดยมุม α_H ที่คำนวณจากส่วน Feedforward Control จะต้องมีค่าเป็น $1\mu s$

4.1 ผลการทดลองโหมด CC

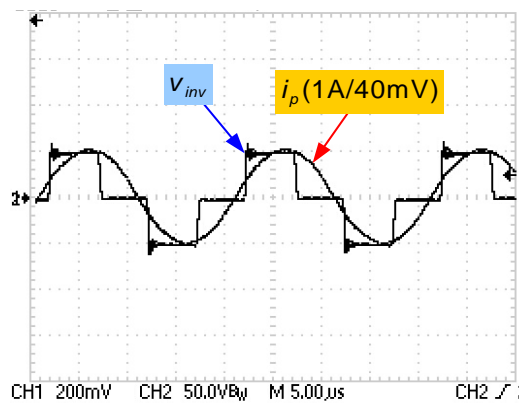
การทดสอบแรกจะทำการทดลองเฉพาะส่วนของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า โดยกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่การสวิตช์ที่แตกต่างๆ กัน ในขณะที่คำสั่งกระแสชาร์จ $I_{ref} = 4A$ ซึ่งคำนวณเป็นมุม α_H ได้เท่ากับ 90 องศา

ผลการทดลองในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าขณะวงจรทำงานอยู่ในบริเวณความถี่ 49-50 kHz จะให้พฤติกรรมในการคุมค่ากระแสต้านเอาต์พุตให้คงที่ได้ค่อนข้างดี โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันของแบตเตอรี่(อิเล็กทรอนิกส์โหลดในโหมด CV) อย่างไรก็ตามด้วยความไม่เป็นอุดมคติของส่วนประกอบกระแสชาร์จไม่สามารถติดตามคำสั่งได้ถูกต้อง ดังนั้นในการควบคุมจะต้องอาศัยตัวควบคุมแบบวงปิดร่วมกับดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2 เพื่อให้สวิตช์กำลังที่อยู่ในวงจรอินเวอร์เตอร์เกิดการทำงานในช่วงการเริ่มนำกระแสแบบ ZVS จะต้องทำให้โหลดที่ต่ออยู่กับอินเวอร์เตอร์เป็นแบบโหลดอินดักทีฟ จากรูปที่ 13 จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสต้านปฐมภูมิ (i_p) มีเฟสล้าหลังแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ (v_{inv}) อยู่เล็กน้อยขณะวงจรทำงานที่ความถี่ 49.5 kHz

การทดลองถัดมาเป็นการทดสอบโดยเพิ่มส่วนการควบคุมแบบวงปิดเพื่อทำงานร่วมกับส่วนควบคุมแบบไปข้างหน้า และปรับตั้ง I_{ref} ไปที่ค่าต่างๆ โดยโหลดอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำงานในโหมด CV จะถูกปรับค่าแรงดันเป็น 24, 26 และ 28 V ตามลำดับ เพื่อจำลองสถานะที่แรงดันแบตเตอรี่เพิ่มค่าขึ้นขณะทำการชาร์จในโหมด CC



รูปที่ 12 กระแสชาร์จแบตเตอรี่ที่ความถี่ต่างๆ เมื่อใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ $I_{ref} = 4A$



รูปที่ 13 รูปคลื่น i_p กับ v_{inv} ที่ความถี่ 49.5 kHz ($I_{ref} = 4A$ $E_{batt} = 26V$)



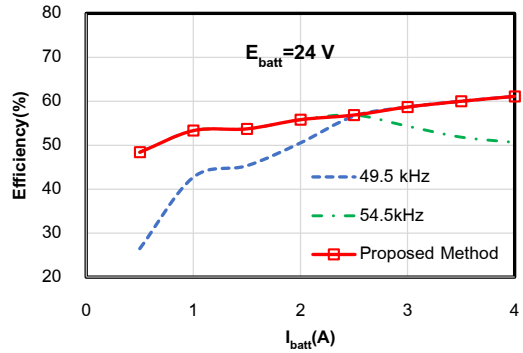
จากวิธีการควบคุมตามแผนผังรูปที่ 8 เมื่อค่า $Q_o < 2$ ระบบควบคุมจะสั่งให้ $\omega = \omega_s + \Delta\omega$ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เพิ่มความถี่ไปจากเดิม 5 kHz เป็น 54.5 kHz เพื่อปรับปรุงให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยในการทดลองประสิทธิภาพที่ทำการวัดจะเป็นประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบ (P_{batt}/P_{in}) ซึ่งรวมการสูญเสียทั้งในภาคอินเวอร์เตอร์ ขดลวดและวงจรเรียงกระแสสำหรับค่า $Q_o = 2$ จะสามารถคิดเป็นกระแสซอร์จเท่ากับ 2A (คำนวณจากสมการที่ (23) และ (20))

กราฟเส้นที่บัสแดงในรูปที่ 14 แสดงประสิทธิภาพรวมของระบบ IPT ที่ถูกควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอ ส่วนกราฟเส้นประสีน้ำเงินและเขียวเป็นการทำงานที่ความถี่คงที่เท่ากับ 49.5 kHz และ 54.5 kHz ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยเฉลี่ย 10% เมื่อความถี่การสวิตช์ถูกปรับเปลี่ยนจาก 49.5 kHz เป็น 54.5 kHz ในสภาวะที่กระแสซอร์จต่ำกว่า 2 A และเมื่อกระแสซอร์จสูงกว่า 2 A ความถี่จะถูกปรับไปที่ 49.5 kHz

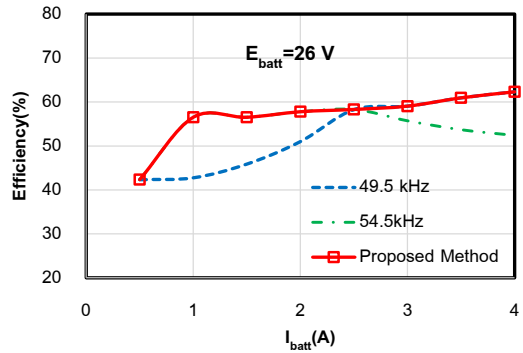
4.2 การทดลองโหมด CV

รูปที่ 15 เป็นผลการทดลองที่ได้จากระบบที่ถูกควบคุมด้วยส่วนของ Feedforward Control เพียงอย่างเดียว โดยตั้งคำสั่งแรงดันแบตเตอรี่ $V_{ref} = 28V$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดัน E_{batt} ที่วัดได้จริง เมื่อปรับให้อิเล็กทรอนิกส์โหลดที่ด้านเอาต์พุตดีดิ่งกระแสเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 A จนถึง 3 A ขณะวงจรทำงานอยู่ในบริเวณความถี่ 57-58 kHz จะเป็นบริเวณที่แรงดัน E_{batt} ถูกคุมค่าได้ดีที่สุด โดย E_{batt} มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส I_{batt} น้อย แต่ความถูกต้องของการติดตามคำสั่งแรงดันยังมีความผิดพลาดค่อนข้างสูงเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของ

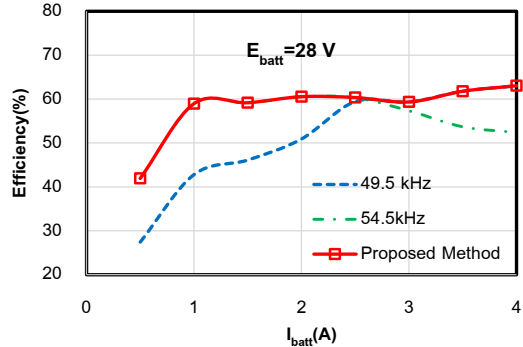
องค์ประกอบในวงจร ดังนั้นจำเป็นต้องมีส่วนควบคุมแบบป้อนกลับทำงานร่วมด้วย



(ก) $E_{batt} = 24V$



(ข) $E_{batt} = 26V$

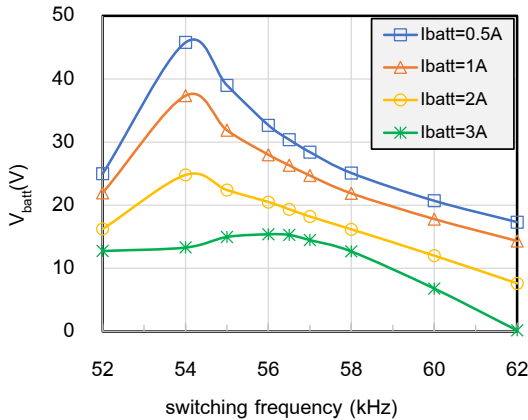


(ค) $E_{batt} = 28V$

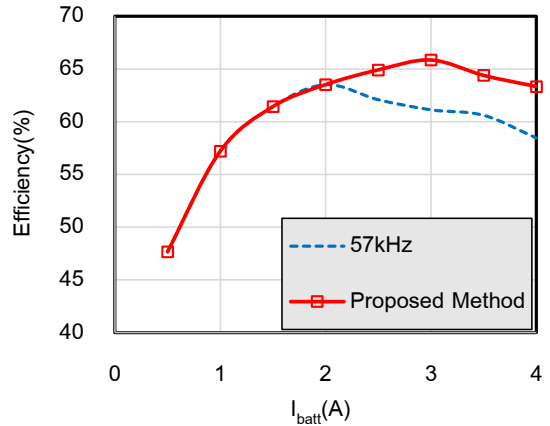
รูปที่ 14 ประสิทธิภาพรวมของระบบ IPT เมื่อถูกควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับโหมด CC



บทความวิจัย



รูปที่ 15 แรงดันแบตเตอรี่ที่ความถี่ต่างๆ เมื่อระบบทำงานด้วยการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ $V_{ref} = 28V$



รูปที่ 16 ประสิทธิภาพของระบบ IPT ที่ควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับโหมด CV ($V_{ref} = 28V$)

การควบคุมในโหมด CV ตามแผนผังที่ได้นำเสนอในรูปที่ 9 ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ถูกกำหนดไปที่ 57 kHz และแรงดันแบตเตอรี่จะปรับตั้งให้รักษาไว้ที่ 28 V อิเล็กทรอนิกส์โหลดที่ด้านเอาต์พุตจะถูกปรับให้ตั้งกระแสเริ่มจากค่า 0.5 A ถึง 4 A โดยเมื่อคำนวณเป็นค่า R_L จะอยู่ระหว่าง 5.67 ถึง 45.39 Ω และเมื่อคำนวณเป็นค่า Q_o จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.47-3.29 โดยเมื่อกระแสดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 2 A จะทำให้ค่า $Q_o > 2$ เป็นผลให้ตัวควบคุมสั่งให้สวิตช์เพื่อต่อตัวเก็บประจุ $C_x = 9.4 nF$ ขนานเข้ากับ $C_p = 94 nF$ ที่มีอยู่เดิม ทำให้ ω_p เปลี่ยนจาก $49.5k/2\pi$ ไปเป็น $46.8k/2\pi$ rad/sec และเมื่อคำนวณเป็นค่า λ ตามสมการที่ (24) จะได้เท่ากับ 0.95 และ δ_{ω} ตามสมการที่ (26) มีค่าเท่ากับ 0.98 ดังนั้น ω_1 จึงเปลี่ยนเป็น $\omega'_1 \approx 54.5k/2\pi$ rad/sec

รูปที่ 16 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพประมาณ 5 % เมื่อทำการปรับความถี่การทำงานและเพิ่มตัวเก็บประจุชดเชยด้านปฐมภูมิตามที่ได้อธิบายข้างต้น(เส้นทึบ) เทียบกับกรณีที่มีความถี่มีค่าคงที่(เส้นประ)

5. สรุปผล

การควบคุมกระแสและแรงดันแบตเตอรี่ที่ถูกชาร์จด้วยระบบ IPT ถูกวิเคราะห์และนำเสนอ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่และตัวชดเชยด้านปฐมภูมิให้เหมาะสมตามสถานะโหลดซึ่งเปลี่ยนแปลงตามสถานะประจุและคำสั่งกระแส/แรงดัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีควบคุมที่นำเสนอสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการควบคุมแบบความถี่คงที่



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.A. Covic and J.T. Boys, Inductive power transfer, Proceedings of the IEEE, Proceeding, 2013, 101(6), 1276–1289.
- [2] Y. Li, R. Mai, T. Lin, H. Sun and Z. He, A novel WPT system based on dual transmitters and dual receivers for high power applications: analysis, design and implementation, Energies, 2017, 10(2), 1–15.
- [3] J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart and J. Fco. Sanz, Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6), 2140–2149.
- [4] X. Liu and S.Y.R. Hui, Equivalent circuit modeling of a multilayer planar winding array structure for use in a universal contactless battery charging platform, IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1), 21–29.
- [5] W. Zhang and C.C. Mi, Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6), 4768–4778.
- [6] G.A.J. Elliott, G.A. Covic, D. Kacprzak, and J.T. Boys, A new concept: asymmetrical pick-ups for inductively coupled power transfer monorail systems, IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10), 3389–3391.
- [7] G.A. Covic and J.T. Boys, Modern trends in inductive power transfer for transportation applications, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1), 28–41.
- [8] Z. Liu, L. Wang, Y. Guo and S. Li, Primary-side linear control for constant current/voltage charging of the wireless power transfer system based on the LCC-N compensation topology, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9), 8895–8904.
- [9] A.B. Khan and W. Choi, Optimal charge pattern for the high-performance multistage constant current charge method for the Li-ion batteries, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3), 1132–1140.
- [10] W. Zhang, S.-C. Wong, C.K. Tse and Q. Chen, Load-independent duality of current and voltage outputs of a series- or parallel-compensated inductive power transfer converter with optimized efficiency, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1), 137–146.



- [11] W. Zhang, S.-C. Wong, C.K. Tse and Q. Chen, Analysis and comparison of secondary series- and parallel-compensated IPT systems, 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Proceeding, 2013, 2898–2903.
- [12] X. Qu, H. Han, S.-C. Wong, C.K. Tse and W. Chen, Hybrid IPT topologies with constant current or constant voltage output for battery charging applications, IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11), 6329–6337.
- [13] S. Bai, Z. Pantic and S. Lukic, A comparison study of control strategies for ZVS resonant converters, IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Proceeding, 2010, 256–262.
- [14] K. Aditya and S.S. Williamson, Design considerations for loosely coupled inductive power transfer (IPT) system for electric vehicle battery charging - A comprehensive review, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Proceeding, 2014, 1-6.

Effect of the Ternary Blends (Ethanol-Biodiesel-Diesel) on Deterioration of a Stationary Agricultural Engine

Sakda Thongchai¹, Ob Nilaphai¹, Pornphan Phanphatrapong² and Manida Tongroon^{*}

¹ ATAE Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

² Resources and Environment Department, Faculty of Science at Sri Racha, Kasetsart University

^{*} Corresponding author, E-mail: manida@src.ku.ac.th

Received: 9 July 2024; Revised 1 August 2024; Accepted: 14 August 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: This study determines the effect of ethanol in the ternary blend on the long-term use of the engine. A stationary agricultural engine is selected for the 500-hour endurance test because of the high feasibility of using ethanol blends as regular in the future. Ethanol 10 % (E10) is mixed with the blend of biodiesel 10% and 90% diesel (B10). So, the test fuel is B10E10. Commercial diesel, which has 7% biodiesel, is also used for the comparison. To simulate the actual application, the engine connected to a water pump was operated to circulate the water. The engine deterioration is evaluated through the change in performance and emissions when compared after 500 hours of use and before the beginning of the test. The engine wear is denoted by the metal contamination in lube oil. Also, the appearance and measured value of parts from the disassembled test engine are used to reveal the engine damage. Moreover, engine oil degradation was also checked by the oil condition and the additive depletion. The results found that torque and fuel consumption changed and indicated engine deterioration as usual. According to lubricant oil results, there is no effect of ternary blend superior to the commercial diesel. No evidence of severe wear can be detected. The engine can run smoothly throughout the test without any adverse consequences. Therefore, the use of ethanol-blended fuel in agriculture engines can expand.

Keywords: Ethanol; Biodiesel; Ternary blends; Diesohol



1. Introduction

Due to the profound effect of global warming, greenhouse gas regulation is currently being tightened. The automotive sector is one of the most significant contributors to emitted greenhouse gases. Therefore, novel engine technology and alternative energy supply resources must be discovered. Regarding economy and efficiency, diesel engines are superior to gasoline ones, hence decreased CO₂ formation. However, based on the combustion mechanism, a compression ignition engine generates a trade-off between smoke and NO_x. Consequently, using renewable energy instead of petroleum-based fuel is the solution.

Oxygenated biofuels have been proven to significantly decrease particulate emissions in direct injection gasoline and diesel engines. The well-to-wheels greenhouse gas can also be reduced. Moreover, the dependency on imported crude oil can be alleviated. As a result, many countries have applied biodiesel blended with diesel. In addition, biodiesel can compensate for the ethanol blend properties by functioning as an emulsifier, lubricity, and viscosity enhancer [1]. Therefore, a ternary blend, ethanol-biodiesel-diesel blend, has been stimulated to investigate.

Previous research indicated that the miscible tri-blend with the higher ethanol concentration requires a higher biodiesel content [2]. Due to the

lower heating value of ethanol and biodiesel, the fuel consumption increased compared to petroleum diesel fuel [3]. However, some researchers indicated higher thermal efficiency because oxygen molecules lead to more complete combustion [4]. The soot/particulate matter dramatically reduced while NO_x emissions seemed to increase [5]. Depending on the engine operating conditions, CO and HC vary [6].

Different ethanol concentrations have a distinct impact on engine output. Murcak et al. conducted the test with ethanol 0-15 % [7]. The results showed that when using 10% ethanol in the blend, the engine power, torque, and fuel consumption have more benefits than diesel for all engine operating conditions. Mohammadi et al. indicated that increasing ethanol up to 20% can decrease exhaust emissions, including the trade of NO_x and soot, with slightly increased thermal efficiency. Nevertheless, the fuel injection system needs modifications when using ethanol beyond 20% [8].

Concerning combustion features, a low cetane number (CN) of ethanol leads to the difficulty of auto-ignition in diesel engines. However, the pilot injection is an effective approach that helps the self-ignition of the main combustion [8]. Moreover, smoke-free combustion is possible with simultaneously lower NO_x by a large amount of exhaust gas recirculation (EGR). In addition, adding ethanol to diesel can induce puffing or



micro-explosion incidents, thus accelerating fuel atomization, vaporization, and combustion [9].

Although the previous study showed the benefit of ethanol blended fuel, there is limited research on long-term use. Most of the research focused on the endurance of injection systems [10] and confined the binary blend (ethanol-diesel) [11]. For the ternary blend research, Kurre et al. [12] evaluated the oil degradation when the engine used a 10% ethanol-10% biodiesel blend with diesel for 100 hours. The results showed acceptable oil degradation but no comparison with regular fuel. Thawornprasert et al. [13] found that the injector was corroded, and then the malfunction happened after 100 hours when using the high blend of 60% biodiesel and 10% ethanol. Kandasamy et al. [14] showed that after 500 hours of an endurance test, engine torque and power reduction compared to 0 hours when using ethanol-blended fuel (20% ethanol + 5% biodiesel) is more significant than B5.

This study conducted the 500-hour durability test to expand the possibility of using ternary blend fuel for long-term use. Because 10% biodiesel blended with 90% diesel (B10) is sold as commercial diesel in many countries, 10% ethanol mixed with B10 is used as the test fuel. Due to its high strength and achievability in ethanol usage, the stationary agricultural-based engine has been selected for the endurance test. The deterioration

of the engine is evaluated through the change in engine performance and exhaust emissions. Engine oil contamination and conditions are used to indicate engine wear. In addition, the disassembled engine parts are measured after use and observed.

2. Apparatus

2.1 Engine

A brand new ordinary agricultural single-cylinder diesel engine equipped with a water pump was used in the current study. The cylinder positions horizontally, and the piston operates four-stroke cycles. With a naturally aspirated intake system, the fuel is injected directly into the combustion chamber by a mechanical pump system with a maximum pressure of up to 220 bars. The engine details are listed in Table 1.

Table 1 Engine specification

Specification	
Engine model	KUBOTA RT140
Engine type	Water-Cooled 4-Stroke Horizontal engine
Bore x Stroke	97 x 96 mm.
Dis. Volume	709 cm ³
Compression ratio	18:1
Int. & Exh. valve	1, 1 valve
Max. power	10.30 kW@2400 rpm
Max. Torque	49 Nm@1600 rpm



The engine performance presented in Fig. 1 was acquired before the test started as the baseline and used to validate the engine conditions. The maximum torque is slightly less than the specification and occurs at 1600 rpm.

2.2 Engine load

A centrifugal pump was applied as the load for the engine durability test. The engine was connected to the pump via an extension belt. The pump sucks and discharges the water through the 4 inches pipe. Table 2 shows the details of the water pump.

2.3 Fuels

The effect of ethanol-blended fuels on engine deterioration was evaluated through B10E10 fuel, where E stands for ethanol, and B is biodiesel. Due to the miscibility problem, 10% ethanol must be mixed into B10, comprising 10% biodiesel as surfactant and 90% diesel. Commercial diesel sold in the gas station (mixed with 7% biodiesel, B7) was also used as the reference. The fuel specification is presented in Table 3.

2.4 Durability test procedure

The durability test was executed following Fig. 2. Before the test began, the engine run-in, also known as break-in, needed to be conducted for 12 hours. Then, engine performance and emissions when using B10E10 were measured at 0 hours as the baseline. Subsequently, the engine was equipped with a pump, which circulated the water

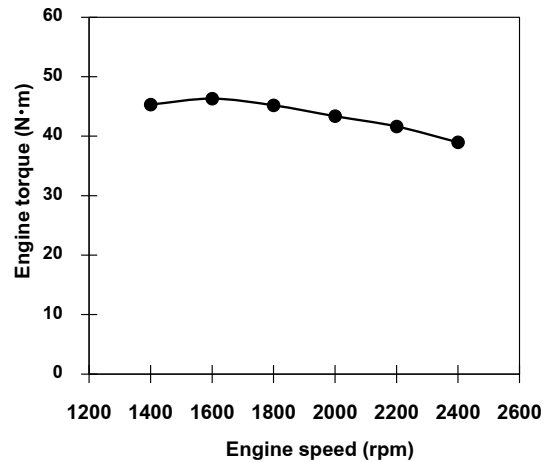


Fig. 1 Engine torque before the durability test

Table 2 Water pump specification

Specification	
Type	A centrifugal pump
Pipe dia.	4 inches
Max. Capacity	1700 liter/mint
Max. Head	27 m.
Output	10 hp.
Revolution	2000 rpm

Table 3 Fuel Properties

Properties	B10E10	Diesel (B7)
Ethanol (%)	10	0
Biodiesel (%)	9	7
Diesel (%)	81	93
Density (g/cm ³)	0.815	0.822
Viscosity (cSt)	2.8	3.2
Heating value (kJ/kg)	41.7	44.8
Lubricity (μm)	240	201

with the pump head around 1 meter and ran for 500 hours. The engine speed was fixed at 1600 rpm. The lubrication oil was changed and evaluated every 100, 200, 300, 400 and 500 hours. After the engine running achieved 500 hours, engine performance and emissions were repeatedly determined. Furthermore, the engine was disassembled and monitored for deterioration and wear. Finally, the engine was overhauled before the test procedure was repeated, but diesel was used as the fuel. The new parts in the overhauled engine include a cylinder block sleeve, injector, piston, and rings. The valves are old ones but grinded.

Engine deterioration was determined by the torque, fuel consumption and emissions change as calculated in Eq. (1).

$$\text{Percentage change (\%)} = \frac{V_f - V_i}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

where V_f and V_i are the values at 500 and 0 hrs, respectively. The used lube oil conditions also indicate engine wear. According to ASTM D6595, the metal contamination in the used lubricants was determined by the rotating disc electrode atomic emission spectrometer. A surface acoustic wave-based instrument was used to measure fuel contamination. Fourier transform infrared spectroscopy measured the oil oxidation, nitration, soot and water according to the ASTM E2412 standard. The lube oil's total base number and viscosity were analysed using the ASTM D4739 and D445 test methods.

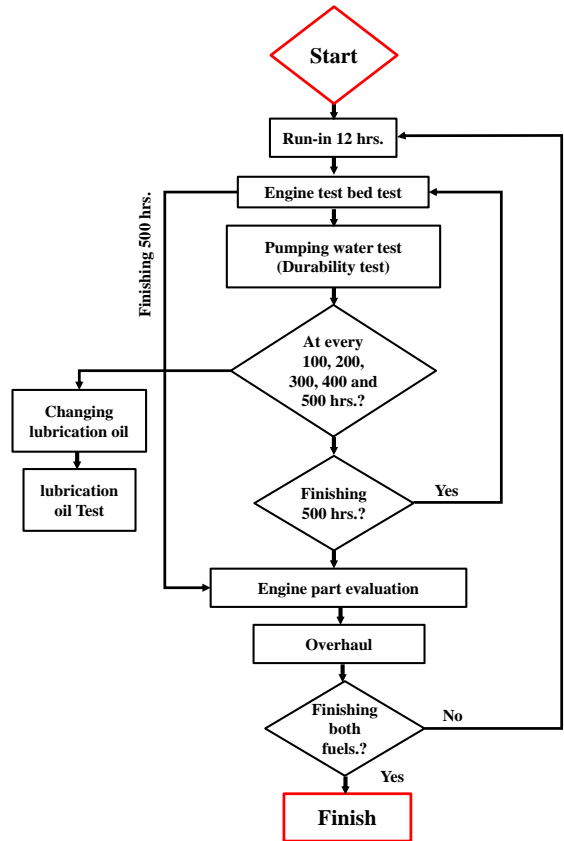


Fig. 2 Test procedure

2.5 Engine performance and emissions

The test was performed on the engine test bed, where a prony brake controlled the load. A chemiluminescent analyser, Horiba model FCA-266, was used to measure nitrogen oxides. The exhaust unburned hydrocarbon was measured by the Horiba model FCA-266 flame ionisation detector (FID) technology. A Horiba model AIA-260 non-dispersive infrared (NDIR) analyser was used to measure carbon monoxide. An AVL smoke meter 145SE was used to detect smoke levels.



3. Result and Discussion

3.1 Performance and emissions change

The engine can run smoothly without any problem throughout the test period for B10E10 and diesel fuel. Fig. 3 presents the average fuel consumption calculated during the 500-hour test period (281 Liters for B10E10 and 267 Liters for diesel). The result shows that the fuel consumption is higher by 4.36 % than diesel B7 when using B10E10. The lower heating value of ethanol is the cause. However, the increasing percentage of fuel consumption is less than the decreasing percentage of the heating value (6.92%) of B10E10 fuel. Because of the more oxygenated molecules, complete combustion occurs for B10E10 fuel.

Fig. 4 exhibits the percentage change of torque after completing the test and initial condition of the engine when using B10E10 and diesel fuel. For more details, engine torque, fuel consumption, and exhaust emissions values before and after 500 hours were summarized in Table 4. Both fuels have a marginal effect on engine degradation. Engine torque decreased for all engine speeds. The percentage change varies with the engine speed without correlation. The engine using a ternary blend at low speeds seems worse than B7 but better at medium speeds. The torque change caused by B10E10 and diesel ranges from -0.60 to, -4.21 and -2.06

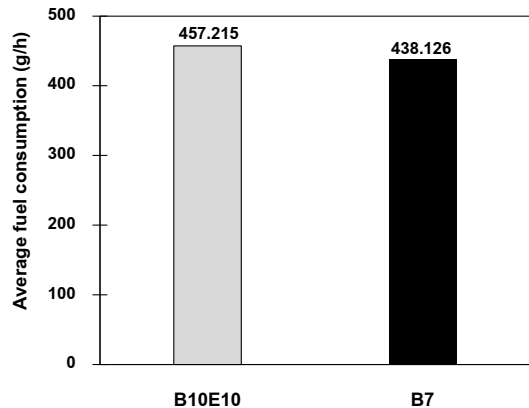


Fig. 3 Average fuel consumption when engine using B10E10 and diesel for 500 hrs.

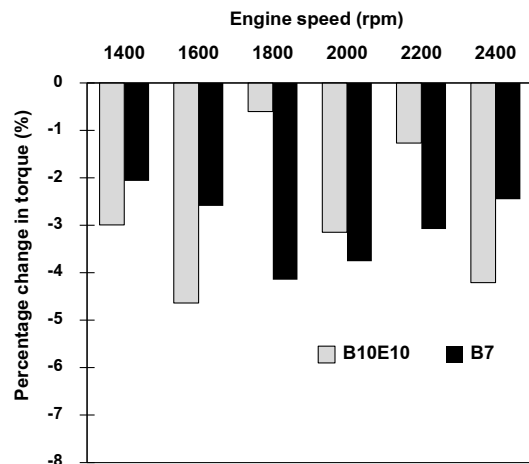


Fig. 4 Percentage of torque change when compared between 0 and 500 hrs.

to -4.15, respectively. As a result the effect of ethanol on engine wear was not significantly observed when compared with commercial diesel.

As shown in Fig.5, long-term use slightly increased the engine's fuel consumption for both test fuels. The variation varied with the engine



speed. The result could not indicate the domination effect of B10E10 fuel over diesel in terms of specific fuel consumption corresponding well with the decreasing torque.

The reduction in engine torque and increased fuel consumption after the endurance test of the brand-new engine/part may be inevitable because of cylinder wall deglazing. The rubbing parts, such as the piston ring and cylinder wall, have a rough surface at the beginning and are then polished to a smooth finish. The high level of metal contamination in the lube oil at 100 hours, which will be discussed later, is evident.

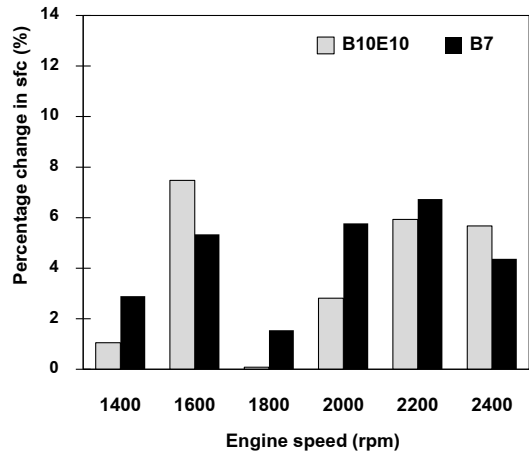


Fig. 5 Percentage change of specific fuel consumption (sfc) when using B10E10 and B7

Table 4 Engine torque, specific fuel consumption, CO, THC, NO_x, and soot before and after 500 hours.

Detail	500 hr.	B10E10						B7					
		1400	1600	1800	2000	2200	2400	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Torque (N·m)	Before	47.12	47.70	44.50	43.53	40.08	39.46	45.32	46.20	45.58	43.80	42.21	40.05
	After	45.71	45.49	44.23	42.16	39.57	37.78	44.38	45.00	43.70	42.15	40.90	38.97
SFC (g/kW-h)	Before	290.3	253.5	268.6	259.9	273.3	285.1	312.9	281.1	269.4	250.4	254.4	309.0
	After	293.4	272.5	268.8	267.2	289.5	301.3	321.3	296.0	273.6	264.9	271.5	324.6
CO (g/kW-h)	Before	7.09	3.02	1.00	0.37	0.23	0.18	10.17	5.47	1.69	0.57	0.45	0.35
	After	3.35	2.07	0.66	0.30	0.22	0.13	7.71	3.22	0.79	0.34	0.21	0.28
THC (g/kW-h)	Before	0.11	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.14
	After	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08
NO _x (g/kW-h)	Before	0.51	0.47	0.63	0.61	0.56	0.47	0.58	0.61	0.62	0.59	0.59	0.58
	After	0.28	0.29	0.30	0.30	0.24	0.35	0.59	0.63	0.60	0.54	0.57	0.60
Soot (g/kW-h)	Before	7.51	6.07	4.52	3.75	3.12	0.50	7.86	6.10	4.88	3.28	2.27	0.73
	After	7.13	5.83	4.56	3.06	2.56	0.56	6.82	6.62	3.75	3.58	2.63	0.66



The percentage change of CO, THC, NO_x and soot from 500-hour endurance is exhibited in Fig. 6. Unlike engine performance, no absolute trend of emission change exists. CO and HC tend to decrease after long-term use for both test fuels, but the change of NO_x and soot could not be concluded. One primary source of THC is the unburned hydrocarbon from the fuel escaping into the oil pan through the gap between the piston ring and cylinder wall. Likewise, unoxidized CO to CO₂ leaves from the crankcase enrich the CO emission. At the beginning of the test, more fuel and CO are easily blown through the coarse surface of the wall to the oil pan and then repel to the cylinder at the exhaust stroke, thus resulting in high THC and CO.

NO_x and soot strongly depend on the combustion characteristics. With the high combustion temperature, the level of NO_x increases and vice versa for smoke. Therefore, the uncertainty of the percentage change of these emissions is sophisticated. Combustion characteristics and spray behaviour should be further examined.

Although the exhaust gas change is an ambiguous indicator of engine deterioration in this study, the results confirm that ethanol in blended fuel has a similar effect to diesel fuel for long-term use. The change is opposite to the previous research [14], where CO, HC, soot and most NO_x emissions increased after the engine ran for 500 hours, and B5E20 had a more significant effect than

B5 fuels. The discrepancy may result from the difference in the run-in period of 20 hours and the high oxygen content blended with the low concentration of biodiesel.

3.2 Lubrication oil

3.2.1 Wear elements

The engine oil was sampled at 100-, 200-, 300-, 400-, and 500-hour test periods and presented sequentially from left to right of each bar chart group and exemplified in Fig. 7. Note that the actual age of engine oil is 100 hours, not the accumulated running hours, as the name indicates. Metal 1 and Metal 2 in Fig. 7 are representative of the graph pattern to present the result. They can be any metal, such as iron, molybdenum, or aluminum, which will be present later.

Metal contamination in used-lube oil, including Iron (Fe), Molybdenum (Mo), Aluminum (Al), Copper (Cu), Chromium (Cr), Lead (Pb), Tin (Sn), and Nickel (Ni), both fine (size < 8 μm detected by rotating disc electrode) on the left and coarse (size of 5 -150 μm measured by rotating filter spectroscopy) elements on the right is illustrated in Fig. 8. Iron is the primary material used for the crankshaft, camshaft, and cylinder block. The engine piston and bearing have an aluminum constituent. Copper is the constituent part of the valve, and chromium is used to cover the cylinder ring and block. The fine particle has a higher



amount than coarse pieces for most metals. In the first 100 hours, the amount of debris for all metals, except for molybdenum, torn from the engine parts is the highest due to the run-in period, particularly iron, which is above the warning level. However, after 100 hours of accumulation, the quantities of wear metal decreased and remained stable afterwards in the acceptable range. It indicates that

the break-in period should be over 12 hours to evaluate the deterioration results.

The oil at the first 100 hours, drawn from the engine using B10E10, contaminated higher metal elements than diesel fuels. However, the wear debris from the brand-new part using B10E10 during the run-in duration significantly contributed to the result, not the test fuels. The new parts used

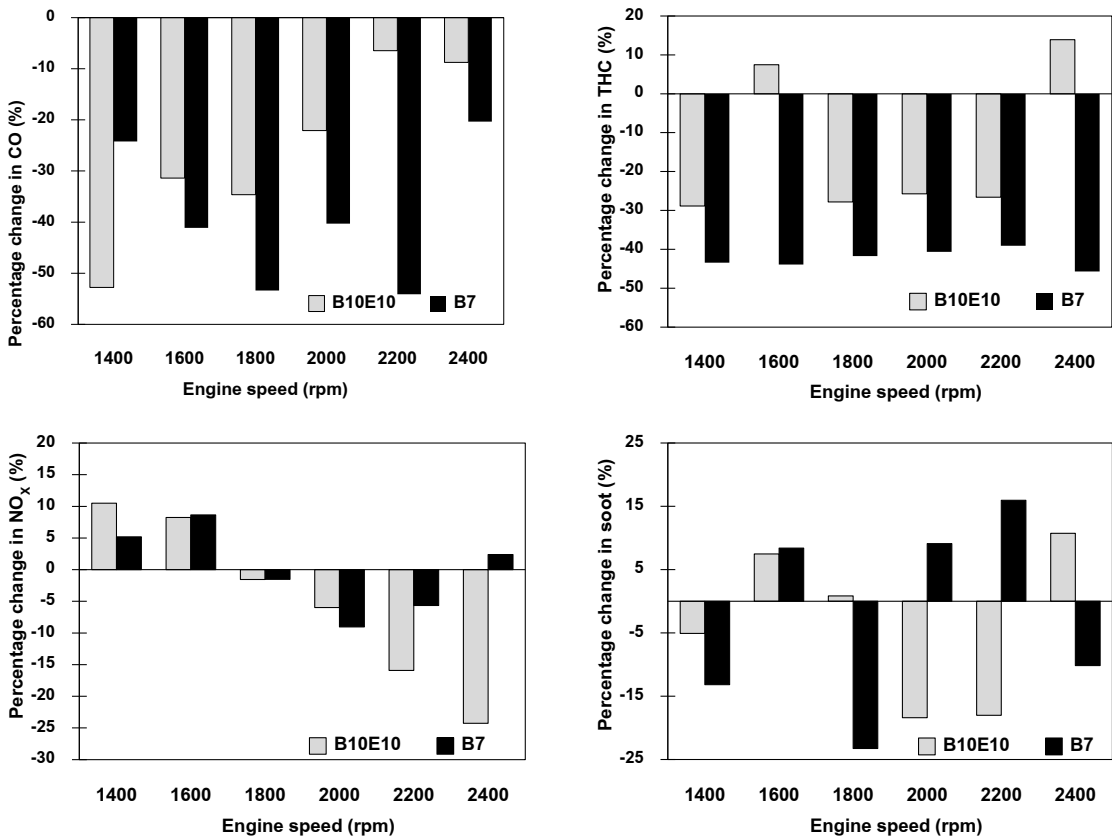


Fig. 6 Percentage change of CO (upper left), THC (upper right), NO_x (lower left) and soot (lower right) emissions from the 500-hour endurance test



in the overhauled engine using B7 include the cylinder block sleeve, piston, piston ring and grind valve. Other parts, such as the crankshaft, camshaft and bearing, had already passed the break-in period and were less detached when tested with B7. Moreover, compared to 200-, 300-, 400-, and 500-hour tests, the level of metal contamination is no different between B10E10 and diesel fuel.

3.2.2 Oil condition

Fig. 9 exhibits the used engine oil conditions (viscosity, total base number (TBN), nitration, and oxidation) sampled every 100 hour-accumulation. For all sample oils, the viscosity decreased and closed to the lower warning bounds after 100 hours of use. Both test fuels have a relative effect on oil viscosity. The fuel/water dilution shown in Fig. 10 is the cause of viscosity reduction. In order to prevent engine failure, the engine oil should be changed every 100 hours as the manufacturer recommends.

Typically, TBN should be decreased because of the acid formation from by-products of combustion, nitration and oxidation. In addition, the acidity of biodiesel resulting from the fuel dilution can reduce the alkalinity. Interestingly, the TBN of motor oil used in this study is comparable to that of new oil except for the oil drained at 200 hours when using B10E10 and 500 hours

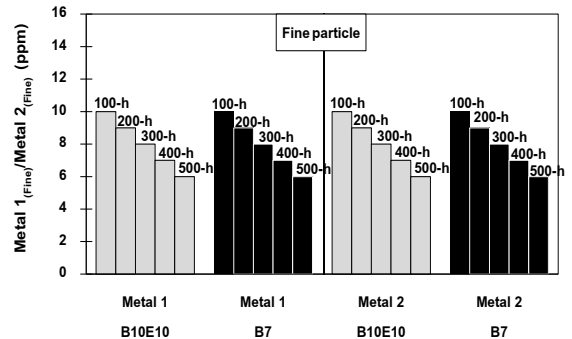


Fig. 7 Example to indicate the engine oil results

when using B7. The alkaline additive in the lubricant, such as calcium, neutralizes the acidity. It can be noticed that the calcium concentration in Fig. 11 was identically reduced, with the TBN substantially decreased at 200 and 500 hours.

Nitration is formed by the reaction of oil and nitrogen oxide compounds, while oxidation is the product of oil oxidized with oxygen. Both substances typically lead to increased viscosity and acidity. The result shows that nitration and oxidation increased after 100 hours of usage compared to the new oil. B10E10 slightly increased higher than B7. Because of higher oxidative agents in tri-blend fuels, the oxidation reaction with lube oil occurs more quickly. More oxide of nitrogen emitted from the B10E10 may be the cause of marginal higher nitration. However, the effect of nitration and oxidation on the viscosity and TBN could not observed as discussed above.



บทความวิจัย

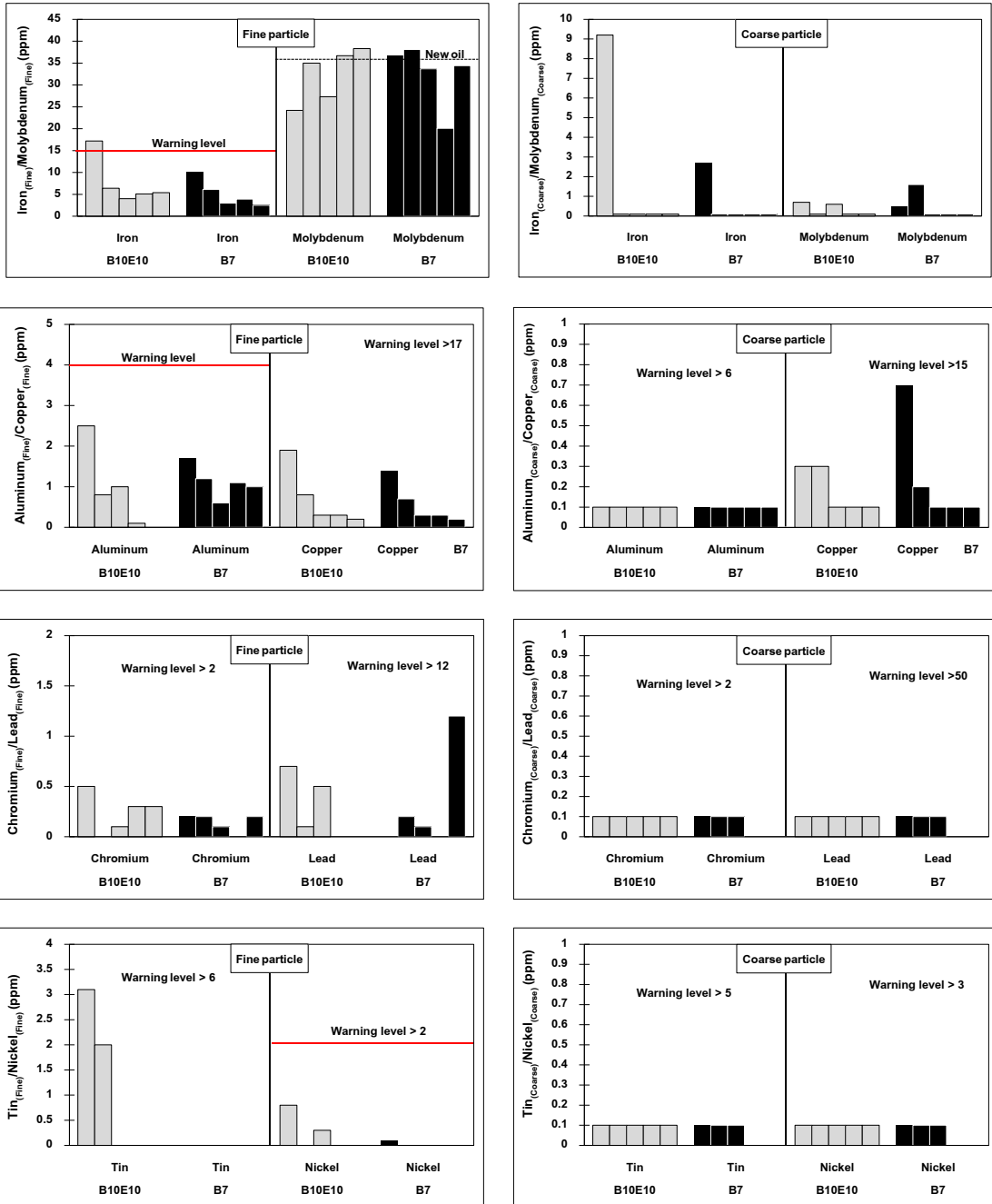


Fig. 8 Metal contamination, Fe, Mo, Al, Cu, Cr, Pb, Sn, and Ni from top to bottom, fine size on the left and coarse on the right



บทความวิจัย

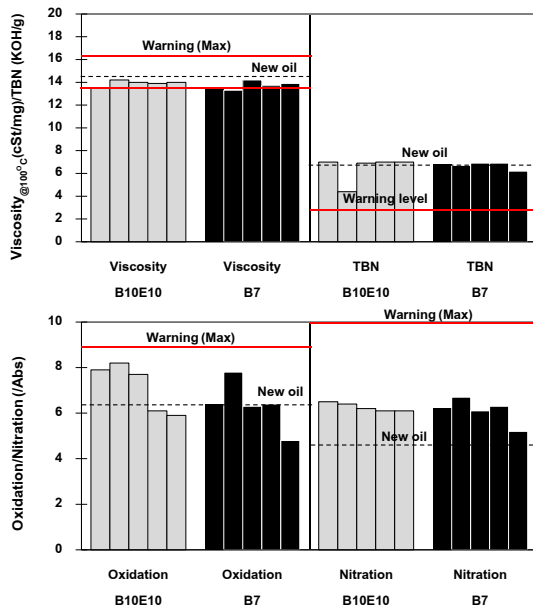


Fig. 9 Used lube oil conditions including viscosity & TBN (top), and oxidation & nitration (below)

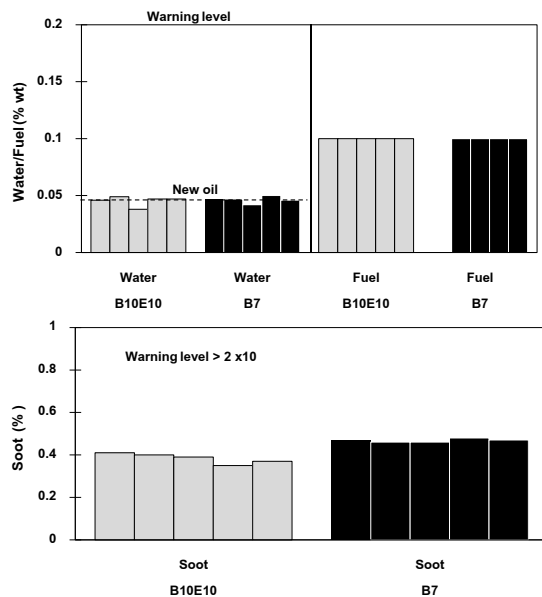


Fig. 10 Contamination of water, fuel, and soot in used lube oil at every 100 hours

3.2.3 Contaminations

The contaminants comprised of water, fuel, and soot diluting in the engine oil are presented in Fig. 10. All contaminant levels are below the upper warning limits. There is no sign of water leakage from the cooling system into the lubricant—the water level in the used oil is comparable to the fresh. However, the fuel can vent through the oil pan and dilute the oil, leading to decreased viscosity (shown above). The effect of both test fuels on fuel dilution is equivalent. Soot concentration when using ethanol-blended fuels is marginally inferior to commercial diesel. The cause is the suppressed soot formation during in-cylinder combustion by a higher amount of oxygen [5].

3.2.4 Additive elements

As shown in Fig.11, the additive elements are zinc, phosphorus, and calcium. Zinc and phosphorus come from an organic compound multifunctional additive, zinc dialkyl dithiophosphate (ZDDP), which is in charge of antiwear and antioxidants. When ZDDP works, an additional temporary lubricant layer that acts as an antiwear property is created between two mating surfaces. This mechanism consumes and depletes ZDDP in the lube oil. Therefore, the phosphorus and zinc reduction levels are correlated [15]. However, of particular interest are the discrepancies between the change of zinc and phosphorus when using different test fuels. The difference in the amount of oxidation shown above may be the cause. Consequently,



further investigation into the antioxidation of ZDDP and the vaporization process, which is another cause of consumed additives [15], should be conducted.

The duty of calcium is a detergent additive used to suspend contamination such as deposits. Moreover, calcium can also neutralize the acidity of combustion products. Calcium forms a thin film to envelop the coagulation deposits and hold them to the oil filter. Therefore, calcium diminished from the used oil compared to the fresh lubricant. Surprisingly, calcium precipitously fell from the oil sampled at 200 hours, resulting in a relatively low TBN, as discussed above.

The low calcium level coincides with the low level of zinc and phosphorus but does not obviously relate to other properties. Moreover, there is no sign of severe engine wear, implying the fast calcium drop.

3.3 Engine parts

All dismantled parts (not shown here) are in normal condition. No severe wear and damage appeared on any parts. Fig. 12 and 13 demonstrate the piston and cylinder head from the disassembled engine after a 500-hour endurance test. The result indicates that the engine using B10E10 has less soot depositing on the piston and head than the diesel B7, which corresponds well with the lower soot contamination in lube oil.

The lists in Table 5 are the parameters and values measured from the long-term used parts. Unfortunately, the assessment before testing could not be provided for comparison. Therefore, the manufacturer's standard specifications are given for reference. Except for the valve seat size, all parts have the measured value in the acceptable range. The parts dismantled from the engine using B10E10 have comparable value to diesel, even the valve seat.

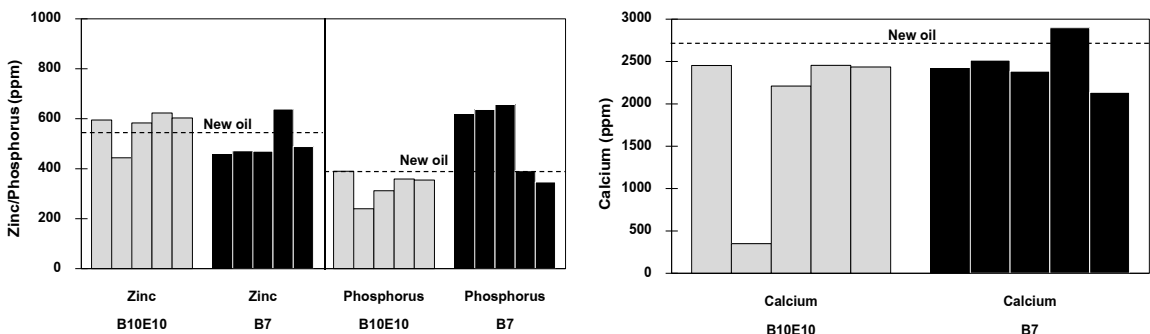


Fig. 11 Concentration of additive elements (Phosphorus, Zinc and Calcium) in used lube oil

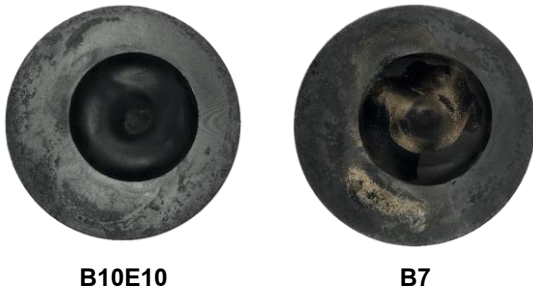


Fig. 12 Piston after long-term use

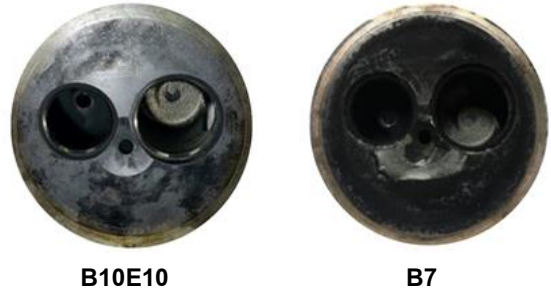


Fig. 13 Cylinder head after long-term use

Table 5 Parameter and measured value of the parts disassembled from the test engine

Part	Detail	Specification	Measured value		
			B10E10	Diesel	
Cylinder head	Distortion	(mm./100 mm.)	< 0.05	< 0.05 mm.	< 0.05 mm.
Valve	Valve seat size	Intake (mm.)	1.4	1.6	1.6
		Exhaust (mm.)	1.4	1.55	1.55
Cylinder block	Size	(mm.)	97.010- 97.032	97.048	96.956
		Limit (mm.)	< 0.2		
Piston	Wrist pin size	(mm.)	27.000- 27.021	27.02	27.01
		Limit (mm.)	< 27.04		
Piston rings	1 st ring gap	(mm.)	0.2-0.4	0.45	0.35
	2 nd ring gap	Limit (mm.)	< 1.2	0.35	0.35
	3 rd ring gap			0.55	0.45
	4 th ring gap			0.35	0.35
	Side clearance between 2 nd rings and groove	(mm.)	0.02-0.052	0.05	0.05
	Side clearance between 3 rd rings and groove	Limit (mm.)	< 1.5	0.05	0.05



4. Conclusion

The endurance of a stationary agricultural diesel engine is evaluated through 500-hour long-term use to expand the feasibility of using the ethanol-biodiesel-diesel blend (B10E10). Commercial diesel is also used for reference. The change in performance and emissions indicates engine deterioration. The engine wear is analyzed through lubrication oil. In addition, dismantled engine parts are observed and measured. The conclusions are:

- Torque reduction and increased fuel consumption specify inherent characteristics of engine deterioration when using both test fuels. However, the change in emissions could not confirm the results. Nevertheless, all changes indicate that the ethanol blend has a similar extent of worsening the engine as commercial diesel.
- The effect of the run-in period demonstrates the highest level of metal contamination at the first 100 hours of engine running when using both test fuels. Therefore, the break-in period should be longer than 12 hours to clarify the engine deterioration.
- According to lube oil analysis, a ternary blend of ethanol has a comparable effect on engine endurance and oil degradation to a binary blend of biodiesel B7.

- The disassembled engine part confirms the normal condition of the engine after long-term use for both test fuels.

From all results, it can be concluded that a stationary can apply the ternary blend as the regular fuel.

4. Acknowledgement

This research was financially supported by Kasetsart University Research and Development Institute, KURDI (R-M 50.64), Thailand.

5. References

- [1] I. P. de Oliveira, A.R.L. Caires, K. Baskar, S. Ponnusamy, P. Lakshmanan and V. Veerappan, Biodiesel as an additive for diesel-ethanol (diesohol) blend: physical-chemical parameters and origin of the fuels' miscibility, *Fuel*, 2020, 263, 116753.
- [2] I.P. de Oliveira, C.H. Lescano, W.J.N. Lima, U.A. Pereira, C.M. Aguilár, V. Velusamy, P. Sasikumar, M. Vimalan, K.G. Kumar and K. SenthilKannan, Physical-chemical properties of biodiesel–diesohol blends: Ultrasonic and molecular simulation studies, *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 388, 122755.



- [3] V. Kulanthaivel, A. Jayaraman, T. Rajamanickam and S. Selvam, Impact of diesel-Algae biodiesel-anhydrous ethanol blends on the performance of CI engines, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295, 126422.
- [4] T. Sathish, V. Mohanavel, M. Arunkumar, K. Rajan, M.E.M. Soudagar, M.A. Mujtaba, S.H. Salmen, S.A. Obaid, H. Fayaz and S. Sivakumar, Utilization of *Azadirachta indica* biodiesel, ethanol and diesel blends for diesel engine applications with engine emission profile, *Fuel*, 2022, 319, 123798.
- [5] L. Zuo, J. Wang, D. Mei, S. Dai and D. Adu-Mensah, Experimental investigation on combustion and (regulated and unregulated) emissions performance of a common-rail diesel engine using partially hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel ternary blend, *Renewable Energy*, 2022, 185, 1272-1283.
- [6] R. Subramanian, G. Rajendiran, R. Venkatachalam, N. Nedunchezian and K. Mayilsamy, Hybrid fuel blends-the alternative fuel for transport bus engine, *SAE Technical Paper*, 2009, 2009-28-0032.
- [7] A. Murcak, C. Haşımoğlu, İ. Çevik and M. Karabektaş, G. Ergen, Effects of ethanol–diesel blends to performance of a DI diesel engine for different injection timings, *Fuel*, 2013, 109, 582-587.
- [8] A. Mohammadi, T. Ishiyama, T. Kakuta and S. Kee, Fuel Injection strategy for clean diesel engine using ethanol blended diesel fuel, *SAE Technical Paper*, 2005, 2005-01-1725.
- [9] Z. Wang, S. Wu, Y. Huang, S. Huang, S. Shi, X. Cheng and R. Huang, Experimental investigation on spray, evaporation and combustion characteristics of ethanol-diesel, water-emulsified diesel and neat diesel fuels, *Fuel*, 2018, 231, 438-448.
- [10] S. Dharma, H. Chyuan Ong, H.H. Masjuki, A.H. Sebayang and A.S. Silitonga, An overview of engine durability and compatibility using biodiesel–bioethanol–diesel blends in compression-ignition engines, *Energy Conversion and Management*, 2016, 128, 66-81.
- [11] İ. Temizer and A. Arı, Effects on ring wear of bioethanol/diesel fuel blends used at long term endurance tests in a DI engine, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2022, 11, 140-151.
- [12] S.K. Kurre, S. Pandey, N. Khatri, S.S. Bhurat, S.K. Kumawat, S. Saxena and S. Kumara, Study of lubricating oil degradation of CI engine fueled with diesel-ethanol blend, *Tribology in Industry*, 2021, 2, 222-231.



- [13] J. Thawomprasert, A. Sopajarn, S. Niseng, P. Suybangdum, W. Duangsuwan and K. Somnuk, Effect of diesel-palm fatty acid distillate ethyl ester-hydrous ethanol blend on the performance, emissions, and long-term endurance test on an unmodified di diesel engine, *ACS Omega*, 2022, 7, 5894-5907.
- [14] S.K. Kandasamy, A.S. Selvaraj and T.K.R. Rajagopal, Experimental investigations of ethanol blended biodiesel fuel on automotive diesel engine performance, emission and durability characteristics, *Renewable Energy*, 2019, 141, 411-419.
- [15] M.V. Twigg, N.R. Collins, D. Morris, T.J. O'Connell, I.K. Ball, S. Arrowsmith, L. Cassidy and P. Wrench, The effect of phosphorus and boron lubricant oil additives on catalyst and engine durability, *Journal of Fuels and Lubricants*, 2004, 113, 948-959.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or not less than 2500 words using a word count of MS Word (should not exceed 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3-5 words).

The content of the research article consists of 5-6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ

เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

1. Title

2. Type of manuscript [] Research Article [] Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Table with 4 columns: Name, Affiliation, Telephone, E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

[] I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

- [] Manuscript submission by system online at http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech/index
[] Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com
[] Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature Corresponding author

()

Date Month Year

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๐ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๗

บทความ (Articles)

- Study of Strength and Corrosion Behavior on Aluminum A1050 and Copper C1100 Joints by Mechanical Steel Bolt, Blind Steel Rivet, and Resistance Spot Weld, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 1-17.
- Bicycle Trainer Connected to The Grid, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 18-33.
- Hardness Improvement on Graphite by Silicon Nitride (Si_3N_4) Reinforcement using Slurry Infiltration, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 34-46.
- Application of Integrated Framework of Kansei Engineering and Kano Model Applied to Healthy Office Chair, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 47-65.
- Research and Development of a Dual-Fuel Radiant Burner for Diverse Applications: Utilizing of Liquefied Petroleum Gas and Bio-Ethanol, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 66-78.
- Development of Infectious Waste Prototype Bin for Public Toilets in Commercial Buildings, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 79-96.
- Application of Failure Mode Effect and Critical Analysis for Risk Management: A Case of Road-rail Transport at the Thai-Lao PDR Cross Border, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 97-111.
- Effect of Injection Pressure to Fuel Consumption of Single Cylinder Diesel Engine for Agriculture, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 112-124.
- An Optimization Process of Automatic Finishing Surface Treatment Al 7075 by a Single Roller Burnishing Tool, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 125-140.
- A Study of the Freeze-Drying Process for Probiotics in Yogurt Produced from a Typical Household Freeze Dryer, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 141-151.
- The Study of the Effect of O_2 Contamination on Discoloration at Root Pass Welding of Titanium Grade 2 Pipe ASTM B 861 Using Gas Tungsten Arc Welding, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 152-164.
- The Work Station Improvement by Ergonomics Principle to Reduce Fatigue from Work of Worker's in Smoked Rubber Sheets Processing, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 165-183.
- Identifying the Optimal Location and Capacity of Distributed Generation for Improving Reliability in Distribution System, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 184-195.
- Efficiency Enhancement of An Inductive Power Transfer System Used for Battery Charging Through Frequency Control and Compensation Adjustment, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 196-211.
- Effect of the Ternary Blends (Ethanol-Biodiesel-Diesel) on Deterioration of a Stationary Agricultural Engine, The Journal of Industrial Technology, 2024, 20(2), 212-228.