

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

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



DRIVEN BY



Indexed in
TCI



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๔

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๔

VOLUME 17 | ISSUE 1 | 2021 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายิ่งจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

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

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

กองบรรณาธิการนานาชาติ

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

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

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

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

Editor-in-Chief

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

Associate Editor

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

Editorial Board Members

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

International Editors

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

Head of Administrative Management

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

Administrative Management

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

Journal Manager

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

วัตถุประสงค์

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

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขาที่เกี่ยวข้องไม่น้อยกว่า 2 คน (Double-Blinded Peer Review) ซึ่งทั้งผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลรายชื่อของกันและกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

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

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-2000 ต่อ 6615, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

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

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality by the double-blinded peer review from the experts in related fields. The authors and reviewers will not know each other's contact information. The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

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

Publishing Schedule

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

Publisher

Research and Academic Supports Division College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Building 63, 3rd Floor, 1518, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800, Tel. +66 2 555-2000 ext. 6615, Email: JIT.journal@gmail.com



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
การดูดซับสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำทิ้งการผลิตผ้าบาติกด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา Adsorption of Organic Substance and Dyestuff from Batik Textiles Wastewater by Rubber Wood Fly Ash กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์ นฤมล ทองมาก และ พรทิพย์ ศรีแดง	1
การลดระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบเพื่อลดต้นทุนการจัดเก็บ Raw Material Purchasing Lead Time Reduction for Reducing Inventory Carrying Cost สุทธิดา ไชยกิจ และ ชูศักดิ์ พรสิงห์	15
การศึกษาปัจจัยเพื่อลดต้นทุนผงเคมีในการผลิตผ้าเบรก A Study of Factors for Chemical Cost Reduction in the Brake Pad Manufacturing Process สรวิชัย สุวรรณอักษร และ ชูศักดิ์ พรสิงห์	31
การอบแห้งใบกะเพราด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง Holy Basil Leaves Drying using Combined Microwave and Hot Air Conveyer Belt Dryer อนัญฐิชา จันทะพันธ์ สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ และ ธนิต สวัสดิ์เสวี	53
อิทธิพลของความเร็วรอบต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ใช้ น้ำมันเอทานอลผสมดีเซล Influence of Speed on Combustion Behavior of a Compression Ignition Engine using Ethanol Blended Diesel Fuel ศักดิ์ดา ธงชาย และ ประทีป ชัยเสริมเทวัญ	65



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทความวิจัย (ต่อ)	
การประยุกต์ใช้วิธีทาгуชิสำหรับกระบวนการกัดขัดผิวเรียบอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยการศึกษา ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของเครื่องจักรในการผลิต Application of Taguchi Method for Burnishing Process of AA5052 Aluminum Alloy by Studying the Optimization สุรียา ประสมทอง และ สุรียา น้ำแก้ว	82
Investigation of the Optimal Machining Parameters on Wire Electrical Discharge Machine by Taguchi Technique Patittar Nakwong	95
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ	S4

การดูดซับสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำทิ้งการผลิตผ้าบาติกด้วยถ้ำลอย ไม้ยางพารา

กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์¹, นฤมล ทองมาก² และ พรทิพย์ ศรีแดง¹

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

²คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: narumol.t@yru.ac.th; Kliangpradit.K@gmail.com

วันที่รับบทความ: 5 พฤศจิกายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 21 ธันวาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 23 ธันวาคม 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 4 กุมภาพันธ์ 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากถ้ำลอยไม้ยางพาราสำหรับบำบัดน้ำทิ้งจากการผลิตผ้าบาติกที่ค่า pH ระหว่าง 5-8 ด้วยถ้ำลอยขนาดช่วง 75-300 ไมครอน ระยะเวลาสัมผัส 2-24 ชั่วโมง และปริมาณถ้ำลอยไม้ยางพารา 5-150 กรัมต่อลิตร ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับซีไอดีและสีย้อม ผลศึกษาที่ดำเนินการทดลองแบบกะ (Batch Method) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับซีไอดีและสีย้อม มีค่าประมาณร้อยละ 96 และ 98 ตามลำดับ ที่สภาวะเหมาะสม คือ pH 7 ด้วยการใช้ถ้ำลอยไม้ยางพารารวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดขนาด) มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 8.02 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวเฉลี่ย 65.03 ตารางเมตรต่อกรัม ภายใต้ระยะเวลาสัมผัส 16 ชั่วโมง ที่ปริมาณถ้ำลอย 100 กรัมต่อลิตร โดยผลการดูดซับซีไอดีด้วยถ้ำลอยไม้ยางพาราสอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรอนดิช ด้วยค่า R^2 0.8828 มีลักษณะการดูดซับทางกายภาพบนพื้นผิวของถ้ำลอยแบบเส้นตรงที่ค่า $\frac{1}{n}$ เท่ากับ 1.0365

คำสำคัญ: ถ้ำลอย; การดูดซับ; น้ำทิ้งผ้าบาติก; ซีไอดี; สีย้อม

Adsorption of Organic Substance and Dyestuff from Batik Textiles Wastewater by Rubber Wood Fly Ash

Kamonrat Kliangpradith¹, Narumol Thongmak^{2*} and Porntip Sridang¹

¹ Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University

² Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: narumol.t@yru.ac.th; Kliangpradit.K@gmail.com

Received: 5 November 2020; Revised: 21 December 2020; Accepted: 23 December 2020

Online Published: 4 February 2021

Abstract: This research has studied the utilization of rubber wood fly ash for batik textiles wastewater treatment at 5-8 of pH value, 75-300 μm of fly ash size, 2-24 hours of contact time and 5-50 g/L of fly ash dose which effected on the adsorption efficiency of COD and dyestuff removal. The batch experiment results showed that the adsorption efficiency of COD and dyestuff removal was about 96 % and 98 % at the optimum conditions, pH 7, the total size of fly ash (no sieve) with 8.02 nm of average pore size and 65.03 m^2/g of average surface area, 16 hours of contact time and 100 g/L of fly ash dose. The organic adsorption in term of COD by rubber wood fly ash was analyzed and fitted with Freundlich isotherm under R^2 0.8828. This result correlated with the linear physical adsorption characteristic on the surface area of fly ash at $\frac{1}{n}$ value of 1.0365.

Keywords: Fly ash; Adsorption; Batik wastewater; COD; Dyestuff



1. บทนำ

ผ้าบาติกมีการผลิตกันแพร่หลายในจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศไทย การผลิตผ้าบาติกสามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมและครัวเรือน กระบวนการผลิตผ้าบาติกประกอบด้วย การเตรียมผ้า การเตรียมเทียนหรือการผสมเทียน การเขียนเทียน การแต้มหรือย้อมสี การเคลือบน้ำยาไซเดียมซัลเฟต การลอกเทียน การตากผ้า และตกแต่งผ้า ซึ่งขั้นตอนในกระบวนการผลิตผ้าบาติกก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียจากขั้นตอนการลอกเทียนและขั้นตอนการล้างสีย้อมออกจากผ้า ลักษณะของน้ำเสียมีซีโอดี (COD) สูงประมาณ $2,334.00 \pm 290.36$ มิลลิกรัมต่อลิตร [1] ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียมียหลายวิธี ได้แก่ การบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางเคมี และการบำบัดทางชีวภาพ โดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ เคมี ที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสำหรับลดซีโอดีและสีย้อมในน้ำทิ้ง เนื่องจากกระบวนการดูดซับมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ และดำเนินการเดินระบบเพื่อทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพ โดยใช้วัสดุดูดซับหรือตัวดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ ถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย ถ้ำลอยแกลบ และถ้ำลอยไม้ยางพารา เป็นต้น [2] ถ้ำลอยเป็นวัสดุดูดซับที่มี (ลักษณะทางกายภาพ) ความพรุน พื้นที่ผิว และมีองค์ประกอบทางเคมีอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่ามากกว่า 2.4 [3] จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำ สามารถใช้ในการดูดซับสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ โดยงานวิจัยของ Patra และคณะ [4] ใช้ถ้ำลอย

ถ่านหินดูดซับสีย้อมในสารละลาย พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสูงสุดร้อยละ 60 เมื่อใช้ปริมาณถ้ำลอย 2 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 0.6 กรัมต่อลิตร งานวิจัยของ Chingono และคณะ [5] ใช้ถ้ำลอยชานอ้อยในการลดซีโอดีและลดความเป็นกรดในน้ำทิ้งจากการผลิตไบโอเอทานอล ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพการลดซีโอดี ร้อยละ 72 ด้วยการใส่ถ้ำลอยขนาด 90-125 ไมครอน ปริมาณ 45 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ดังนั้นการประยุกต์ใช้ถ้ำลอยที่มีความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและเคมี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมหรือลดค่าความสกปรกจากน้ำทิ้ง โดยกระบวนการผลิตผ้าบาติกที่ทำให้เกิดน้ำทิ้ง หากมีการนำถ้ำลอยชีวมวลจากไม้ยางพารา ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากโรงไฟฟ้าชีวมวลในพื้นที่ภาคใต้ ที่มีปริมาณถ้ำลอยเกิดขึ้น 20 ตันต่อวัน (ร้อยละ 80-85 ของถ้ำทั้งหมด) และมักถูกทิ้งในพื้นที่โรงไฟฟ้ามาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการเป็นวัสดุดูดซับราคาต่ำ [6] เนื่องจากถ้ำลอยไม้ยางพารามีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 9.23 ตารางเมตรต่อกรัม มีความพรุนประมาณ 17.72 ตารางเมตรต่อกรัม องค์ประกอบทางเคมี คือ SiO_2 และ Al_2O_3 ร้อยละ 2.57 และ 0.53 ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.52 [7] ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากถ้ำลอยไม้ยางพาราในพื้นที่ภาคใต้สำหรับบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซีโอดีและสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 อุปกรณ์

อุปกรณ์ในการทดลอง ประกอบด้วย (1) เตาอบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Linking รุ่น LT900 (2) pH Meter ยี่ห้อ ADWA รุ่น AD1040 และเครื่องมือตรวจวิเคราะห์สมบัติของถ้ำลอยไม้ยางพารา ประกอบด้วย (3) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer) หรือ BET (Brunauer-Emmett-Teller) รุ่น ASAP2460 (Static Volumetric N₂ Gas Adsorption Method) (4) เครื่องวิเคราะห์สัณฐาน (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Apreo (5) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry; XRF) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น ZETIUM และ (6) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasca รุ่น V-530 สำหรับตรวจวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนสีย้อม

2.2 วิธีการทดลอง

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองแบบกะ (Batch Method) ในห้องปฏิบัติการ โดยวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และลักษณะทางเคมีของถ้ำลอยไม้ยางพาราในการดูดซับสีโอดีและสีย้อม โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

2.2.1 การศึกษาลักษณะน้ำตัวอย่างจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก (Batik) และน้ำสีย้อมสังเคราะห์ (Dyestuff) ผ่านพารามิเตอร์ (รูปที่ 1 และตารางที่ 1) ตามวิธีมาตรฐานวิเคราะห์คุณภาพน้ำ [8]



(ก) น้ำทิ้งผ้าบาติก



(ข) น้ำสีย้อมสังเคราะห์

รูปที่ 1 น้ำทิ้งจากการผลิตผ้าบาติกและน้ำสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งผ้าบาติก	สีย้อมสังเคราะห์	วิธีการ
pH	✓	✓	4500-H ⁺ B ¹
TSS	✓		2540 D ²
TDS	✓		2540 C ³
SCOD ⁴	✓	✓	5220 B ⁵

¹ electrometric method

² total suspended solids dried at 103-105°C

³ total dissolved solids dried at 180°C

⁴ soluble chemical oxygen demand

⁵ open reflux method



โดยนำข้อมูลผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกมาใช้พิจารณาเลือกน้ำสีย้อมสังเคราะห์ที่มีช่วงค่า pH และซีโอดี ใกล้เคียงกับตัวอย่างน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก

2.2.2 การเตรียมเถ้าลอย

นำเถ้าลอยไม้ยางพารารวมทุกขนาดร่อนผ่านรูตะแกรงมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 150 และ 300 ไมครอน ตามลำดับ เพื่อคัดขนาดของเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว ล้างด้วยน้ำปราศจากอิออน (Deionized Water) ในอัตราส่วนเถ้าลอย 100 กรัม ต่อน้ำปราศจากอิออน 1 ลิตร กวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และตั้งทิ้งให้เถ้าลอยตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตะกอนเปียกของเถ้าลอยอบที่อุณหภูมิ 105-115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เถ้าลอยที่ผ่านการอบนำไปใส่ตู้ดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บรรจุใส่ภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันความชื้นก่อนนำไปใช้งาน [9] จากนั้นทดสอบการตกค้างซีโอดี ของเถ้าลอยไม้ยางพาราด้วยน้ำปราศจากอิออน โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย 10 กรัมต่อลิตร กวนด้วยเครื่องกวนสาร ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.3 การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย

ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยไม้ยางพาราจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ด้วยการวิเคราะห์พื้นที่ผิว รูพรุน และสารประกอบออกไซด์ ด้วยวิธีทดสอบ BET SEM และ XRF

2.2.4 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการดูดซับซีโอดีและสีย้อมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

สภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้แก่ pH ขนาดของเถ้าลอย ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ใช้ในการดูดซับซีโอดีและสีย้อม ในตัวอย่างน้ำสีย้อมสังเคราะห์ ดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การทดสอบผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

กำหนดอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อตัวอย่างน้ำสีย้อมสังเคราะห์คงที่ที่ 10 กรัมต่อลิตร โดยใช้เถ้าลอยรวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดขนาด) [10] ปรับค่า pH ของตัวอย่างน้ำสีย้อมสังเคราะห์ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้มีค่า pH 5 6 7 และ 8 (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.5) จากนั้นนำไปกวนผสมที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เถ้าลอยตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที

2.2.4.2 การทดสอบผลของขนาดเถ้าลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

กำหนดอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อตัวอย่างน้ำสีย้อมสังเคราะห์คงที่ที่ 10 กรัมต่อลิตร โดยทดสอบกับเถ้าลอยที่ผ่านการคัดแยกเป็น 4 ขนาด ได้แก่ 75 150 300 ไมครอน และเถ้าลอยรวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด) ทำการปรับค่า pH ที่ค่าที่เหมาะสม ซึ่งได้ผลจากขั้นตอนที่ 2.2.4.1 นำไปกวนผสมที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เถ้าลอยตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที



จากนั้นทดสอบปรับลดระยะเวลาสัมผัสในช่วงต่ำ และสูงกว่า 2 ชั่วโมง (120 นาที) คือที่เวลา 30 60 120 และ 180 นาที เพื่อประเมินเบื้องต้นถึงระยะเวลาสัมผัสต่ำที่สุด ที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดีไม่น้อยกว่าผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 2.2.4.1

2.2.4.3 การทดสอบผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

กำหนดอัตราส่วนของแฉะลอยต่อตัวอย่างน้ำซีโอดี 10 กรัมต่อลิตร โดยปรับค่า pH และใช้ขนาดแฉะลอยที่เหมาะสมจากผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 2.2.4.1 และ 2.2.4.2 จากนั้นนำปฏิกิริยาที่ความเร็ว 180-200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ที่ระยะเวลาสัมผัสเริ่มต้น 2-24 ชั่วโมง (เพิ่มขึ้นทุก ๆ 2 ชั่วโมง) เพื่อหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ เมื่อครบระยะเวลาสัมผัสที่ทดสอบตัวอย่างถูกตั้งทิ้งไว้ให้แฉะลอยตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที

2.2.4.4 การทดสอบผลของปริมาณแฉะลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

นำผลการทดสอบขนาดแฉะลอยที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 2.2.4.2 ในปริมาณที่เท่ากับ 5 15 25 50 100 และ 150 กรัม ต่อน้ำซีโอดี 1 ลิตร ตามลำดับ ทำการปรับ pH และใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 2.2.4.1 และ 2.2.4.3 ทุกตัวอย่างน้ำที่ผ่านการทดสอบในหัวข้อ 2.2.4.1 - 2.2.4.4 นำไปกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C™ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์

ซีโอดีในรูปละลายน้ำ และวัดค่าการดูดกลืนแสงของซีโอดีที่เลือก (หัวข้อ 2.2.1) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นซึ่งให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของซีโอดีที่เลือกด้วยการทดสอบหาในหลายช่วงค่าความยาวคลื่น ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงเฉพาะ และรายงานผลเป็นค่าร้อยละการดูดซับซีโอดีที่หายไป

2.2.4.5 การวิเคราะห์ผลการศึกษาร่วมกับไอโซเทอมการดูดซับ

ข้อมูลผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมจากขั้นตอน 2.2.4.4 นำเข้าสู่การวิเคราะห์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของแฉะลอยไมยางพารา (ไอโซเทอม) โดยพิจารณาเลือกไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) [11] และฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) [12] ซึ่งเป็นไอโซเทอมที่นิยมใช้อธิบายสมดุลการดูดซับ ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} \quad (1)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุล q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)



$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (2)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อ ปริมาณ ของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุล K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

3. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

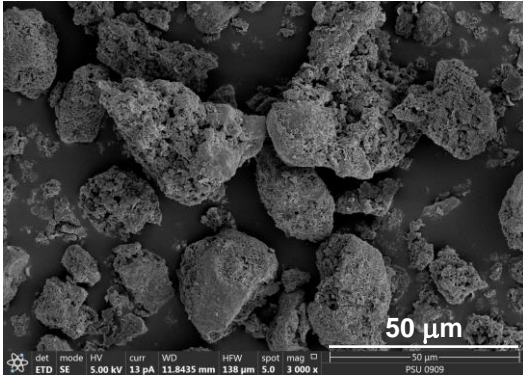
3.1 ลักษณะน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก และคุณสมบัติของเถ้าลอยไม้ยางพารา

ตารางที่ 2 แสดงลักษณะน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติก ได้แก่ น้ำซึลิกเกต น้ำล้างซึลิกเกต น้ำต้มผ้า และน้ำล้างหลังต้มผ้า ผลการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกมีค่า pH และ

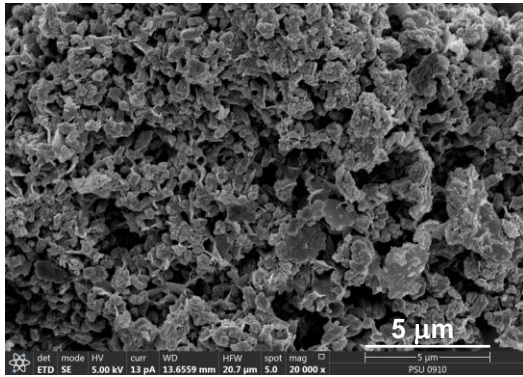
ซีโอดีสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม [13] ขณะที่ค่า TSS ของน้ำล้างต้มผ้า ค่า TDS ของน้ำซึลิกเกต และน้ำล้างต้มผ้า ที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด คุณสมบัติของเถ้าลอยไม้ยางพารารวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด) พบว่า มีลักษณะเป็นผงสีเทา มีหลายขนาดปะปน โดยมีสัดส่วนของขนาด 300 150 และ 75 ไมครอนอยู่ร้อยละ 16.11 3.89 และ 3.01 ตามลำดับ และมีขนาดใหญ่กว่า 300 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 76.99 มีพื้นผิวเป็นรูพรุนและโพรงกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว (รูปที่ 2) โดยมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 8.02 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวเฉลี่ย 65.03 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ที่พบมากที่สุดเ็นเถ้าลอยไม้ยางพารา คือ CaO SiO_2 MgO Al_2O_3 และ P_2O_5 มีสัดส่วนร้อยละ 43.61 9.19 4.47 3.65 และ 2.83 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) จากการทดสอบการตกค้างซีโอดี ด้วยน้ำปราศจากอิออนของเถ้าลอยไม้ยางพารา ชั้นตอนที่ 2.2.2

ตารางที่ 2 สมบัติของน้ำตัวอย่างจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกเบื้องต้นและสีย้อมสังเคราะห์

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์ (มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			
	pH	TSS	TDS	COD
น้ำซึลิกเกต	11.53±0.01	58.67±44.24	460.00±69.39	9,420.00±3.62
น้ำล้างซึลิกเกต	8.66±0.01	460.00±6.11	9,613.33±63.40	109.57±2.17
น้ำต้มผ้า	10.83±0.02	58.67±44.24	18,342.67±258.81	268.32±26.81
น้ำล้างหลังต้มผ้า	9.11±0.01	24.00±4.00	2,621.33±136.14	215.00±17.68
สีน้ำเงิน	6.52	-	-	17,371±1,938.89
สีเหลือง	5.96	-	-	11,750±1,697.06
สีแดง	5.09	-	-	375±353.55
ค่ามาตรฐาน	5.5-9	50	3000	120



(ก) กำลังขยาย 3,000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า

รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยไม้ยางพารา

พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีซีโอดีละลายออกมา ร้อยละ 12.34 ซึ่งค่าดังกล่าวนำไปพิจารณาร่วมกับผล ร้อยละการดูดซับซีโอดีที่เหลือ (หัวข้อ 2.2.4.1 - 2.2.4.4) อันเนื่องมาจากเถ้าลอยที่ตกค้างในน้ำตัวอย่าง

3.2 ผลของสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซีโอดี และสีย้อม

3.2.1 ผลของ pH

การทดสอบหาค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ ซีโอดีและสีย้อม รายงานเป็นค่าร้อยละของการดูดซับ เมื่อทดสอบกับตัวอย่างน้ำสีย้อมสังเคราะห์สีน้ำเงิน (ใช้ซีโอดี 579.00±12.78 มิลลิกรัมต่อลิตร ตารางที่ 2)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา

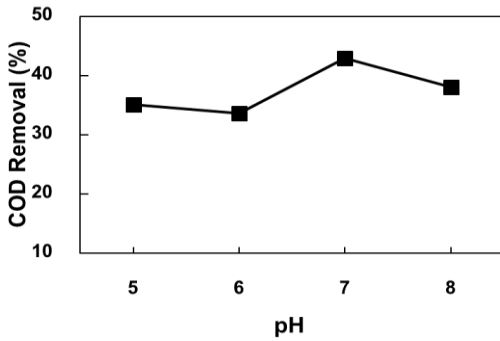
สารประกอบ	ร้อยละ	สารประกอบ	ร้อยละ
CaO	43.61	TiO ₂	0.19
CO ₂	16.16	SrO	0.15
CHNO	14.85	BaO	0.14
SiO ₂	9.19	ZnO	0.09
MgO	4.47	Na ₂ O	0.06
Al ₂ O ₃	3.65	Cl	0.05
P ₂ O ₅	2.83	CuO	0.02
K ₂ O	1.94	NiO	0.02
Fe ₂ O ₃	1.08	Rb ₂ O	0.02
SO ₃	0.76	PbO	0.01
MnO	0.72	ZrO ₂	0.01

โดยใช้เถ้าลอยไม้ยางพารารวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการ คัดแยกขนาด) จากรูปที่ 3 พบว่าร้อยละการดูดซับ ซีโอดี ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ค่าความคลาดเคลื่อน ±0.5) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35.04±0.81 33.63±0.81 42.94 ±0.77 และ 37.99±6.52 ตามลำดับ

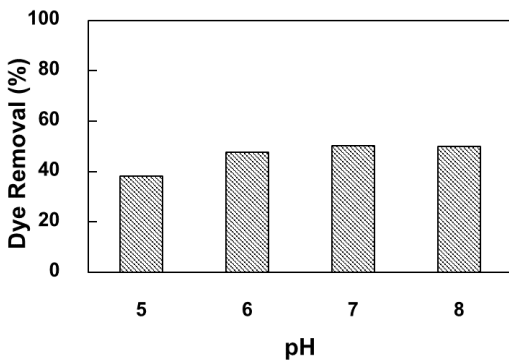
ค่าร้อยละการดูดซับค่าสีย้อม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 38.31±3.08 47.76±0.08 50.38±0.14 และ 9.97±0.30 ตามลำดับ (รูปที่ 4) ดังนั้น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา คือ pH 7 เนื่องจากมี ประสิทธิภาพในการดูดซับซีโอดีและสีย้อมสูงที่สุดเมื่อ เทียบกับประสิทธิภาพที่ pH 5 6 และ 8 เนื่องจากสีย้อมสังเคราะห์เป็นสีที่ละลายน้ำแล้วได้ประจุลบ มีค่า pH เป็นกรดอ่อน จึงดูดซับได้ดีในช่วง pH เป็นกลาง [14] ผลศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bekele และคณะ [15] ที่ทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลเรด ด้วยเถ้าลอยถ่านหินที่ pH 6.8 โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย



ถ่านหินระหว่าง 0.5-1.5 กรัม ได้ประสิทธิภาพการดูดซับช่วงร้อยละ 94.24-98.39



รูปที่ 3 ผลของ pH ต่อร้อยละการดูดซับซีโอดี



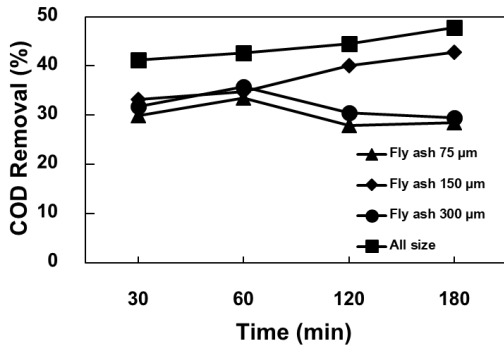
รูปที่ 4 ผลของ pH ต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม

3.2.2 ผลของขนาดถ้ำลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

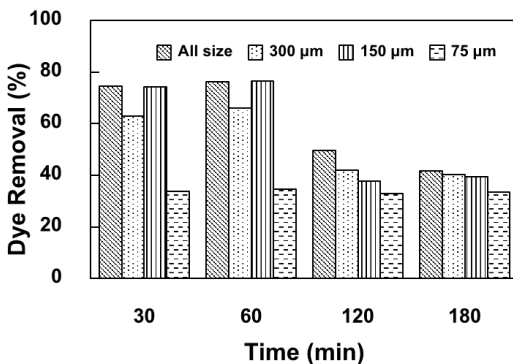
ขนาดถ้ำลอยไม่ียงพาราที่ผ่านการคัดขนาดทดสอบที่ระยะเวลาสัมผัส 30 60 120 และ 180 นาที ต่อประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดีและสีย้อมในน้ำสีย้อมสังเคราะห์ ที่ pH 7 (ผลทดสอบข้อ 3.2.1) ผลการทดสอบพบว่า ถ้ำลอยรวมทุกขนาด (ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด) และถ้ำลอยขนาด 150 ไมครอน มีแนวโน้มค่าร้อยละการดูดซับซีโอดีเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึง 180 นาที

(รูปที่ 5) โดยถ้ำลอยรวมทุกขนาดมีค่าร้อยละการดูดซับ เท่ากับ 41.21 ± 1.41 42.62 ± 1.41 44.50 ± 2.16 และ 47.79 ± 3.26 ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ โดยระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับซีโอดีสูงสุด และมีประสิทธิภาพสูงกว่าถ้ำลอยขนาด 150 ไมครอน เนื่องจากสีย้อมมีขนาดโมเลกุลเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.42 นาโนเมตร [16] ซึ่งมีขนาดเล็ก โดยกลไกการดูดซับอนุภาคสีย้อมสามารถเกิดที่ผิวด้านในโพรงของรูพรุนและผิวด้านนอกของถ้ำลอย และอาจเกิดการซ้อนทับกันของอนุภาคสีย้อม สำหรับถ้ำลอยขนาด 300 และ 75 ไมครอน ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงต่ำกว่าร้อยละ 30 เมื่อระยะเวลาสัมผัสสูงกว่า 60 นาที และจากการศึกษาการดูดซับสีย้อม (รูปที่ 6) พบว่าถ้ำลอยรวมทุกขนาด ถ้ำลอยขนาด 300 และ 150 ไมครอน มีแนวโน้มร้อยละการดูดซับสีย้อมลดลงหลังวันที่ 60 เช่นกัน เนื่องจากเกิดการคายดูดซับสีย้อม (Desorption) โดยซีโอดีและสีย้อมถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวของถ้ำลอย ซึ่งการคายดูดซับที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) [17] ในขณะที่ถ้ำลอยขนาด 75 ไมครอน มีแนวโน้มร้อยละการดูดซับค่าสีย้อมคงที่

ดังนั้นขนาดถ้ำลอยที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับซีโอดีและสีย้อมในการศึกษานี้ คือ ถ้ำลอยรวมทุกขนาด ซึ่งมีสัดส่วนของขนาดถ้ำลอยใหญ่กว่า 300 ไมครอน อยู่ร้อยละ 76.99 ที่มีลักษณะเป็นรูและมีโพรงภายในถ้ำลอย ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวดูดซับด้านใน (Internal Pore Surface) กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว (รูปที่ 2) ส่งผลให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดูดติด



รูปที่ 5 ขนาดถ้ำลอยต่อร้อยละการดูดซับซีโอดี

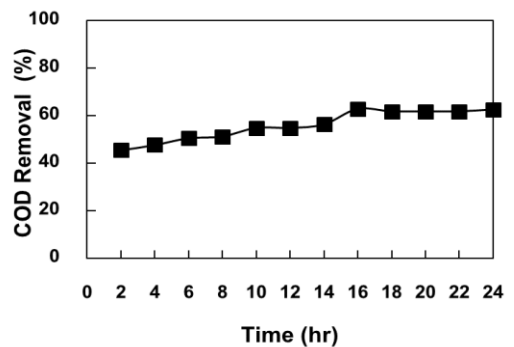


รูปที่ 6 ขนาดถ้ำลอยต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม

บนผิวภายในรูและโพรงบางส่วนหรือเรียงตัวจนเต็ม (Internal Pore Adsorption) งานวิจัยของ Chingono และคณะ [5] ทำการศึกษาการดูดซับน้ำทิ้งจากถ้ำลอยชานอ้อยพบว่า ถ้ำลอยชานอ้อยขนาดช่วง 90-125 ไมครอน มีประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดีสูงสุดที่ร้อยละ 55.37 และเมื่อขนาดถ้ำลอยชานอ้อยใหญ่กว่า 125 ไมครอน สมรรถนะการดูดซับลดลงเนื่องจากการถ่ายโอนมวล อย่างไรก็ตามในการดูดซับซีโอดีด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาดมีแนวโน้มการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น (รูปที่ 5) ดังนั้นจึงขยายผลของระยะเวลาสัมผัสจนถึง 24 ชั่วโมง (หัวข้อ 3.2.3)

3.2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับซีโอดีและสีย้อมในน้ำสีย้อมสังเคราะห์ โดยใช้ค่า pH ที่ 7 และใช้ถ้ำลอยรวมทุกขนาด (ผลทดสอบข้อ 3.2.1 และ 3.2.2) ร้อยละการดูดซับซีโอดีของถ้ำลอยไผ่ยางพาราที่ระยะเวลาสัมผัสเริ่มต้นที่ 2 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนถึงระยะเวลาสัมผัสที่ 14 ชั่วโมง พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ระหว่าง 45.52 ± 1.44 - 56.27 ± 5.02 เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 16 ค่าร้อยละการดูดซับซีโอดีเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณร้อยละ 63 จนเข้าสู่สมดุลในชั่วโมงที่ 18 (รูปที่ 7) และผลการดูดซับสีย้อม มีค่าร้อยละการดูดซับดีที่สุดในระยะเวลาสัมผัสระหว่าง 16-18 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 63.51 ± 3.59 - 63.66 ± 3.84 (รูปที่ 8) ซึ่งเป็นการดูดซับสีย้อมที่เกิดขึ้นอีกครั้งหลังเกิดการคายซับตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ถึงชั่วโมงที่ 14

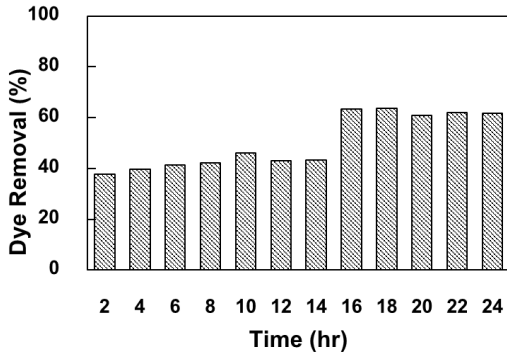


รูปที่ 7 ระยะเวลาสัมผัสต่อร้อยละการดูดซับซีโอดี

ดังนั้น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดีและสีย้อมด้วยถ้ำลอยไผ่ยางพารา คือ 16 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zaharia และ Suteu [18] พบว่าถ้ำลอยถ่านหิน



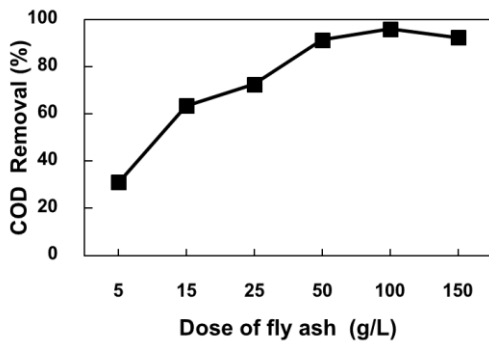
สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีในช่วงเวลาเริ่มต้น และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนคงที่ที่เวลา 16.5-24 ชั่วโมง



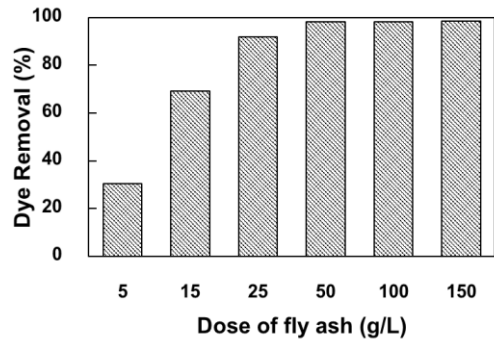
รูปที่ 8 ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม

3.2.4 ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ปริมาณเถ้าลอยไม่ยางพาราต่อการดูดซับซีโอดีและสีย้อม ในน้ำสีย้อมสังเคราะห์ โดยใช้ค่า pH 7 เถ้าลอยรวมทุกขนาด และระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 16 ชั่วโมง (ผลทดสอบข้อ 3.2.1 - 3.2.3) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดีและสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น พบร้อยละการดูดซับซีโอดีสูงสุดถึงร้อยละ 95.94±0.88 และมีร้อยละการดูดซับสีย้อมสูงสุดถึงร้อยละ 98.39±0.17 (รูปที่ 9 และ 10)



รูปที่ 9 ปริมาณเถ้าลอยต่อร้อยละการดูดซับซีโอดี



รูปที่ 10 ปริมาณเถ้าลอยต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม

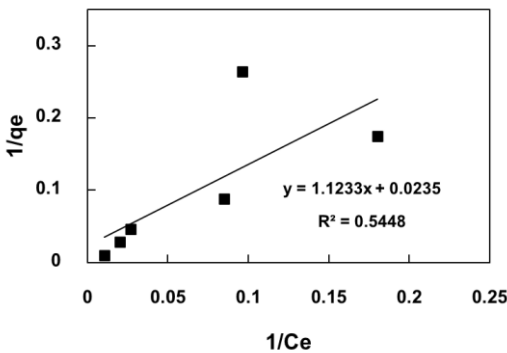
โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการดูดซับซีโอดีและสีย้อม คือ 50-100 กรัมต่อลิตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lalani และ Usman [19] ที่พบว่าร้อยละการดูดซับซีโอดีและสีย้อมเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

3.3 ผลของไอโซเทอมการดูดซับซีโอดีด้วยเถ้าลอยไม่ยางพารา

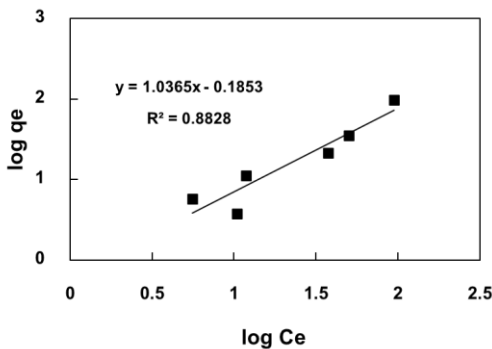
จากข้อมูลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมข้างต้น เมื่อนำผลของปริมาณเถ้าลอยไม่ยางพาราต่อประสิทธิภาพการดูดซับซีโอดี มาพิจารณาความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอมของฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) ผลการศึกษา (รูปที่ 11 และ 12) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการดูดซับ (R^2) ไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดิช มีค่าเท่ากับ 0.5448 และ 0.8828 ตามลำดับ ซึ่งการดูดซับของเถ้าลอยไม่ยางพาราสอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดิชมากกว่าไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยไอโซเทอมฟรุนดิชมีค่า $\frac{1}{n}$ เท่ากับ 1.0365 หรือมีค่าประมาณ 1 แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบเส้นตรง [20] และมีค่า K_f เท่ากับ 0.653 (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่ง



พฤติกรรมของการดูดซับของไอโซเทอมฟรอนดิชเป็นลักษณะการดูดซับทางกายภาพ มีการซ้อนทับกันของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีอิสระในการจับหรือยึดเกาะได้ทั่วพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น และมีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [21]



รูปที่ 11 ไอโซเทอมแลงเมียร์ต่อการดูดซับซีโอดี



รูปที่ 12 ไอโซเทอมฟรอนดิชต่อการดูดซับซีโอดี

4. บทสรุป

ประสิทธิภาพในการดูดซับซีโอดีและสีย้อมจากน้ำสีย้อมสังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยไม้ยางพารา ได้สภาวะที่เหมาะสม ที่ pH 7 ด้วยถ้ำลอยรวมทุกขนาดระยะเวลาสัมผัสที่ 16 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณถ้ำลอย 100 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับซีโอดี

และสีย้อม สูงสุด ประมาณ ร้อยละ 96 และ 98 ตามลำดับ และมีแนวโน้มการดูดซับเข้าสู่สมดุลและคงที่ภายหลังจากระยะเวลาสัมผัส 18 ชั่วโมง ผลศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรอนดิช ด้วยค่า R² 0.8828 ดังนั้นถ้ำลอยจากไม้ยางพาราในพื้นที่ภาคใต้จึงเป็นวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำสำหรับปรับสภาพน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและครัวเรือนที่มีการผลิตผ้าบาติกเพื่อลดซีโอดีและสีย้อมก่อนเข้าสู่การบำบัดต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา โรงไฟฟ้าชีวมวลและอุตสาหกรรมผ้าบาติก จังหวัดยะลา ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ้ำลอยไม้ยางพารา และตัวอย่างน้ำทิ้งผ้าบาติก

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M.F. Siddiqui, Z.A. Wahid and M. Sakinah, Bioremediation and biofouling perspective of real batik effluent by indigenous bacteria, International Journal of Chemical and Environmental Engineering, 2011, 2(5), 302-308.

[2] W. Pimpa and C. Pimpa, Synthesis and utilization of the rice straw based adsorbents for wastewater treatment, Research Report of Agriculture, Naresuan University, 2014. (in Thai)



- [3] M. Visa, L. Isac and A. Duta, Fly ash adsorbents for multi-cation wastewater treatment, *Applied Surface Science*, 2012, 258(17), 6345-6352.
- [4] G. Patra, R. Barnwal, S.K. Behera and B.C. Meikap, Removal of dyes from aqueous solution by sorption with fly ash using a hydrocyclone, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(4), 5204-5211.
- [5] K.E. Chingono, E. Sanganyado, E. Bere and B. Yalala, Adsorption of sugarcane vinasse effluent on bagasse fly ash: A parametric and kinetic study, *Journal of Environmental Management*, 2018, 224, 182-190.
- [6] Rubber Intelligence Unit, Block from Para Rubber Wood Fly Ash, Available: http://www.rubber.oie.go.th/File/10_อิฐจากเถ้าลอยไม้ยางพารา.pdf (in Thai)
- [7] A. Hawa, Properties of pumice lightweight concrete containing rubber wood fly ash and rice husk ash, Master Thesis of Engineering in Civil Engineering, Prince of Songkla University, Thailand. 2008.
- [8] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington D.C., USA, 2017.
- [9] M. Visa, L. Andronic and A. Duta, Fly ash - TiO₂ nanocomposite material for multi - pollutants wastewater treatment, *Journal of Environmental Management*, 2015, 150, 336-343.
- [10] W. Kitchainukul, Adsorption of mercury contaminated synthetic water by fly ash from coal fired power plant, *Bulletin of Applied Science*, 2013, 2(2), 35-39.
- [11] I. Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *Journal of the American Chemical Society*, 1918, 40, 1361-1403.
- [12] H.M.F. Freundlich, Over the adsorption in solution, *The Journal of Physical Chemistry*, 1906, 57, 385-470.
- [13] Ministry of industry, Industrial Effluent Standards, Available: <https://www.diw.go.th/ha/wk/news/11.PDF>, 18 December 2019. (in Thai)
- [14] R. Srimoon, Dyes treatment in wastewater using adsorption processes, *KKU Science Journal*, 2016, 44(3), 419-434. (in Thai)
- [15] B.A. Bekele, M.A Balcha, Ayalew and F.B. Demelash, Adsorption of methyl red on coal fly ash from aqueous solution, *Chemistry and Materials Research*, 2018, 10(4), 13-19.



- [16] C.H. Maeda, C.A. Araki, A.L. Moretti, M.A.S.D. De Barros and P.A. Arroyo, Adsorption and desorption cycles of reactive blue dye BF-5G dye in a bone char fixed-bed column, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26, 28500-28509.
- [17] R.M. Razanajatovo, J. Ding, S. Zhang, H. Jiang and H. Zou, Sorption and desorption of selected pharmaceuticals by polyethylene microplastics, *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136, 516-523.
- [18] C. Zaharia and D. Suteu, Coal fly ash as adsorptive material for treatment of a real textile effluent: operating parameters and treatment efficiency, *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20: 2226 - 2235.
- [19] V. Lalani and S.M. Usman, A study on removal of pollutants using fly ash adsorbent from dyes wastewater, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2020, 7(5), 417-422
- [20] N.A.B. Rohaizar, N.B.A. Hadi and W.C. Sien, Removal of Cu (II) from water by adsorption on chicken eggshell, *International Journal of Engineering & Technology*, 2013, 13(1), 40-45.
- [21] I. Boonyuen, Adsorption of lignin and tannin by wasted activated carbon used as ballasting agent from activated sludge process, Master Thesis of Engineering Program in Environmental Engineering, Chulalongkorn University, Thailand. 2009. (in Thai)

การลดระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบเพื่อลดต้นทุนการจัดเก็บ

สุทธิดา ไชยกิจ* และ ชูศักดิ์ พรสิงห์

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ,
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: c.suthida94@gmail.com

วันที่รับบทความ: 13 สิงหาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 9 กุมภาพันธ์ 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 9 กุมภาพันธ์ 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 4 มีนาคม 2564

บทคัดย่อ: บริษัทกรณีศึกษาประสบปัญหาได้รับวัตถุดิบล่าช้าบ่อยครั้ง โดยเฉพาะวัตถุดิบเคมีที่ซื้อจากต่างประเทศที่มีเวลาสั่งซื้อนานและมีความแปรปรวนสูง จึงเพิ่มปริมาณวัตถุดิบคงคลังให้สูงขึ้นเพื่อป้องกันการขาดแคลน ส่งผลให้เกิดต้นทุนการจัดเก็บสูงและพื้นที่จัดเก็บไม่เพียงพอ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าขั้นตอนขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรมีระยะเวลาดำเนินงานที่แปรปรวนสูงกว่าขั้นตอนอื่น ส่งผลให้มีคำสั่งซื้อที่ล่าช้าเกินกำหนดถึง 82.4% สาเหตุเกิดจากขั้นตอนการทำงานที่มีความยุ่งยากส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการประสานงานและขาดการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนกจึงเกิดการผิดพลาดอยู่บ่อยครั้ง งานวิจัยนี้จึงปรับปรุงการทำงานโดยนำหลักการ ECRS และการบริหารจัดการสื่อสารข้อมูลโดยโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ มาใช้ในการติดตามคำสั่งซื้อและการแบ่งปันข้อมูลเพื่อลดระยะเวลาในการสั่งซื้อวัตถุดิบ จากการเก็บข้อมูลหลังปรับปรุงพบว่าสามารถลดระยะเวลาสั่งซื้อเฉลี่ยลงได้ 7.04 วัน จาก 95.35 วัน ลดพื้นที่จัดเก็บลงได้ 34.8 ตารางเมตร จาก 136 ตารางเมตร และลดต้นทุนวัตถุดิบคงคลังได้ 3.4 ล้านบาท จาก 11.5 ล้านบาท

คำสำคัญ: ระยะเวลาการสั่งซื้อ; วัตถุดิบคงคลัง; ECRS; ไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ

Raw Material Purchasing Lead Time Reduction for Reducing Inventory Carrying Cost

Suthida Chaiyakit* and Choosak Pornsing

Division of Engineering Management, Department of Industrial Engineering and Management,
Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

* Corresponding author, E-mail: c.suthida94@gmail.com

Received: 13 August 2020; Revised 9 February 2021; Accepted: 9 February 2021

Online Published: 4 March 2021

Abstract: The case study company was impacted by often late receive raw materials, especially imported raw materials that has long and high variability purchasing lead time. The company had decided to increase safety stock level to prevent a raw material shortage, which caused high raw material holding cost and storage area. After researched, found the most variable part is the company's internal approval process. The approval process affected 82.4% late behind the standard procedure. The main reason is complicated working steps, lack of information sharing and linkage between departments. Therefore, ECRS and management information systems; i.e. Microsoft power BI program were applied to simplify working activities and share important information for reducing purchasing lead time. As a result, the purchasing lead time of raw materials was decreased by 7.04 days from the original lead time of 95.35 days, the raw materials storage area was decreased by 34.8 m² from 136 m², and carrying cost was decreased by 3.4 million baht from 11.5 million baht.

Keywords: Purchasing lead time; Inventory; ECRS; Microsoft power BI



1. บทนำ

วัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญของทุกอุตสาหกรรม โดยเฉพาะวัตถุดิบที่ต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ ซึ่งจะต้องมีการวางแผนการจัดการวัตถุดิบที่เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้มีความสามารถในการตอบสนองความต้องการวัตถุดิบของกระบวนการผลิต ในการวางแผนการจัดการวัตถุดิบจำเป็นต้องศึกษาตัวแปรสำคัญที่จะส่งผลต่อการวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบ ได้แก่ ความต้องการวัตถุดิบ ระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบ ความแปรปรวนของความต้องการวัตถุดิบ ความแปรปรวนของระยะเวลาการสั่งซื้อ และปริมาณการสั่งซื้อ เพื่อทำการควบคุมปัจจัยดังกล่าวไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการการสั่งซื้อวัตถุดิบ หากไม่เช่นนั้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตอย่างมาก ตัวอย่างเช่น การได้รับวัตถุดิบล่าช้าอาจทำให้เกิดการขาดแคลนวัตถุดิบ กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงัก ส่งผลให้ไม่สามารถผลิตสินค้าเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ ทำให้เสียโอกาสในการขายสินค้าหรือเกิดสถานการณ์ร้ายแรงที่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของบริษัทที่อาจนำไปสู่การสูญเสียฐานลูกค้าในที่สุด

บริษัท ทรูศึกษาในโรงงานวิจัยนี้เป็นบริษัทผู้ประกอบการผลิตผ้าเบรกสำหรับรถยนต์และรถบรรทุกแห่งหนึ่งในประเทศไทย ที่มีรูปแบบการผลิตแบบผสมทั้งการผลิตแบบเพื่อเก็บไว้ในคลังรอการขาย (Make to Stock) และการผลิตแบบตามสั่ง (Make to Order) โดยจะส่งผลให้ความต้องการวัตถุดิบของกระบวนการผลิตมีความแปรปรวนมาก โดยในปี พ.ศ.2562 บริษัทมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 170,000 ชุดต่อเดือน ซึ่งมูลค่าการสั่งซื้อวัตถุดิบ

โดยรวมของบริษัท 330 ล้านบาท สามารถแบ่งวัตถุดิบได้เป็น 3 ประเภท คือ สารเคมี เหล็ก และบรรจุภัณฑ์ โดยการวางแผนความต้องการวัตถุดิบในการผลิตจะสามารถพยากรณ์ปริมาณการใช้วัตถุดิบล่วงหน้าจากแผนการผลิตที่มีการวางแผนล่วงหน้าได้ ทำให้มีการคำนวณระดับวัตถุดิบคงคลังที่เหลือได้ก่อนมีการเบิกใช้ในกระบวนการผลิต ยกเว้นวัตถุดิบสารเคมีที่จะมีการสั่งซื้อเมื่อมีการเบิกใช้วัตถุดิบไปแล้วจนถึงจุดการสั่งซื้อใหม่ (Re-Order Point) เนื่องจากสูตรการผลิตและอัตราส่วนสารเคมีเป็นความลับทางการค้าของบริษัท ทำให้พนักงานไม่สามารถคำนวณการใช้งานล่วงหน้าได้ หากการสั่งซื้อเกิดความล่าช้าก็จะมีความเสี่ยงในการขาดแคลนมากกว่าวัตถุดิบประเภทอื่น จึงมีการเพิ่มระดับการจัดเก็บวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัย (Safety Stock Level) เพื่อป้องกันการขาดแคลน ส่งผลให้มีระดับวัตถุดิบคงคลังมากเกินไป โดยมูลค่าการสั่งซื้อโดยรวมวัตถุดิบเคมีในปี พ.ศ.2562 สูงถึง 138 ล้านบาท คิดเป็น 42% ของมูลค่าการสั่งซื้อวัตถุดิบทั้งหมด ซึ่งการเพิ่มระดับการจัดเก็บของวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบที่มากเกินไปเช่นนี้ ทำให้บริษัทประสบปัญหาในการบริหารคลังวัตถุดิบ เกิดต้นทุนวัตถุดิบคงคลังที่สูง และยังส่งผลให้พื้นที่ในการจัดเก็บมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ จากการศึกษาการทำงานและข้อมูลการสั่งซื้อพบว่าขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนของการขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรนั้นมีความแปรปรวนของระยะเวลาที่สูงผิดปกติ (ค่าความแปรปรวนมากกว่า 100% คือมีความแปรปรวนมากกว่าระยะเวลาเฉลี่ยของการดำเนินงานในขั้นตอนนั้น) ส่งผลต่อระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบ



และแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบอย่างมาก ซึ่งอาจทำให้สินค้ามีโอกาสเกิดการขาดแคลนสูงขึ้น จึงต้องมีการปรับปรุงขั้นตอนการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงต้องการปรับลดระยะเวลาในกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบลง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับการบริหารคลังวัตถุดิบ ให้สามารถปรับเปลี่ยนระดับการจัดเก็บของวัตถุดิบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบันและความต้องการวัตถุดิบที่แปรปรวนของการผลิตได้ ไม่จำเป็นต้องมีระดับวัตถุดิบคงคลังมากเกินไป เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบคงคลังและพื้นที่จัดเก็บลงได้

ขอบเขตของงานวิจัยได้ดำเนินการศึกษากระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบสารเคมีของผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกรถยนต์ตั้งแต่ขั้นต้นของการสั่งซื้อ ระยะเวลาในการสั่งซื้อ และข้อจำกัดในการสั่งซื้อของวัตถุดิบแต่ละชนิด โดยใช้หลักการศึกษางาน [1] เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการสั่งซื้อ แล้วทำการปรับปรุงการดำเนินงานด้วยหลักการ ECRS และประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ (Microsoft Power BI) กับกระบวนการสั่งซื้อภายในองค์กร เพื่อการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนกและติดตามการดำเนินงานให้อยู่ในเวลาที่กำหนดโดยดำเนินการศึกษาในกลุ่มของวัตถุดิบเคมีที่ส่งจากต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผ้าเบรก มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก มีมูลค่าการสั่งซื้อสูง ใช้ระยะเวลาในการสั่งซื้อนานและมีความแปรปรวนสูงถึง 95.3 ± 19.5 วัน ซึ่งมากกว่าเวลาที่บริษัทกำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 93 วัน ทำให้วัตถุดิบกลุ่มนี้มีความเสี่ยงในการขาดแคลนมากกว่า

วัตถุดิบกลุ่มอื่น และหากขาดแคลนก็จะส่งผลกระทบต่อการผลิตอย่างมาก

โดยหลักการ ECRS [2] เป็นหลักการที่ใช้ในการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน ซึ่งจะทำการศึกษารายละเอียดของการดำเนินงานของกระบวนการเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงขั้นตอนการดำเนินงานและควบคุมตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบแล้วทำการวิเคราะห์ปรับลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นลง (Elimination), การรวมขั้นตอนการทำงานที่สามารถดำเนินการในขั้นตอนเดียวกันได้เข้าด้วยกัน (Combine), การจัดเรียงลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ (Rearrangement) เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการทำงาน, หรือการปรับปรุงการดำเนินงาน เพื่อให้ขั้นตอนการทำงานง่ายขึ้นหรือสะดวกรวดเร็วขึ้น (Simplification) ซึ่งในปัจจุบัน ECRS เป็นหลักการในการปรับปรุงการทำงานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ในการปรับปรุงการขนส่งของบริษัทขนส่งชิ้นส่วนยานยนต์ ลัตตาวัลย์ [3] ใช้หลักการ ECRS ปรับปรุงกิจกรรมการดำเนินงาน โดยภายหลังการปรับปรุงสามารถลดเวลาในการทำงานลงจากเดิม 50% และสามารถรับ-ส่งสินค้าได้ทันตามกำหนดเวลา

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการประยุกต์ใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า ไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ [4] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างภาพข้อมูล (Data Visualization) เพื่อนำเสนอข้อมูลที่มีการเก็บรวบรวมไว้ให้สามารถมองเห็นถึงแนวโน้มและภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำ โดยจะสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทั้งผ่านทางแอปพลิเคชันบนมือถือ โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ หรือผ่านทางเว็บไซต์ของโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การศึกษากระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบ

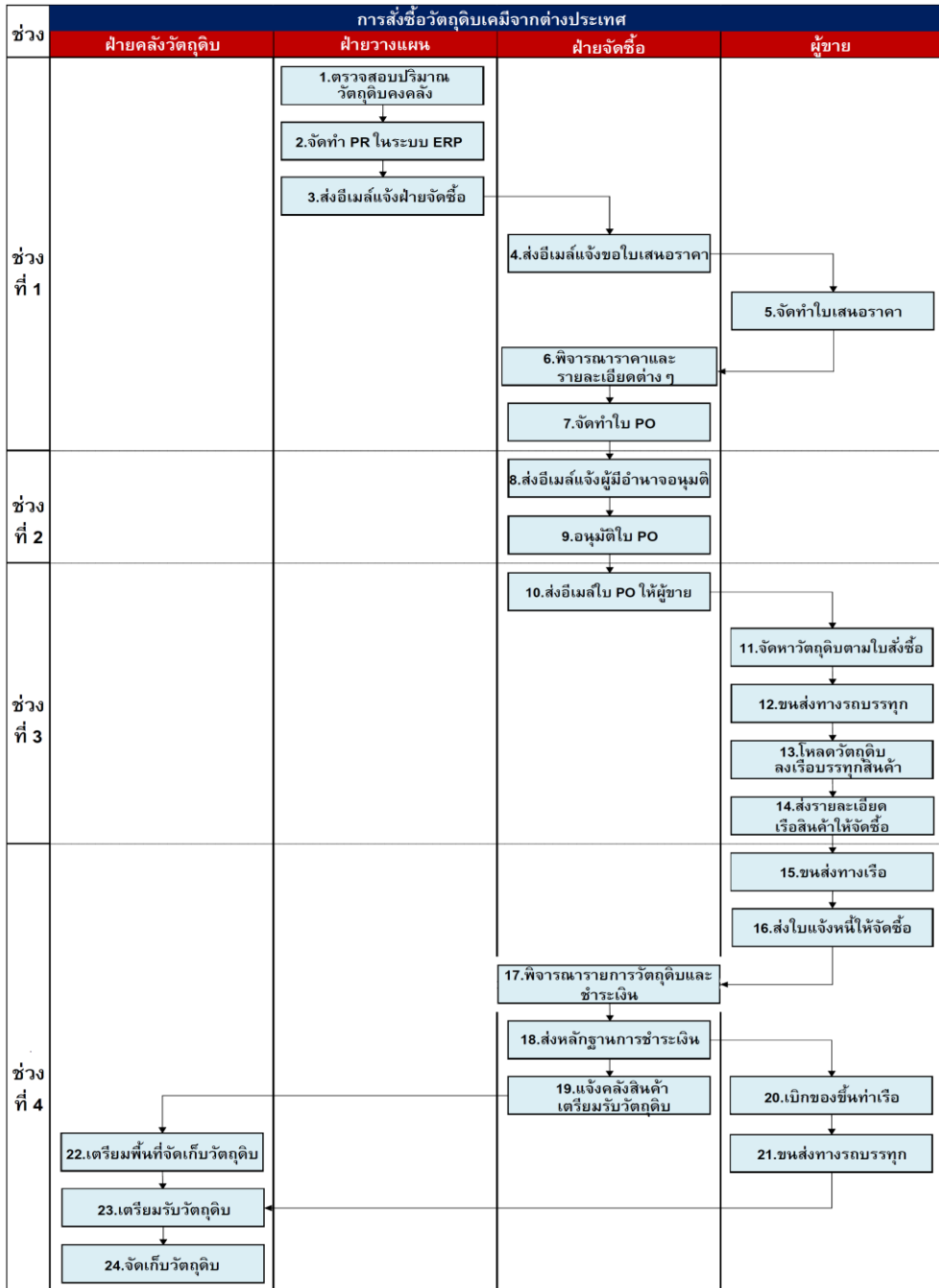
กระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบ ถือเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการผลิตสินค้าและผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อให้มีการดำเนินการจัดซื้อจัดหาวัตถุดิบที่มีคุณภาพมาใช้ในการผลิตได้ทันเวลา จากวัตถุดิบทั้งหมดของผ้าเบรคที่เคยได้กล่าวมา งานวิจัยนี้ได้เลือกทำการปรับปรุงกระบวนการสั่งซื้อของวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศที่มีความเสี่ยงในการขาดแคลนมากที่สุด ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 5 รายการ ได้แก่ CB01, CB02, CB03, CB04 และ CB05 โดยมีมูลค่ารวมสูงถึง 26.3 ล้านบาทต่อปี ซึ่งจะเริ่มจากการศึกษาขั้นตอนการดำเนินงานของกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบสารเคมีจากต่างประเทศ พบว่ามีขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 24 ขั้นตอน จะสามารถรวมขั้นตอนการทำงานเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้เป็น 4 ช่วงดังรูปที่ 2 ช่วงที่ 1 การจัดทำใบคำขอสั่งซื้อ (Purchasing Requisition) การขอใบเสนอราคา ไปจนถึงการจัดทำใบคำสั่งซื้อ (Purchasing Order), ช่วงที่ 2 ช่วงการอนุมัติคำสั่งซื้อโดยผู้มีอำนาจในการอนุมัติ, ช่วงที่ 3 ช่วงการจัดหาและผลิตวัตถุดิบของผู้ขายวัตถุดิบ ตลอดจนการขนย้ายลงเรือขนส่งสินค้า, และช่วงที่ 4 ช่วงการขนส่งสินค้าทางเรือจากทางเรือต้นทางและการขนส่งทางบกจนถึงโรงงานปลายทาง ไปจนถึงการตรวจรับวัตถุดิบ ซึ่งจะมีแผนกที่เกี่ยวข้องหลัก ๆ 4 แผนก ได้แก่ ฝ่ายวางแผนผลิต เป็นผู้ตรวจสอบระดับวัตถุดิบคงคลังและออกเอกสารคำขอสั่งซื้อวัตถุดิบ ฝ่ายจัดซื้อ เป็นผู้ดำเนินการติดต่อสั่งซื้อวัตถุดิบจากผู้ขายและผู้จัดการฝ่ายจะมีอำนาจอนุมัติคำสั่งซื้อ ฝ่ายคลังวัตถุดิบ ผู้บริหารดูแลการจัดเก็บ

หรือการเบิกจ่ายวัตถุดิบคงคลัง และผู้ขายวัตถุดิบเป็นผู้ผลิตหรือจำหน่ายวัตถุดิบให้กับบริษัท

จากนั้นได้ศึกษาระยะเวลาการดำเนินงานของการสั่งซื้อวัตถุดิบในแต่ละช่วง โดยจะเริ่มพิจารณาจากข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบย้อนหลัง 48 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2559 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 แล้วนำมาเปรียบเทียบความแปรปรวนของระยะเวลาการดำเนินงาน เพื่อหาขั้นตอนที่ส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนมากที่สุด แต่เนื่องจากข้อมูลในแต่ละชุดมีค่าต่างกัน จึงส่งผลให้ไม่สามารถใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการเปรียบเทียบได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation หรือ C.V.) [8] ซึ่งจะเป็นร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation หรือ S.D.) ต่อค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการสั่งซื้อ (Average) ทำให้สามารถเปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างชุดข้อมูลได้ [9] โดยในการดำเนินงานพบว่าสามารถเก็บข้อมูลระยะเวลาได้เป็นช่วงการดำเนินงานเท่านั้น ไม่สามารถระบุรายละเอียดระยะเวลาในแต่ละขั้นตอน ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าทางสถิติของระยะเวลาการดำเนินงาน

รายการ	ช่วง 1	ช่วง 2	ช่วง 3	ช่วง 4
Max	79	56	95	56
Min	0	0	15	8
ค่าเฉลี่ย	3.4	6.7	52.4	32.8
S.D.	3.5	6.0	17.1	3.8
%C.V.	104.1	90.2	32.5	11.6



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศ

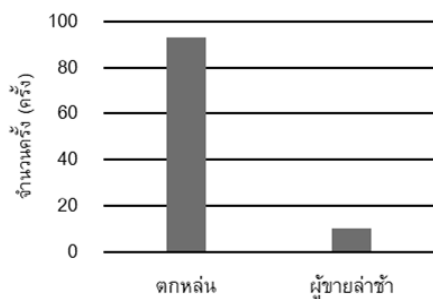


จากตารางที่ 1 พบว่าช่วงการทำงานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนมากคือขั้นตอนการทำงานช่วงที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นช่วงการดำเนินการขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรที่มีนโยบายที่กำหนดให้มีระยะเวลาการดำเนินการรวม 2 ช่วงไม่เกิน 3 วัน จากข้อมูลพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานรวมของช่วงที่ 1 และ 2 มีทั้งสามารถดำเนินการเสร็จภายในวันเดียวไปจนถึงใช้ระยะเวลานานถึง 80 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการดำเนินงานรวม 2 ช่วงเท่ากับ 10.1 วัน ซึ่งจะพบว่าข้อมูลมีความแปรปรวนมากและจำนวนครั้งที่มียุทธศาสตร์การดำเนินงานมากกว่าเวลามาตรฐานมีถึง 103 ครั้ง จากทั้งหมด 125 คำสั่งซื้อหรือคิดเป็น 82.4% ดังนั้นจึงจะนำขั้นตอนการขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรนี้มาศึกษาเพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงาน ทำให้เกิดความล่าช้าขึ้นในการสั่งซื้อ

2.2 การศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบไม่เป็นไปตามเวลาที่กำหนด

เมื่อดำเนินการศึกษาขั้นตอนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศในส่วนของการขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรตามหัวข้อ 2.1 แล้วนำมาสร้างแผนผังขั้นตอนการปฏิบัติงานตามรูปที่ 2 และดำเนินการตรวจสอบบันทึกสาเหตุการล่าช้าและสัมภาษณ์พนักงานผู้ปฏิบัติงาน เพื่อหาสาเหตุความแปรปรวนของระยะเวลาสั่งซื้อ พบว่าการดำเนินงานในช่วงการขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรนั้น มีขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมด 9 ขั้นตอน (ขั้นตอนที่ 1-9) แต่ต้องมีการประสานงานกันระหว่างแผนกเกิดขึ้นหลายครั้งทั้งทางฝ่ายวางแผน ฝ่ายจัดซื้อ และผู้ขายวัตถุดิบ ซึ่ง

ในปัจจุบันยังไม่มีกระบวนการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนก เช่น ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบคงคลังจากฝ่ายวางแผน เพื่อให้ฝ่ายจัดซื้อคำนวณเวลาในการสั่งซื้อวัตถุดิบ หรือข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบว่าอยู่ในขั้นตอนใด เพื่อให้ฝ่ายวางแผนสามารถบริหารจัดการสต็อกวัตถุดิบได้อย่างเหมาะสม ทำให้การดำเนินงานในการสั่งซื้อวัตถุดิบมีความไม่ต่อเนื่อง แผนกต้นทางที่เป็นผู้สั่งซื้อไม่สามารถทราบถึงสถานะของคำสั่งซื้อนั้น ก่อเกิดการผิดพลาดจากการดำเนินงานบ่อยครั้ง เช่น ขั้นตอนการอนุมัติไม่มีการส่งอีเมลแจ้งผู้บริหาร แผนกต้นสังกัดไม่ได้ส่งข้อมูลรายละเอียดวัตถุดิบที่ต้องการสั่งซื้อให้ฝ่ายจัดซื้อ หรือฝ่ายจัดซื้อไม่ได้ส่งอีเมลถึงผู้ขาย โดยคำสั่งซื้อที่เกิดความล่าช้าที่มีสาเหตุความผิดพลาดจากการดำเนินงานทำให้เกิดการตกหล่นเป็นจำนวน 93 ครั้งจากคำสั่งซื้อที่เกิดล่าช้า 103 ครั้งคิดเป็น 90% ของคำสั่งซื้อล่าช้าทั้งหมด ดังรูปที่ 3 และยังพบว่าการทำงานนั้นยังมีความยุ่งยากซับซ้อนในบางส่วน เช่น การตรวจติดตามคำสั่งซื้อที่อยู่ในแต่ละขั้นตอนที่ต้องตรวจติดตามทีละคำสั่งซื้อ ทำให้เสียเวลาในการดำเนินงาน หรือฝ่ายอื่นที่เกี่ยวข้องไม่สามารถติดตามความคืบหน้าของการดำเนินงานได้ เป็นต้น



รูปที่ 3 สาเหตุของความล่าช้าในการสั่งซื้อวัตถุดิบ



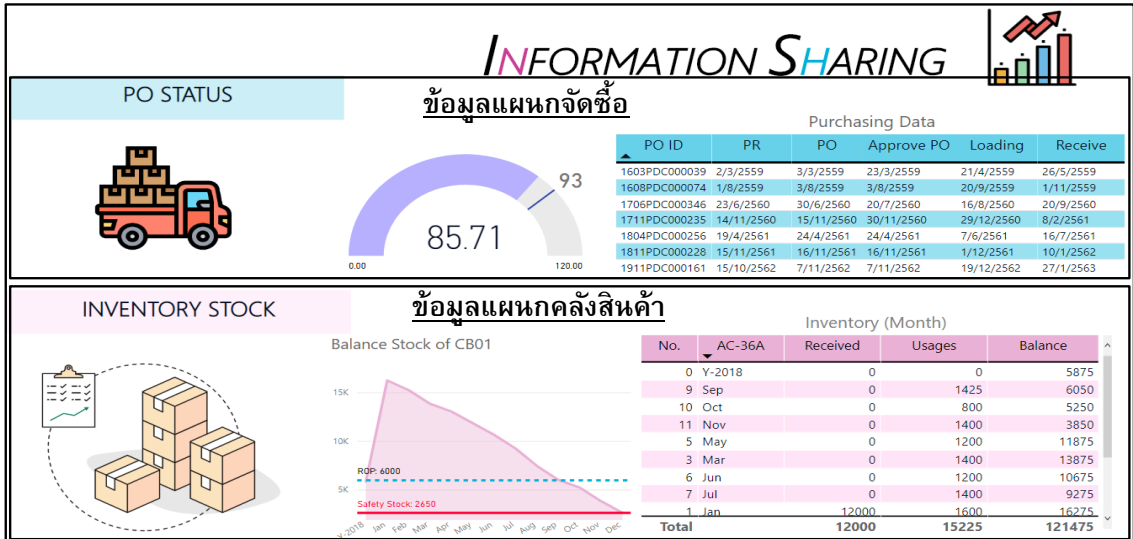
2.3 การปรับปรุงการทำงาน เพื่อลดเวลาในการสั่งซื้อวัตถุดิบ

เมื่อทราบว่าสาเหตุของความล่าช้าส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมาจากความผิดพลาดด้านการประสานงาน ทำให้เกิดการตกหล่นของคำสั่งซื้ออยู่บ่อยครั้ง ผู้วิจัยนี้จึงได้นำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้ในการปรับขั้นตอนการทำงานให้พนักงานสามารถปฏิบัติงานได้ง่ายขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการสั่งซื้อวัตถุดิบ โดยได้มีการนำโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดูแนวโน้มข้อมูลและเห็นภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วผ่านทางแอปพลิเคชันในมือถือ หน้าเว็บไซต์ หรือโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้พนักงานสามารถตรวจติดตามข้อมูลของคำสั่งซื้อได้ง่ายขึ้นและมีการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนกที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะส่งผลให้การประสานงานระหว่างแผนกดียิ่งขึ้น และสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ร่วมกันทั้งระดับวัตถุดิบคงคลังและการดำเนินการจัดซื้อ เพื่อวางแผนป้องกันการขาดแคลนวัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

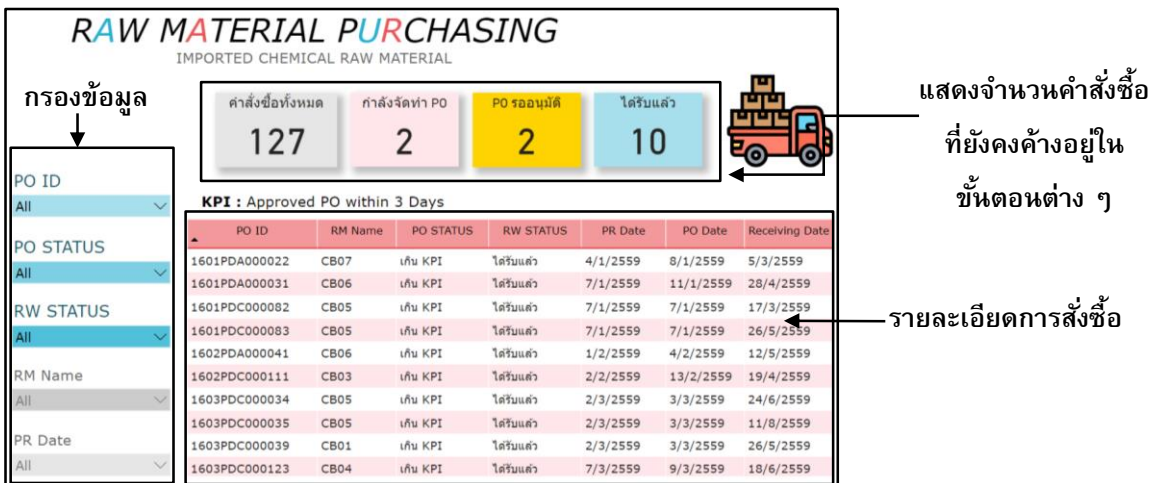
การออกแบบหน้ารายงานของโปรแกรมต้องคำนึงถึงการนำเสนอข้อมูลให้ผู้ใช้งานนั้นได้รับข้อมูลที่ต้องการอย่างครบถ้วน โดยข้อมูลอาจถูกแปลงเป็นกราฟ แผนภูมิ หรือตัวเลขแสดงผลต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจความหมายได้ง่ายและต้องคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานสำหรับผู้ใช้งานทั้งผู้บริหารและพนักงานที่เกี่ยวข้องและง่ายต่อการกรอกข้อมูลของผู้ปฏิบัติงาน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบร่วมกับทางบริษัทกรณีศึกษา เพื่อให้รูปแบบการนำเสนอเป็นไปอย่างมีประโยชน์และตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานมากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้

ฐานข้อมูลในโปรแกรมไมโครซอฟท์ เอกเซล (Microsoft Excel) เพื่อให้สอดคล้องกับฐานข้อมูลของบริษัท โดยการออกแบบรูปแบบหน้าแสดงผลของโปรแกรมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 เป็นการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนกดังรูปที่ 4 ที่จะประกอบไปด้วยข้อมูลการดำเนินงานในแผนกต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในที่นี้จะเป็ข้อมูลระดับวัตถุดิบคงคลังจากแผนกคลังสินค้า และรายละเอียดการดำเนินงานของแต่ละคำสั่งซื้อจากแผนกจัดซื้อ และมีการแจ้งเตือนเมื่อวัตถุดิบคงคลังถึงระดับที่จะต้องสั่งซื้อใหม่ ซึ่งจะสามารถลดขั้นตอนที่ 1 การตรวจสอบปริมาณวัตถุดิบคงคลังที่ฝ่ายวางแผนผลิตต้องดำเนินการได้ และโปรแกรมในส่วนที่สองคือการตรวจติดตามข้อมูลของคำสั่งซื้อวัตถุดิบดังรูปที่ 5 ในส่วนนี้จะมีการนำข้อมูลการสั่งซื้อมาคำนวณร่วมกับระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อแสดงสถานะของคำสั่งซื้อ โดยการแสดงผลจะแสดงเป็นสถานะของใบคำสั่งซื้อ และมีแถบแสดงจำนวนของคำสั่งซื้อที่ยังคงค้างอยู่ในแต่ละขั้นตอน เช่น กำลังจัดทำใบ PO, รอการอนุมัติ, หรือได้รับวัตถุดิบแล้ว โดยเมื่อมีการจัดทำ PO โปรแกรมก็จะมีการแจ้งเตือนไปยังผู้มีอำนาจอนุมัติ ทำให้สามารถลดขั้นตอนการส่งอีเมลล์แจ้งผู้มีอำนาจอนุมัติลงได้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้การตรวจติดตามคำสั่งซื้อได้ง่ายขึ้น และช่วยให้มีความสะดวก รวดเร็วในการวิเคราะห์ข้อมูลมากยิ่งขึ้น

จากการประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอข้างต้น จะสามารถลดขั้นตอนการดำเนินงานได้ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการตรวจสอบปริมาณวัตถุดิบคงคลัง และขั้นตอนการส่งอีเมลล์แจ้งผู้มีอำนาจอนุมัติคำสั่งซื้อ ดังแผนภูมิการไหลในรูปที่ 6



รูปที่ 4 ส่วนการตรวจติดตามคำสั่งซื้อในโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บීไอ



รูปที่ 5 ส่วนการตรวจติดตามคำสั่งซื้อในโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บี้ไอ



บทความวิจัย

แผนภูมิการไหลของกระบวนการ									
Flow Process Chart									
แผนภูมิตามหมายเลข... แผนที่... ของ...			สรุปผล						
ผลิตภัณฑ์ / วัสดุ / พนักงาน	Activity	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง	ลดลง					
ผลิตภัณฑ์ดีสก์เบรกและดรัมเบรก/วัตถุดิบเคมี	ปฏิบัติงาน	7							
	เคลื่อนย้าย	0							
กิจกรรม : กระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศ (ก่อนการปรับปรุง)	รอคอย	1							
	ตรวจสอบ	1							
	เก็บ	0							
	รวม	9							
วิธีทำงาน :	ระยะเวลา (วัน)	10.1							
คำอธิบาย	ระยะเวลา	เวลา	สัญลักษณ์				หมายเหตุ		
	(เมตร)	(วัน)							
1. ตรวจสอบปริมาณคงคลังของวัตถุดิบเคมี		3.4						*Eliminate	
2. จัดทำเอกสารขอซื้อ (Purchasing Requisition) ในระบบ ERP									
3. ส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์แจ้งการสั่งซื้อทางจัดซื้อทราบ									
4. ส่งอีเมลล์แจ้งรายละเอียดวัตถุดิบที่ต้องการซื้อ เพื่อขอเอกสารใบเสนอราคาวัตถุดิบ (Quotation หรือ Performa Invoice) กับทางผู้ขายวัตถุดิบ									
5. รอการตอบกลับจากผู้ขาย									
6. พิจารณาราคาและรายละเอียดการสั่งซื้อต่าง ๆ									
7. จัดทำเอกสารสั่งซื้อ (Purchasing Order)									
8. แจ้งเตือนผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อหรือผู้มีอำนาจในการอนุมัติคำสั่งซื้อ			6.7						*Eliminate
9. ผู้จัดการอนุมัติคำสั่งซื้อ									
รวม		10.1	7	0	1	1	0		

รูปที่ 6 แผนภูมิการไหลของกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศที่ปรับปรุงการทำงานโดยใช้ ECRS

2.4 การติดตามผลหลังการปรับปรุง

เมื่อทำการปรับปรุงการทำงานของกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศ ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการทำงานจาก 9 ขั้นตอน เหลือ 7 ขั้นตอนจะได้แผนภูมิการไหลใหม่ดังรูปที่ 7 จึงได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานหลังการปรับปรุงการทำงานเป็นเวลา 2 ไตรมาส (เดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึง เดือนมิถุนายน พ.ศ.2563) พบว่าเมื่อลด

ขั้นตอนการปฏิบัติงานลงและทำการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนก ส่งผลให้เกิดความล่าช้า ผิดพลาดน้อยลงและมีการประสานงานที่ดีขึ้น สามารถลดระยะเวลาในขั้นตอนการอนุมัติคำสั่งซื้อภายใน (ช่วงที่ 1 และ 2) ลงจากเดิมเฉลี่ย 10.1 วัน เหลือเพียง 3.0 วัน และระยะเวลาการสั่งซื้อทั้งหมดลดลงจากเดิมเฉลี่ย 95.35 วัน ลดลง 7.04 วันเหลือ 88.31 วัน ดังตารางที่ 2



แผนภูมิการไหลของกระบวนการ									
Flow Process Chart									
แผนภูมิหมายเลข... แผนที่ ... ของ ...				สรุปผล					
ผลิตภัณฑ์ / วัสดุ/ พนักงาน	Activity	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง						
ผลิตภัณฑ์ดีสก์เบรกและดรัมเบรกวัสดุดีบุก	ปฏิบัติงาน	7	5						
	เคลื่อนย้าย	0	0						
กิจกรรม : กระบวนการสั่งซื้อวัสดุดีบุกจากต่างประเทศ (หลังการปรับปรุง)	รอคอย	1	1						
	ตรวจสอบ	1	1						
	เก็บ	0	0						
	รวม	9	7						
วิธีทำงาน :	ระยะเวลา (วัน)	10.1	3						
คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วัน)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ	
			●	➡	D	□	▽		
2. จัดทำเอกสารขอซื้อ (Purchasing Requisition) ในระบบ ERP		3	●	➡	D	□	▽		
3. ส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์แจ้งการสั่งซื้อทางฝ่ายจัดซื้อทราบ			●	➡	D	□	▽		
4. ส่งอีเมลแจ้งรายละเอียดวัตถุประสงค์ที่ต้องการซื้อ เพื่อขอเอกสารใบเสนอราคาวัสดุดีบุก (Quotation หรือ Performa Invoice) กับทางผู้ขายวัสดุดีบุก			●	➡	D	□	▽		
5. รอการตอบกลับจากผู้ขาย			○	➡	●	□	▽		
6. พิจารณาราคาและรายละเอียดการสั่งซื้อต่าง ๆ			○	➡	●	□	▽		
7. จัดทำเอกสารสั่งซื้อ (Purchasing Order)			●	➡	D	□	▽		
9. ผู้จัดการอนุมัติคำสั่งซื้อ			●	➡	D	□	▽		
รวม			3	5	0	1	1	0	

รูปที่ 7 แผนภูมิการไหลของกระบวนการสั่งซื้อวัสดุดีบุกจากต่างประเทศหลังการปรับปรุงการทำงาน

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาเฉลี่ยในการสั่งซื้อวัสดุดีบุกที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ

รายการ	ระยะเวลาการสั่งซื้อเฉลี่ย (วัน)		
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ลดลง
CB01	82.67	73.67	9.00
CB02	102.80	97.20	5.60
CB03	93.77	86.54	7.23
CB04	115.00	107.00	8.00
CB05	82.51	77.14	5.37
ค่าเฉลี่ย	95.35	88.31	7.04

2.5 การคำนวณจุดสั่งซื้อใหม่และระดับวัสดุดีบุกคงคลังเพื่อความปลอดภัย จากระยะเวลาการสั่งซื้อที่เปลี่ยนแปลงไป

หลังจากการปรับปรุงการดำเนินงานซึ่งการลดขั้นตอนการทำงานจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการสั่งซื้อวัสดุดีบุก ทำให้จำเป็นต้องทำการคำนวณจุดสั่งซื้อใหม่และระดับวัสดุดีบุกคงคลังเพื่อความปลอดภัย [10] ให้มีความเหมาะสมต่อการบริหารคลังวัสดุดีบุกหลังทำการปรับปรุง ซึ่งการคำนวณระดับวัสดุดีบุกคงคลังต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้ [11]



จุดสั่งซื้อใหม่ (ROP) คำนวณจากสมการที่ (1)

$$ROP = (\bar{d} \times \bar{L}) + SS \quad (1)$$

โดยที่ \bar{d} คือความต้องการวัตถุดิบเฉลี่ยของการผลิต, \bar{L} คือระยะเวลาการสั่งซื้อเฉลี่ยของวัตถุดิบ, และ SS คือระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$SS = z (\bar{L} (SD_d)^2 + \bar{d}^2 (SD_L)^2)^{1/2} \quad (2)$$

โดยที่ z คือระดับการบริการลูกค้า (Service Level) ในที่นี้บริษัทใช้ 95% หรือ $z = 0.95$, SD_d คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการวัตถุดิบในกระบวนการผลิต (Standard Deviation of Raw Material Demand) และ SD_L คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบ (Standard Deviation of Raw Material Purchasing Lead Time)

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาประสบปัญหาการได้รับวัตถุดิบล่าช้าบ่อยครั้ง โดยเมื่อทำการหาสาเหตุของปัญหาพบว่าขั้นตอนของการอนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กรเกิดความผิดพลาดบ่อยครั้ง สาเหตุมาจากการประสานงานผิดพลาดทำให้เกิดการตกลงของคำสั่งซื้อ งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ เพื่อช่วยในการติดตามคำสั่งซื้อและแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนก พบว่าจะสามารถปรับลดขั้นตอนการทำงาน ได้ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือขั้นการตรวจสอบปริมาณคงคลังของวัตถุดิบเคมี ที่จะมีภาระแจ้งเตือนเมื่อถึงจุดสั่งซื้อใหม่ได้จากโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ และขั้นตอนการแจ้ง

เตือนผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อหรือผู้มีอำนาจในการอนุมัติคำสั่งซื้อ ที่สามารถดำเนินการผ่านแอปพลิเคชันของโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอได้ ส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินงานของทั้งกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบมีการลดลง โดยสามารถลดระยะเวลาเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 2 จากเดิมก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 95.35 วัน และหลังการปรับปรุงการทำงานระยะเวลาเฉลี่ย 88.31 วัน ซึ่งลดลงถึง 7.04 วัน โดยที่เมื่อระยะเวลาของกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบมีการลดลง จะส่งผลให้ระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยและจุดสั่งซื้อใหม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน

เมื่อนำระยะเวลาสั่งซื้อหลังการปรับปรุงไปใช้คำนวณหาระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยและจุดสั่งซื้อใหม่ตามสมการที่ (1) และ (2) เพื่อให้ความเหมาะสมของระดับวัตถุดิบคงคลังกับระยะเวลาการสั่งซื้อที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ได้ระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยและจุดสั่งซื้อใหม่ดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัย

รายการ	ระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัย (กิโลกรัม)			
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ลดลง	% ลดลง
CB01	1,800	742	1,058	59%
CB02	3,400	1,378	2,022	59%
CB03	5,400	3,591	1,809	33%
CB04	3,900	802	3,098	79%
CB05	4,000	1,433	2,567	64%
รวม	18,500	7,946	10,554	57%



ตารางที่ 4 เปรียบเทียบจุดสั่งซื้อใหม่

รายการ	จุดสั่งซื้อใหม่ (กิโลกรัม)			
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ลดลง	% ลดลง
CB01	6,000	4,180	1,820	30%
CB02	8,200	6,562	1,638	20%
CB03	21,000	18,591	2,409	11%
CB04	9,000	6,865	2,135	24%
CB05	10,000	6,576	3,424	34%
รวม	54,200	42,774	11,426	21%

จากการลดลงของระยะเวลาของกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศ จะส่งผลทำให้บริษัทสามารถลดปริมาณสินค้าที่จะต้องจัดเก็บสินค้าไว้ลง ซึ่งจะลดระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยและจุดสั่งซื้อใหม่ของวัตถุดิบเคมีที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ ทั้ง 5 รายการ ได้แก่ CB01, CB02, CB03, CB04, และ CB05 มีระดับวัตถุดิบเพื่อความปลอดภัยลดลง 1,058, 2,022, 1,809, 3,098, และ 2,567 กิโลกรัม ตามลำดับ รวมแล้วระดับวัตถุดิบเพื่อความปลอดภัยมีการลดลงถึง 10,554 กิโลกรัมหรือลดลง 57% จากระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยเดิม และจุดสั่งซื้อใหม่ของวัตถุดิบแต่ละชนิดลดลง 1,820, 1,638, 2,409, 2,135, 3,424 กิโลกรัม ตามลำดับ รวมจุดสั่งซื้อใหม่ลดลงถึง 11,426 กิโลกรัมหรือ 21% จากระดับจุดสั่งซื้อเดิม ซึ่งจะส่งผลให้ระดับการจัดเก็บของวัตถุดิบคงคลังลดลงเช่นกันดังตารางที่ 4 และจะพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องอีกปัจจัยหนึ่งคือพื้นที่ที่ใช้จัดเก็บของวัตถุดิบ ก็จะมีการลดลงเช่นกัน โดยคำนวณจากจุด

สั่งซื้อใหม่ที่ลดลง ส่งผลให้ระดับการจัดเก็บสูงสุดลดลงด้วย โดย CB01, CB02, CB03, CB04, และ CB05 มีพื้นที่ที่ใช้จัดเก็บดังนี้ 1200, 1000, 1000, 600, 160 kg/pallet ตามลำดับ เมื่อ 1 พาเลท เท่ากับ 1.2 ตารางเมตร จะได้ว่าพื้นที่ที่ใช้จัดเก็บวัตถุดิบจึงลดลงถึง 34.8 ตารางเมตรหรือคิดเป็น 16% ของพื้นที่จัดเก็บวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศทั้งหมด และยังส่งผลต่อต้นทุนในการบริหารจัดการคลังวัตถุดิบ ทำให้ต้นทุนในการจัดเก็บลดลง ซึ่งในที่นี่จะคำนวณต้นทุนในการจัดเก็บวัตถุดิบจากค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการเก็บรักษาและดูแลวัตถุดิบที่เป็นส่วนต่างที่เกิดขึ้นระหว่างก่อนการปรับปรุงและหลังทำการปรับปรุงดังตารางที่ 5 ซึ่งในที่นี่จะคิดเป็นค่าส่วนต่างของต้นทุนวัตถุดิบคงคลังของบริษัทในการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีที่มีการลดลงถึง 3,440,000 บาท จากก่อนการปรับปรุงการทำงานและคิดเป็นต้นทุนค่าเสียโอกาสของเงินทุนได้ถึง 137,600 บาท/ปี (4% ต่อปีของต้นทุนวัตถุดิบคงคลัง)

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงหลังการปรับปรุงของการดำเนินงาน

รายการ	การลดลงหลังการปรับปรุง			
	ROP ที่ลดลงได้ (kg)	พื้นที่จัดเก็บที่ลดลงได้ (m ²)	ต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงได้ (บาท)	ต้นทุนค่าเสียโอกาสของเงินทุนที่ลดลงได้ (บาท/ปี)
CB01	1,820	1.2	166,262.77	6,650.51
CB02	1,638	2.4	107,079.12	4,283.16
CB03	2,409	2.4	163,994.96	6,559.80
CB04	2,135	3.6	195,384.87	7,815.39
CB05	3,424	25.2	2,807,282.32	112,291.29
รวม	11,426	34.8	3,440,004.04	137,600.16



4. บทสรุป

จากปัญหาการได้รับวัตถุดิบล่าช้าของบริษัท กรณีศึกษา เมื่อทำการศึกษาการทำงานพบว่าสาเหตุเกิดจากขั้นตอนของการขออนุมัติคำสั่งซื้อภายในองค์กร เนื่องจากขั้นตอนการทำงานมีการประสานงานระหว่างแผนกหลายครั้ง แต่ไม่มีการแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนก และการตรวจติดตามคำสั่งซื้อนั้นเป็นไปได้ยาก จึงเกิดเหตุการณ์การดำเนินงานผิดพลาดอยู่บ่อยครั้งของคำสั่งซื้อ ทำให้การดำเนินการล่าช้า ส่งผลให้ได้รับวัตถุดิบล่าช้าและมีความเสี่ยงในการขาดแคลนวัตถุดิบ โดยงานวิจัยได้นำเอาหลักการปรับปรุงการทำงาน ECRS มาประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมไมโครซอฟท์ พาวเวอร์ บีไอ ให้ขั้นตอนการตรวจติดตามคำสั่งซื้อสามารถดำเนินการได้ง่ายขึ้นและสามารถแบ่งปันข้อมูลระหว่างแผนก อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถช่วยในการประมวลผลข้อมูลออกมาอยู่ในรูปแบบที่สามารถมองเห็นถึงแนวโน้มและภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องอีกด้วย จึงสามารถลดเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานจากเดิม 95.35 วัน ลดลง 7.04 วัน เหลือ 88.31 วัน ทำให้สามารถปฏิบัติงานได้ทันระยะเวลาที่บริษัทกำหนด (ไม่เกิน 93 วัน)

โดยเมื่อมีระยะเวลาการสั่งซื้อวัตถุดิบที่เป็นไปตามเวลามาตรฐานแล้ว จึงนำระยะเวลาการสั่งซื้อหลังการปรับปรุงมาใช้ในการคำนวณหาระดับวัตถุดิบคงคลังเพื่อความปลอดภัยและจุดสั่งซื้อใหม่ให้มีความเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบคงคลังในวัตถุดิบที่สั่งจากต่างประเทศได้ถึง 3,440,000 บาท คิดเป็นต้นทุนค่าเสียโอกาสของเงินทุนได้ 137,600 บาท/ปี และลดการใช้พื้นที่จัดเก็บได้ 34.8 ตารางเมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้านี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Rijiravanich, Work study principles and case study, Chulalongkorn University Press, Bangkok, 2010. (in Thai)
- [2] R. Kanjanapanyakom, Industrial work study, Top Publishing Co.,Ltd, Bangkok, 2009. (in Thai)
- [3] L. Nantajinda, Application of ECRS with milk run transport company: A case study of the ABC transport company, Master Thesis, Burapa University, 2016. (in Thai)
- [4] <https://powerbi.microsoft.com/en-us/>. (Accessed on 8 March 2020)
- [5] H. Wangchoei and N. Nanthajirapong, Management information system for hotel operation reports with Power BI, Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal, 2018, 4(1), 69-86. (in Thai)
- [6] P. Tiangsombun, Business intelligence system to support executive forecasting and decision making; Case study: Healthcare, Master Thesis, Sripatum University, 2018. (in Thai)



- [7] P. Lalitaphon, Inventory management, Technology Promotion Association (Thailand-Japan) Press, Bangkok, 2009. (in Thai)
- [8] A. Lerdchayantee, Statistical for research, Silsanong Press, Bangkok, 1996. (in Thai)
- [9] S. Jantaravinid, Statistics for educational research, Silpakorn University Press, Nakhon Pathom, 2013. (in Thai)
- [10] W. Lorjirachunkul, Theory of Inventory, National Institute of Development Administration, National Institute of Development Administration (NIDA) Press, Bangkok, 1996. (in Thai)
- [11] <https://inventorymanagementmetrics.blogspot.com/2011/12/reorder-point.html>. (Accessed on 20 April 2020)
- [12] I. Boonyuen, Adsorption of lignin and tannin by wasted activated carbon used as ballasting agent from activated sludge process, Master Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009. (in Thai)

การศึกษาปัจจัยเพื่อลดต้นทุนผงเคมีในการผลิตผ้าเบรก

สรวิชัย สุวรรณอักษร* และ ชูศักดิ์ พรสิงห์

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ,
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: suwanauksorn_s@su.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 พฤศจิกายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 1 มีนาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มีนาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 มีนาคม 2564

บทคัดย่อ: บริษัทกรณีศึกษาที่มีปริมาณของผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกมากถึง 180,000 กิโลกรัมต่อปี หรือประมาณ 15.84% ของปริมาณวัตถุดิบเคมีที่ใช้ในการผลิต ซึ่งส่งผลให้มีต้นทุนการใช้ผงเคมีในการผลิตผ้าเบรกเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นมูลค่าวัตถุดิบเคมีที่สูญเสียไปประมาณ 13 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากการผลิตผ้าเบรก และเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกลดลง โดยจากการระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญของทางบริษัทกรณีศึกษาพบว่า สาเหตุของปริมาณผงเคมีที่เหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมากนั้น เกิดจากในกระบวนการผลิตผ้าเบรกมีความจำเป็นต้องเผื่อน้ำหนักผงเคมีไว้ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิต ได้แก่ 1) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชั้นงานในกระบวนการฝนตกแต่ง 2) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชั้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน และ 3) ค่าเผื่อเนื้อชั้นงานสำหรับการฝาร่องและการลบมุม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อค้นหาปัจจัยเบื้องต้นที่อาจจะส่งผลกระทบต่อความผันแปรของขนาดความหนาชั้นงาน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหา Why-Why Analysis และนำปัจจัยเหล่านั้นไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ 2 ระดับ (2^k Full Factorial Design) เพื่อค้นหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่ออย่างแท้จริง และนำปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่ออย่างแท้จริงนั้นไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ 3 ระดับ (3^k Full Factorial Design) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ซึ่งค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงสามารถลดปริมาณการใช้ผงเคมีในการผลิตผ้าเบรกได้ 8.75% ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตผ้าเบรกได้ 2.60%

คำสำคัญ: ผ้าเบรก; ค่าความเผื่อของชั้นงาน; การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ 2 ระดับ; การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ 3 ระดับ

A Study of Factors for Chemical Cost Reduction in the Brake Pad Manufacturing Process

Sorawich Suwanauksorn* and Choosak Pornsing

Division of Engineering Management, Department of Industrial Engineering and Management,
Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

* Corresponding author, E-mail: suwanauksorn_s@su.ac.th

Received: 30 November 2020; Revised 1 March 2021; Accepted: 2 March 2021

Online Published: 9 March 2021

Abstract: The case study company had a surplus chemical powder from brake pad manufacturing processes at 180,000 kilograms per year or 15.84% of all chemical powder in manufacturing processes and was resulting in high manufacturing cost. The cost of a surplus chemical powder was about 13 million baht per year. The objective of this research was to find the cause and reduced a surplus chemical powder from brake pad manufacturing processes. Brainstorming of case study company experts found the cause of a surplus chemical powder in brake pad manufacturing from necessary tolerance weight of chemical powder in the production so that no problem in production: 1) variation of thickness in grinding process 2) variation of thickness in hot press process and 3) variation of slotting process and chamfering process. After that brake pad thickness variation problem was analyzed preliminary affect factor by Why-Why Analysis. And factors were analyzed to decide which factors affected the problem by 2^k Full Factorial Design experiment. The factors that were obtained were then tested in 3^k Full Factorial Design to find the optimal levels of various factors. In conclusion, the optimum level of each factor from the experiment can be reduced chemical powders by 8.75% in the brake pads production and can be reduced cost by 2.60% in brake pad manufacturing processes.

Keywords: Brake Pad; Tolerances; 2^k Full Factorial Design; 3^k Full Factorial Design

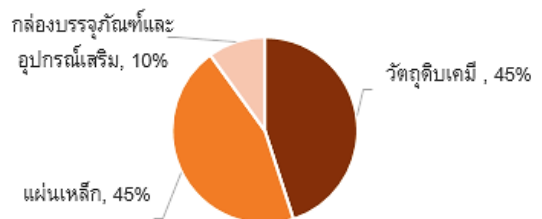
1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยในปัจจุบัน [1] เนื่องจากด้วยปริมาณความต้องการและกำลังผลิตที่เพิ่มขึ้นภายในประเทศ ประกอบกับประเทศไทยมีลักษณะทำเลที่ตั้งและสิ่งแวดล้อมที่เป็นประโยชน์ในการผลิตและขนส่ง ทำให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ต่างชาติจำนวนมากย้ายฐานการผลิตเข้ามาลงทุนในประเทศไทย ส่งผลให้การแข่งขันในธุรกิจอุตสาหกรรมนี้มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งลูกค้ามีตัวเลือกในการตัดสินใจซื้อเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตในประเทศไทยจึงพยายามให้ความใส่ใจในรายละเอียดกระบวนการทำงานแต่ละกระบวนการเพิ่มขึ้นและให้ความสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนลงให้น้อยที่สุดและได้กำไรในการประกอบการเพิ่มขึ้น

ในการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ได้มีนักวิจัยหลายท่านใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม [2-6] โดยหลังปรับปรุงพบว่าสามารถลดความผันแปรของกระบวนการผลิต และลดต้นทุนในกระบวนการผลิตได้

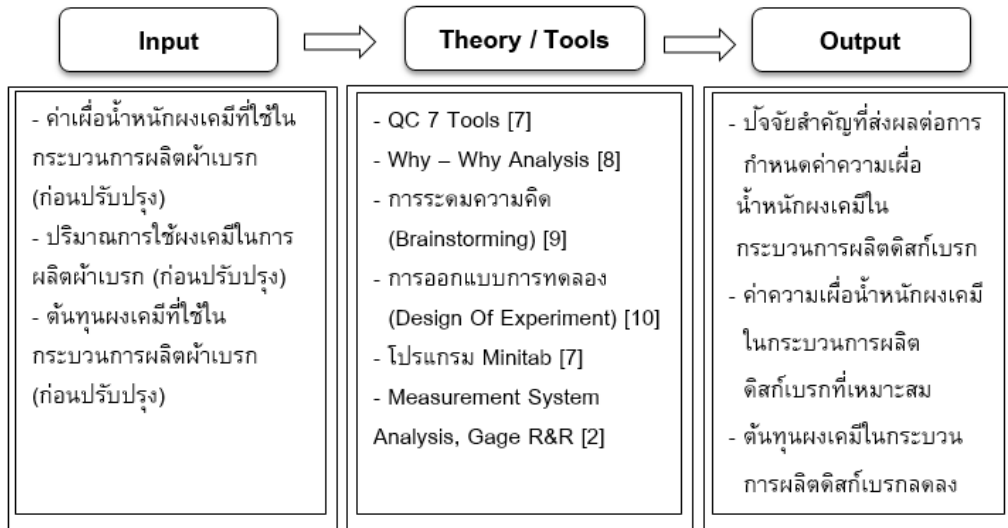
บริษัท ตรีศก จำกัด สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นบริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ ประเภทผ้าเบรก โดยมี 2 ผลิตภัณฑ์หลักคือ ผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกและผลิตภัณฑ์ก้ามเบรก ผู้วิจัยเลือกผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกสำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากการผลิตดิสก์เบรกมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีมากถึง 83.61% ส่วนผลิตภัณฑ์ก้ามเบรกมีปริมาณการใช้

วัตถุดิบเคมีเพียง 16.39% จากการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนในกระบวนการผลิตดิสก์เบรก พบว่าสัดส่วนของต้นทุนที่มากที่สุดอยู่ในส่วนของต้นทุนวัสดุทางตรงที่ใช้ในการผลิตดิสก์เบรก ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 65 หากพิจารณาในรายละเอียดของต้นทุนดังกล่าวพบว่า ร้อยละ 45 เป็นต้นทุนของวัตถุดิบเคมี ร้อยละ 45 เป็นต้นทุนของแผ่นเหล็กและอีกร้อยละ 10 เป็นต้นทุนของกล่องบรรจุภัณฑ์และอุปกรณ์เสริมดังรูปที่ 1 ทั้งนี้จากการเก็บข้อมูลของบริษัท ตรีศก จำกัด พบว่าในปี พ.ศ. 2559-2562 มีปริมาณเฉลี่ยของผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตมากถึง 180,000 กิโลกรัมต่อปีหรือประมาณ 15.84% ของปริมาณวัตถุดิบเคมีที่ใช้ในการผลิตทั้งหมดจากการเผื่อน้ำหนักผงเคมีในกระบวนการผลิต คิดเป็นมูลค่าวัตถุดิบเคมีที่สูญเสียไปประมาณ 13 ล้านบาทต่อปี และค่าส่งกำจัดฝุ่นผงเคมีซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมอีกประมาณ 5 แสนบาทต่อปี



รูปที่ 1 สัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบทางตรงดิสก์เบรก

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงต้องการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือใช้จากการผลิตผ้าเบรกเป็นจำนวนมาก เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกลดลง ซึ่งจะก่อให้เกิดต้นทุนการผลิตที่ลดลงและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัตถุดิบโดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีต่าง ๆ ตามกรอบแนวคิดในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตอย่างละเอียดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา แล้วจึงนำสาเหตุมาวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไข เพื่อปรับปรุงปริมาณการใช้ผงเคมีของบริษัทกรณีศึกษาให้มีความเหมาะสมต่อไป ดังรูปที่ 3

2.1 เก็บข้อมูลการใช้ปริมาณผงเคมีแต่ละผลิตภัณฑ์

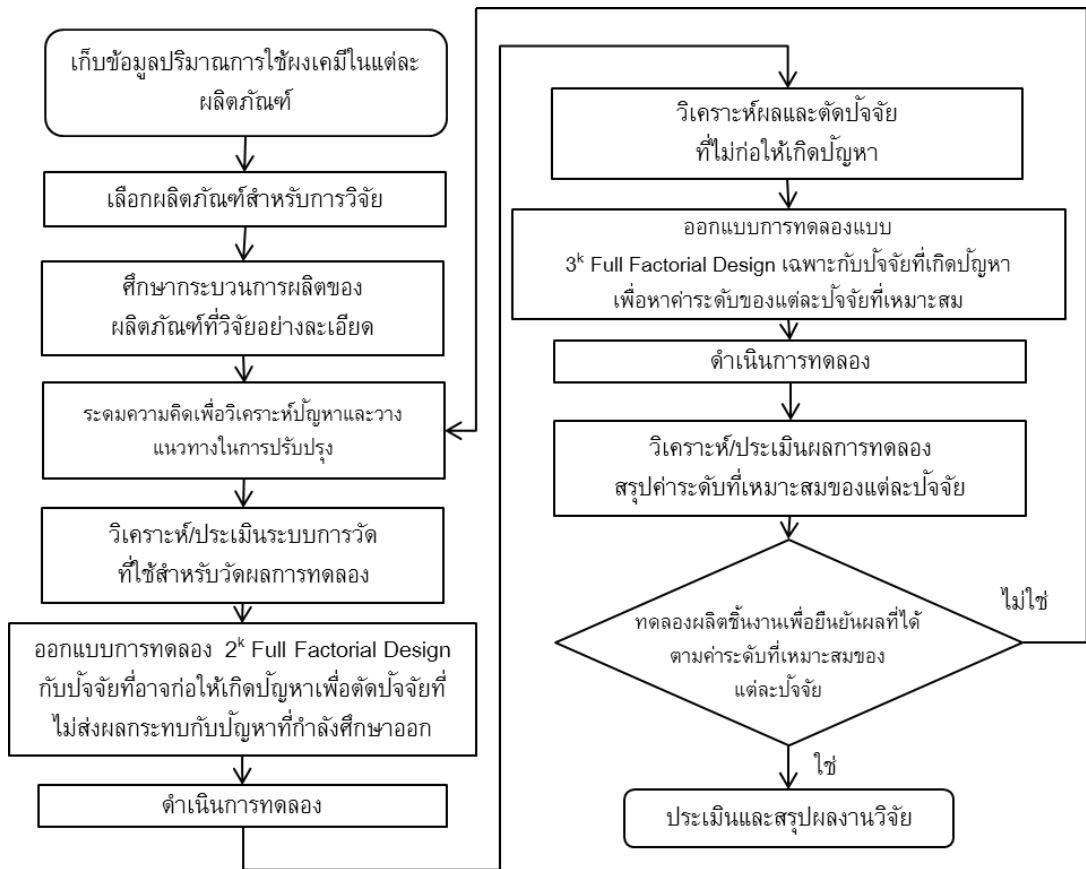
จากการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีนั้นพบว่า จากข้อมูลการผลิตในปี 2562 ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีเพื่อการผลิตผ้าเบรกสูงที่สุดนั้นได้แก่ ผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกซึ่งมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีจำนวน 950,201 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 83.61% ของปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีทั้งหมด ส่วนผลิตภัณฑ์ก้ามเบรกนั้นมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีจำนวน 186,208 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 16.39% ของ

ปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีทั้งหมด จึงเลือกทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกเนื่องจากมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีสูงที่สุด

สำหรับผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรคนั้นทางบริษัทกรณีศึกษามีสูตร การผสมวัตถุดิบเคมีที่ใช้ในการผลิตหลายสูตร จากข้อมูลการผลิตพบว่า สูตรการผสมวัตถุดิบเคมีที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุดนั้นได้แก่สูตรเคมี A

2.2 เลือกผลิตภัณฑ์วิจัย

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษามีการผลิตผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกมากกว่า 400 รุ่น ดังนั้นจึงเลือกผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรก รุ่น A สูตรเคมี A เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับงานวิจัย เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการใช้ผงเคมีในปี 2562 เท่ากับ 8,000 กิโลกรัม และมีมูลค่าการสูญเสียประมาณ 100,000 บาท ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณการใช้ผงเคมีและมูลค่าการสูญเสียมากที่สุด



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการดำเนินงานวิจัย

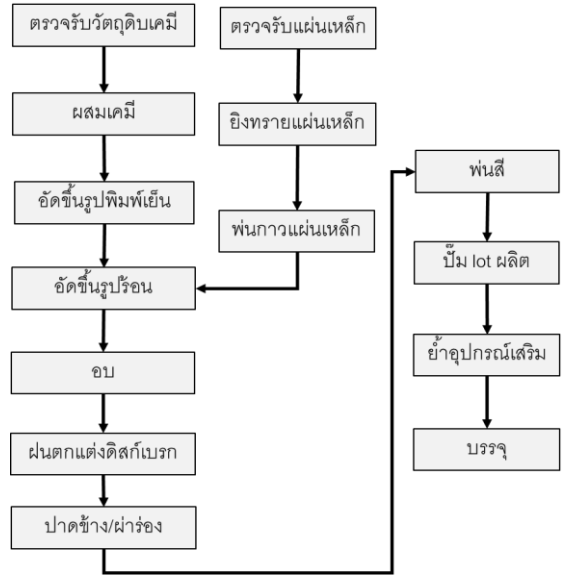
2.3 ศึกษากระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตดีสก์เบรกเริ่มจากการตรวจรับวัตถุดิบเคมีและแผ่นเหล็กจากนั้นนำวัตถุดิบเคมีแต่ละชนิดที่กำหนดปริมาณการใช้ไว้ในแต่ละสูตรการผสมผงเคมีมาทำการผสมในเครื่องผสมผงเคมีจนได้ผงเคมีที่ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันและมีค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ตามที่กำหนด ผงเคมีที่ได้หลังการผสมนั้นจะนำไปอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นตามค่าน้ำหนักผงเคมีที่กำหนดในแม่พิมพ์ของแต่ละรุ่น

หลังจากนั้นจึงนำผงเคมีที่อัดเป็นก้อนแล้วพร้อมกับแผ่นเหล็กที่ผ่านกระบวนการยิงทรายเพื่อทำความสะอาดผิวเหล็กและพ่นกาวสำหรับการยึดติดผงเคมีกับแผ่นเหล็กไปเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีการกำหนดค่าแรงดันของเครื่องจักรและความร้อนของแม่พิมพ์ เพื่ออัดให้ก้อนผงเคมีให้ทำปฏิกิริยากันเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันตามขนาดความหนาที่ต้องการ และสามารถยึดติดกับแผ่นเหล็กได้ โดยบริษัท



กำหนดค่าเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนนั้นต้องมีขนาดความหนาเพิ่มจากมาตรฐานความหนาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร เพื่อให้ไม่ส่งผลกระทบบต่อกระบวนการฝนตกแต่งดังรูปที่ 7 แต่เนื่องจากความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนนั้นมีความผันแปรค่อนข้างสูง จึงมีความจำเป็นต้องเผื่อค่าความผันแปรของขนาดความหนาเพิ่มอีก 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 ซึ่งทำให้ค่าเผื่อความผันแปรของขนาดความหนาที่ใช้สำหรับกำหนดน้ำหนักผงเคมีเบื้องต้นรวมกับเท่ากับ 1.50 มิลลิเมตร เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดความหนาเพิ่มจากมาตรฐานความหนาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร เมื่อได้ชิ้นงานตามความหนาที่ต้องการแล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการอบตามอุณหภูมิที่กำหนดเพื่อให้เนื้อเคมีที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่สมบูรณ์ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับดิสก์เบรก หลังกระบวนการอบแล้วจะนำไปเข้าสู่กระบวนการฝนตกแต่ง โดยบริษัทกำหนดค่าเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานสำหรับความแปรปรวนของกระบวนการฝนตกแต่งโดยเพิ่มจากขนาดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาของชิ้นงานในส่วนที่ต้องฝนตกแต่งออกเพื่อให้ได้ขนาดรูปร่างตามแบบที่กำหนด โดยความหนาตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรก รุ่น A สูตรเคมี A กำหนดความหนาที่ต้องการเท่ากับ 15.70 ± 0.30 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปปั่นสีในส่วนที่เป็นแผ่นเหล็กตามสีที่กำหนดในแต่ละยี่ห้อ (Brand) ก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์รหัสผลิตและติดอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เพื่อเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ต่อไป ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังกระบวนการผลิตดิสก์เบรก

2.4 ระดมความคิดเพื่อวิเคราะห์ปัญหา

การระดมความคิดเป็นกระบวนการที่มีแบบแผนที่ใช้เพื่อรวบรวมความคิดเห็น ปัญหา หรือข้อเสนอแนะจำนวนมากในเวลาอย่างรวดเร็ว เป็นวิธีการที่ดีในการกระตุ้นความคิดสร้างสรรค์และเกิดการมีส่วนร่วมของกลุ่มมากที่สุด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ 1) ตั้งผู้ดำเนินการ 2) กำหนดหัวข้อ 3) ระดมความคิด 4) สรุปผล และ 5) ติดตามผล โดยจากการระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญของทางบริษัท ทัศนศึกษา โดยมีผู้เชี่ยวชาญเข้าร่วม ดังนี้ 1) ผู้จัดการฝ่ายผลิต จำนวน 1 ท่าน 2) หัวหน้างานในกระบวนการผลิต จำนวน 3 ท่าน 3) วิศวกรกระบวนการผลิตที่มีอายุงานไม่ต่ำกว่า 5 ปี จำนวน 2 ท่าน ซึ่งพบว่าสาเหตุของปริมาณผงเคมีที่เหลือจากการผลิตนั้นเกิดจากในกระบวนการผลิตผ้าเบรกมีความจำเป็นต้องเผื่อน้ำหนักผงเคมีไว้

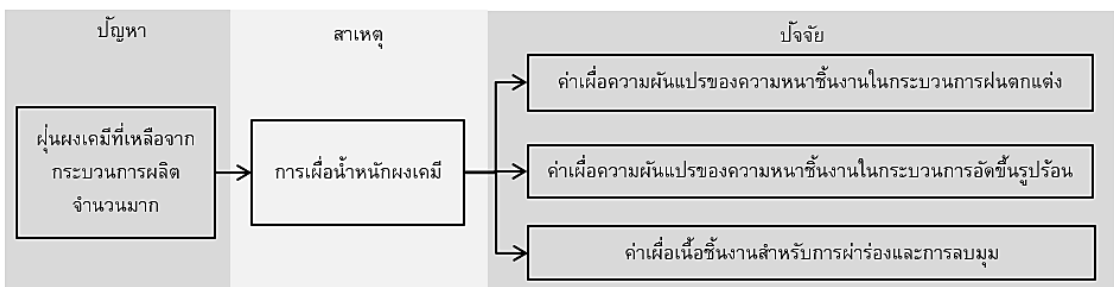


เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิต ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 5 และตารางที่ 1 โดยมีสาเหตุจาก 3 ปัจจัย คือ 1) ค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่งเท่ากับ 0.50 มิลลิเมตร 2) ค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเท่ากับ 1.00 มิลลิเมตร และ 3) การเผื่อเนื้อชิ้นงานสำหรับการเผ่ารองและการลบมุม ซึ่งจากทั้ง 3 ปัจจัยข้างต้น ทำให้ต้องมีการเผื่อน้ำหนักผงเคมีรวมทั้งหมด 24 กรัม คิดเป็น 17.85% จากค่าน้ำหนักมาตรฐาน และจากการร่วมกันระดมความคิดเพื่อวิเคราะห์ 3 ปัจจัยข้างต้น ที่เป็นเหตุต่อการกำหนดค่าความเผื่อน้ำหนักผงเคมีนั้นพบว่า ค่าความเผื่อความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่งที่ 0.50 มิลลิเมตรนั้นมากเกินไปจนเกินความจำเป็น ซึ่งค่าความเผื่อที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.10 มิลลิเมตร เนื่องจากความสามารถของกระบวนการฝนตกแต่งที่ทำการศึกษามีค่าค่อนข้างสูงโดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ C_p ซึ่งเท่ากับ 17.82 และค่า C_{pk} ซึ่งเท่ากับ 15.00 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 1.33 ดังรูปที่ 6 ทำให้ค่าความผันแปรของกระบวนการฝนตกแต่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงอาจจะไม่มีความจำเป็นที่ต้องเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ขนาด

ความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้สูญเสียผงฝุ่นเคมีจากกระบวนการผลิตเกินความจำเป็น จึงทำการกำหนดค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่งใหม่ โดยเผื่อความหนาไว้เพียง 0.10 มิลลิเมตร เนื่องจากกระบวนการฝนตกแต่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.007 และมีค่าพิสัย (R) เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6

ส่วนการเผื่อเนื้อชิ้นงานสำหรับการเผ่ารองและลบมุมนั้นเดิมมีค่าเผื่อน้ำหนักเคมีเท่ากับ 2.04% แต่ไม่สามารถปรับลดลงได้เนื่องจากรูปแบบแม่พิมพ์ไม่สามารถสร้างเพื่อรองรับการเผ่ารองและการลบมุมได้ เพราะอาจจะทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

สำหรับค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ดังรูปที่ 7 นั้นพบว่า มีการเผื่อค่าความหนาของชิ้นงานจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนไว้ถึง 1.00 มิลลิเมตร อันเนื่องมาจากค่าความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนนั้นมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าความหนาที่ต้องการ 0.80 มิลลิเมตร โดยมีค่าพิสัยเท่ากับ 1.04 มิลลิเมตร ซึ่งมีความผันแปรค่อนข้างสูง

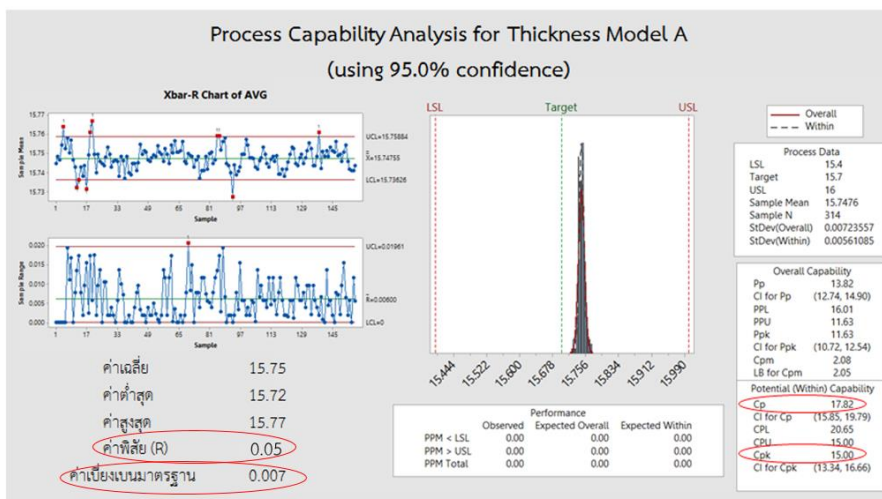


รูปที่ 5 สาเหตุปัญหาฝุ่นผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิต

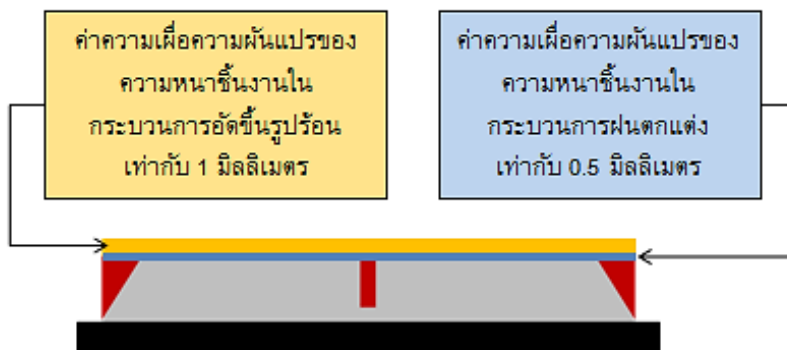


ตารางที่ 1 ค่าเผื่อขนาดความหนาและน้ำหนักเคมีผลิตภัณฑ์ A สูตรเคมี A ของแต่ละกระบวนการก่อนปรับปรุง

น้ำหนักเคมี มาตรฐาน	น้ำหนักเคมี ปัจจุบัน	ค่าเผื่อน้ำหนักเคมี (กรัม) / ค่าเผื่อขนาดความหนา (มิลลิเมตร)		กระบวนการ ผันตกแต่ง (+0.50 มิลลิเมตร)		กระบวนการ อัดขึ้นรูปร้อน (+1.00 มิลลิเมตร)		ผ่าร่องและลบมุม		รวมค่าเผื่อ ทั้งหมด (+1.50 มิลลิเมตร)	
		กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%		
136	160	7	5.25	14	10.57	3	2.04	24	17.85		



รูปที่ 6 ความสามารถของกระบวนการผันตกแต่งในการผลิตชิ้นงานรุ่น A สูตรเคมี A



รูปที่ 7 การเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานก่อนปรับปรุง



และจากการระดมความคิดโดยผู้เชี่ยวชาญนั้นสรุปมีความเห็นร่วมกันให้ลดค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเบื้องต้นลงก่อนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ 60% ทำให้ค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานเหลือ 0.40 มิลลิเมตร โดยจะประเมินผลการวิจัยในระยะยาว (1 ปี) อีกครั้ง เพื่อลดความเสี่ยงจากปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ในระยะยาว หากไม่พบปัญหาจะดำเนินการลดค่าความเผื่อความผันแปรของขนาดความหนาและดำเนินการทดลองตามแนวทางการวิจัยนี้อีกครั้ง ซึ่งเมื่อรวมกับค่าเผื่อความหนาเพื่อรองรับความผันแปรของกระบวนการผันตงแต่ง 0.10 มิลลิเมตร รวมความหนาที่เผื่อไว้ทั้งหมดจากเดิม 1.50 มิลลิเมตร เพื่อสำหรับใช้ในการกำหนดน้ำหนักผงเคมีเบื้องต้น ให้เหลือเพียง 0.50 มิลลิเมตร โดยให้กำหนดค่ามาตรฐานความหนาชิ้นงานที่ต้องการในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนใหม่เท่ากับค่ามาตรฐานความหนาชิ้นงานสำเร็จรูป+0.50 มิลลิเมตร โดยกำหนดขอบเขตการยอมรับเท่ากับ ± 0.40 มิลลิเมตร จากเดิมที่กำหนดมาตรฐานไว้ให้มีขนาดความหนาเพิ่มจากมาตรฐานความหนาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร

จากการกำหนดให้การเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานให้มีค่าที่ลดลงนั้น จึงต้องหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนใหม่ เพื่อให้ขนาดความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมีความผันแปรลดลง โดยจากการวิเคราะห์ปัจจัยความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเบื้องต้นด้วยเครื่องมือ Why-Why Analysis ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หา

ปัจจัยที่เป็นต้นเหตุให้เกิดปัญหาอย่างเป็นระบบมีขั้นตอนไม่เกิดการตกหล่น โดยก่อนจะทำการวิเคราะห์ปัญหาต้องตรวจสอบที่หน้างานจริงและดูสภาพของจริงเพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับรายละเอียดของปัญหาให้ถูกต้องและชัดเจน จากนั้นจึงกำหนดปัญหา และให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการร่วมกันวิเคราะห์ โดยการตั้งคำถามหาสาเหตุด้วยคำถาม “ทำไม” ไปเรื่อย ๆ เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริง โดยจากการวิเคราะห์ Why-Why Analysis พบว่า สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 8 เมื่อทราบปัจจัยเบื้องต้นที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของขนาดความหนาชิ้นงานแล้ว จะนำปัจจัยดังกล่าวไปเป็นปัจจัยนำเข้าสำหรับการออกแบบการทดลองต่อไป เพื่อให้ทราบว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของขนาดความหนาชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนอย่างแท้จริง และดำเนินการออกแบบการทดลองต่อไปเพื่อหาค่าระดับของปัจจัยเหล่านั้นที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตต่อไป

2.5 วิเคราะห์ระบบการวัด

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาได้รับการรับรองระบบคุณภาพ ISO 9001/ATF 16949 จึงได้มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดเป็นประจำ จึงอนุมานได้ว่าคุณสมบัติด้านความถูกต้องของเครื่องมือวัดดีแล้ว งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความแม่นยำของระบบการวัดเพียงอย่างเดียวโดยใช้การประเมินค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และความสามารถการทำเหมือน (Reproducibility) โดยพิจารณาดัชนีที่เรียกว่า Gage R&R (Gage Repeatability and Reproducibility) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดผู้วัดที่ผ่านการฝึกอบรมมาเป็นอย่างดี และมีหน้าที่ในการวัดและบันทึกผลการวัด จำนวน 4 คน

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวัดในการเก็บข้อมูลจะใช้ เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ที่ผ่านการสอบเทียบแล้วชิ้นเดียวกันสำหรับผู้วัดทั้ง 4 คน

3. กำหนดจำนวนชิ้นงานที่จะวัดเพื่อศึกษา จำนวน 20 ชิ้น

4. จำนวนการวัดซ้ำสำหรับชิ้นงานแต่ละชิ้น กำหนดให้วัดซ้ำ 3 ตำแหน่งของชิ้นงานและเลือกบันทึกค่าที่ต่ำสุดของชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์ระบบการวัด (Gage R&R) ด้วยโปรแกรม Minitab ในรูปที่ 9 ซึ่งจากการพิจารณา ค่า Number of Distinct Categories = 15 แสดงว่า ระบบการวัดสามารถแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น

15 ประเภทที่แตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูลความหนาที่วัดได้ สามารถใช้การประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้ และจากการทดสอบพบว่า %Precision to total variation = 8.81% และ % Precision to tolerance = 9.80 % ซึ่งถือว่าระบบการวัดผ่านเป็นที่ยอมรับ สอดคล้องกับข้อกำหนด ของ AIAG (Automotive Industry Action Group) ที่ระบุค่ายอมรับได้ของ Total Gage R&R ต้องไม่เกิน 10% ดังนั้น จากการวิเคราะห์การวัดค่าความหนาของชิ้นงานผลลัพ์จาก โปรแกรม Minitab สามารถสรุปได้ว่าความแม่นยำของระบบการวัดที่ใช้ในการวัดความหนาของชิ้นงาน ดิสก์เบรกรุ่น A มีความเหมาะสมและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานในระบบการวัดได้ และผู้วิจัยได้เลือกพนักงานจำนวน 1 คน จากผู้ทดสอบทั้งหมด 4 คน มาทำการวัดผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 8 แผนภูมิการไหลของกระบวนการสังเคราะห์วัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศหลังการปรับปรุงการทำงาน



Gage R&R					
Variance Components					
Source	VarComp	95% CI	%Contribution (of VarComp)	95% CI	
Total Gage R&R	0.0001708	(0.000, 0.001)	0.78	(0.36, 2.42)	
Repeatability	0.0000996	(0.000, 0.000)	0.45	(0.21, 0.82)	
Reproducibility	0.0000712	(0.000, 0.000)	0.32	(0.12, 1.88)	
พนักงาน	0.0000217	(0.000, 0.000)	0.10	(0.02, 1.62)	
พนักงานอื่น	0.0000495	(0.000, 0.000)	0.22	(0.08, 0.51)	
Part-To-Part	0.0218322	(0.013, 0.047)	99.22	(97.58, 99.64)	
Total Variation	0.0220030	(0.013, 0.047)	100.00		
Process tolerance = 0.8					
Gage Evaluation					
Source	StdDev (sD)	95% CI	Study Var (6 × sD)	95% CI	%Study Var (sSV)
Total Gage R&R	0.013069	(0.012, 0.023)	0.078411	(0.071, 0.135)	8.81
Repeatability	0.009979	(0.009, 0.011)	0.059875	(0.054, 0.067)	6.73
Reproducibility	0.008438	(0.006, 0.020)	0.050629	(0.037, 0.121)	5.69
พนักงาน	0.004661	(0.002, 0.019)	0.027966	(0.012, 0.113)	3.14
พนักงานอื่น	0.007034	(0.005, 0.010)	0.042205	(0.030, 0.057)	4.74
Part-To-Part	0.147757	(0.112, 0.216)	0.886544	(0.674, 1.295)	99.61
Total Variation	0.148334	(0.113, 0.216)	0.890005	(0.679, 1.298)	100.00
%Tolerance					
Source	95% CI	sVToler	95% CI		
Total Gage R&R	(5.96, 15.56)	9.80	(8.87, 16.89)		
Repeatability	(4.56, 9.04)	7.48	(6.75, 8.40)		
Reproducibility	(3.51, 13.73)	6.33	(4.66, 15.12)		
พนักงาน	(1.25, 12.72)	3.50	(1.49, 14.14)		
พนักงานอื่น	(2.86, 7.17)	5.28	(3.69, 7.16)		
Part-To-Part	(98.78, 99.82)	110.82	(84.25, 161.90)		
Total Variation		111.25	(84.82, 162.20)		
Number of Distinct Categories = 15					
95% CI = (897630, 23.6866)					

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดชิ้นงาน

2.6 การทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design

ออกแบบการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design เพื่อตรวจสอบดูว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาขนาดความหนาของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า มีปัจจัยที่อาจจะส่งผลกระทบ 4 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด ค่าแรงดันที่กำหนด เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด โดยกำหนดค่าระดับของแต่ละปัจจัยไว้ 2 ระดับ คือค่าระดับต่ำและค่าระดับสูง ซึ่งเป็นค่าขอบเขตการยอมรับได้ในปัจจุบันของแต่ละปัจจัยที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ตามตารางที่ 2 ซึ่งการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์จะต้องทำการทดลองเท่ากับ 2⁴ = 16 การทดลองและ

ในการวิเคราะห์จำนวนการทำซ้ำ (Replication) ของจำนวนปัจจัยนำเข้า จำนวน 4 ปัจจัย จะใช้ Effect เท่ากับ 0.25 เนื่องจากเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการผลิตในปัจจุบัน โดยสามารถคำนวณจำนวนการทำซ้ำจากโปรแกรม Minitab ได้จำนวนการทดลองซ้ำไม่ต่ำกว่า 4 ครั้ง ตามรูปที่ 10 เพื่อให้ระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 95% แต่เนื่องจาก 1 ไม่การผสมผงเคมีนั้น สามารถทำการทดลองซ้ำในครั้งนี้ได้ถึง 7 ครั้ง ทางผู้เชี่ยวชาญของบริษัทเคมีศึกษา จึงให้ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำ 7 ครั้ง เพื่อเพิ่มระดับความเชื่อมั่น ดังนั้นการทดลองครั้งนี้รวมเป็น 112 การทดลอง โดยจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดของการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 2 การแบ่งระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		หน่วย
	ระดับต่ำ	ระดับสูง	
	(-)	(+)	
1. ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด	0.40	0.60	g/cc
2. ค่าแรงดันที่กำหนด	295	305	kg/cm ²
3. เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง	3	7	วินาที
4. น้ำหนักผงเคมีที่กำหนด	155	165	กรัม

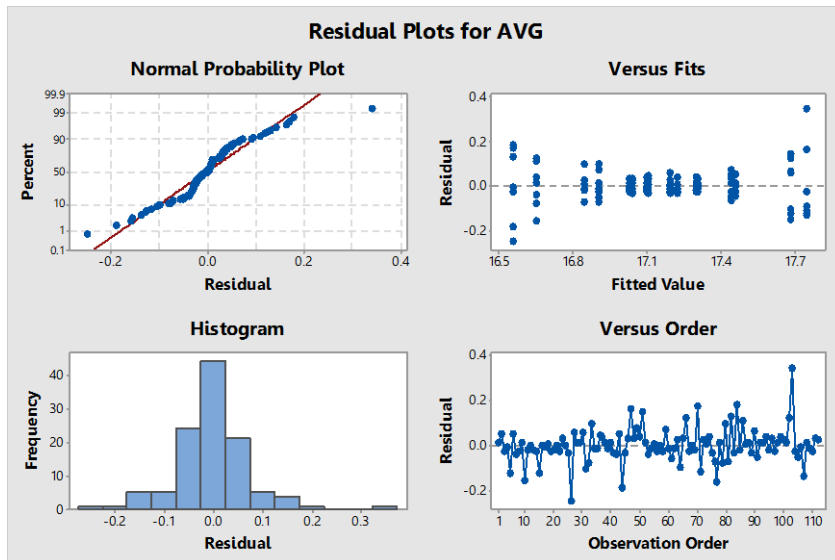
จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 4 ประการ คือ 1) มีการกระจายตัวแบบปกติ 2) ค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 และ 4) มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (σ^2) ดังรูปที่ 11 จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลการทดลองได้

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นจากโปรแกรม Minitab โดยได้มีการกำหนดตัวแปรดังนี้ ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด (Bulk Density: A) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure: B) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time: C) และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด (Weight: D) ในรูปที่ 12 และ 13 พบว่ามีปัจจัยหลัก (Main Effect) จำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure: B) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time: C) และน้ำหนักผงเคมีที่

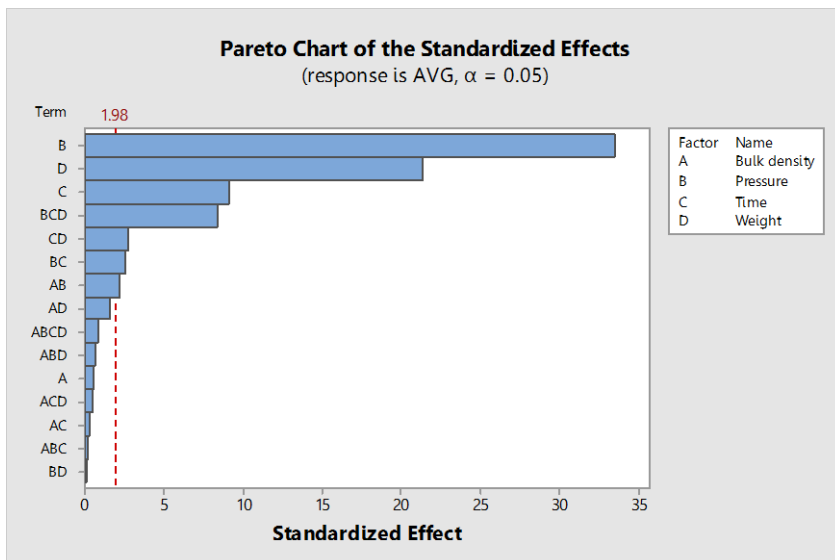
กำหนด (Weight: D) ที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของขนาดความหนาของชิ้นงาน และมีปัจจัยร่วม (Interactions) ดังนี้ ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย ได้แก่ 1) ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนดและค่าแรงดันที่กำหนด 2) ค่าแรงดันที่กำหนดและเวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง 3) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้งและน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด ปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าแรงดันที่กำหนด เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด โดยพิจารณาที่ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และจากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) จากตารางที่ 4 พบว่า ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 94.80% และค่า R-Sq(adj) มีค่าเท่ากับ 93.99% ซึ่งมีค่ามากกว่า 75% และค่าใกล้เคียง 100% ซึ่งหมายความว่า ในความผันแปรของค่าความหนาชิ้นงานทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 93.99% แสดงว่าเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ และสามารถนำสมการถดถอยนี้ไปทำนายผล เพื่อหาคำตอบได้

Power and Sample Size						
2-Level Factorial Design						
$\alpha = 0.05$ Assumed standard deviation = 0.25						
Factors: 4 Base Design: 4, 16						
Blocks: none						
Center Points	Effect	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power	
0	0.25	3	48	0.90	0.919009	
0	0.25	4	64	0.92	0.974932	
0	0.25	4	64	0.95	0.974932	
0	0.25	5	80	0.98	0.992740	
0	0.25	5	80	0.99	0.992740	

รูปที่ 10 จำนวนการทำซ้ำสำหรับการทดลอง 2^k Full Factorial Design



รูปที่ 11 Residual Plots



รูปที่ 12 แสดงปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดความหนาของชิ้นงาน

Factorial Regression: AVG versus Bulk Density, Pressure, Time, Weight

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	11.6124	0.77416	116.75	0.000
Linear	4	11.0002	2.75005	414.73	0.000
Bulk Density	1	0.0018	0.00181	0.27	0.603
Pressure	1	7.4418	7.44176	1122.28	0.000
Time	1	0.5502	0.55020	82.97	0.000
Weight	1	3.0065	3.00645	453.40	0.000
2-Way Interactions	6	0.1438	0.02396	3.61	0.003
Bulk Density*Pressure	1	0.0319	0.03189	4.81	0.031
Bulk Density*Time	1	0.0005	0.00047	0.07	0.790
Bulk Density*Weight	1	0.0168	0.01676	2.53	0.115
Pressure*Time	1	0.0444	0.04440	6.70	0.011
Pressure*Weight	1	0.0001	0.00011	0.02	0.899
Time*Weight	1	0.0502	0.05015	7.56	0.007
3-Way Interactions	4	0.4633	0.11583	17.47	0.000
Bulk Density*Pressure*Time	1	0.0002	0.00020	0.03	0.862
Bulk Density*Pressure*Weight	1	0.0029	0.00290	0.44	0.510
Bulk Density*Time*Weight	1	0.0012	0.00122	0.18	0.669
Pressure*Time*Weight	1	0.4590	0.45901	69.22	0.000
4-Way Interactions	1	0.0050	0.00502	0.76	0.386
Bulk Density*Pressure*Time*Weight	1	0.0050	0.00502	0.76	0.386
Error	96	0.6366	0.00663		
Total	111	12.2489			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0814307	94.80%	93.99%	92.93%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		17.1629	0.0077	2230.55	0.000	
Bulk Density	0.00804	0.00402	0.00769	0.52	0.603	1.00
Pressure	-0.51554	-0.25777	0.00769	-33.50	0.000	1.00
Time	-0.14018	-0.07009	0.00769	-9.11	0.000	1.00
Weight	0.32768	0.16384	0.00769	21.29	0.000	1.00
Bulk Density*Pressure	0.03375	0.01688	0.00769	2.19	0.031	1.00
Bulk Density*Time	0.00411	0.00205	0.00769	0.27	0.790	1.00
Bulk Density*Weight	-0.02446	-0.01223	0.00769	-1.59	0.115	1.00
Pressure*Time	0.03982	0.01991	0.00769	2.59	0.011	1.00
Pressure*Weight	0.00196	0.00098	0.00769	0.13	0.899	1.00
Time*Weight	0.04232	0.02116	0.00769	2.75	0.007	1.00
Bulk Density*Pressure*Time	0.00268	0.00134	0.00769	0.17	0.862	1.00
Bulk Density*Pressure*Weight	-0.01018	-0.00509	0.00769	-0.66	0.510	1.00
Bulk Density*Time*Weight	0.00661	0.00330	0.00769	0.43	0.669	1.00
Pressure*Time*Weight	0.12804	0.06402	0.00769	8.32	0.000	1.00
Bulk Density*Pressure*Time*Weight	-0.01339	-0.00670	0.00769	-0.87	0.386	1.00

Regression Equation in Uncoded Unit

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์การทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design

2.7 การทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อขนาดความหนาที่ได้จากการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design มาหา ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย เพื่อกำหนดเป็นค่าที่เหมาะสมกับการผลิตต่อไป ด้วยการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design เพื่อให้ได้ขนาดความหนาชิ้นงานมีขนาดความหนาไม่ต่ำกว่า 15.80 มิลลิเมตร (15.70 + 0.10 มิลลิเมตร) ซึ่งความหนา 15.70 มิลลิเมตร เป็นข้อกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ และ 0.10 มิลลิเมตร เป็นค่าเผื่อความผันแปรของกระบวนการผลิตตามที่ระบุในหัวข้อ 2.4 โดยกำหนดให้มาตรฐานความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเท่ากับ 16.20 ± 0.40 มิลลิเมตร โดยค่าความหนา 16.20 มิลลิเมตร กำหนดจากค่ามาตรฐานความหนาชิ้นงานสำเร็จรูป +0.50 มิลลิเมตร ตามที่ระบุในหัวข้อ 2.4 และกำหนดขอบเขตการยอมรับได้ ± 0.40 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดความหนาไม่ต่ำกว่า 15.80 มิลลิเมตร และกำหนดค่าระดับของแต่ละปัจจัยไว้ 3 ระดับ คือระดับต่ำ จุดกึ่งกลาง และระดับสูง ซึ่งเป็นค่าในช่วงขอบเขตการยอมรับได้ของแต่ละปัจจัยที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ตามตารางที่ 3 สำหรับน้ำหนักเคมีที่กำหนดในการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design เป็นน้ำหนักที่คำนวณเบื้องต้นจากปริมาตรของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการซึ่งแตกต่างจากการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design ซึ่งเป็นน้ำหนักเดิมที่บริษัทใช้ในการผลิต โดยต้องทำการทดลองเท่ากับ 3³ = 27 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง รวม 54 การทดลอง

จากโปรแกรม Minitab ตามรูปที่ 14 เพื่อให้ระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 95% แต่ทางบริษัทกรณีศึกษาต้องการให้ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำเท่ากับการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design คือจำนวน 7 ครั้ง รวมการทดลองในครั้งนี้ 189 การทดลอง โดยจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดของการวิเคราะห์ผล

Power and Sample Size				
General Full Factorial Design				
α = 0.05 Assumed standard deviation = 0.25				
Factors: 3 Number of levels: 3,3,3				
Include terms in the model up through order: 3				
Not including blocks in model.				
Maximum Difference	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
1	2	54	0.95	1

รูปที่ 14 จำนวนการทำซ้ำสำหรับการทดลอง 3^k Full Factorial Design

ตารางที่ 3 ปัจจัยนำเข้าและการแบ่งระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	ระดับต่ำ	จุดกึ่งกลาง	ระดับสูง	
	(-)	(0)	(+)	
1. ค่าแรงดันที่กำหนด	295	300	305	kg/cm ²
2. เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง	3	5	7	วินาที
3. น้ำหนักเคมีที่กำหนด	140	146	152	กรัม

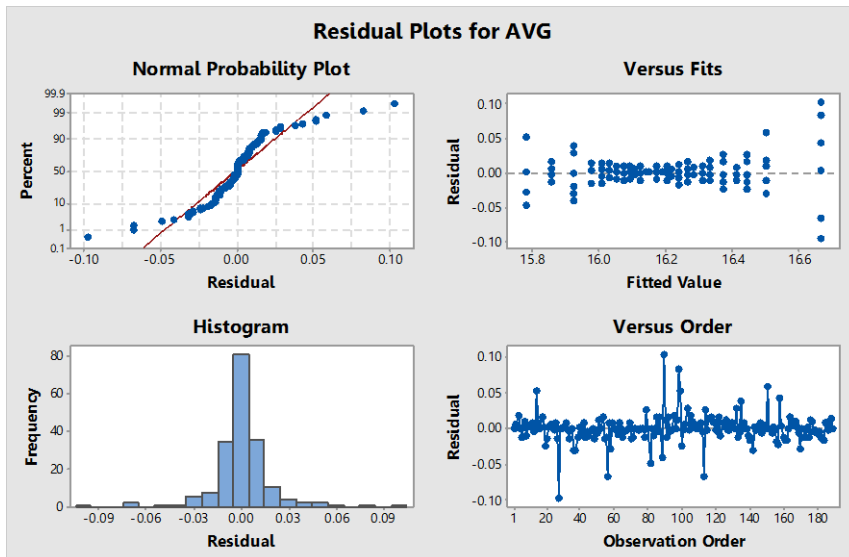


จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 4 ประการ คือ 1) มีการกระจายตัวแบบปกติ 2) ค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 และ 4) มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (σ^2) ดังรูปที่ 15 จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้

จากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) จากรูปที่ 16 พบว่า ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 99.01% และค่า R-Sq(adj) มีค่าเท่ากับ 98.65% ซึ่งมีค่ามากกว่า 75% และค่าใกล้เคียง 100% ซึ่งหมายความว่า ในความผันแปรของค่าความหนาชิ้นงานทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถ

พยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 98.65% แสดงว่าเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ และสามารถนำสมการถดถอยนี้ไปทำนายผล เพื่อหาคำตอบได้

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาที่ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ 1) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure) 2) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time) และ 3) น้ำหนักผงเคมีที่กำหนด (Weight) ส่งผลกระทบต่อขนาดความหนาของชิ้นงานเช่นเดียวกันกับการทดลองแบบแบบ 2^k Full Factorial Design จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วยฟังก์ชัน Response Optimization ของโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าทำนายค่าเฉลี่ย (\bar{y}) เท่ากับ 16.2014 ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย (Target) คือ 16.20 ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Desirability: d) เท่ากับ (0.99749 ซึ่งเป็นค่าแสดง



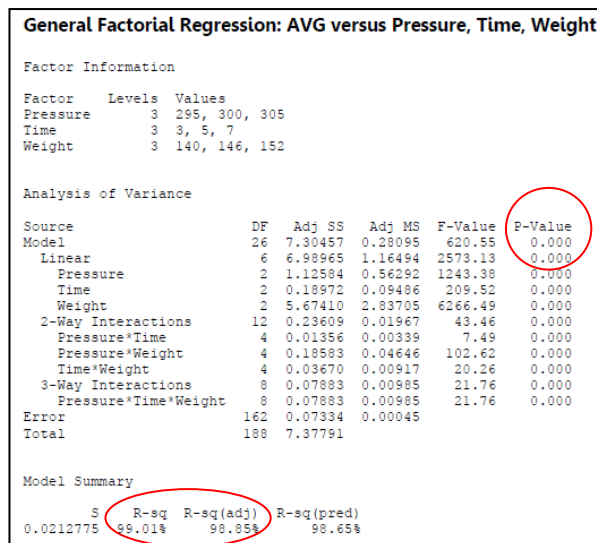
รูปที่ 15 Residual Plots



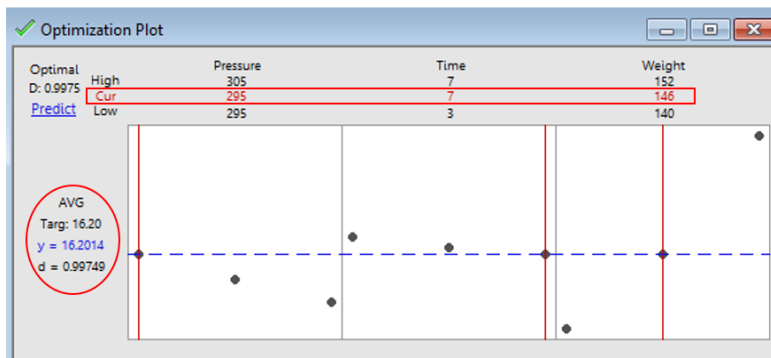
ความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยและค่าตอบสนองที่มีความสัมพันธ์กันถึง 99.75 % โดยมีค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังนี้ ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure) มีค่าระดับที่เหมาะสมเท่ากับ 295 kg/cm² เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time) มีค่าระดับที่เหมาะสมเท่ากับ 7 วินาที และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด (Weight) มีค่าระดับที่เหมาะสมเท่ากับ 146 กรัม ดังรูปที่ 17 และตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

Factor	ค่าระดับที่เหมาะสม	หน่วย
1. ค่าแรงดันที่กำหนด	295	kg/cm ²
2. เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงาน	7	วินาที
3. น้ำหนักผงเคมีที่กำหนด	146	กรัม



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์การทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design



รูปที่ 17 Optimization Plot



3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดลองผลิตชิ้นงานตามผลที่ได้

เมื่อได้ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเรียบร้อยแล้วจึงนำค่าที่ได้มาดำเนินการทดลองผลิตและติดตามผลการผลิตเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง โดยเก็บข้อมูลติดตามผลการปรับปรุงจากชิ้นงานผลิตที่รุ่น A สูตรเคมี A จำนวน 100 ชิ้น โดยผลวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการมีรายละเอียดดังนี้ จากการทำ Normality Test ในรูปที่ 18 พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.109 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สรุปได้ว่า ข้อมูลความหนาที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยสามารถวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 19

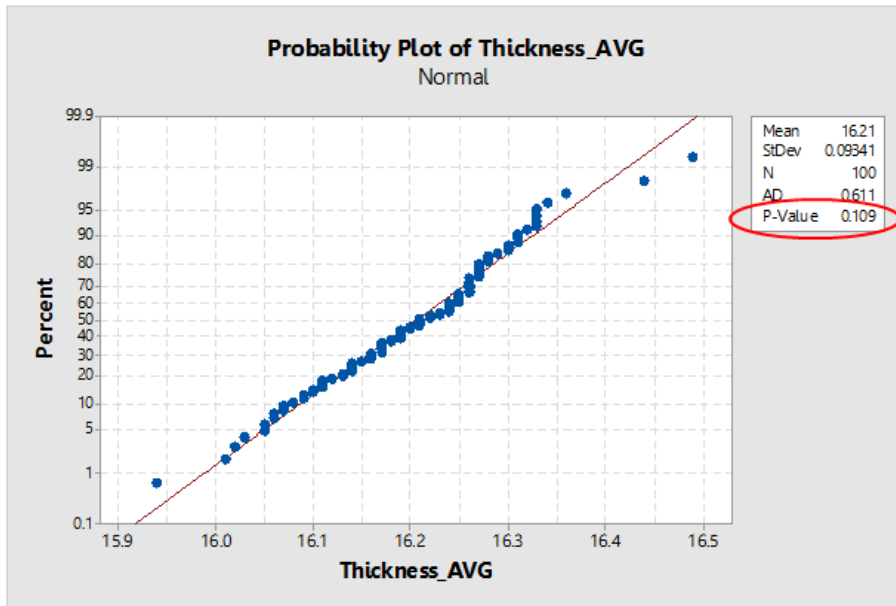
จากรูปที่ 19 ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis) จะเห็นได้ว่าความสามารถของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนหลังทดลองผลิตชิ้นงานตามผลที่ได้จากชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น พบว่าขนาดความหนาของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.21 มิลลิเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 และดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ C_p ซึ่งเท่ากับ 1.47 และค่า C_{pk} ซึ่งเท่ากับ 1.44 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 1.33 ซึ่งสรุปได้ว่าความสามารถของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนหลังทดลองผลิตชิ้นงานตามผลที่ได้นั้นมีความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้น และจากการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามรายการอื่น ๆ ที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการยอมรับชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ผลการตรวจสอบคุณภาพผ่านตาม

เกณฑ์ที่กำหนดไว้ทุกรายการ และจากตารางที่ 5 พบว่า ความหนาของชิ้นงานเป็นไปตามคุณสมบัติที่กำหนดที่ต้องการความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 16.20 ± 0.40 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 16.20 มิลลิเมตร ค่าความหนาต่ำสุดเท่ากับ 15.79 มิลลิเมตร และค่าความหนาสูงสุดเท่ากับ 16.45 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในขอบเขตการยอมรับได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของความสามารถของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุงข้อมูลจากรูปที่ 20 และ 21 พบว่ากระบวนการหลังการปรับปรุงมีความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้น

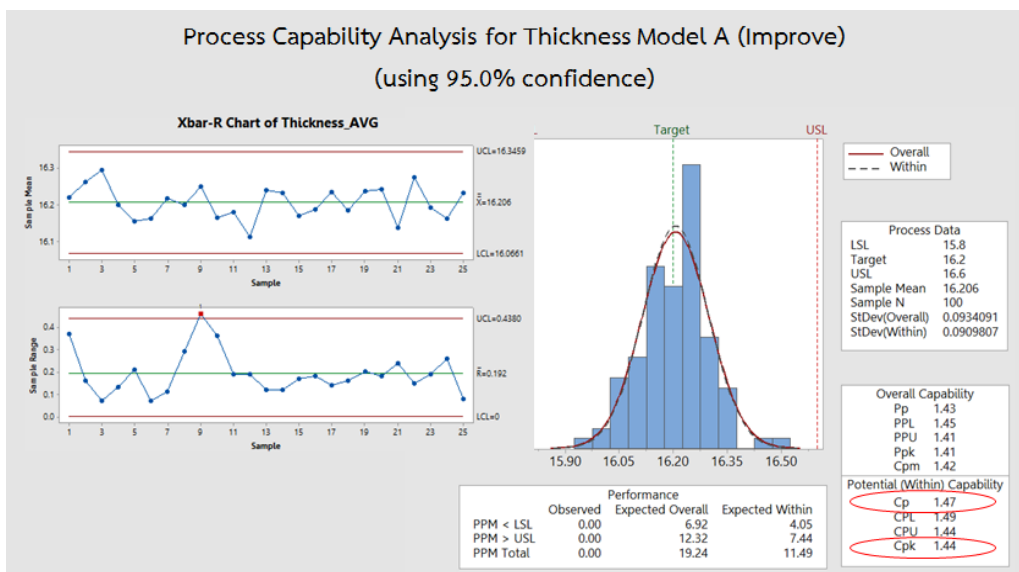
จากนั้นได้นำค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลอง มาใช้กับกระบวนการผลิตจริงซึ่งพบว่าความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลของความสามารถของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	หน่วย
1. ค่าเฉลี่ย			
ความหนาของชิ้นงาน	17.00	16.20	มิลลิเมตร
2. ค่าต่ำสุด			
ความหนาของชิ้นงาน	16.47	15.97	มิลลิเมตร
3. ค่าสูงสุด			
ความหนาของชิ้นงาน	17.51	16.45	มิลลิเมตร
4. ค่าพิสัย (R)	1.04	0.48	มิลลิเมตร
5. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.25	0.09	-



รูปที่ 18 Probability Plot สำหรับขนาดความหนาของชิ้นงาน



รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการด้วยโปรแกรม Minitab



3.2 สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลของผลิตภัณฑ์รุ่น A สูตรเคมี A ที่เลือกทำการศึกษาพบว่า จากการลดค่าเพื่อความผันแปรของขนาดความหนาในแต่ละกระบวนการ ตามตารางที่ 6 และใช้ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ตามตารางที่ 4 ซึ่งหลังทำการปรับปรุง สามารถทำให้ค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีที่ใช้ในการผลิตเดิมที่เผื่อไว้ 24 กรัม หรือ 17.85% หลังการปรับปรุงจะเหลือค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีเพียง 10 กรัมหรือ 7.35% ตามตารางที่ 6 คิดเป็นน้ำหนักที่ลดลงต่อชิ้นเท่ากับ 14 กรัม หรือคิดเป็นน้ำหนักที่ลดลง 8.75% และได้ทำการขยายผลไปยังผลิตภัณฑ์รุ่นอื่น ๆ ของดีสก์เบรกสูตรเคมี A ในการผลิตจริง โดยลดค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีจากเดิม 17.85% ลงเหลือ 7.35% และใช้ระดับค่าควบคุมของ

แต่ละปัจจัยเช่นเดียวกันกับผลิตภัณฑ์รุ่น A ซึ่งทั้งหมดผ่านการตรวจสอบคุณภาพตามที่ทางบริษัทกรณีศึกษากำหนด

ปัจจุบันบริษัทในกรณีศึกษาได้กำหนดเกณฑ์ค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ดีสก์เบรกทุกรุ่นในสูตรเคมี A ใหม่ โดยให้เผื่อไว้เพียง 7.35% ซึ่งทำให้สามารถลดน้ำหนักผงเคมีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของทุกรุ่นลงได้ 8.75% ซึ่งอนุมานได้ว่าหากบริษัทมียอดการผลิตเท่ากับปี 2562 ซึ่งมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีสูตร A เท่ากับ 276,279 กิโลกรัม บริษัทจะมีปริมาณการใช้น้ำหนักเคมีเพียง 251,414 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักเคมีที่ลดลงเท่ากับ 24,865 กิโลกรัม ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนลงได้เป็นจำนวนเงิน 1,989,212 บาท และสามารถลดต้นทุนการผลิตดีสก์เบรกเกรดเคมี A ลงได้ 2.60%

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าเผื่อน้ำหนักเคมีและค่าเผื่อขนาดความหนา ผลิตภัณฑ์ A สูตรเคมี A ของแต่ละกระบวนการ ก่อนและหลังปรับปรุง

กระบวนการ	น้ำหนักเคมีมาตรฐาน (กรัม)	น้ำหนักเคมีชิ้นงาน (กรัม)	ค่าเผื่อน้ำหนักเคมี (g)/ ค่าเผื่อขนาดความหนา(mm)							
			กระบวนการ ฝนตกแต่ง	กระบวนการ อัดขึ้นรูปร้อน	ผาร่องและ ลบมุม	รวมค่าเผื่อทั้งหมด				
ก่อนปรับปรุง	136	160	7 g	5.25%	14 g	10.57%	3 g	2.04%	24 g	17.85%
			+0.50 mm		+1.00 mm				+1.50 mm	
หลังปรับปรุง	136	146	2 g	1.47%	5 g	3.68%	3 g	2.04%	10 g	7.35%
			+0.10 mm		+0.40 mm				+0.50 mm	



4. บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปสาเหตุปัจจัยของปัญหาที่ทำให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกเป็นจำนวนมากนั้น ซึ่งพบว่าสาเหตุเกิดจากในกระบวนการผลิตผ้าเบรกก่อนปรับปรุงนั้น มีความจำเป็นต้องเผื่อน้ำหนักผงเคมีไว้เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิต อันเนื่องมาจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่ง 2) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพร้อม และ 3) การเผื่อน้ำหนักชิ้นงานสำหรับการเผ่ารองและการลบมุม

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ 2 ระดับ (2^k Full Factorial Design) เพื่อต้องการตรวจสอบว่ามีปัจจัยหลัก (Main Effect) ปัจจัยใดบ้าง จากทั้งหมด 4 ปัจจัยเบื้องต้น ที่ได้การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหา Why-Why Analysis คือ 1) ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด (Bulk Density) 2) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure) 3) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time) และ 4) น้ำหนักเคมีที่กำหนด (Weight) ที่ส่งผลกระทบต่อขนาดความหนาของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพร้อม ซึ่งพบว่ามีเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้น ที่ส่งผลกระทบต่ออย่างแท้จริงต่อขนาดความหนาของชิ้นงานดังนี้ 1) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure) 2) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time) และ 3) น้ำหนักเคมีที่กำหนด (Weight) และนำปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างแท้จริงนั้นไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ 3 ระดับ (3^k Full Factorial Design) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

ซึ่งค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงจะสามารถลดปริมาณการใช้ผงเคมีในการผลิตผ้าเบรกลงได้ 8.75% ส่วนค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกเกรดเคมี A ที่ทางบริษัทกรณีศึกษา กำหนดไว้ 17.85% นั้นมากเกินไป ซึ่งค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีเกรดเคมี A ในการผลิตผ้าเบรกที่เหมาะสมนั้นควรอยู่ที่ 7.35%

4.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถขยายผลการออกแบบการทดลองดังกล่าวไปยังสูตรเคมีอื่น ๆ และสามารถนำหลักการออกแบบการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้ เพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและสามารถหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ในกระบวนการผลิตดีสก์เบรกที่เหมือนกัน ซึ่งทำให้มีค่าพารามิเตอร์ที่เป็นมาตรฐานโดยส่งผลให้สามารถลดต้นทุนของกระบวนการผลิตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทผู้ผลิตผ้าเบรกที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลและขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญร่วมกันระดมความคิดเพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศิลปากรที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] <https://kasikornbank.com/th/business/sme>

/KSMEKnownedKS/article/KSMEAnalysis/Pages/Thai-Automotive_4-0.aspx.

(Accessed on 6 August 2019)



- [2] P. Boonklang, Variation reduction of acrylic foam tape width in slitting process by six sigma approach, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009, pp. 130-138. (in Thai)
- [3] M. Sae-ung, A study of factors affecting plating thickness in electro-plating Process, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2001, pp. 62-107. (in Thai)
- [4] W. Thaweasuk, The study of factors effecting the crown inducement of write/read head assembly of hard disk drive by using the design of experiment, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2003, pp. 84-101. (in Thai)
- [5] P. Natasan, Design of experiment for analyzing factors in corrugated box production process, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2010, pp. 93-159. (in Thai)
- [6] W. Hemso, Defect reduction from brake pads production by using DMAIC method, Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. 2013, pp. 97-173. (in Thai)
- [7] P. Parakawong na ayuthaya, Design of experiment to waste reduction injection process of electronic parts, Thesis, Silpakorn University, Thailand. 2018, pp. 15-21, 77-88. (in Thai)
- [8] <http://leanmanufacturing-tawatchai.blogspot.com/2009/12/why-why-analysis-5-gen.html> (Accessed on 10 August 2019)
- [9] <https://www.sasimasuk.com/15842591/brainstorm>. (Accessed on 15 August 2019)
- [10] A. Kengwinit, Application of experimental design for improving kurtosis process capability of pitch in suspension industry, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2010, pp. 7-16. (in Thai)



การอบแห้งใบกะเพราด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

อณัฐริชา จันทะพันธ์¹, สุมล แซ่เฮง พิสิษฐสังฆการ^{2*} และ ธนิต สวัสดิ์เสวี³

¹สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมยานยนต์และพลังงาน, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³สายวิชาเทคโนโลยีอณูณหภาพ, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

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

วันที่รับบทความ: 23 ธันวาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 24 กุมภาพันธ์ 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มีนาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 มีนาคม 2564

บทคัดย่อ: ใบกะเพราเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาหารไทย แต่อย่างไรก็ตามใบกะเพราเก็บรักษาได้ไม่นานด้วยเหตุนี้การใช้กระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาใบกะเพราวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและคุณภาพในด้านสีของใบกะเพราอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง ใบกะเพราจะถูกอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟช่วงกำลัง 300 ถึง 500 วัตต์ ความเร็วลมตั้งไว้ที่ 0.3 เมตรต่อวินาที และมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ในขณะที่ใช้ความเร็วสายพาน (ไป-กลับ) 0.02 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า อัตราการลดลงของความชื้นในใบกะเพราจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้ง และกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความสว่าง (L^*) และสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ค่าความสว่าง และสีเหลือง จะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบกะเพราด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการทดลองนี้คือ ใช้ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟ 500 วัตต์ (2x250 W)

คำสำคัญ: ใบกะเพรา; ลมร้อน; ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ; ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะ

Holy Basil Leaves Drying using Combined Microwave and Hot Air Conveyer Belt Dryer

Anatticha Chanthaphan¹, Sumol Sae-heng Pisitsungkakarn^{2*} and Thanit Swasdisevi³

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

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

³ Division of Thermal Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

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

Received: 23 December 2020; Revised 24 February 2021; Accepted: 2 March 2021

Online Published: 18 March 2021

Abstract: Holy basil is an important ingredient of Thai food. However, it cannot preserve for a long time since the use of a suitable drying process is necessary to prolong the shelf-life of holy basil. This research aimed to investigate the drying kinetics, specific energy consumption and quality (in term of color) of dried holy basil leaves using a microwave-hot air conveyer belt dryer. The holy basil leaves was dried at temperature range 60 to 80°C and microwave powers range 300 to 500 watt. Air velocity was set at 0.3 m/s with 80% of recycled air while the belt conveyor velocity (forward-backward) was 0.02 m/s. The results showed that the rate of moisture reduction increased with an increase in drying temperature and microwave power. For hot air drying, it was found that the lightness (L^*) and yellowness (b^*) decreased with an increase in temperature. For microwave-hot air drying, the L^* and b^* value increased with and increased in microwave power. The specific energy consumption decreased with an increase in the microwave power. Based on this experiment, the optimum condition for holy basil drying using microwave-hot air drying was the use of an air velocity 0.3 m/s, temperature of 80°C and microwave power of 500 watt (2x250 W).

Keywords: Holy basil leaves; Hot air drying; Microwave-hot air drying; Specific energy consumption



1. บทนำ

กะเพราเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในไทยและต่างประเทศ โดยเอกลักษณ์ของใบกะเพราจะมีกลิ่นหอมและมีรสเผ็ดเหมาะสำหรับนำมาประกอบอาหารโดยเฉพาะเมนูผัดกะเพราและอาหารจำพวกต้มยำ รวมถึงเป็นสรรพคุณทางยาเพื่อช่วยในการบรรเทาอาการหรือโรคต่าง ๆ ที่เป็นอยู่ซึ่งสามารถใช้เป็นยาขับลมแก้อาการท้องอืดท้องเฟ้อและช่วยทำให้เลือดลมไหลเวียนดีขึ้น [1] เป็นต้น แต่ปัจจุบันใบกะเพราที่จำหน่ายในตลาดต่างประเทศหาซื้อได้ยากและมีราคาสูง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการดูแลและเก็บรักษาใบกะเพราเพื่อไม่ให้ใบกะเพราเกิดการเหี่ยวเฉาและเน่าเสีย อีกทั้งการขนส่งยังต้องใช้ระยะเวลาเนิ่นนานกว่าจะถึงมือผู้บริโภคซึ่งการที่จะนำใบกะเพราไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้น ใบกะเพราควรมีคุณภาพที่ดีและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับใบกะเพราสดมากที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการนำใบกะเพราไปผ่านกระบวนการถนอมอาหารในวิธีการต่าง ๆ โดยกระบวนการอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาคุณภาพ [2] และสามารถเพิ่มมูลค่าของใบกะเพราได้ ซึ่งกระบวนการอบแห้งนั้นมีหลากหลายวิธีเช่น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด [3] การอบแห้งด้วยลมร้อน [4] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ [5] การอบแห้งด้วยรังสีอาทิติย์ [6] การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดคลื่นไกล [7] เป็นต้น

โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ไม่สูงมากนัก การใช้งานไม่ซับซ้อน แต่การอบแห้งด้วยวิธีนี้ใช้เวลาค่อนข้างนาน

เป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเสื่อมคุณภาพทั้งในแง่ของทางกายภาพและทางโภชนาการ อีกทั้งมีการสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทำให้ใช้พลังงานมาก ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งไม่มีประสิทธิภาพ [8-10] จากงานวิจัยการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรพบว่า การอบแห้งใบมะกรูดด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50°C ความเร็วลม 0.3 m/s มีอัตราส่วนความชื้นต่ำที่สุด โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 420 min และใช้พลังงานรวมทั้งหมด 411.48 MJ/kg (น้ำระเหย) ซึ่งใช้เวลาและพลังงานมากที่สุด [11] ปัจจุบันจึงมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีคุณสมบัติในการกำจัดความชื้นภายในเนื้อวัสดุได้โดยไม่ทำให้ผิวด้านบนของวัสดุเกิดความเสียหายและทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะช่วยในการเร่งการระเหยของน้ำภายในวัสดุ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟในระดับพลังงานที่แตกต่างกันคือ 100, 300 และ 450 W จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไมโครเวฟ [10,12] แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในวัสดุจนผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการนำฟริกซ์ฟ้าไปอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้นและที่คลื่นไมโครเวฟสูงกว่า 106.93 W จะส่งผลให้ฟริกซ์เกิดความเสียหายเป็นอย่างมากและก่อให้เกิดการติดไฟภายในห้องอบได้ [13] ดังนั้นเพื่อลดความเสียหายในการอบแห้ง สามารถนำเทคนิค



การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาใช้โดย การให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เป็นช่วง ๆ จะช่วยลดพลังงานในการอบแห้งลง ส่งผลให้ ค่าอัตราการอบแห้งสูงขึ้นและเกิดการกระจาย ความชื้นที่สม่ำเสมอ [13-14] อีกทั้งมีสีและกลิ่น ไกล่เคียงกับผลิตภัณฑ์สด ตลอดจนได้คุณสมบัติ ของเนื้อสัมผัสที่ดีในเวลาที่รวดเร็วและประหยัดพลังงาน กว่าวิธีอื่น [15]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำ ไมโครเวฟมาทำงานร่วมกับลมร้อน เพื่อใช้ศึกษา กระบวนการอบแห้งของใบกะเพราในกรณีต่าง ๆ ที่จะ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีคุณภาพ โดยไม่ทำให้เกิด ความเสียหายและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ อบแห้งให้ดียิ่งขึ้น สามารถเป็นแนวทางที่จะนำไป ประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ใช้ใบกะเพราสดที่ผ่านมาตรฐาน GAP จากผู้ประกอบการ โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล ค่าความละเอียด 0.01 g (Sartorius BSA3202S-CW) ค่าความคลาดเคลื่อน 0.05 g ในการชั่งน้ำหนักรวมไป ถึงการหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบ กะเพร่าก่อนและหลังจากการอบแห้ง ซึ่งเครื่อง อบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ใช้ในการ ทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบสายพาน ลำเลียง ดังรูปที่ 1

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับไมโครเวฟแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้ชุดลดไฟให้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ร่วมกับ

เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟทั้งหมด 2 ตัวขนาด 2x150, 2x200 และ 2x250 W ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ปรับความเร็วลมเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง 0.3 m/s โดยใช้ลมร้อนหมุนเวียนที่ 80% เพื่อลดการสิ้นเปลือง พลังงานจากการสูญเสียความร้อน และปรับความเร็ว สายพาน (ไป-กลับ) ไว้ที่ 0.02 m/s

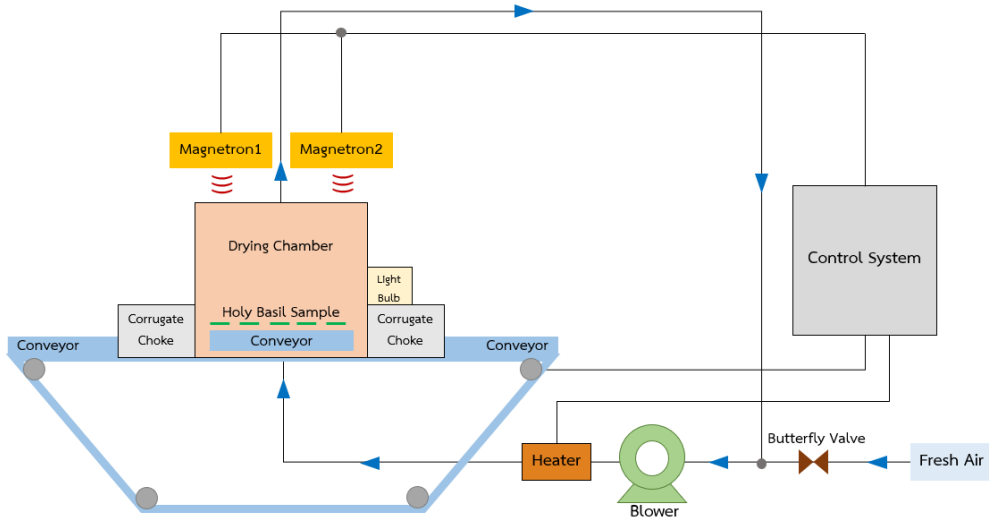


รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ [16]

เครื่องทดสอบคุณภาพด้านสี Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) ที่สามารถวิเคราะห์ Reflectance graph ได้ ซึ่งมีการกำหนดมาตรฐาน ทางการวิจัยโดยใช้ระบบ CIE Lab scale สำหรับวัด ค่าคุณภาพสีของใบกะเพร่าก่อนและหลังการอบแห้ง โดยที่ L^* คือ ค่าความสว่าง (100), มีด (0) ค่า a^* คือ ค่าสีเขียว ($-a^*$), ค่าสีแดง ($+a^*$) และค่า b^* คือ ค่าสี น้ำเงิน ($-b^*$), ค่าสีเหลือง ($+b^*$)

2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบก่อนการทดลอง การอบแห้ง และ การทดสอบคุณภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

2.2.1 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบก่อนการทดลอง

การหาค่าความชื้นเริ่มต้นโดยการนำใบกะเพราสดมาล้างทำความสะอาดและซับน้ำออกให้แห้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิตอลให้ได้ใบกะเพราสดประมาณ 2 g ตัดแบ่งเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อทำการอบแห้งหาค่าความชื้นเริ่มต้น ด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตามวิธีการ AOAC (1990)

การเตรียมใบกะเพราเพื่อใช้ในการอบแห้ง โดยการนำใบกะเพราสดมาทำการชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิตอลให้ได้ 20 g แล้วล้างทำความสะอาดและซับน้ำก่อนทำการอบแห้ง

2.2.2 ขั้นตอนการอบแห้ง

ในขั้นตอนนี้การทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ อบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ในส่วนแรกนำใบกะเพราสดน้ำหนัก 20 g ที่เตรียมไว้มาทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ความเร็วลม 0.3 m/s โดยบันทึกค่าที่

จำเป็นทุก 3 min จนได้ค่าความชื้นสุดท้าย 6-8% (d.b.) จากนั้นทำการจดบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลมชนิดลวดความร้อน และไมโครเวฟ จากมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานจำเพาะ

ในส่วนที่สองนำใบกะเพราสดน้ำหนัก 20 g ที่เตรียมไว้มาทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250, 2x200 และ 2x250 W ความเร็วลม 0.3 m/s ความเร็วสายพาน 0.02 m/s โดยบันทึกค่าที่จำเป็นทุก 3 min จนได้ค่าความชื้นสุดท้าย 6-8% (d.b.) โดยปริมาณความชื้นหาได้จากสมการที่ (1)

$$MC_d = \frac{(w-d)}{d} \quad (1)$$

โดยที่ MC_d คือ ความชื้นฐานแห้ง (d.b.), เศษส่วน w คือ มวลของใบกะเพราสด, kg d คือ มวลของใบกะเพราอบแห้ง, kg



จากนั้นทำการจัดบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลม ขดลวดความร้อน และไมโครเวฟ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบกะเพราดังสมการที่ (2)

$$SEC_{dry\ solid} = \frac{E_{blower} + E_{heater} + E_{microwave}, MJ}{Mass, kg} \quad (2)$$

โดยที่ $SEC_{dry\ solid}$ คือ พลังงานจำเพาะสำหรับอบใบกะเพราแห้งหนึ่งกิโลกรัม, MJ/kg

- E_{blower} คือ พลังงานที่ใช้ในเครื่องเป่าลม, MJ
- E_{heater} คือ พลังงานที่ใช้ในขดลวดความร้อน, MJ
- $E_{microwave}$ คือ พลังงานที่ใช้ในไมโครเวฟ, MJ
- Mass คือ น้ำหนักใบกะเพราอบแห้ง, $kg_{(dry\ solid)}$

2.2.3 ขั้นตอนทดสอบคุณภาพ

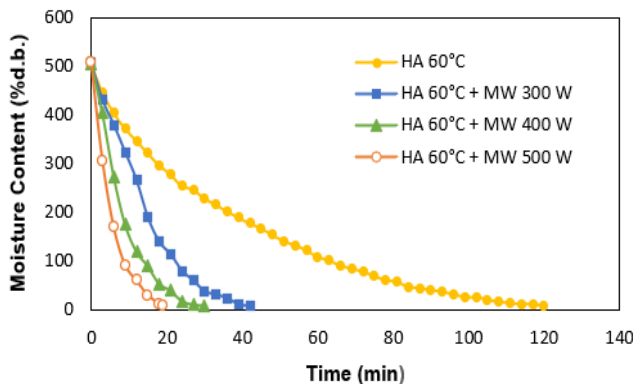
ทำการทดสอบ คุณภาพ ด้านสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) โดยพิจารณาจากค่า L^*a^* และ b^* ในแต่ละเงื่อนไขทำการทดลองใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ใบ ทำการวัดสีของใบกะเพราทั้ง 2 ด้าน และนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี ANOVA

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบกะเพรา

การทดลองนี้เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา โดยมีรายละเอียดดังนี้

กรณีอุณหภูมิลมร้อน 60°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W วัดความชื้นเริ่มต้นได้ 506.75% (d.b.) จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงช้ากว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 120 min และเมื่ออบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ 2x150, 2x200 และ 2x250 W พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงเร็วขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 42 30 และ 19 min ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250 W ใช้เวลาน้อยที่สุด เนื่องจากไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนก่อให้เกิดความร้อนขึ้นทำให้น้ำระเหยออกมาจากวัสดุได้เร็วขึ้น



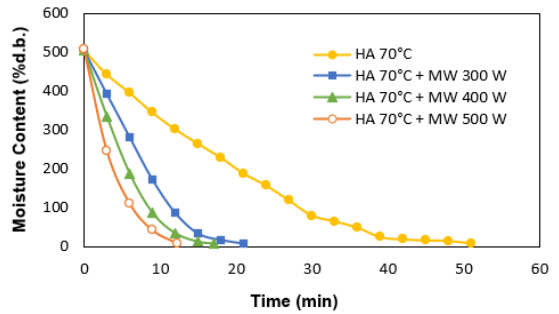
รูปที่ 3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เทียบกับเวลากรณีอุณหภูมิลมร้อน 60°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W



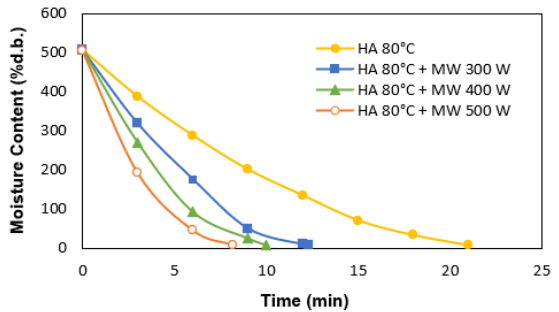
กรณีอุณหภูมิลมร้อน 70°C ร่วมกับไมโครเวฟ กำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W วัดความชื้นเริ่มต้นได้ 506.75% (d.b.) จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงช้ากว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 51 min และเมื่ออบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ 2x150, 2x200 และ 2x250 W พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงเร็วขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 21 17 และ 12.30 min ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน 70°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250 W ใช้เวลาน้อยที่สุด กรณีอุณหภูมิลมร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W วัดความชื้นเริ่มต้นได้ 506.75% (d.b.) จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงช้ากว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 21 min และเมื่ออบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ 2x150, 2x200 และ 2x250 W พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงเร็วขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 12.30 10 และ 8.15 min ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250 W ใช้เวลาน้อยที่สุด

ความเร็วของลมร้อนส่งผลต่อการอบแห้งใบกะเพรา โดยเมื่อความเร็วของลมร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะส่งผลต่อ

การอบแห้งมากกว่าผลจากการเพิ่มความเร็วมดังกล่าว ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วมเพียง 0.3 m/s เนื่องจากถ้าใช้ความเร็วมที่มีค่าสูงกว่านี้ จะส่งผลให้ใบกะเพราปลิวภายในห้องอบได้



รูปที่ 4 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เทียบกับเวลากรณีอุณหภูมิลมร้อน 70°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W



รูปที่ 5 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เทียบกับเวลากรณีอุณหภูมิลมร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W

นอกจากนี้ผลของการเพิ่มอุณหภูมิและกำลังของไมโครเวฟให้สูงขึ้น หากมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้นที่ใบกะเพราและส่งผลให้เกิดรอยไหม้หรือจุดดำที่ใบกะเพราอบแห้ง รวมทั้งมีผลทำให้ใบกะเพราสูญเสียคุณภาพตามมาอีกด้วย



3.2 คุณภาพของใบกะเพราอบแห้ง

ใบกะเพราอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยลมร้อน เทียบกับลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกเงื่อนไข จะถูกนำไปทดสอบคุณภาพด้านสีด้วยการวัดค่าสี L^* a^* และ b^* ของใบกะเพราอบแห้งเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด โดยผลการทดสอบด้านสีของใบกะเพราด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ค่าสีจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ANOVA

เมื่อพิจารณาใบกะเพราอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งทางด้านหน้า และด้านหลังพบว่าค่า L^* และ b^* จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนของใบกะเพราพบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นค่า L^* และ b^* จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการอบแห้งใบกะเพราโดยใช้

ไมโครเวฟกำลัง 2x250 W ที่ลมร้อนอุณหภูมิ 70°C และ 80°C จะมีค่าความสว่าง (L^*) ดีที่สุด คือ 27.51±0.26 และ 27.53±0.36 ตามลำดับ ในขณะที่เงื่อนไขที่ใช้ไมโครเวฟกำลัง 2x200 W ที่ลมร้อนอุณหภูมิเดียวกันจะมีค่าสีแดง (a^*) ดีที่สุด คือ 0.40±0.62 และ 0.37±0.48 ตามลำดับ สำหรับค่าสีเหลือง (b^*) ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C พบว่า ที่กำลังไมโครเวฟ 2 x 250 W อุณหภูมิลมร้อน 80°C ค่าสีเหลืองมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาสีของใบกะเพราทั้ง L^* a^* และ b^* พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลัง 2x250 W และลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ให้ค่าสีของใบกะเพรามีค่าดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด

ตารางที่ 1 ค่าสี L^* a^* b^* ของด้านหน้าและด้านหลังของใบกะเพราอบแห้งเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด

Condition	L^*		a^*		b^*	
	Front	Back	Front	Back	Front	Back
Fresh Basil	24.82±0.58 ^b	28.49±1.18 ^a	-6.97±0.34 ^d	-6.71±0.19 ^f	19.13±1.18 ^a	19.34±0.37 ^a
HA 60°C	20.13±0.65 ^{ef}	20.49±1.66 ^f	1.74±0.26 ^b	1.73±1.14 ^{abc}	15.00±2.88 ^{bcd}	13.53±1.93 ^{de}
HA-MW 60°C, 2x150 W	20.68±2.47 ^{de}	22.98±1.53 ^{de}	2.15±0.34 ^{ab}	1.82±0.51 ^{ab}	12.06±1.48 ^{ef}	13.96±1.76 ^{cd}
HA-MW 60°C, 2x200 W	20.25±2.87 ^{def}	21.77±0.63 ^{def}	2.56±0.67 ^a	2.23±0.52 ^a	12.57±0.89 ^{ef}	12.62±1.09 ^{de}
HA-MW 60°C, 2x250 W	22.06±0.35 ^{cde}	22.28±1.85 ^{def}	1.60±0.23 ^b	1.72±0.37 ^{abc}	11.90±0.34 ^{ef}	12.86±1.13 ^{de}
HA 70°C	20.43±1.93 ^{def}	20.87±1.44 ^{ef}	0.62±0.25 ^c	1.17±0.56 ^{abcde}	12.80±1.19 ^{def}	12.17±0.96 ^{de}
HA-MW 70°C, 2x150 W	23.64±1.16 ^{bc}	23.76±1.05 ^{cd}	1.71±0.77 ^b	1.46±1.21 ^{abcd}	13.29±1.47 ^{cde}	13.25±0.89 ^{de}
HA-MW 70°C, 2x200 W	24.47±1.66 ^{bc}	26.19±0.42 ^{ab}	0.40±0.62 ^c	0.85±0.78 ^{bcde}	15.38±0.57 ^{bc}	16.41±2.76 ^{bc}
HA-MW 70°C, 2x250 W	27.51±0.26 ^a	27.34±1.17 ^{ab}	0.51±0.34 ^c	-0.02±0.18 ^e	16.82±0.39 ^b	16.61±1.90 ^b
HA 80°C	17.78±1.41 ^f	20.41±1.91 ^f	0.73±0.66 ^c	0.98±0.17 ^{bcde}	10.69±0.19 ^f	12.46±0.53 ^{de}
HA-MW 80°C, 2x150 W	20.93±1.25 ^{de}	21.31±1.03 ^{ef}	0.69±0.26 ^c	0.78±0.43 ^{bcde}	11.28±0.48 ^{ef}	11.21±1.24 ^e
HA-MW 80°C, 2x200 W	22.99±1.25 ^{bcd}	25.62±1.41 ^{bc}	0.37±0.48 ^c	0.59±0.38 ^{cde}	15.57±0.47 ^{bc}	14.60±1.31 ^{bcd}
HA-MW 80°C, 2x250 W	27.53±0.36 ^a	28.25±0.29 ^a	0.72±0.27 ^c	0.41±0.62 ^{de}	15.48±1.95 ^{bc}	16.63±1.31 ^b

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)



3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของใบกะเพราอบแห้ง

การทดลองนี้จะใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งทั้งหมด 3 ส่วนคือ เครื่องเป่าลม ขดลวดความร้อน และพลังงานที่ใช้กับแมกนีตรอนของไมโครเวฟ ซึ่งจะมีการนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ที่ 80% เพื่อลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงการแจกแจงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลม ขดลวดความร้อน ไมโครเวฟ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวม จะเห็นได้ชัดว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในทุกอุณหภูมิอบแห้งทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบกะเพราด้วยลมร้อนกับไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวในทุกอุณหภูมิอบแห้ง กรณีอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C กำลังไมโครเวฟ 2x250 W จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุดคือ 515.76 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 1,503.19 MJ/kg ซึ่งพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 987.43 MJ/kg

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานจำเพาะและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบกะเพรา

Condition	Time (min)	Blower (MJ/kg)	Heater (MJ/kg)	MW (MJ/kg)	SEC (MJ/kg)
HA 60°C	120	76.60	1426.60	-	1503.19
HA-MW 60°C, 2x150 W	42	52.79	504.58	232.88	790.25
HA-MW 60°C, 2x200 W	30	48.52	390.62	316.72	755.85
HA-MW 60°C, 2x250 W	19	20.63	237.25	257.88	515.76
HA 70°C	51	60.67	889.89	-	950.56
HA-MW 70°C, 2x150 W	21	20.23	394.38	121.35	535.96
HA-MW 70°C, 2x200 W	17	20.23	313.48	161.80	495.51
HA-MW 70°C, 2x250 W	12	20.11	261.45	170.95	452.51
HA 80°C	21	20.40	530.00	-	550.40
HA-MW 80°C, 2x150 W	12	20.23	293.26	70.79	384.27
HA-MW 80°C, 2x200 W	10	20.06	260.72	90.25	371.03
HA-MW 80°C, 2x250 W	8	20.00	234.56	101.98	356.55



สำหรับกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x250 W พบว่า มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุด 452.51 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70°C อย่างเดียวมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 950.56 MJ/kg ซึ่งพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 498.05 MJ/kg

กรณีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x250 W พบว่า มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุดคือ 356.55 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะมีค่าพลังงานจำเพาะเท่ากับ 550.40 MJ/kg ซึ่งพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 193.85 MJ/kg เป็นที่น่าสังเกตว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x250 W มีการใช้พลังงานจำเพาะที่น้อยที่สุดเท่ากับ 356.55 MJ/kg โดยใช้พลังงานของเครื่องเป่าลม 5.61% พลังงานของขดลวดความร้อน 65.79% และพลังงานของไมโครเวฟ 28.60% ทำให้สามารถลดพลังงานของขดลวดความร้อนได้ถึง 55.74% เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นการอบแห้งด้วยเทคนิคลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟจะช่วยลดพลังงานในส่วนของการลดความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้พลังงานจากไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาในการอบแห้งที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

4. บทสรุป

เมื่อทำการอบแห้งไปกะเพราด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (60 70 และ 80°C) ร่วมกับไมโครเวฟที่ กำลังต่าง ๆ (2x150, 2x200 และ 2x250 W) โดยตั้งความเร็วลม 0.3 m/s และมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ในขณะที่ใช้ความเร็วสายพาน (ไป-กลับ) 0.02 m/s สามารถลดความชื้นในไปกะเพราสด ลดระยะเวลาอบแห้ง และลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งได้มากขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองเป็นไปตามหลักการของการถ่ายเทความร้อนคือ เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในของไปกะเพราเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกของไปกะเพรามากยิ่งขึ้น เป็นผลโดยตรงต่อการเพิ่ม Drying Force ของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ดังนั้นจึงส่งเสริมให้การอบแห้งดีขึ้นตามไปด้วย

การทดสอบคุณภาพด้านสีด้วยการวัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของไปกะเพราอบแห้งเปรียบเทียบกับไปกะเพราสดพบว่า สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น และสำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น

ดังนั้นกรณีที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง



2x250 W เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ลดลง 61.19% ค่าพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ลดลง 35.22% และมีคุณภาพสีที่ใกล้เคียงกับไมกะเพราะสดมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณห้องวิจัยอบแห้ง สายวิชา เทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อห้องทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2020-GRAD-03

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Suriyakanthorn and R. Assavarachan, Microwave drying models of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) leaves, Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, 2012, 18(1), 59–67. (in Thai)
- [2] F. Gulcimen, H. Karakaya and A. Durmus, Drying of sweet basil with solar air collectors, Renewable Energy, 2016, 93, 77-86.
- [3] T. Wang, R. Khir, Z. Pan and Q. Yuan, Simultaneous rough rice drying and rice bran stabilization using infrared radiation heating, LWT-Food Science and Technology, 2017, 78, 281-288.
- [4] S. Srisuriyawong, S. Wanlapa, W. Phromjan, and N. Chankamma, Drying kinetics of paddy dried with the small-scale paddy dryer, Agricultural Science Journal, 2014, 45(2)(Suppl.), 345-348. (in Thai)
- [5] A. Chen, G. Achkar, B. Liu and R. Bennacer, Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process, Journal of Food Engineering, 2020, 292, 1-7.
- [6] J. Jareanjit, A solar dryer technology and its development, KCU Research Journal, 2012, 17(1), 110-124. (in Thai)
- [7] W. Sriariyakul, T. Swasdisevi, S. Devahastin and S. Soponronnarit, Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation, Food and Bioprocess Technology, 2016, 100, 391-400.
- [8] A. Elmizadeh, M. Shahedi and N. Hamdami Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices, Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 43, 130-135.



- [9] P. Toomthong, S. Suayklang and P. Toomthong, Study of wolffia drying using hot air, Rajamangala Surin Conference (RSC 2016), Proceeding, 2016, 365-370. (in Thai)
- [10] S. Pangkanya, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, Durian Chips Drying Using Combined Microwave-Hot Air with Step-Down Microwave Power Input Technique, KKU Research Journal (Graduate Studies), 2016, 16(3), 102-111. (in Thai)
- [11] K. Sittichaitaweekul, T. Swasdisevi, and S. Soponronnarit, Kaffir lime leave drying using combined microwave and hot air, 15th Conference on Energy Network of Thailand, (E-NETT-Thailand 2019), Proceeding, 2019, 889-903. (in Thai)
- [12] A. Chahbani, N. Fakhfakh, M.A. Balti, M. Mabrouk, H.E. Hatmi, N. Zouari and N. Kechaou, Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.), Food Bioscience, 2018, 25, 32-38.
- [13] T. Tipyavimol and S. Chirnaksorn, Hot air-microwave combination drying of chili, Thai Agricultural Research Journal, 2007, (25)1, 46-57. (in Thai)
- [14] Y. Pu and D. Sun, Drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution, Biosystem Engineering, 2017, 156, 108-119.
- [15] Y. Jia, I. Khalifa, L. Hu, W. Zhu, J. Li, K. Li and C. Lia, Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques, Food and Bioproducts Processing, 2019, 118, 67-76.
- [16] K. Apinyavisit, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, Design of prototype of combined microwave-hot air conveyor belt dryer, KKU Science Journal, 2017, 45(3), 628-638. (in Thai)

อิทธิพลของความเร็วรอบต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ใช้ น้ำมันเอทานอลผสมดีเซล

ศักดิ์ดา ธงชาย* และ ประทีป ชัยเสริมเทวัญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

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

วันที่รับบทความ: 21 มกราคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 3 มีนาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 4 มีนาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 มีนาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอลผสมน้ำมันดีเซลโดยใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวประสาน เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบค่าต่าง ๆ โดยสัดส่วนการผสมระหว่างเอทานอล-ดีเซล-ไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดสอบ จะถูกกำหนดด้วยปริมาณไบโอดีเซลที่ผสมในดีเซลที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจริง (ร้อยละ 3, 7 และ 10) เพื่อให้ใกล้เคียงกับความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในอนาคตอันใกล้มากที่สุด เป็นการลดช่องว่างระหว่างการศึกษาวิจัยและการนำไปใช้งาน สำหรับร้อยละเอทานอลที่ผสมจะถูกจำกัดด้วยการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิด โดยไม่เกิดการแยกชั้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงถึง 10 องศาเซลเซียส และสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานถึง 3 เดือน การทดสอบจะถูกทำขึ้นในเครื่องยนต์ดีเซลสี่สูบที่มีขายจริงในท้องตลาดที่ไม่มีการปรับแต่ง หรือปรับจูนระบบควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์แต่อย่างใด ทั้งนี้ น้ำมันที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยน้ำมันดีเซลที่มีขายในท้องตลาดซึ่งผสมไบโอดีเซลร้อยละ 7 (DB7) และน้ำมันผสมเอทานอลอีก 3 อัตราส่วนได้แก่ DB3E7, DB7E5 และ DB10E10 ทั้งนี้จะมีการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องยนต์ตั้งแต่ 1400-2800 รอบต่อนาทีเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงและอิทธิพลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ปรับเปลี่ยนเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เปลี่ยนไป โดยผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบไม่ส่งผลต่ออิทธิพลของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ แต่ความเร็วรอบจะทำให้คุณลักษณะการเผาไหม้ของทุกเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปในทำนองเดียวกันคือ ที่ความเร็วรอบต่ำการเผาไหม้เกิดขึ้นในสองช่วงเวลา และจังหวะการเริ่มต้นการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง สำหรับที่ค่าความเร็วรอบคงที่ค่าใดๆ เชื้อเพลิงเอทานอลจะส่งผลต่อการเริ่มการเผาไหม้ที่ล่าช้า แต่การผสมไบโอดีเซลเพื่อใช้เป็นตัวประสานจะช่วยเร่งการเผาไหม้ให้เกิดเร็วขึ้น ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่เกิดการเผาไหม้ล่าช้าจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่สูง และใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้น้อย

คำสำคัญ: เอทานอล; ไบโอดีเซล; น้ำมันดีเซล; คุณลักษณะการเผาไหม้

Influence of Speed on Combustion Behavior of a Compression Ignition Engine using Ethanol Blended Diesel Fuel

Sakda Thongchai* and Prateep Chaisermtawan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,
Kasetsart University Sriracha Campus

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

Received: 21 January 2021; Revised 3 March 2021; Accepted: 4 March 2021

Online Published: 24 March 2021

Abstract: This research has studied the combustion characteristics of a compression ignition (CI) engine or diesel engine when using ethanol-blended diesel and biodiesel as the co-solvent when the engine is running at varying speeds. The objective of this study is to bridge the gap between the research and application. Therefore, the ratios of ethanol-diesel-biodiesel are limited by the biodiesel concentration, currently blended in diesel and sold in the market (3, 7 and 10%) because they are the prospective fuels in the near future. The amounts of ethanol are constrained by the phase separation problem. Tri-blend fuels should be homogeneous liquid phase even though the ambient temperature is low as 10 °C. In addition, they should be stored as long as 3 months with phase stability. The four-cylinder commercial diesel engine without any modification and recalibration was used throughout the experiment. Four fuels including 3 ratios of ethanol-diesel-biodiesel (DB3E5, DB7E5 and B10E10) blend and one commercial diesel with 7% of biodiesel (DB7) were used to test. To understand its effect on the influence of each fuel on combustion behaviors, the engine speed has been varied from 1400-2800 rpm. The results found that the combustion characteristics have been changed the same for all test fuels when engine speed was varied. The form of combustion feature is dependent on engine speed and does not rely on test fuels. However, at each engine speed ethanol tends to delay the ignition while adding biodiesel as the additive could advance combustion. The retarded combustion results in a higher rate of heat release and shorter combustion duration.

Keywords: Holy basil leaves; Hot air drying; Microwave-hot air drying; Specific energy consumption



1. บทนำ

แม้ว่าประเทศไทยจะมีความพยายามในการใช้เชื้อเพลิงทดแทนเพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ แต่จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่ามี การนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นทุกปี [1] ทั้งนี้เนื่องมาจากจำนวนรถยนต์ดีเซล [2] ที่มากส่งผลให้ความต้องการใช้น้ำมันดีเซลที่สูงซึ่งมากกว่าเบนซินถึงเกือบสองเท่า ในขณะที่เชื้อเพลิงทดแทนโดยส่วนใหญ่สามารถใช้ทดแทนได้เฉพาะน้ำมันเบนซิน เช่น ก๊าซ LPG, CNG และเอทานอล นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตน้ำมันสำเร็จรูปจากน้ำมันดิบไม่สามารถเลือกการผลิตน้ำมันดีเซลได้เพียงชนิดเดียว จำเป็นต้องทำการผลิตน้ำมันดีเซลและเบนซินควบคู่กันไป ดังนั้นหากต้องการลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ จึงจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือกที่ผลิตภายในประเทศ และสามารถนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้

นอกจากนี้ ความเข้มงวดของการควบคุมมลพิษที่ปล่อยออกมาจากยานยนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดงานวิจัยที่พยายามลดปริมาณสารมลพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คิวตันดำหรืออนุภาคขนาดเล็ก (Particulate Matter, PM) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่เป็นปัญหาหลักของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากพืช เช่น อ้อย กากน้ำตาล มันสำปะหลัง โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเอทานอลสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจก (GHG) ได้เป็นอย่างดีเมื่อใช้ในเครื่องยนต์เบนซิน [3, 4] และสามารถช่วยลดปริมาณเขม่า/คิวตันดำและ NO_x ได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล [5, 6]

ด้วยข้อจำกัดของเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศและนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้เพียงไม่กี่ชนิด ประกอบกับศักยภาพในการผลิตเอทานอลที่เกิดการบริโภคเป็นเชื้อเพลิงภายในประเทศ [7] รวมถึงประโยชน์ในการลดปริมาณสารมลพิษที่เป็นปัญหารุนแรงโดยเฉพาะฝุ่นควันในปัจจุบัน การนำเอทานอลมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษา

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของเอทานอลที่มีค่าจำนวนซีเทน ความหล่อลื่นและความหนืดที่ต่ำ ทำให้อเอทานอลไม่เหมาะสมกับการใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยเฉพาะค่าจำนวนซีเทนที่ต่ำทำให้อเอทานอลไม่สามารถจุดระเบิดได้ด้วยตนเอง (Autoignition) ในเครื่องยนต์ดีเซล [8] การใช้อเอทานอลจึงจำเป็นต้องทำการผสมในน้ำมันดีเซล ใช้เทคนิค Fumigation การใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับดีเซล (Dual fuel) หรือการเติมสารเติมแต่งลงไปในเอทานอล [9, 10] ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป สำหรับวิธีการผสมเอทานอลในน้ำมันดีเซลจะเป็นวิธีที่มีความเป็นไปได้สูงที่สุดในการใช้กับเครื่องยนต์โดยไม่ต้องทำการดัดแปลง อย่างไรก็ตามข้อด้อยของวิธีการผสมนี้คือการเกิดการแยกชั้นระหว่างเอทานอลและดีเซล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการผสมเอทานอลในปริมาณที่มาก อุณหภูมิต่ำ หรือมีน้ำเจือปนสูง [11] ดังนั้นสารเติมแต่งจำพวกตัวประสาน (Co-solvent / Emulsifier) หรือสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) จึงเป็นสิ่งจำเป็น [12,13]

ด้วยคุณสมบัติที่ปลายด้านหนึ่งมีโครงสร้างแบบไม่มีขั้วเช่นเดียวกับดีเซล ทำให้ไปโอดีเซลสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกับดีเซล ในขณะที่ปลายอีกด้าน



หนึ่งมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบทำให้เกิดโครงสร้างแบบมีขั้วเช่นเดียวกับเอทานอล ไบโอดีเซลจึงสามารถผสมกับเอทานอลได้ดีเช่นเดียวกัน จากกฎ Like-Dissolve-Like ไบโอดีเซลจึงถูกใช้เป็นตัวประสานในเชื้อเพลิงผสมระหว่างเอทานอลและดีเซลได้เป็นอย่างดี [14, 15] ยิ่งไปกว่านั้นไบโอดีเซลยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่เป็นที่ต้องการในเครื่องยนต์ดีเซล คือค่าซีเทน ความหนืดและความหล่อลื่นที่สูง การใช้ไบโอดีเซล เป็นตัวประสานในน้ำมันเอทานอลผสมจึงสามารถลดเขยื้อนคุณสมบัติของเอทานอลที่ขาดหายไปได้ในบางส่วน [16, 17]

การศึกษาการใช้ไขมันผสม เอทานอล-ดีเซล-ไบโอดีเซลที่ผ่านมาพบว่า เครื่องยนต์มีสมรรถนะลดต่ำลง ในขณะที่กินน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น [18, 19] สำหรับผลกระทบทางด้านปริมาณสารมลพิษพบว่า การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารมลพิษประเภทคาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และออกไซด์ของไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทดสอบ [20, 21] ในขณะที่เอทานอลและไบโอดีเซลส่งผลให้ควันดำ เขม่าและฝุ่นละอองขนาดเล็กมีปริมาณลดลงอย่างชัดเจนเป็นไปในทางเดียวกัน [22, 23]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่ผ่านมาทำการศึกษาผลกระทบของน้ำมันผสมทั้งสามในเครื่องยนต์ดีเซล แต่งานวิจัยส่วนมากจะศึกษาผลของเอทานอลและไบโอดีเซลแบบแยกส่วน นั่นคืองานวิจัยส่วนหนึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันเอทานอลในขณะที่สัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลคงที่ และในทางตรงข้ามงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งจะทำการเปลี่ยนสัดส่วนไบโอดีเซลแต่กำหนดปริมาณเอทานอลให้คงที่ ไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการรวมผลกระทบของน้ำมันไบโอดีเซลและเอทานอล

ไว้ในงานเดียวกัน นอกจากนี้การศึกษาที่ผ่านมาโดยส่วนมาก สัดส่วนที่เลือกใช้ทดสอบ จะมีเพื่อวัตถุประสงค์ของการวิจัยเป็นหลักไม่ได้มุ่งเน้นถึงการนำไปใช้งานในอนาคตอันใกล้ สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการเชื่อมต่อระหว่างงานวิจัยและการนำไปใช้ได้จริง ดังนั้นสัดส่วนที่เลือกใช้ในการทดสอบจะถูกกำหนดด้วยปริมาณไบโอดีเซลที่มีการผสมใช้จริงในท้องตลาดร้อยละ 3, 7 และ 10 เพื่อเทียบเคียงกับการใช้จริง ทั้งในด้านการผสมและการเตรียมเชื้อเพลิง ทั้งนี้ปริมาณเอทานอลที่ถูกผสมเข้าไปจะต้องมั่นใจว่าไม่เกิดการแยกชั้นด้วยการทดสอบ Phase Stability ก่อนนำไปทดสอบในเครื่องยนต์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

2.1 เครื่องยนต์ทดสอบ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซลสี่สูบ สี่จังหวะ แกวเรียง ระบายความร้อนด้วยน้ำที่ไม่มีการดัดแปลงใดๆ ทั้งสิ้น โดยคุณลักษณะต่างๆ ของเครื่องยนต์ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของน้ำมันผสมทั้งสามชนิดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานจริง สมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ (ECU) จะทำการฉีดเชื้อเพลิงด้วยค่าต่างๆ (จังหวะและความดันการฉีดเชื้อเพลิง รวมถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีด) ที่ถูกโปรแกรมมาจากโรงงานผลิตโดยไม่ทำการเปลี่ยนแปลงใดๆ ทั้งสิ้นในทุกสภาวะการทดสอบ

แท่นทดสอบไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current ยี่ห้อ DYNomite™ รุ่น 012-200-1K ถูกติดตั้งกับเครื่องยนต์ เพื่อทำการควบคุมความเร็วรอบตั้งแต่ 1400-2800 รอบต่อนาที (ความเร็วรอบที่ครอบคลุม



การทำการจริงในรถยนต์) และวัดค่าแรงบิด ซึ่งเครื่องยนต์จะถูกกำหนดตำแหน่งคันเร่งไว้คงที่ที่ทุกสภาวะการทดสอบ ก่อนการทดสอบเครื่องยนต์จะต้องทำการอุ่นเครื่องเพื่อให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและน้ำมันหล่อลื่นถึงค่า 85 °C การเก็บค่าจะเริ่มดำเนินการเมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะการทำงานคงที่ (Steady State Conditions)

2.2 เชื้อเพลิงทดสอบ

น้ำมันที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยน้ำมัน 4 ชนิดคือ น้ำมันดีเซล และน้ำมันผสมเอทานอลที่มีการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวประสาน 3 อัตราส่วน เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการทดสอบเชื้อเพลิงผสมที่มีความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง ดังนั้นสัดส่วนการผสมจะถูกกำหนดด้วยการผสมไบโอดีเซลที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจริงประกอบด้วยน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซลร้อยละ 3, 7 และ 10 โดยปริมาตร ซึ่งจะเรียกว่าน้ำมัน DB3, DB7, และ DB10 ตามลำดับ โดย D แทนคำว่า ดีเซล และ B แทนคำว่า ไบโอดีเซล ส่วนตัวเลขแทนร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมในดีเซล จากนั้นน้ำมันผสมไบโอดีเซลทั้งสามอัตราส่วนจะถูกนำมาผสมเอทานอลในสัดส่วนต่างๆ เพื่อทดสอบ Phase Stability เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าน้ำมันผสมเอทานอล-ไบโอดีเซล-ดีเซล จะไม่เกิดการแยกชั้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-10 °C และสามารถเก็บรักษาได้นานจนถึงสามเดือน ทั้งนี้ผลการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงที่ผ่านการทดสอบและถูกนำมาใช้ในการทดสอบในเครื่องยนต์ประกอบด้วยน้ำมัน DB3 จำนวนร้อยละ 95 ผสมเอทานอลร้อยละ 5 เรียกว่าน้ำมัน DB3E5 น้ำมัน DB7 จำนวนร้อยละ 95 ผสม

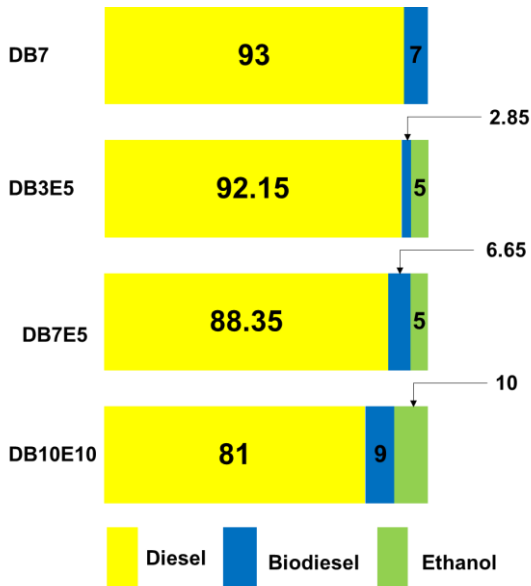
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเครื่องยนต์

ยี่ห้อ	ISUZU
รุ่น	4JK1-TC
แบบเครื่องยนต์	ดีเซล 4 สูบแถวเรียง 4 จังหวะ จังหวะระบายความร้อนด้วยน้ำ
กระบอกสูบ x ช่วงชัก	95.4 x 87.4 มม.
ปริมาตรกระบอกสูบ	2,499 ซีซี.
อัตราส่วนแรงอัด	18.1:1
ระบบวาล์ว	16 วาล์ว DOHC
ระบบฉีดเชื้อเพลิง	ความดันสูงแบบรางร่วม Common rail

เอทานอลร้อยละ 5 เรียกว่า DB7E5 และน้ำมัน DB10 ร้อยละ 90 ผสมเอทานอลร้อยละ 10 นอกจากนี้ น้ำมันดีเซลที่ใช้อ้างอิงจะเป็นน้ำมันดีเซลที่ผสมไบโอดีเซลร้อยละ 7 (DB7) เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงที่ขายในท้องตลาด ทั้งนี้เมื่อคิดสัดส่วนการผสมจริงของเชื้อเพลิงทดสอบทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2

2.3 การทดสอบการเผาไหม้ในกระบอกสูบ

การทดสอบถูกทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก (Automotive Technology and Alternative Energy Research Group, ATAE) โดยเซนเซอร์แบบ Piezoelectric ยี่ห้อ Kistler รุ่น 6052C ถูกนำมาใช้วัดความดันในกระบอกสูบที่ทุกๆ 1 องศาหมุนเพลอาซ์หรือเหวี่ยงที่ถูกให้สัญญาณการเก็บค่าด้วยเอ็นโค้ดเดอร์แบบหมุน



รูปที่ 1 ร้อยละของน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลและเอทานอลที่ผสมอยู่ในน้ำมันทดสอบแต่ละชนิด

(Incremental Rotary Encoder) ยี่ห้อ Baumer ทั้งนี้ สัญญาณความถี่ในกระบอกสูบจะถูกส่งผ่านไปยังตัวขยายสัญญาณยี่ห้อ Dewetron รุ่น DEWE-30-4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

Properties	Diesel	Biodiesel	Ethanol	DB7	DB3E5	DB7E5	DB10E10
Density (g/cm ³)	0.814	0.864	0.782	0.829	0.829	0.830	0.828
Viscosity (cSt)	3.07	4.5	1.2	3.2	3.0	3.0	2.8
Heating Value (kJ/kg)	45.86	40.1	27.6	44.8	43.9	42.9	41.7
Cetane Number	-	67.9	-	-	56.5	56.7	53.6
Lubricity (μm)	532	172	-	201	245	282	240
Heat of Vaporization (kJ/kg)	254 [24]	254 [24]	904 [24]				
Enthalpy of Vaporization (kJ/g)	0.250 [25]	0.245 [25]	0.846 [26]				
Specific Heat Capacity (J g ⁻¹ K ⁻¹) @298 K	1.87-1.92 [26]	2.12 [27]	2.44 [28]				

ก่อนนำไปเก็บที่หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมด้วยโปรแกรม Dewesoft เป็นจำนวน 100 วัฏจักรต่อเนื่องกันสำหรับทุกสภาวะการทดสอบค่าความดันทั้ง 100 วัฏจักรจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละสภาวะการทดสอบและถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (Rate of Heat Release) ซึ่งคำนวณได้จากจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อสมมติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างการเผาไหม้ดังแสดงในสมการที่ (1) [29]

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (1)$$

เมื่อ p คือความดันในกระบอกสูบ V คือปริมาตรในกระบอกสูบ, และ γ คือค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Ratio) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.3 แม้ว่าค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะจะเปลี่ยนแปลงตามความดันและอุณหภูมิ



สำหรับเวลาที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ในการศึกษานี้จะนิยามที่ตำแหน่งมุมเพลาช้อเหวียงที่เกิดการเผาไหม้ของสารผสมเป็นสัดส่วนร้อยละ 5 โดยคำนวณจากความร้อนที่ปล่อยออกมาสะสมที่ตำแหน่งใดๆ ทหารด้วยค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาสะสมทั้งหมด

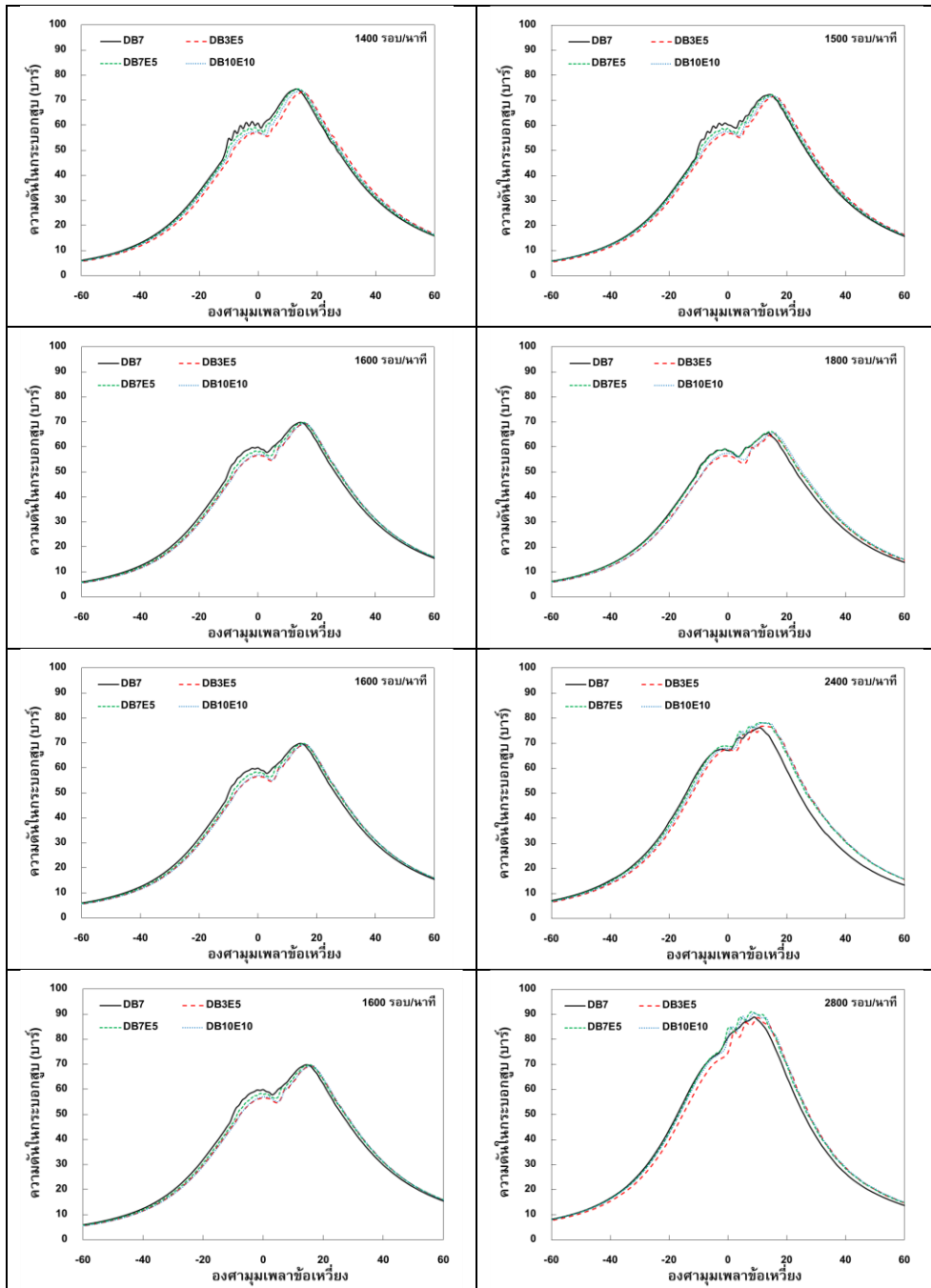
3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบต่อความดันในกระบอกสูบ

รูปที่ 2 แสดงค่าความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบค่าต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิด ผลการทดสอบเป็นไปในทางเดียวกันที่ทุกความเร็วรอบว่าน้ำมันดีเซล DB7 มีแนวโน้มที่ค่าความดันในกระบอกสูบในช่วงแรก (ก่อนศูนย์ตายบนจนถึงประมาณ 10 องศาหลังศูนย์ตายบน) สูงกว่าน้ำมันที่ใช้เอทานอลผสมโดยมีไบโอดีเซลเป็นตัวประสาน ตามมาด้วยน้ำมัน DB7E5, DB10E10 ในขณะที่น้ำมัน DB3E5 ให้ค่าความดันต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมัน DB7 เกิดการเผาไหม้ก่อนตามมาด้วยน้ำมัน DB7E5, DB10E10 และน้ำมัน DB3E5 ตามลำดับซึ่งจะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่จะได้กล่าวในลำดับถัดไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความดันที่เกิดขึ้นสูงสุด (P_{max}) ในกระบอกสูบดังรูปที่ 3 จะพบว่าน้ำมัน DB7E5 ให้ค่าสูงสุดในขณะที่ DB3E5 ให้ค่าต่ำสุด การให้ค่า P_{max} ที่สูงสุดของน้ำมัน DB7E5 เนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กันจากการเผาไหม้มวลเชื้อเพลิงที่มีจำนวนมากกว่าน้ำมัน DB7 อันเป็นผลมาจากการเริ่มการเผาไหม้ที่ช้ากว่าในขณะที่การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นล่าช้าเกินไปของน้ำมัน DB3E5 ส่งผลในทางตรงข้ามเนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้น

ในช่วงที่ลูกสูบขยายตัวลงไปสู่ศูนย์ตายล่างซึ่งปริมาตรในกระบอกสูบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันลดลง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบไม่ส่งผลต่ออิทธิพลของเชื้อเพลิงทดสอบต่อค่าความดันสูงสุด แต่การเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ค่าความดันสูงสุดมีค่าลดลงสำหรับทุกน้ำมันทดสอบในช่วง 1400-1800 รอบต่อนาที แต่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบต่อไปจาก 1800-2800 รอบต่อนาที ค่าความดันในกระบอกสูบมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบนี้เครื่องยนต์จะถูกให้ทำงานด้วยการควบคุมของ ECU อย่างอิสระ การลดลงของค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นในช่วงแรก (1400-1800 rpm) เป็นผลมาจากจังหวะในการฉีดเชื้อเพลิงที่เกิดความล่าช้าเพิ่มมากขึ้น (เห็นได้อย่างชัดเจนในการวิเคราะห์ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อน) ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นต่อไปอีก จังหวะในการฉีดเชื้อเพลิงจะถูกปรับให้เกิดล่วงหน้าเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้เชื้อเพลิงถูกฉีดได้ทัน โดยจะเห็นได้ว่าค่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่สูงจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเพลาช้อเหวียงที่ใกล้ศูนย์ตายบนซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องยนต์จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด (ปริมาตรกระบอกสูบน้อย) ในขณะที่ความดันสูงสุดที่มีค่าต่ำกว่าจะเกิดที่ตำแหน่งเพลาช้อเหวียงที่อยู่ห่างจากศูนย์ตายบนมากกว่า [29]

อิทธิพลของความเร็วรอบต่อตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุดที่ล่าช้าในช่วงแรกเนื่องมาจากเวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการเผาไหม้มีค่าลดลง (Time Base) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อพิจารณาเป็นค่ามุมเพลาช้อเหวียง (Angle Base) จะใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่จังหวะการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่เร็วขึ้น



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่อความดันในกระบอกสูบเมื่อใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

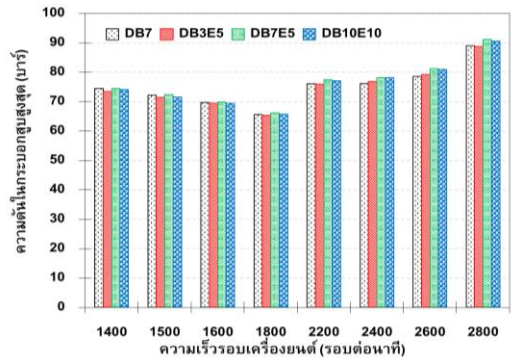


น่าจะเป็นผลต่อตำแหน่งค่าความดันสูงสุดที่เกิดเร็วขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยกต่อไป เนื่องจากหากเครื่องยนต์ยังคงทำการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งเดิม กระบวนการเผาไหม้ทั้งหมดอาจจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ทันเวลาที่วาล์วไอเสียจะทำการเปิด ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลง

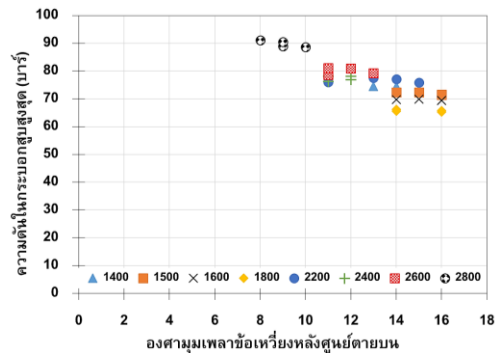
สำหรับอิทธิพลของเชื้อเพลิงทดสอบต่อตำแหน่งที่เกิดค่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบดังแสดงในรูปที่ 5 จะพบว่าตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุดของน้ำมันดีเซลเกิดขึ้นเร็วที่สุดในขณะที่น้ำมัน DB3E5 เกิดในตำแหน่งที่ล่าช้าที่สุด น้ำมัน DB10E10 มีแนวโน้มเกิดล่าช้ากว่า DB7E5 ซึ่งล่าช้ากว่าน้ำมันดีเซล DB7 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุดไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามผลของตำแหน่งที่เกิดค่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบนี้พอจะคาดการณ์ได้ว่า น้ำมันที่มีเอทานอลเป็นส่วนผสมน่าจะเริ่มเกิดการเผาไหม้ล่าช้ากว่าน้ำมันดีเซลซึ่งจะแสดงรายละเอียดในอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนในหัวข้อถัดไป

3.2 ผลกระทบต่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน

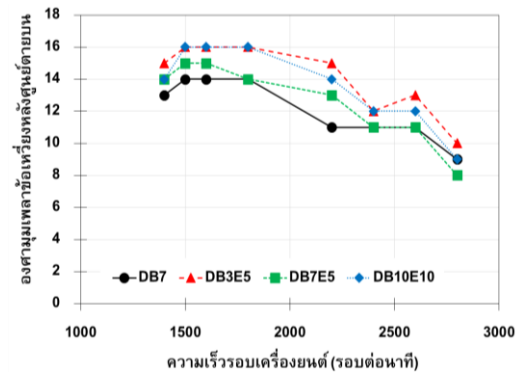
จากค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนในรูปที่ 6 จะพบว่าความเร็วยกที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยที่ความเร็วยกเครื่องยนต์ต่ำถึงปานกลางตั้งแต่ 1400 - 2200 รอบต่อนาทีการเผาไหม้จะเกิดขึ้นในสองช่วงเวลา คือ ช่วงก่อนศูนย์ตายบนระหว่าง -15 ถึง 0 องศาเฟลา ข้อเหวี่ยงช่วงก่อนศูนย์ตายบนระหว่าง -15 ถึง 0 องศาเฟลาข้อเหวี่ยงการปลดปล่อยความร้อนจะเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวที่



รูปที่ 3 ค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดที่ความเร็วยกของเครื่องยนต์ค่าต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบสูงสุดและตำแหน่งที่เกิดที่ความเร็วยกเครื่องยนต์ค่าต่างๆ



รูปที่ 5 ตำแหน่งที่เกิดค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดของเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิดที่ความเร็วยกต่างๆ

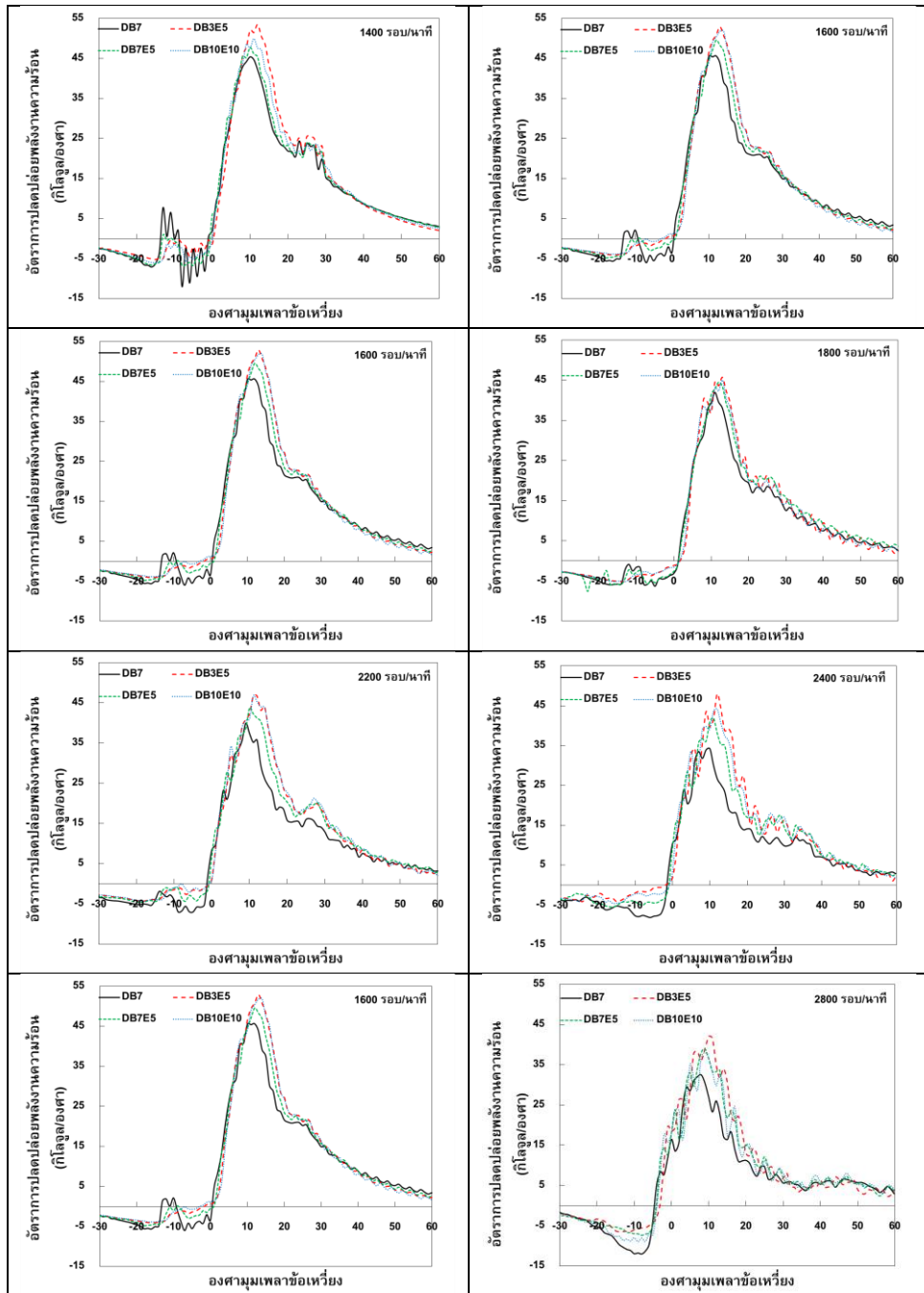


ตำแหน่งหลังศูนย์ตายบน ทั้งนี้เนื่องมาจากโดยทั่วไปที่สภาวะความเร็วรอบต่ำ ECU จะสั่งการให้เครื่องยนต์ฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงสองครั้งเพื่อประโยชน์ทางด้าน การเดินเครื่องที่ราบเรียบและการควบคุมมลพิษของเครื่องยนต์ คือครั้งที่หนึ่งฉีดน้ำมันเพียงปริมาณเล็กน้อยในช่วงการฉีดก่อน (Pilot หรือ Pre Injection) โดยที่ความเร็วรอบต่ำมากเชื้อเพลิงจะถูกฉีดในปริมาณมากกว่าที่ความเร็วรอบสูง การปลดปล่อยพลังงานในช่วง Pre/pilot จึงมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และครั้งที่สองฉีดน้ำมันปริมาณมากในช่วงการฉีดหลัก (Main Injection) สำหรับที่ความเร็วรอบสูงเครื่องยนต์จะถูกฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วงการฉีดหลักเพียงช่วงเดียว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่เริ่มการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไป จะพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในช่วงแรกที่ 1400-1800 รอบต่อนาที ตำแหน่งเริ่มการเผาไหม้มีค่าล่าช้ามากขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยังต่อไปจาก 2200-2800 รอบต่อนาที ตำแหน่งการเริ่มการเผาไหม้เกิดขึ้นล่วงหน้าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับตำแหน่งความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในหัวข้อนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน

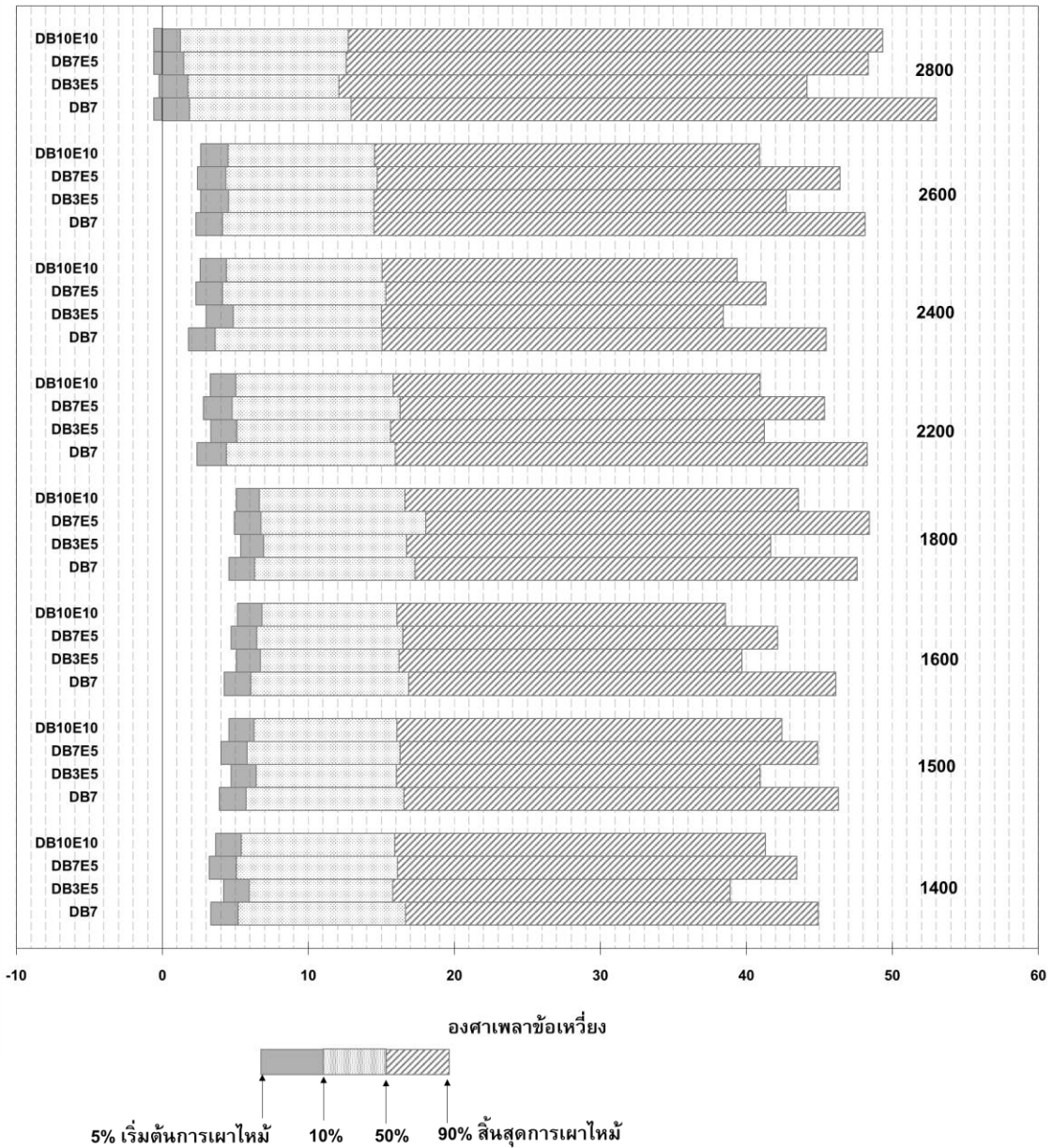
แม้ว่ารูปแบบของการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ซึ่งแสดงด้วยค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิดจะไม่แตกต่างกัน แต่เชื้อเพลิงที่ผสมเอทานอลและไบโอดีเซลจะส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ได้ออกมาแตกต่างจากน้ำมันดีเซล โดยในช่วงการเผาไหม้ก่อน

(Pre/Pilot Combustion) เชื้อเพลิงที่ผสมเอทานอลจะให้ค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่ำกว่า และเวลาที่เชื้อเพลิงเริ่มปลดปล่อยความร้อนล่าช้ากว่า น้ำมันดีเซลที่ผสมเพียงไบโอดีเซลร้อยละ 7 ทั้งนี้เนื่องมาจากเอทานอลต้องการพลังงานความร้อนที่สูงในการระเหยเป็นไอ (Heat of Vaporization) ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นเมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดในช่วงการฉีดก่อน น้ำมันดีเซลซึ่งดูดความร้อนน้อยกว่าจึงสามารถระเหยและปลดปล่อยความร้อน (Exothermic) ได้ใน ส่วนหนึ่ง ในขณะที่เอทานอลต้องดูดความร้อน (Endothermic) ส่วนมากไปในการระเหย และส่งผลให้ต้องให้เวลายาวนานก่อนที่สารผสมจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นพร้อมในการปลดปล่อยความร้อน

การผสมเอทานอลลงในเชื้อเพลิงไม่เพียงแต่ส่งผลต่อการเผาไหม้ในช่วง Pre/Pilot เชื้อเพลิงเอทานอลยังส่งผลให้การเผาไหม้หลัก (Main Combustion) เกิดความล่าช้ากว่าเชื้อเพลิงที่ไม่มีเอทานอลเป็นส่วนผสม เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [30] ดีเซล DB7 เริ่มต้นการเผาไหม้เร็วที่สุด สอดคล้องกับค่าความดันที่สูงในช่วงแรกและค่าตำแหน่งความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นเร็วสุดดังที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้า เป็นไปในทำนองเดียวกันเชื้อเพลิง DB3E5 เริ่มเกิดการเผาไหม้ช้าที่สุดโดยที่ค่าความดันในกระบอกสูบต่ำสุดและตำแหน่งความดันสูงสุดในกระบอกสูบเกิดขึ้นห่างจากศูนย์ตายบนมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเอทานอลต้องการความร้อนในการระเหยกลายเป็นไอมากที่สุด จึงต้องใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จนถึงอุณหภูมิที่สามารถจุดระเบิดได้เองยาวนานกว่าเชื้อเพลิง DB7



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 7 ตำแหน่งเพลาช้อเหวี่ยงการเผาไหม้ที่ร้อยละ 5, 10, 50 และ 90 ของมวลที่ถูกเผาไหม้ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิด



นอกจากนี้ในช่วงจังหวะการอัดของเครื่องยนต์ ดีเซลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบจะเสมือนว่าเป็นไปตามกระบวนการ Isentropic ดังแสดงในสมการที่ 2 [29]

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

เมื่อ γ คือ Ratio of Specific Heat, T และ P คือ อุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบตามลำดับ ซึ่งค่าอุณหภูมิหรือความดันที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่า γ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, c_p) ของเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่าเอทานอลมีค่าความร้อนจำเพาะที่สูง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกระบอกสูบจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ผสมเอทานอลเกิดการเริ่มต้นเผาไหม้ช้ากว่า

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน DB3E5 และ DB7E5 ซึ่งมีปริมาณเอทานอลเท่ากันแต่ปริมาณไบโอดีเซลต่างกันจะพบว่าน้ำมัน DB7E5 เกิดการเผาไหม้ก่อน DB3E5 และในบางสภาวะจะเกิดการเผาไหม้เร็วใกล้เคียงกับน้ำมัน DB7 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในไบโอดีเซลรวมกับที่อยู่ในน้ำมัน เอทานอลที่มากในน้ำมัน DB7E5 สามารถช่วยส่งเสริมการเกิดการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี โดยหลังจากที่เชื้อเพลิงถูกฉีดเป็นสเปรย์ในกระบอกสูบ การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในบางส่วนของห้องเผาไหม้อาจเกิดการผสมเป็นแบบหนา (Local Rich Zone) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้ ออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่เป็น Oxidizer ที่อยู่ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลและเอทานอลในปริมาณที่มากขึ้นสามารถเจือจางส่วนผสมใน Local Rich Zone

เหล่านั้นและทำให้อยู่ในอัตราส่วนการผสมที่พอเหมาะ จะเกิดการเผาไหม้ กระบวนการ Oxidation ด้วย Oxidizer ที่มากเพียงพอจึงสามารถเกิดขึ้นได้ [31]

ในทำนองเดียวกันน้ำมัน DB10E10 ซึ่งมีเอทานอลเป็นส่วนผสมมากที่สุดน่าจะเริ่มเกิดการเผาไหม้หลังสุด แต่สัดส่วนในการผสมไบโอดีเซลที่สูงสามารถชดเชยการลดลงของจำนวนซีเทนได้ส่วนหนึ่ง ประกอบกับปริมาณออกซิเจนในน้ำมันที่สูงสามารถเร่งให้เชื้อเพลิง DB10E10 เกิดการเผาไหม้ก่อน DB3E5 ด้วยการลด Ignition Delay ให้สั้นลง [29] แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าน้ำมัน DB7E5 เนื่องจากค่าจำนวนซีเทนที่ต่ำกว่ามากจากปริมาณเอทานอลที่สูงกว่า

การเริ่มต้นการเผาไหม้จะส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนและช่วงระยะเวลาในการเผาไหม้ (Combustion Duration) โดยน้ำมัน DB3E5 ที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ช้าที่สุดจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนมากที่สุดในทางตรงข้ามน้ำมัน DB7 ที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ก่อนจะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันที่เริ่มจุดระเบิดช้าจะมีเวลาในการผสมสารผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ (Premixed Mixture) ที่พร้อมในการเผาไหม้มาก ส่งผลให้ในช่วงเวลา Premixed Combustion Mode สารผสมจำนวนมากจะเกิดการจุดระเบิดและเผาไหม้พร้อม ๆ กัน (Simultaneously Homogeneous Combustion) จึงมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่สูง เกิดการเผาไหม้ที่รวดเร็วส่งผลให้เวลาในการเผาไหม้ในช่วงนี้จะสั้นสุดก่อน (การเผาไหม้ในช่วง 10-50 ของมวลที่ถูกเผาไหม้ทั้งหมด) ทั้งที่เวลาในการเผาไหม้มวลที่



ร้อยละ 10 สิ้นสุดช้ากว่า (ช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้) สำหรับน้ำมัน DB7 การเริ่มจุดระเบิดที่รวดเร็วทำให้มีปริมาณเชื้อเพลิงผสม (Premixed Charge) ในการเผาไหม้น้อยจึงส่งผลในทางตรงข้ามกับน้ำมัน DB3E5

ในขณะที่เดียวกันเมื่อน้ำมันส่วนใหญ่ถูกเผาไหม้ในช่วงของ Premixed Combustion Mode น้ำมันที่เหลือสำหรับการเผาไหม้ในช่วง Diffusion mode ที่ถูกควบคุมด้วยอัตราการระเหยของเชื้อเพลิง การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ณ ในขณะเวลานั้นๆ จะเหลือเป็นปริมาณน้อยลง น้ำมัน DB3E5 จึงเกิดการเผาไหม้สิ้นสุดลงเร็วที่สุด (การเผาไหม้ในช่วง 50-90 ของมวลที่ถูกเผาไหม้น้อยสุด) อีกทั้งค่าความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed) ของเอทานอลที่สูงยังส่งผลให้การเผาไหม้ในช่วงนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกทางหนึ่งด้วย น้ำมันที่ผสมเอทานอลในทุกสัดส่วนจึงสิ้นสุดการเผาไหม้ได้รวดเร็วกว่าน้ำมัน DB7 ที่ทุกความเร็วรอบการทดสอบ

4. บทสรุป

จากผลการตอบสนองของเครื่องยนต์ดีเซลต่อลักษณะการเผาไหม้ เมื่อมีการใช้เอทานอลผสมในน้ำมันดีเซลโดยใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวประสานเป็นเชื้อเพลิง ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ โดยไม่มีการปรับแต่งระบบการควบคุมใดๆ พบว่าคุณสมบัติของความต้องการพลังงานความร้อนที่สูงในการระเหยของเอทานอลส่งผลต่อตำแหน่งการเริ่มต้นในการจุดระเบิดที่ล่าช้าในทุกความเร็วรอบที่ทดสอบ ทั้งนี้เมื่อมีการเติมน้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวประสานจะส่งผลในทางตรงข้ามคือ การเผาไหม้จะเริ่มต้นได้ล่วงหน้ามากขึ้นเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่ม

มากขึ้นช่วยส่งเสริมให้เกิดสารผสมที่พอดีสำหรับการจุดระเบิดด้วยตนเอง โดยเชื้อเพลิงที่เกิดการจุดระเบิดล่าช้าจากเอทานอลจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนในช่วง Premixed Mode สูงตรงกันข้ามกับเชื้อเพลิงที่ส่งผลในการจุดระเบิดได้ก่อนที่ซึ่งมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่ำกว่า นอกจากนี้ เอทานอล ยังส่งผลต่อช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ให้มีระยะเวลาสั้นลง

สำหรับอิทธิพลของความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทุกชนิดไปในทำนองเดียวกัน นั่นคือ ที่ความเร็วรอบต่ำการเผาไหม้จะเกิดขึ้นในสองช่วงเวลาคือ Pre/Pilot Combustion และ Main Combustion เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงสองจังหวะ โดยเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้น จังหวะเริ่มการเผาไหม้จะช้าลงอย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วของเครื่องยนต์ยังเพิ่มขึ้นต่อไปอีก การฉีดเชื้อเพลิงจะเหลือเพียงครั้งเดียวในช่วงการฉีดหลักและการเผาไหม้จะเริ่มการจุดระเบิดเร็วขึ้น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องยนต์ไม่ส่งผลต่ออิทธิพลของเชื้อเพลิงทดสอบที่เปลี่ยนไป

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวประสานในเชื้อเพลิงดีเซลที่ผสมเอทานอลสามารถลดความแตกต่างระหว่างเชื้อเพลิงเอทานอลให้สามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดปัจจุบันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิง DB7E5 ที่ให้ลักษณะการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ขายอยู่ในท้องตลาด อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดควรจะมีการปรับจูน



เครื่องยนต์โดยอาจจะปรับตั้งให้มีการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าขึ้น อีกทั้งควรทำการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลเป็นเวลานานที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ได้วางแผนในการศึกษาในอนาคตอันใกล้ รวมถึงการเพิ่มสัดส่วนการผสมเอทานอลในน้ำมันด้วยการเพิ่มสัดส่วนการผสมไบโอดีเซลที่ร้อยละ 20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีการใช้งานจริงในหลายประเทศ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://drive.google.com/file/d/1176wJc0jQlCfOX-wtU8Gvh38VdOaeacd/view> (Accessed on 15 January 2021) (in Thai)
- [2] <https://web.dlt.go.th/statistics/>. (Accessed on 15 January 2021) (in Thai)
- [3] A. Milovanoff, I.D. Posen, B.A. Saville and H.L. MacLean, Well-to-wheel greenhouse gas implications of mid-level ethanol blend deployment in Canada's light-duty fleet, 2020, 131, 110012.
- [4] J. Han, A. Elgowainy and M. Wang, Well-to-wheels greenhouse gas emissions analysis of high-octane fuels with various market shares and ethanol blending levels, Argonne, US Department of Energy, 2015, Technical Report, ANL/ESD-15/10: 119162.
- [5] V. Kumar, A.P. Singh and A.K. Agarwal, Gaseous emissions (regulated and unregulated) and particulate characteristics of a medium-duty CRDI transportation diesel engine fueled with diesel-alcohol blends, Fuel, 2020, 278, 118269.
- [6] H.Y. Kim, J.C. Ge and N.J. Choi, Effects of ethanol-diesel on the combustion and emissions from a diesel Engine at a low idle speed, Applied Sciences, 2020, 10, 4153.
- [7] <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/10208-8459.pdf> (Accessed on 25 February 2021) (in Thai)
- [8] P. Satgé De Caro, Z. Mouloungui, G. Vaitilingom and J.Ch. Berge, Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines, Fuel, 2001, 80, 565-574.
- [9] M.A. Ghadikolaei, Effect of alcohol blend and fumigation on regulated and unregulated emissions of IC engines—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57, 1440-1495.
- [10] F.C. Barbosa, Heavy duty ethanol engines – A sustainable approach for transit bus Fleets, SAE Technical Papers, 2015, No. 2015-36-0223.



- [11] H. Liu, B. Hu and C. Jin, Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends, *Fuel*, 2016, 184, 440-448.
- [12] K. Theinnoi, B. Sawatmongkhon, T. Wongchang, E. Sukjit, S. Chuepeng, The combustion characteristic of fuel additives with diesel-ethanol fuel blends on engine performance, *SAE Technical Papers*, 2019, No. 2019-32-0611.
- [13] R. Shanmugam, P. Murugesan, G.G. Guye and B. Duraisamy, Effect of additives on the stability of ethanol-diesel blends for IC engine application, *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28, 12153–12167.
- [14] S. Pinzi, I. Lopez, D.E. Leiva-Candia, M.D. Redel-Macizs, J.M. Herreros, A. Cubero-Atienza and M.P. Dorado, Castor oil enhanced effect on fuel ethanol-diesel fuel blend properties, *Applied Energy*, 2018, 224, 409-416.
- [15] M.H. Low, M.N.A. Mukhtar, F.Y. Hagos and M.M. Noor, Tri-fuel (diesel-biodiesel-ethanol) emulsion characterization, stability and the corrosion effect, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 257, 012082.
- [16] N. Al-Esawi, M.A. Qubeissi and R. Kolodnytska, The impact of biodiesel fuel on ethanol/diesel blends, *Energies*, 2019, 12, 1804.
- [17] S. Madiwale, A. Karthikeyan and V. Bhjwani, Properties investigation and performance analysis of a diesel engine fuelled with Jatropa, Soybean, Palm and Cottonseed biodiesel using ethanol as an additive, *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1), 657-664.
- [18] A. Gupta, D. Gupta and N. Kumar, Performance evaluation and emission characteristics of biodiesel-alcohol-diesel fuelled in VCR engine, *SAE Technical Papers*, 2016, No. 2016-01-2265.
- [19] H.K. Imdadul, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, N.W.M. Zulkifli, A. Alabdulkarem, M.M. Rashed, Y.H. Teoh and H.G. How, Higher alcohol-biodiesel-diesel blends: An approach for improving the performance, emission, and combustion of a light-duty diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 2016, 111, 174-185.
- [20] F. Aydin and H. Ögüt, Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions, *Renewable Energy*, 2017, 103, 688-694.



- [21] Y. Noorollahi, M. Azadbakht and B. Ghobadian, The effect of different diesterol (diesel-biodiesel-ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases, *Energy*, 2018, 142, 196-200.
- [22] H. Tse, C.W. Leung, C.S. Cheung, Performances, emissions and soot properties from a diesel-biodiesel ethanol blend fuelled engine. *Advances in Automobile Engineering*, 2016, S1: 005.
- [23] M.A. Ghadikolaei, L. Wei, C.S. Cheung, K. Yung and Z. Ning, Particulate emission and physical properties of particulate matter emitted from a diesel engine fueled with ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol blended and fumigation modes), *Fuel*, 2020, 263, 116665.
- [24] J. Barata, Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation, *Renewable Energy*, 2008, 33(4), 769-779.
- [25] S. Sundarapandian, G. Devaradjane, Performance and emission analysis of biodiesel operated CI engine, *Journal of Engineering, Computing and Architecture*, 2007, 1(2), 1–22.
- [26] A. Zanier, HW. Jäckle, Heat capacity measurements of petroleum fuels by modulated DSC, *Thermochimica Acta*, 1996, 287(2), 203–212.
- [27] W.M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 96th Eds, CRC Press, Taylor & Francis Group, FL, USA, 2015-2016, 7-9.
- [28] <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (Accessed on 18 March 2021)
- [29] J.B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Inc., NY, USA, 1988.
- [30] G. Labeckas, S. Slavinskas and M. Mazeika The effect of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 2014, 79, 698-720.
- [31] O.T. Kaario, V. Vuorinen, H. Kahila, H.G. Im and M. Larmi, The effect of fuel on high velocity evaporating fuel sprays: Large-Eddy simulation on spray A with various fuels, *International Journal of Engine research*, 2020, 21(1), 26-42.

การประยุกต์ใช้วิธีทากูชิสำหรับกระบวนการกัดขัดผิวเรียบอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของเครื่องจักรในการผลิต

สุริยา หน้าแก้ว¹ และ สุริยา ประสมทอง^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยนครพนม

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

วันที่รับบทความ: 21 ธันวาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 5 มีนาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มีนาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 5 เมษายน 2564

บทคัดย่อ: กระบวนการกัดขัดผิวถูกพัฒนาและออกแบบสำหรับการตกแต่งผิวชิ้นงานเพื่อลดเวลาในการผลิต การวิจัยนี้ทำการศึกษาการกัดขัดผิวบนอะลูมิเนียมผสม AA5052 ที่ส่งผลต่อความเรียบผิว โดยใช้วิธีทากูชิเพื่อหาปัจจัย (ความเร็วรอบ อัตราป้อน และแรงในการกัดขัดผิว) ที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต จากการทดลองพบว่าปัจจัยการกัดขัดผิวเรียบที่เหมาะสม คือ การปรับความเร็วรอบ 200 rev/min ที่ความเร็วเดิน 0.5 mm/rev และ แรงในการกัดขัดผิวเรียบ 200 N ให้ค่าเฉลี่ยความเรียบผิวต่ำสุดที่ 0.47 ไมโครเมตร อัตราส่วน S/N อยู่ที่ 6.53 ในการทดลองซ้ำยืนยันพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองครั้งแรกด้วยการคำนวณโดยวิธีทากูชิถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าร้อยละ 98.14 ดังนั้นวิธีการทากูชิสามารถนำมาออกแบบกระบวนการกัดขัดผิวเรียบอะลูมิเนียมผสม AA5052 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วิธีทากูชิ; การกัดขัดผิวเรียบ; อะลูมิเนียมผสม

Application of Taguchi Method for Burnishing Process of AA5052 Aluminum Alloy by Studying the Optimization of Production Machining Parameters

Suriya Namkaew¹ and Suriya Prasomthong^{2*}

¹ Division of Industrial Engineering, Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvornabhumi

² Division of Industrial Technology, Faculty of industrial Technology, Nakhon Phanom University

* Corresponding author, E-mail: Suriya.p@npu.ac.th

Received: 21 December 2020; Revised: 5 March 2021; Accepted: 9 March 2021

Online Published: 5 April 2021

Abstract: The burnishing process was developed and designed for the finishing of the workpiece to reduce the production time. This research was to study the burnishing on AA5052 aluminum alloy which affects the surface roughness. The Taguchi method was used to determine the appropriate factors (speed, feed and burnishing Force) for optimization of production processes. From the experiment, the results showed that the condition of the burnishing process was the speeds 200 rev/min, the feeds 0.5 mm/rev and burnishing force 200 N, which had the average surface roughness as low as 0.47 μm and the S/N ratio was found to be 6.53. In the repeated trials, it was found that the values were closed to the first experiment by calculating via the Taguchi method, which was considered acceptable by estimated model coefficients of 98.14%. Therefore, the Taguchi method could be used to design an efficient burnishing process for AA5052 aluminum alloy.

Keywords: Taguchi method; Burnishing process; Aluminum alloy



1. บทนำ

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเรือ อุตสาหกรรมอากาศยาน ฯลฯ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีสัดส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง การผลิตชิ้นส่วนจากอะลูมิเนียมส่วนใหญ่ มักใช้กระบวนการตัดเฉือน อาทิ การกลึงปลอกผิว การกัดลดขนาด การเจาะ เป็นต้น โดยกระบวนการตัดเฉือนเหล่านี้มักส่งผลต่อคุณภาพผิวสุดท้ายของวัสดุ เช่น ความเรียบผิว ขนาดชิ้นงาน และเป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมไม่สามารถตกแต่งผิวสุดท้ายด้วยกระบวนการเจียระไนได้ ดังนั้นกระบวนการกัดขัดผิวเรียบ (Burnishing Process) จึงเป็นทางเลือกให้กับวัสดุเหล่านี้ โดยกระบวนการกัดขัดผิวเรียบนั้นมียุทธศาสตร์ประกอบของกระบวนการที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวสุดท้ายของชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วรอบ แรงในการกัดขัด และอัตราป้อน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มักเป็นตัวกำหนดคุณภาพของชิ้นงาน Gharbi, et al. [1] ศึกษากระบวนการกัดขัดผิวต่อคุณภาพผิว และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI1010 พบว่าแรงในการกัดขัดผิวส่งผลต่อความเรียบผิวและความแข็งแรงของชิ้นงานมากที่สุดรองลงมาเป็นความเร็วรอบ และอัตราป้อน มีผลต่อชิ้นงานน้อยสุด Hamadache, et al. [2] ทำการปรับปรุงคุณภาพผิวของเหล็กผสมสูงด้วยการกัดขัดผิวเรียบพบว่าแรงในการกัดขัดผิวเรียบส่งผลต่อความเรียบผิวและความแข็งแรงของชิ้นงานมากกว่าปัจจัยในการผลิตอื่น และยังมีรายงานว่ากระบวนการกัดขัดผิวเรียบนอกจากจะช่วยปรับปรุงคุณภาพผิวแล้วยังสามารถเพิ่มความสามารถ

ในการต้านทานการกัดกร่อน และความเค้นบริเวณผิวชิ้นงานสูงขึ้น [3-4]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าการกัดขัดผิวเรียบสามารถปรับปรุงผิวของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการศึกษาจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบปัจจัยกระบวนการกัดขัดผิวเรียบของอะลูมิเนียมผสม AA5052 เนื่องจากยังไม่มีมีการกล่าวถึงมากนักในการศึกษา สำหรับงานวิจัยใช้เทคนิคการออกแบบด้วยวิธีทากูชิ [5-9] มาช่วยในการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความเรียบผิวเพื่อลดจำนวนปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อกระบวนการในการผลิต เนื่องจากวิธีทากูชิสามารถลดต้นทุนในการทดลอง เปอร์เซนต์จำนวนครั้งในการทดลอง และความเชื่อมั่นในทางสถิติสูงเพราะวิธีทากูชิอาศัยหลักการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ร่วมกับ S/N Ratio ส่งผลให้มีความน่าเชื่อถือกว่าวิธีอื่น [10-11] การศึกษาทำการตรวจสอบปัจจัยควบคุม ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และแรงในการกัดขัดผิวเรียบ เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากกระบวนการกัดขัดผิวเรียบด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต โดยงานวิจัยนี้คาดหวังว่าวิธีทางทากูชิจะสามารถออกแบบกระบวนการกัดขัดผิวเรียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และหวังว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ผลิตและผู้สนใจศึกษาด้านการกัดขัดผิวเรียบต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การกัดขัดผิวเรียบ (Burnishing Process)

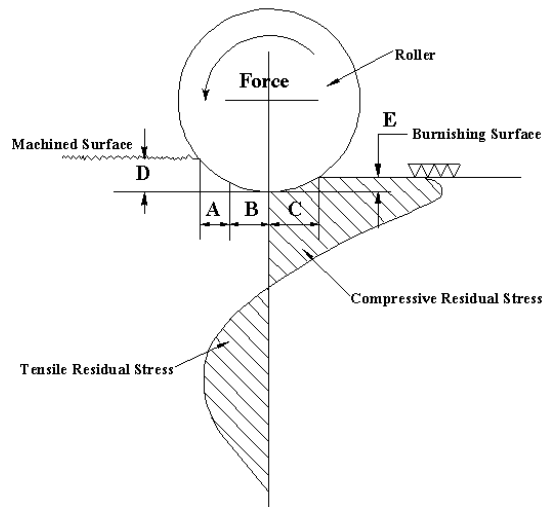
กระบวนการกัดขัดผิวเรียบ เป็นการทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการตัดเฉือนมาแล้วมีผิวเรียบและแข็งขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ได้กับทุกวัสดุ โดยลูกรัดจะถู



กดลงบนผิวงานด้วยกลไกที่มีความแม่นยำสูง [12-14] เมื่อลูกรีดกดสัมผัสกับผิวชิ้นงานจะถูกหมุนด้วยความเร็วรอบและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามอัตราการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดจากเครื่องจักร ซึ่งการกดขัดผิวเรียบเป็นวิธีการปรับขนาด ตกแต่งชิ้นงานที่รวดเร็ว ผิวชิ้นงานสะอาด มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดเวลาในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากชิ้นงานไม่ต้องถูกถอดออกจากเครื่องจักรเดิมสามารถทำงานให้แล้วเสร็จภายในเครื่องจักรเดียว จึงส่งผลให้ประหยัดเวลาและแรงงานในการผลิต [15-18] ต่อมา มีการใช้กระบวนการกดขัดผิวอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่น ๆ ประโยชน์ของกระบวนการกดขัดผิวเรียบ คือ สามารถควบคุมขนาดที่แม่นยำมาก (ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.0005 นิ้ว หรือดีกว่าขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุและปัจจัยอื่น ๆ) พื้นผิวสำเร็จที่ดี (โดยทั่วไประหว่าง 1 ถึง 10 Ra) ความแข็งผิวเพิ่มขึ้น (มากถึง 5-10 % หรือมากกว่า) รอบเวลาในการผลิตที่ลดลง ผิวชิ้นงานสะอาดกว่าวิธีการอื่น ๆ และสามารถจัดกระบวนการผลิตผิวสำเร็จของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ล่าช้า และลดค่าใช้จ่ายของกระบวนการ เช่น ไม่ต้องมีการเจียรไนหรือขัดผิวสำเร็จ

รูปที่ 1 แสดงกลไกของกระบวนการกดขัดผิวเรียบ เมื่อลูกรีดกดลงบนผิวชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวที่ยังมีความเรียบผิวต่ำ ($Ra > 80$) หรือผิวเดิมแสดงยังพื้นที่ D (Machined Surface) ลักษณะผิวเดิมมีค่าความสูงต่ำของผิว เมื่อลูกรีดกดสัมผัสกับผิวด้วยแรงที่เหมาะสมและคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ที่สม่ำเสมอ ลูกรีดทำการกดที่ผิวส่งผลให้เกิดการไหลตัวของวัสดุจาก

บริเวณยอดผิวสู่พื้นผิวด้านล่าง (บริเวณพื้นผิวต่ำ) ทำให้ความเรียบผิวมีความสม่ำเสมอหรือผิวงานสุดท้ายมีความเรียบผิวสูงขึ้นดังแสดงในจุด E (Burnishing Surface) และในขณะที่มีแรงกดจากลูกรีดทำให้บริเวณที่เกิดการไหลของวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) และเกิดความเค้นอัดตกค้าง (Compressive Residual Stress) บริเวณพื้นผิวที่ถูกกดสัมผัส ซึ่งในทำนองเดียวกันพื้นผิวภายในเนื้อวัสดุที่ได้รับอิทธิพลจากแรงกดของลูกรีดภายนอกทำให้เกิดการตกค้างของความเค้นดึงภายในเนื้อวัสดุ (Tensile Residual Stress) ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งขึ้นจากการสะสมของความเค้นจากภายนอกที่มากกว่า ในทำนองเดียวกันเมื่อบริเวณการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรมักมีการเพิ่มขึ้นของดิสโลเคชันจำนวนมากจึงทำให้ดิสโลเคชันเกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน ความแข็งและความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวดังกล่าวจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 5-10 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่า



รูปที่ 1 แสดงกลไกกระบวนการกดขัดผิวเรียบ [6]



2.2 การทดลองการกัดขัดผิวเรียบ

การทดลองกัดขัดผิวเรียบทำการศึกษาปัจจัยของเครื่องจักรในการผลิต ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และแรงกัดขัดผิวเรียบ เนื่องจากปัจจัยทั้งสามมักส่งผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน [1-2] บนเครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกัดคงที่ ระยะความลึกในการกัด 0.25 มิลลิเมตร ทำการกัดขึ้นรูปครั้งเดียว เครื่องมือกัดผิวเป็นลูกรีดวงกลม โดยเครื่องมือในการกัดถูกออกแบบให้สามารถวัดแรงในการกัดใช้สปริงเป็นตัวกำหนดระยะโดยหมุนปรับระยะเกลียวซึ่งมีเกจวัดแรงดันเป็นตัววัดแรงในการกัดขัดผิวเรียบ ซึ่งลักษณะการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการวัดความเรียบผิวด้วยเครื่องมือวัด

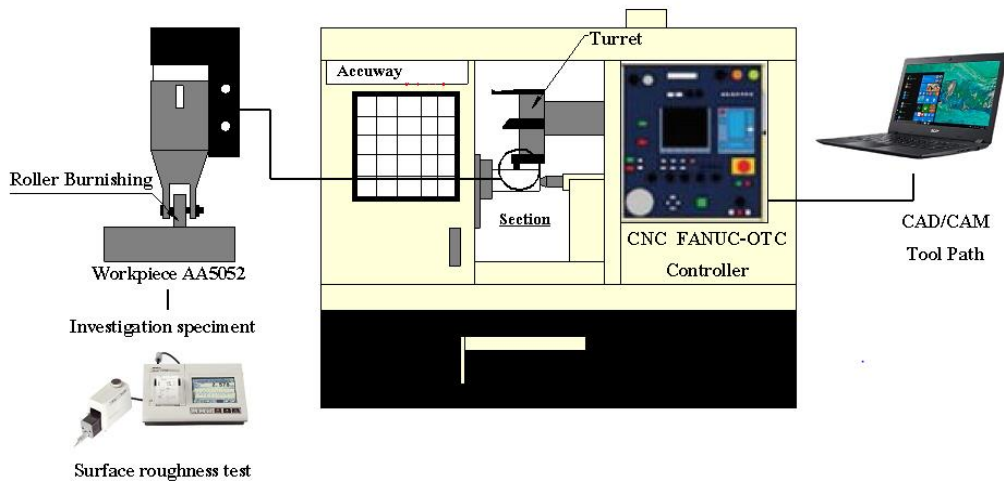
แบบเคลื่อนที่สัมผัส และนำค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมาทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 วัสดุในการทดลอง

วัสดุในการทดลองใช้อะลูมิเนียมผสม AA5052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 120 mm ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA5052 ดังตารางที่ 1 ทำการปลอกผิวหยาบก่อนการกัดขัดผิวเรียบโดยมีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 4.20 μm หัวกัดขัดผิวเรียบทำจากเหล็กเครื่อง SKD11 ทำการเพิ่มความแข็งด้วยกระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำมันจากนั้นทำการกัดขัดผิวเรียบตามปัจจัยที่กำหนดก่อนทำการวัดความเรียบผิว

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม AA5052

Chemical composition								Mechanical Properties		
Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Fe	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Hardness, BHN
Bal.	0.48	0.24	0.12	0.95	0.21	0.23	0.45	89.6	195	47



รูปที่ 2 แผนภาพการดำเนินงานขั้นตอนการกัดขัดผิวเรียบอะลูมิเนียมผสม AA5052



2.4 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ

2.4.1 ตัวแปรในการทดลอง

การศึกษาทำการออกแบบการทดลองจำนวนของปัจจัยควบคุม (Control Factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (Control Factor Level) ที่ได้ออกแบบไว้โดยนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิด Orthogonal Array (OA) การใช้ OA ซึ่งจะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีหลายปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำหนดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน OA อย่างเหมาะสม ดังขั้นตอนต่อไปนี้จะพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดขัดผิวเรียบซึ่งประกอบด้วย 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยปัจจัยและระดับปัจจัยถูกกำหนดด้วยขั้นตอนการผลิตของเครื่องจักร [19] แสดงดังตารางที่ 2 ส่วนตัวแปรที่ไม่ได้กำหนดวิธีการควบคุมตัวแปรเนื่องจากปัจจัยภายนอกเกิดขึ้นน้อยที่สุด เช่น สภาพอากาศ ผู้ปฏิบัติงาน ฯลฯ

2.4.2 วิธีทางทากูชิ [20]

ทากูชิเป็นเทคนิคสำหรับการออกแบบและการทดลองจนเป็นกระบวนการค้นหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่ได้จากปัจจัยในการนำมาทำการทดลอง วิธีทางทากูชิ คือสิ่งที่ต้องการการออกแบบซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยได้ทำการกำหนดสมรรถนะที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไข

ที่กำหนด เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิธีทากูชิ คือ OA เป็นระบบเมตริกซ์ของจำนวนข้อกำหนดในระดับแถวและคอลัมน์ วิธีทางทากูชิคือการใช้อัตราส่วนแบบ Signal-to-Noise (S/N) จะหาจำนวนของตัวแปรที่มีอยู่ S/N คือค่าเฉลี่ยที่ใช้วัดของผลกระทบของปัจจัย Noise ตามลักษณะของสมรรถนะของตัวแปร และจะทำการวัดค่าทั้งสองคือ S/N ของจำนวนตัวแปรในข้อมูลของผลตอบและเพื่อให้เข้าใจค่าเฉลี่ยของผลตอบของเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

ทากูชิได้เสนอ 8 ขั้นตอนมาตรฐานดังนี้

1. จำแนกการดำเนินงานหลัก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้างเคียงแล้หมอดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น
2. จำแนกปัจจัย Noise ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบ และลักษณะเฉพาะของคุณภาพ
3. จำแนกเป้าหมายของการดำเนินงานจนได้ค่าที่ดีที่สุด
4. จำแนกปัจจัยควบคุมและระดับต่าง ๆ
5. เลือกการทดลองแบบเมตริกซ์แบบ OA
6. ดำเนินการทดลองแบบเมตริกซ์
7. วิเคราะห์ข้อมูล ทำนายผลในระดับที่คาดหวังและสมรรถนะกระบวนการที่ดีที่สุด
8. ดำเนินการทดลองเพื่อพิสูจน์หาความจริงและวางแผนการดำเนินงานในอนาคต

ตารางที่ 2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ในการทดลอง

Experimental Factors	Experimental Level			Surface Roughness (µm); Ra
	-1	0	1	
Speeds (rev/min)	200	500	800	-
Feeds (mm/ rev)	0.1	0.3	0.5	-
Burnishing Force (N)	100	150	200	-



ตารางที่ 3 อัตราส่วน S/N-Ratio ของค่าความเรียบผิวจากการทดลองทั้ง 9 Run โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

Run	Speeds (rev/min)	Feeds (mm/ rev)	Burnishing Force (N)	Test-1 (μm)	Test-2 (μm)	Test-3 (μm)	SN-Ratio	Mean
1	200	0.1	100	1.05	1.12	1.08	-0.70	1.08
2	200	0.3	150	0.75	0.82	0.74	2.26	0.77
3	200	0.5	200	0.42	0.52	0.47	6.53	0.47
4	500	0.1	150	1.26	1.18	1.22	-1.73	1.22
5	500	0.3	200	0.51	0.46	0.48	6.31	0.48
6	500	0.5	150	1.91	1.86	1.95	-5.61	1.91
7	800	0.1	200	0.74	0.66	0.72	3.01	0.71
8	800	0.3	100	2.40	2.52	2.38	-7.73	2.43
9	800	0.5	150	2.35	2.40	2.38	-7.52	2.38
Average =							-0.58	1.27

2.4.3 การคำนวณ [23]

หลังจากทำการเลือกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยในการคำนวณอัตราส่วน S/N โดยที่อัตราส่วน S/N-Ratio เป็นความเข้าใจทางคุณภาพที่มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบสำหรับการเปลี่ยนแปลงโดยค่าตัวแปรของกระบวนการในสมรรถนะของกระบวนการหรือผลผลิตที่ได้จากการประเมิน ดังนั้นข้อกำหนดการปรับการวัดเรียกว่า Signal-to-Noise อัตราส่วน S/N ซึ่งเป็นการเข้ารวมกันระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการวัดค่าของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ด้วยการออกแบบ Robust ซึ่งคุณลักษณะของ อัตราส่วน S/N-Ratio สำหรับการศึกษานี้เลือกเป้าหมายของการทดลองสำหรับสมการแบบ Smaller-is-Better ดังแสดงในสมการที่ 1 เนื่องจากผลลัพธ์คือความเรียบผิวต่ำสุดของชิ้นงาน ปัจจัยการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 ใช้ OAs แบบ

L-9 (3^3) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดลอง ดังนั้นจึงทำการทดลองเท่ากับ 27 run ซึ่งการจัดลำดับแบบ OAs แบบ L-9 (3^3) ที่ใช้ในการศึกษาและผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

$$S/N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการกัดขัดผิวเรียบเมื่อทำการทดลองการกัดขัดผิวเรียบและนำไปทำการตรวจสอบค่าความเรียบผิวของชิ้นงานตามสภาวะที่ได้ทำการออกแบบโดยวิธีทากูชิทั้ง 9 การทดลองแล้วพบว่าค่าความเรียบผิวต่ำสุด คือ การทดลองที่ 3 โดยปัจจัยที่ให้ค่าความเรียบผิวต่ำสุดได้แก่ความเร็วรอบที่ 200 rev/min อัตราป้อน 0.5 mm/rev และแรงในการกดที่ 200 N ให้ค่าความเรียบผิวต่ำสุดเท่ากับ $0.47 \mu\text{m}$



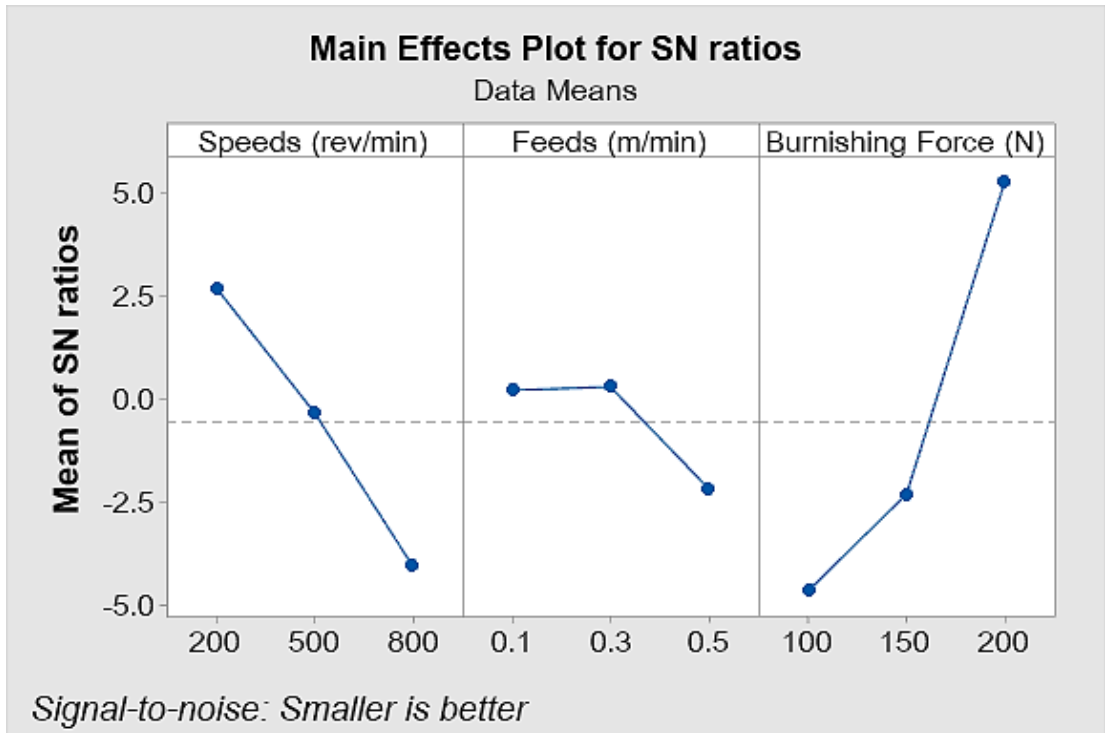
ส่วนค่าความเรียบผิวชิ้นงานสูงสุดของการทดลองอยู่ที่ระดับการทดลองที่ 8 ให้ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานเฉลี่ยเท่ากับ $2.43 \mu\text{m}$ ที่ความเร็วรอบ 800 rev/min อัตราป้อน 0.3 mm/rev และแรงในการกด 100 N ส่วนลำดับการทดลองอื่นของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3 จากผลการทดลองซ้ำในตารางที่ 3 ผลลัพธ์จากการทดลองซ้ำมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองเดิมซึ่งจากการสังเกตมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยของกระบวนการ โดยผลต่างของผลลัพธ์จากการทดลองซ้ำอาจเกิดจากการควบคุมการทดลองและผู้ปฏิบัติงานจึงส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่คงที่แต่ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะการตั้งค่าเครื่องมือในการกดขัดผิวเรียบอาจมีการคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม และผลจากการทดสอบค่าความเรียบผิวอยู่ในช่วง $0.42\text{-}2.52 \mu\text{m}$ และ อัตราส่วน S/N-Ratio ของค่าความเรียบผิวอยู่ระหว่าง -7.73-6.53 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio ที่ -0.58

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความเรียบผิวถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาดี โดยได้ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio ของ

ค่าความเรียบผิวดังแสดงในตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยค่า S/N-Ratio ถูกนำมาหาระดับของปัจจัยจากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูงสุด (Max) และปัจจัยที่มีค่าต่ำสุด (Min) จากนั้นทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (% Main Effect) ของแต่ละปัจจัยพบว่าแรงในการกดขัดผิว เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความเรียบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 51.82 รองลงมาคือความเร็วรอบในการกดขัดผิวมีค่าร้อยละ 35.28 และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวต่ำสุด คือ อัตราป้อนมีค่าร้อยละ 12.90 จากผลในตารางที่ 4 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนองของ S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับของปัจจัยในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบ และแรงกด มีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความเรียบผิวมากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับระดับของอัตราป้อนมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความเรียบผิวชิ้นงานต่ำมากเมื่อเทียบกับทั้งปัจจัย โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความเรียบผิวชิ้นงานต่ำสุดควรกำหนดความเร็วรอบที่ 200 rev/min, อัตราป้อน 0.3 mm/rev และแรงในการกดขัดผิวที่ 200 N

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความเรียบผิว

Factors	Average of S/N-Ratio			Max	Min	Max-Min	% Main effect
	Level-1	Level-2	Level-3				
Speeds (rev/min)	2.70	-0.34	-4.08	2.7	-4.08	6.78	35.28
Feeds (mm/rev)	0.19	0.28	-2.20	0.28	-2.20	2.48	12.90
Burnishing Force (N)	-4.68	-2.33	5.28	5.28	-4.68	9.96	51.82
Average =						19.22	100.00



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของระดับปัจจัยหลัก

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้อง การทดลองนี้กำหนดระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) ผลการทดลองหุ้่นจำลองสำหรับอัตราส่วน S/N-Ratio ดังแสดงในตารางที่ 5 ค่า P-Value ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/N-Ratio ของกระบวนการกัดขัดผิวเรียบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่ 1 ความเร็วรอบ (200 rev/min) ผลลัพธ์การประมาณค่าหุ้่นจำลองสัมประสิทธิ์ S/N-Ratio ซึ่งมีค่า P-Value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่ามีผลต่อค่า S/N-Ratio (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 อัตราป้อน (0.1 และ 0.3 mm/rev) ผลลัพธ์การประมาณค่าหุ้่นจำลอง

สัมประสิทธิ์ S/N ซึ่งมีค่า P-Value เกินระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สรุปว่าไม่มีผลต่อค่า S/N-Ratio และ ปัจจัยที่ 3 แรงในการกด (100 และ 150 N) พบว่ามีค่า P-Value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่ามีผลต่อค่า S/N-Ratio (มีนัยสำคัญ) ในตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า S/N-Ratio ซึ่งมีค่า P-Value ที่ไม่เกิน 0.05 คือ ปัจจัยที่ 1 (ความเร็วรอบ) และปัจจัยที่ 3 (แรงในการกด) ส่งผลต่อค่า S/N-Ratio (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 (อัตราป้อน) ไม่ส่งผลต่อค่า S/N-Ratio (ไม่มีนัยสำคัญ) โดยปัจจัยที่ 1 คือ ความเร็วรอบมีค่า P-Value เท่ากับ 0.02 และปัจจัยที่ 3 คือ แรงในการกด มีค่า P-Value เท่ากับ 0.01 มีระดับนัยสำคัญ



ที่ไม่เกิน 0.05 สรุปว่ามีผลต่อค่ารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ย (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยอื่นที่มีค่าเกินระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่าไม่มีผลต่อค่ารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ย (ไม่มีนัยสำคัญ) และการปรับค่าสัมประสิทธิ์การ

ตัดสินใจร้อยละ 98.14 แสดงให้เห็นความน่าเชื่อถือของกระบวนการที่ดี ส่วนสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับอัตราส่วน S/N-Ratio การกดขัดผิวเรียบเพื่อตรวจสอบความเรียบผิวน้อยสุดแสดงดังสมการที่ 2

$$S/N = -0.58 + 3.27(S200) + 0.23(S500) + 0.77(F0.1) - 0.86(F0.3) - 4.10(f100) - 1.75(f150) \quad (2)$$

ตารางที่ 5 หุ่นจำลองสำหรับอัตราส่วน S/N-Ratio

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0.58	0.25	-2.29	0.15
Speeds (200 rev/min)	3.27	0.36	9.21	0.01
Speeds (500 rev/min)	0.23	0.36	0.65	0.58
Feeds (0.1 mm/rev)	0.77	0.36	2.16	0.16
Feeds (0.3 mm/rev)	0.86	0.36	2.41	0.14
Burnishing force (100 N)	-4.10	0.36	-11.55	0.01
Burnishing force (150 N)	-1.75	0.36	-4.94	0.04

S = 0.7536 R-Sq = 99.54 % R-Sq(adj) = 98.14 %

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความเรียบผิว

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Speeds (rev/min)	2	69.12	69.12	34.56	60.85	0.02
Feeds (mm/rev)	2	11.89	11.89	5.94	10.47	0.09
Burnishing force (N)	2	162.55	162.55	81.27	143.11	0.01
Residual Error	2	1.14	1.14	0.57		
Total	8	244.69				



4. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้วิธีทาทุชิสำหรับกระบวนการกัดขัดผิว อะลูมิเนียมผสม AA5052 โดยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของเครื่องจักรในการผลิตสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สภาวะการกัดขัดผิวเรียบที่เหมาะสม คือ ลำดับการทดลองที่ 3 การปรับความเร็วรอบ 200 rev/min ที่ อัตราป้อน 0.5 mm/rev และ แรงในการกด 200 N ให้ค่าเฉลี่ยความเรียบผิวต่ำสุดที่ 0.47 μm อัตราส่วน S/N อยู่ที่ 6.53 ในการทดลองซ้ำยืนยันพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองครั้งแรกด้วยการคำนวณโดยวิธีทาทุชิ ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ผลการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอาจเกิดจากการปรับตั้งค่าเครื่องจักรในการทดลองทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันแต่ไม่มีความแตกต่างกันมากนักถือว่ายอมรับได้ ดังนั้นวิธีการทาทุชิสามารถนำมาออกแบบกระบวนการกัดขัดผิวเรียบอะลูมิเนียมผสม AA5052 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัยพบว่าแรงในการกัดขัดผิวเรียบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความเรียบผิวต่ำสุด รองลงมาคือความเร็วรอบ และปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวต่ำสุดคืออัตราป้อนในการกัดขัดผิว

ปัจจัยในกระบวนการผลิตของเครื่องจักรส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงานอย่างชัดเจน กล่าวคือ ถ้าความเร็วรอบในการขัดผิว และแรงในการกัดขัดผิวสูงหรือต่ำมากเกินไปก็ส่งผลต่อความเรียบผิว และมีแนวโน้มไปสู่ความล้มเหลวในกระบวนการกัดขัดผิวเรียบ

จากการทดลองการกัดขัดผิวเรียบพบว่าสามารถเพิ่มคุณภาพผิวให้กับอะลูมิเนียมผสม AA5052 และแนวโน้มของความแข็งแรงบริเวณผิวชิ้นงานสูงขึ้น อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการกัดขัดผิวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มคุณภาพผิวให้กับอะลูมิเนียมผสมทั้งในด้านการผลิตและการศึกษาต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

การนำเอาวิธีการทาทุชิมาช่วยในการออกแบบการทดลองเป็นวิธีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าที่ดีที่สุดที่ต้องการเข้าใกล้ค่าตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้อย่างเหมาะสม การปรับบางค่าตามเงื่อนไขของข้อกำหนดและการตัดสินใจเพื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการทดลอง การออกแบบทาทุชิเป็นเครื่องมือที่สำคัญและให้คำแนะนำอย่างง่ายและเป็นวิธีที่เป็นระบบจนสามารถนำไปสู่สมรรถนะที่ดีมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนและคุณภาพของกระบวนการผลิตสูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ที่ให้ทุนสนับสนุนการจัดทำงานวิจัยโครงการ “การศึกษาปัจจัยการผลิตพื้นผิวสำเร็จ ด้วยเทคนิคการกัดขัดผิวเรียบเพื่อลดขั้นตอนและต้นทุนการผลิตของผู้ประกอบการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสำหรับรองรับการผลิตในอุตสาหกรรมแห่งอนาคต” ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Gharbi, S. Sghaier, K.J. Al-Fadhlah and T. Benameur, Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates, *Journal of materials engineering and performance*, 2011, 20(6), 903-910.
- [2] H. Hamadache, Z. Zemouri, L. Laouar, and S. Dominiak, Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(4), 1491-1498.
- [3] H. Yilmaz and R. Sadeler, Effect of ball burnishing treatment on the fatigue behavior of 316L stainless steel operating under anodic and cathodic polarization potentials. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(11), 5393-5401.
- [4] A. Sova, C. Courbon, F. Valiorgue, J., Rech, and Ph. Bertrand, Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(8), 1922-1934.
- [5] H. Luo, J. Liu, L. Wang and Q. Zhong, Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25, 454-459.
- [6] L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. Muñoa and J.A. Sánchez, Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(15), 1659-1668.
- [7] F.J. Shiou, S.J. Huang, A.J. Shih, J. Zhu and M. Yoshino, Fine surface finish of a hardened stainless steel using a new burnishing tool, *Procedia Manufacturing*, 2017, 10, 208-217.
- [8] U. Esmé, Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA 7075 aluminum alloy, *Materiali in tehnologije*, 2010, 44(3), 129-135.
- [9] S.R. Thorat and A.G. Thakur, Optimization of burnishing parameters by taguchi based GRA method of AA 6061 aluminum alloy, *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2), 7394-7403.
- [10] J.D. Kechagias, K.E. Aslani, N.A. Fountas, N.M. Vaxevanidis and D.E. Manolakos, A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy. *Measurement*, 2020, 151, 107213.



- [11] A. Rafidah, A. Nurulhuda, A. Azrina, Y. Suhaila, I.S. Anwar, and R.A. Syafiq, Comparison design of experiment (doe): Taguchi method and full factorial design in surface roughness. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 660, 275-279.
- [12] W.Labuda, R.Starosta and R. Dyl, Estimation of the influence of burnishing parameters on steel X5CrNi1810 surface layers strengthening and roughness changes, *Journal of KONES*, 2008, 15, 259-267.
- [13] 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.
- [14] Y.C. Yen, P. Sartkulvanich, and T.Altan, Finite element modeling of roller burnishing process, *CIRP annals*, 2005, 54(1), 237-240.
- [15] A.M. Hassan, and A.S. Al-Bsharat, Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals, *Wear*, 1996, 199(1), 1-8.
- [16] A.M. Hassan and S.Z. Al-Dhifi, Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 96(1-3), 73-80.
- [17] Y.C. Lin, S.W. Wang and H.Y. Lai, The relationship between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 23(9), 666-671.
- [18] H. Basak, , S. Özkan and A. Taskesen, Application of burnishing process on friction stir welding and investigation of the effect of burnishing process on the surface roughness, hardness and strength, *Experimental Techniques*, 2011, 35, 8-16.
- [19] S. Swirad and R. Wdowik, Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method, *Procedia Manufacturing*, 2019, 34, 287-292.
- [20] K.L. Tsui, An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design, *IIE Transactions*, 1992, 24(5), 44-57.

Investigation of the Optimal Machining Parameters on Wire Electrical Discharge Machine by Taguchi Technique

Patittar Nakwong*

Department of Applied Science, Faculty of Science and Technology,

Major of Industrial Management Engineer, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

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

Received: 14 October 2020; Revised: 15 March 2021; Accepted: 16 March 2021

Online Published: 8 April 2021

Abstract: This paper focused on the effect of process parameters on material removal rate (MRR), feed rate (FR) and surface roughness (SR) of machining titanium by wire electrical discharge machine (WEDM). The Taguchi method had been used based on L9 orthogonal array to find out the optimal process parameters. This work also investigated the influences of machining parameters including peak current, wire-speed, wire tension and voltage. The experiment was analyzed by Minitab 16 which observed that the peak current was the most influential factor for MRR, FR and SR. However, the wire speed was significant to the feed rate. The optimum parameters of obtained MRR, FR and SR were 20.57 mm³/min, 22.43 mm/min and 1.74 μm, respectively. Thereafter, the scanning electron microscope (SEM) was used to identify the microstructure of the workpiece. It could be seen that craters had more by the high discharge of thermal energy that caused the formation of larger cracks and craters, leading to an increase in surface roughness.

Keywords: Material removal rate (MRR); Feed rate (FR); Surface roughness (SR); Taguchi method; Wire electrical discharge machining (WEDM)



1. Introduction

Wire electrical discharge machining (WEDM) is a non-traditional process that is widely used for machining a variety of difficult-to-use materials, including titanium alloys with complex shapes. This article characterizes the surface produced by thermal processes. From observations, a more consistent surface was achieved using coated wire electrodes. Among various parameters affecting the surface characteristics such as time between pulses, duration of pulses, injection pressure, wire speed and wire tension, the time between pulses was determined as the most suitable [1].

Technological developments of high hardness materials in manufacturing processes proceed at a rapid pace. WEDM utilizes the principle of an electric current passing through a wire electrode to cut high hardness materials that are difficult to machine with high accuracy [2]. WEDM causes the metal to evaporate, leaving debris while following a very accurate route [3]. Machining process parameters such as voltage (V_0), discharge current (I), wire speed (W_s), pulse on-off time (T-on, T-off), nozzle distance and wire tension were correlated with performance characteristics of surface roughness and material removal rate [1-5]. Each discharge factor generates high heat transfer resulting in evaporation and melting in nearby material from

the surface roughness finish [6]. The cutting mechanism of WEDM depends on the electrical conductivity of the wire and the material used in the process. The electrical spark, as a spark gap between the wire electrode and the material under its influence, occurs as a short duration discharge that generates melting, while particles are removed from the workpiece by flushing with deionized water [7-8]. The surface response method technique was used in the development of mathematical models as well as WEDM parameter optimization. Variance analysis was conducted to test the accuracy of the proposed model. Increasing the pulse on time (T-on) can reduce surface roughness [6].

The Taguchi method is the greatest for the design of the experiment. Taguchi method used widely in engineering system is one of the greatest tools for the design of experiment. This method focuses more on the effective application of engineering advanced statistics. Moreover, the Taguchi method investigates the effect of process parameters. This research used this method to determine the optimal value setting in wire electrical discharge machine in addition to original response values transferred to the S/N ratio. Further analysis is performed according to this S/N ratio and assessed by analysis of variance (ANOVA) to determine the significant machining parameter [9-11]. Therefore the optimal value of



machining parameter to obtain the optimal combination levels of machining parameters for material removal rate (MRR), feed rate (FR), surface roughness (SR).

In order to increase the efficiency of wire electrical discharge machining process, this paper focuses on analyzing the process parameters affecting the material removal rate surface characteristics and feed rates such as peak current, wire speed, wire tension and open voltage were determined as the most suitable for wire electrical discharge process. The influence of process parameters by the Taguchi method was used to determine the optimal value of the parameters affecting material removal rate, feed rate and surface roughness.

2. Materials and Methods

2.1 Titanium Alloy

Titanium alloys are recently developed advanced materials. Titanium grade 2 has numerous applications such as engine parts, heat exchangers, and orthopedic uses in the medical industry [7-10]. Titanium has high strength, with oxidation resistance and high melting temperature and is difficult to machine. A simulation of the machining process is shown in Fig. 1. The chemical composition of titanium grade 2 is shown in Table 1.

2.2 Design of the Experiments

The titanium workpiece with a size of 13.97 x 13.97 x 6.35 cm is prepared by wire electrical discharge machine JSEDM series W-B430. In this experimental work, the brass wire with a diameter of 0.25 mm is used as an electrode. The deionized water is used as a dielectric fluid. This work aims to thoroughly investigate the impact of the machine according to observe the effect of various process parameters such as peak current, wire speed, wire tension and open voltage which have been investigated.

Table 1 Chemical composition of titanium grade 2

Element	Ti	Si	Fe	Sn
Weight%	99.84	0.10	0.03	0.02

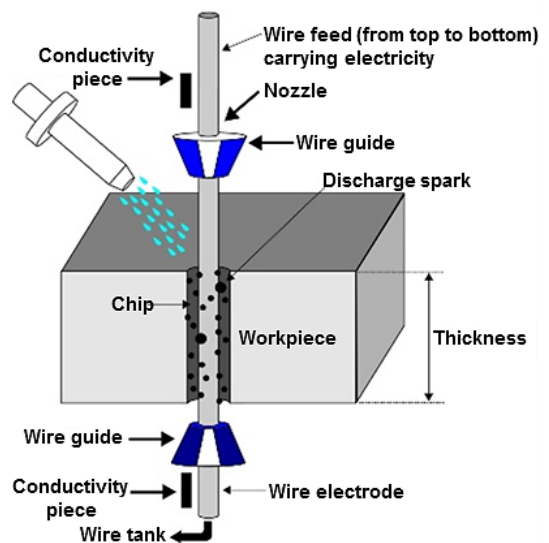


Fig. 1 Simulation of the machining process



The employ of the experimentation base on the machine capacity refers to workpiece capacity, four parameters are considered as minimum levels. The machining experiments were processed for determining the performance of WEDM machines, process parameters and their range of parameters. The experiment was performed using the Taguchi testing method with 3 levels, 4-factor. The experiment was carried out as per the design of experiment approach L9 (3²) orthogonal array each of the combinations shown in Table 2. The signal-to-noise ratio (S/N) method is used to measure quality characteristics that deviate from the desired value by the Taguchi technique. The method is also used to represent the mean to convert the experimental results into values for evaluation of characteristics to obtain the analyzing the appropriate parameters. The experimental result can be observed of the experiment value was impacted on material removal rate (MRR), feed rate (FR) and surface roughness (SR).

The Taguchi method was suggested signal to noise ratio (S/N) objective function for the matrix experiment. The optimum level for factors that result in MRR and FR were evaluated as “higher is better”, while SR focused in the inverse direction as “lower is better”. The observed values were calculated following Equations (1) and (2) [11].

$$\eta_{MRR, FR} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^{-2} \right] \quad (1)$$

$$\eta_{SR} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

Where n is the number of experiments is the repeated num of each experiment and y_i is the observed data.

The S/N ratios have been computed the optimal values were analyzed by ANOVA. The higher S/N ratios value to identify the effect of peak current-voltage and wire speed on MRR, FR and SR 0.05 (95% confidence) level of significance were selected for this research.

2.3 Experimental setup

In this paper, the experiment was carried out with the parameters were selected from the machining handbook such as peak current, wire-speed, wire tension, and open voltage each parameter has three levels namely low, medium and high, denoted by Level1, Level2 and Level3, respectively. The factors and their respective levels have been selected based on trial experiments. The parameter settings are shown in Table 2.

Table 2 : Process parameters

Parameter	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
Peak current (IP)	A	4	6	8
Wire speed (WS)	m/min	4	8	10
Wire tension (WT)	kgf	8	10	12
Open voltage (Vo)	Volt	12	14	16

The wire feed rate depends on the machining process. The wire feed rate was investigated to evaluate the material removal rate, which was calculated using Equation (3) [12].

$$\text{MRR} = \text{FR} \times b \times h \quad (3)$$

Where FR = Feed rate (mm/min)

b = Width of cut (mm) = $2Kw + d$

Kw = Kerf width (mm)

d = Diameter (mm)

h = Thickness workpiece (mm)

The possibility of fracturing the wiring involves selecting the parameters resulting in higher cutting speed or good surface [13]. Fig. 2 shows a wire EDM machine of the experimental setup that deals with the equipment used for the experiment.



Fig. 2 The JSEDM series W-B430 machine

3. Result and Discussion

The designs of Taguchi method utilized four parameters L9 orthogonal array to obtain the results of MRR, FR and SR. The experimental result was shown in Table 3.

Table 3 Experimental Results

No.	IP	WS	WT	Vo	FR (mm/min)	MRR (mm ³ /min)	SR (μm)
1	4	4	8	12	23.59	18.03	1.74
2	4	8	10	14	23.92	18.91	2.11
3	4	10	12	16	24.43	19.96	2.16
4	6	4	10	16	23.58	18.86	2.54
5	6	8	12	12	23.63	19.77	2.57
6	6	10	8	14	23.92	20.42	2.79
7	8	4	12	14	23.26	19.18	3.33
8	8	8	8	16	23.39	19.33	3.25
9	8	10	10	12	23.62	20.57	3.12

NOTE: No. = Experimental Number

3.1 Effect of parameter on MRR

The MRR was determined by the mass of workpiece, hence result-focused highest of MRR. The effect of process parameters on MRR was shown in Fig. 3. The results showed that MRR increased with peak current, while voltage also increased because a high peak current led to a voltage increase [13]. This high energy resulted in melted material, causing rising MRR [12].

3.2 Analysis of MRR

The main effects plot for S/N ratio of process as shown in Fig. 3. The main effects plot for S/N ratio of the parameters gave a high level at 8 A in peak current, 10 m/min in wire speed, 12 kgf in



wire tension, and 14 V in voltage, Hence MRR increased with peak current, wire tension, voltage, and wire speed increased.

3.3 Effect of parameter on feed rate (FR)

Fig. 4 showed an increase in MRR as the feed rate of the machine also increased. Smaller feeds produced fewer MRR results. This was due to the fact that greater feed estimation created a close gap between the wire and the workpiece. Corrosion of the material was affected by sparks. As the feed rate increases similarly, the MRR increases until the appropriate level was reached. The MRR decreases as the feed rate decreases.

3.4 Analysis of feed rate (FR)

Fig. 4 showed the effect of wire feed rate. The main effected plot for S/N ratio of the parameters gave a high level at 4 A in peak current,

10 m/min in wire speed, 12 kgf in wire tension, and 16 V in voltage. Larger is better, with a feed rate was 24.43 mm/min. The MRR increased as the feed rate increased [13-15].

3.5 Effect of parameter on surface roughness (SR)

The effect of the parameters on surface roughness using lower was better as shown in Fig. 5. The surface roughness was investigated at lower peak current at 4 A, wire-speed at 4 m/min, wire tension at 8 kgf and voltage at 12 V because as the discharge current increased, the voltage declined to melt the surface material. Surface roughness was measured at 1.74 μm ; however, as the discharge current increased, voltage also increased with greater melting of the workpiece.

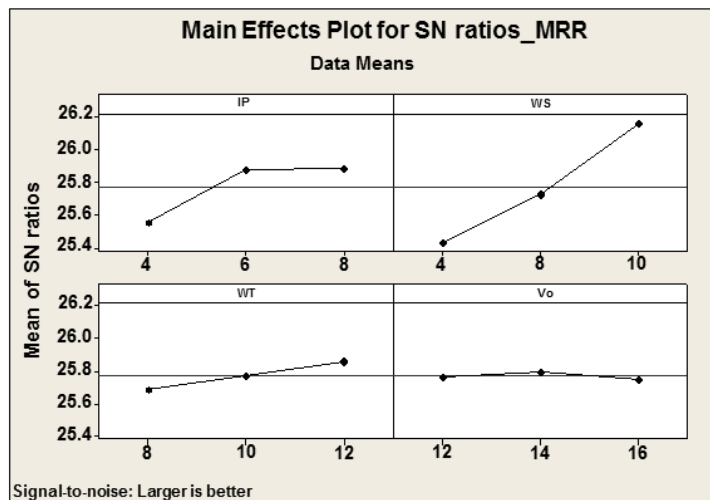


Fig. 3 Main effects plot for S/N ratio of MRR

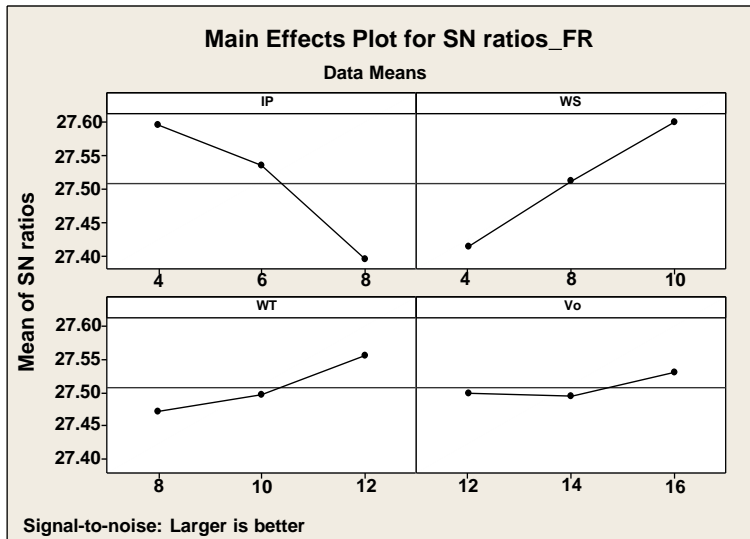


Fig. 4 Main effects plot for S/N ratio of FR

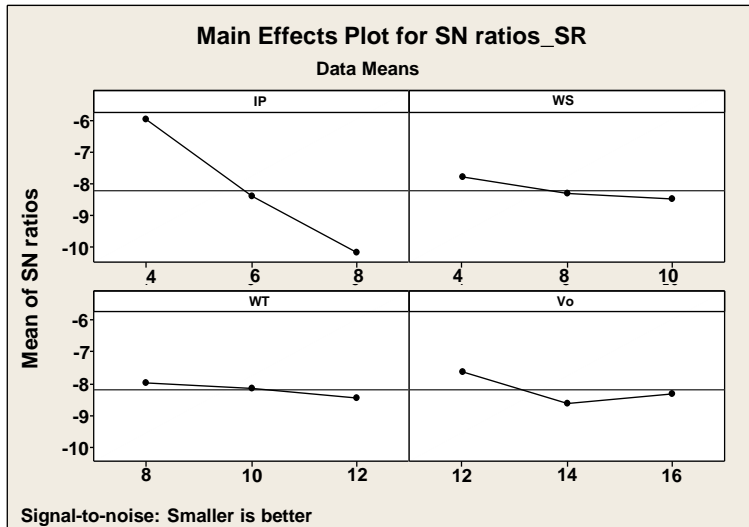


Fig. 5 Main effects plot for S/N ratio of SR



3.6 Analysis of surface roughness (SR)

The main effects of SR of each factor for various level conditions were investigated. Surface roughness had increased with peak current, wire tension, and wire speed. Larger craters were produced by higher peak current, possibly producing larger discharge energy. The influence of peak current with various settings was shown in Fig. 6 and Fig. 7.

Variations of crater diameter, depth, and volume concerning peak current were consistent with the literature. Higher currents generate larger craters and, therefore, produced a rougher surface [13-15]. The significance for surface roughness was peak current that could be observed by SEM analysis which was shown in Fig. 6, 7 and 8. It showed that the surface roughness integrity for titanium with peak currents at 4, 6, and 8 A. In experiment No.1, surface variation with peak current at 4A was $1.74 \mu\text{m}$, while the surface variation of No. 7 experiment was $3.33 \mu\text{m}$. The increase in surface roughness with decreasing peak current could be explained by the high discharge of thermal energy that caused the formation of larger cracks and craters, leading to an increase in surface roughness.

4. Evaluation of S/N Ratios

Base on the main effect plot for the S/N ratio of MRR, FR and SR as shown in Fig. 3 to Fig. 5.

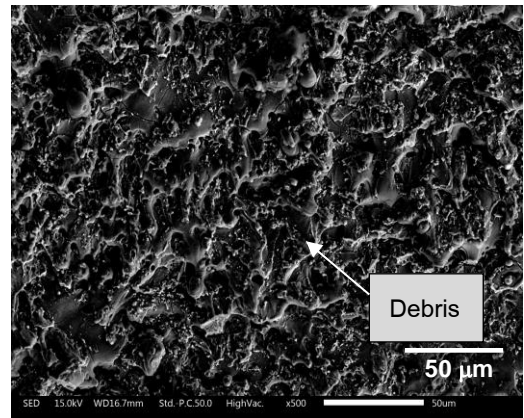


Fig. 6 Influence of peak current at 4 A

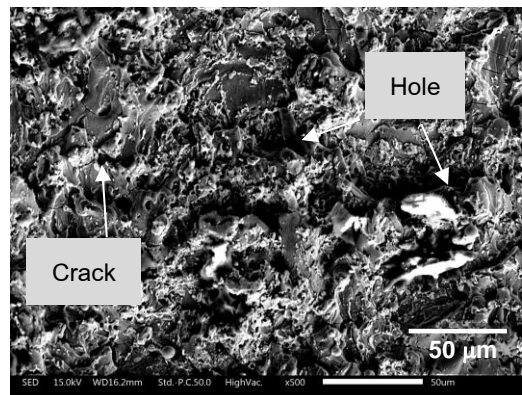


Fig. 7 Influence of peak current at 6 A

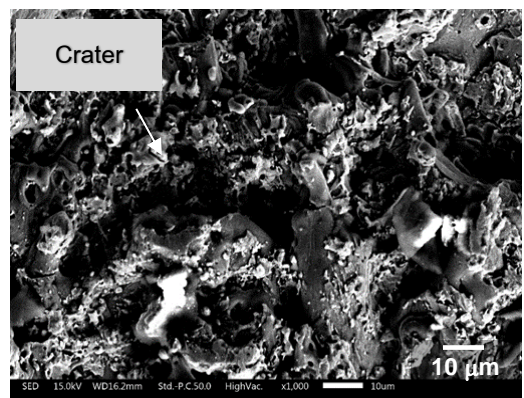


Fig.8 Influence of peak current at 6 A



The WEDM parameter rankings were shown in Table 4 - 6. As a result, it showed the response for MRR, FR and SR. The ranks indicated the importance of each factor in response. The rank showed that peak current at level 1 was the most important factor followed by voltage, wire speed and wire tension in that order.

Table 4 Response for Means for MRR

Level	IP	WS	WT	Vo
1	8.96	10.71	10.92	10.57
2	11.34	11.24	11.09	11.54
3	13.08	11.43	11.37	11.27
Delta	4.13	0.72	0.46	0.97
Rank	1	3	4	2

Table 5 Response for Means for FR

Level	IP	WS	WT	Vo
1	27.60	24.41	27.47	27.50
2	27.53	27.51	27.50	27.49
3	27.39	27.60	27.56	27.53
Delta	0.20	0.19	0.09	0.04
Rank	1	2	3	4

Table 6 Response for Means for SR

Level	IP	WS	WT	Vo
1	-6.00	-7.79	-7.99	-7.63
2	-8.40	-8.31	-8.16	-8.62
3	-10.19	-8.50	-8.45	-8.34
Delta	4.20	0.71	0.46	0.99
Rank	1	3	4	2

4.1 Regression analysis

The Taguchi method used the signal-to-noise ratios. The Minitab software was used to analyze the experimental data showed the effect of the process parameters. The variance analysis was

used to generate statistically significant machining parameters and the percentage contribution of these parameters. The ANOVA analysis result for the experimental was analyzed the main parameters affected to obtain MRR, SR and FR respectively. This experiment carried out 95% confidence level. The performance of MRR, FR and SR was developed by regression, as shown in Equations (4) - (6), The ANOVA results for machining results were shown in Tables 7 and 9. Statistically, the P-value gave a decision on the degree of confidence whether these estimates differ significantly Regression equations.

$$\text{MRR} = 15.80 + 0.18 \text{ IP} + 0.26 \text{ WS} + 0.08 \text{ ET} - 0.02 \text{ Vo} \quad (4)$$

$$\text{FR} = 22.95 - 0.14 \text{ IP} + 0.08 \text{ WS} + 0.04 \text{ WT} + 0.05 \text{ Vo} \quad (5)$$

$$\text{SR} = -0.25 + 0.31 \text{ IP} + 0.03 \text{ WS} + 0.02 \text{ WT} + 0.04 \text{ Vo} \quad (6)$$

According to Table 7, which showed the effect of parameters on MRR, it could be seen that the most effective significant of MRR was peak current and wire speed which confirmed the significant confidence by the R^2 value at 76.10%. Table 8 showed the result of significant parameter was affected to FR. It could be seen that peak current and wire speed were significant to feed rate which confirmed the significant confidence by the R^2 value of 88%. Table 9 showed the effect of significant parameters to SR and it could be seen that the peak current was



significant to surface roughness and confirmed the significant confidence by the R^2 value of 94.20%.

4.2 Confirmation experiments

The Taguchi method was used to predict the experimental results. Confirmation experiments were using the optimal parameters such as peak current at 8 A, wire speed at 10 m/min, wire tension at 10 m/min and voltage at 12V.

The optimal value of MRR was determined to be 20.57 mm³/min. Comparison with the optimized by Taguchi method showed the main effect that influences the MRR the optimal value predict of MRR is between 25.34<MRR<25.93 mm³/min. Table 10 showed the comparison of the results between the optimal value and the optimal value predict by the Taguchi method for confirmation experiments with the estimated process parameter settings.

Table 7 Analysis of variance for MRR

Term	Coef	SE Coef	T	P	Significance
Constant	15.80	1.54	10.29	0.00*	Significance
IP	0.18	0.08	2.24	0.09	Non -Significance
WS	0.26	0.05	4.81	0.00*	Significance
WT	0.09	0.08	1.16	0.31	Non -Significance
Vo	-0.02	0.08	-0.23	0.83	Non -Significance
Summary of Model S = 0.40 R-Sq = 88.10% R-Sq(adj) = 76.10%					

Table 8 Analysis of variance for feed rate

Term	Coef	SE Coef	T	P	Significance
Constant	22.95	0.46	49.61	0.00	Significance
IP	-0.14	0.02	-5.69	0.00*	Significance
WS	0.08	0.02	4.96	0.00*	Significance
WT	0.04	0.02	1.43	0.23	Non-Significance
Vo	0.05	0.02	1.91	0.13	Non-Significance
Summary of Model S = 0.12 R-Sq = 94.00% R-Sq(adj) = 88.00%					

**Table 9** Analysis of variance for SR

Term	Coef	SE Coef	T	P	Significance
Constant	-0.25	0.52	-0.49	0.65	Non-Significance
IP	0.31	0.03	11.36	0.00*	Significance
WS	0.03	0.02	1.45	0.22	Non-Significance
WT	0.02	0.03	0.86	0.44	Non-Significance
Vo	0.04	0.03	1.60	0.19	Non-Significance

Summary of Model S = 0.13 R-Sq = 97.10% R-Sq(adj) = 94.20%

Table 10 Confirmation of experimental results

Response	Optimal condition	Experimental	Optimal value prediction	95 %CI
MRR	IP ₃ WS ₃ WT ₂ Vo ₁	20.57	IP ₃ WS ₃ WT ₃ Vo ₂	25.34<MRR<25.93
FR	IP ₁ WS ₃ WT ₃ Vo ₃	24.43	IP ₁ WS ₃ WT ₃ Vo ₃	23.61<FR< 23.63
SR	IP ₁ WS ₁ WT ₁ Vo ₁	1.74	IP ₁ WS ₁ WT ₃ Vo ₂	0.57<SR< 0.97

5. Conclusions

This paper was investigated the machining characteristics of titanium using wire electrical discharge and applied the Taguchi technique to optimize the process parameters. The results were summarized as follows.

1. Peak current was the most significant to material removal rate, feed rate and surface roughness.
2. The wire speed was the main effect of the material removal rate.
3. The confirmation results was suggested a nominal value of MRR at 20.57 mm³/min, feed rate of 24.43 mm/min and optimal SR of 1.74 μm.

4. The ANOVA, regression analysis, and confirmation experiment for the estimated parameters for material removal rate, wire feed rate, and surface roughness indicated that the parameter relationship responses could be used to predict results.

6. Acknowledgements

The author would like to thanks support from the Faculty of Science and Technology, Department of Applied Science, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University for equipment and machine.



7. References

- [1] S. Kuriakose and M.S.Shunmugam Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface, *Materials Letters*, 2008, 58(17-18), 2231-2237.
- [2] M. Sharanya Nair and M.N. Joshi, A review on wire electrical discharge machining (WEDM) of composite materials, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2014, 17(9), 415-420.
- [3] K. Jangra and S. Grover, Modelling and experimental investigation of process parameters in WEDM of WC-5.3 % Co using response surface methodology, *Mechanical Sciences*, 2012, 3(2), 63-72.
- [4] A.R. Prasad, K. Ramji and B.R. Kumar, Study of wire-electrical discharge machining parameters of titanium alloy by using Taguchi method, *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, 7(2.8), 10-12.
- [5] P. Nakwong and T. Subboon, Effects of peak current and nozzle offset distance on wire electrical discharge machining of titanium, *The Journal of Industrial Technology*, 2020, 16(1), 93-104. (in Thai)
- [6] M.A.R. Khan, M.M. Rahman, K. Kadirgama, M.A. Maleque and M. Ishak, Prediction of surface roughness of Ti-6Al-4V in electrical discharge machining: A regression model, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2011, 1, 16-24.
- [7] V. Singh, R. Bhandari and V.K Yadav, An experimental investigation on machining parameters of AISI D2 steel using WEDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 93(1-4), 203-214.
- [8] A.V.S. Prasad, K. Ramji and G. Datta, An experimental study of wire EDM on Ti-6Al-4V Alloy, *Procedia Materials Science*, 2014, 5, 2567-2576.
- [9] J. Kumar and J.S. Khamba, An experimental study on ultrasonic machining of pure titanium using designed experiments, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2008, 30(3). 231-238.
- [10] A. Kumar, V. Kumar and J. Kumar, An investigation into machining characteristics of commercially pure titanium (grade-2) using CNC WEDM, *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 159, 56-68.



- [11] P.J. Ross, Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-Hill, NY, US, 1988.
- [12] M. Manjaiah, S. Narendranath and J. Akbari, Optimization of wire electro discharge machining parameters to achieve better MRR and surface finish, *Procedia Materials Science*, 2014, 5, 2635-2644.
- [13] A. Alias, B. Abdullah and N. Abbas, WEDM: Influence of machine feed rate in machining titanium Ti-6al-4v using brass wire and constant current (4A), *Procedia Engineering*, 2012, 41, 1812-1817.
- [14] P.S. Rao, K. Ramji and B. Satyanarayana, Experimental investigation and optimization of wire EDM parameters for surface roughness, MRR and white layer in machining of aluminium alloy, *Procedia Materials Science*, 2014, 5, 2197-2206.
- [15] M. Modi, G. Agarwal, S.D. Chaugankar, U. Bhatia and V. Patil, Effect of machine feed rate on kerf-width, material removal rate, and surface roughness in machining of Al/SiC composite material with wire electrical discharge machine, *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 70(1), 81-88.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 ท่าน แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่เกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์ของวารสาร (<http://j.cit.kmutnb.ac.th>)

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 at least two people in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3 – 5 words).

The content of the research article consists of 5 - 6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's homepage (ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech)



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ

เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

1. Title

2. Type of manuscript Research Article Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included :

Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech/index>

Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com

Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature Corresponding author

(.....)

Date Month Year



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 ปี 2564

- | | |
|--|---|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญเนตร สมบัติสมภพ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ หวังรักษ์ดีสกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ มีถม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ รนต์ละออง | มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย เผือกสามัญญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนัสพรวิทย์ สวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราวิชต์พร นวลสุวรรณค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 11. อาจารย์ ดร.วิษณุตร์ งามสะอาด | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 12. อาจารย์ ดร.โสภิตา ท่วมมี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๔

บทความวิจัย (Research Articles)

- K. Kiangpradith, N. Thongmak and P. Sridang, Adsorption of Organic Substance and Dyestuff from Batik Textiles Wastewater by Rubber Wood Fly Ash, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 1-14. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.02.001
- S. Chaiyakit and C. Pornsing, Raw Material Purchasing Lead Time Reduction for Reducing Inventory Carrying Cost, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 15-30. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.001
- S. Suwanauksorn and C. Pornsing, A Study of Factors for Chemical Cost Reduction in the Brake Pad Manufacturing Process, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 31-52. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002
- A. Chanthaphan, S.S. Pisitsungkakarn and T. Swasdisevi, Holy Basil Leaves Drying using Combined Microwave and Hot Air Conveyer Belt Dryer, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 53-64. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003
- S. Thongchai and P. Chaisermawan, Influence of Speed on Combustion Behavior of a Compression Ignition Engine using Ethanol Blended Diesel Fuel, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 65-81. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.004
- S. Namkaew and S. Prasomthong, Application of Taguchi Method for Burnishing Process of AA5052 Aluminum Alloy by Studying the Optimization of Production Machining Parameters, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 82-94. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.04.001
- P. Nakwong, Investigation of the Optimal Machining Parameters on Wire Electrical Discharge Machine by Taguchi Technique, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(1), 95-107.
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.04.002