



Print ISSN 1906-0874 Online ISSN 2651-2130

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

UTK RESEARCH JOURNAL

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2569

Vol. 20 No.1 January - June 2026

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

โทรศัพท์ 02 287 9600 ต่อ 3115

<https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>



วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2569 Vol 20 No.1 January – June 2026

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศาสตราจารย์ญาณวิทย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี	กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
ศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ทิพย์ปัทมาศ	กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
ดร.สิริเบญจา กอวัฒนา	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิระ ขจรจิตต์เมตต์	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ บุตรดี	ที่ปรึกษาอาวุโส
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจัน	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวาภู	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ สงวนพวง	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ดร.ประภาพร ร้อยพรมมา	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก บุญธรรม	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
-------------------------------------	-----------------------------------

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
--------------------------------------	---------------------------------------

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาธ เนืองเฉลิม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล เย็นฤดี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้าใส วิวัฒน์วงศ์วนา	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวงษ์ สว่างศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คณะวาปี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ พลอัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนางค์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลมาศ บำรุงเศรษฐพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทน์ฉาย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวธัญญ์นรี อุเทน	นายณรงค์ศักดิ์ วิสุทธิแพทย์	นางสาวพัชรินทร์ พัฒนโกครัตนา
นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา	นางสาวอจจรา จินดาจามัง	นางสาวนุชนารถ สิมมาลา
นางนาฏนภา จรเชื้อ	นางสาววันทนา ประดิษฐานธรรม	นายวันนิวัติ วันทนา
นายปณณกัณฑ์ สะสม	นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา	

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนกองบรรณาธิการ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 8 -12 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเอกสารอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วง และประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double-blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปแบบฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่อเอกสารอ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
 - 1.1. Environment Chemistry
 - 1.2. General Engineering
 - 1.3. Applied Mathematics
 - 1.4. Renewable Energy, Sustainability and the Environment
 - 1.5. Biomaterials
2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอดและเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วงคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไปเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้ระบุไว้ในเล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 3115
Email: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
<https://www.rdi.rmutk.ac.th>

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)
ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่

เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

สารบัญ

หน้า

1	Influence of Geometric Shapes of Parts on 3D Scanning Accuracy for Reverse Engineering.....	1 - 10
	Niwat Mookam, Tavee Madsa, Wichai Pumchan, Piyawan Sunasuan	
2	การวิเคราะห์ความแตกต่างของแนวทางสลิ้นในวิสาหกิจภาคการผลิตขนาดเล็กและขนาดกลางของประเทศไทย.....	11 - 21
	Analysis of Differences in Lean Implementation between Small and Medium-Sized Manufacturing Enterprises in Thailand	
	นภัสวรรณ คำเกิด และ เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์	
3	การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตเครื่องตีก็อปปีด้วยหลัก ECRS และการลดกำลังคน.....	22 - 29
	Improving Copying-Machine Production Line Efficiency Using ECRS Principles and Workforce Reduction	
	คณิศร ภูนิคม, กิตติพงษ์ เพียรพิทักษ์, อารี บุตรสอน, อรุณ บุญสร้าง, ฉัตรชัย พรหมนา และ อรจิรา ไชยระ	
4	การวิเคราะห์ผลตอบแทนคาร์บอนเครดิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและบทบาทในการเพิ่มความคุ้มค่าการลงทุนของโครงการ.....	30 - 35
	Assessment of Carbon Credit Value Derived from Rooftop Photovoltaic Systems and Their Contribution to Shortening Project Payback Periods	
	สุรเชษฐ เดชทุ่ง, ณัฏพล เรืองทรัพย์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	
5	การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันเพื่อชุดโอกาสพิเศษ.....	36 - 40
	Oil Repellency Finishing Technology for Special Occasion Clothes	
	ภัทรา คุ่มเขต	
6	การพัฒนาดีซีออปติไมเซอร์ด้วยวงจรฟลายแบคสองสวิตช์โดยใช้หลักการแปลงผันกำลังบางส่วน.....	41 - 50
	Development of a DC Optimizer Using a Two-Switch Flyback Converter with Partial Power Conversion	
	โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีต และ มณฑนา รังสโยภาส	

สารบัญ

หน้า

- | | | |
|---|---|---------|
| 7 | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดเส้นทางขนส่งอะไหล่รถยนต์ภายใต้จำนวนลูกค้าที่แตกต่างกัน..... | 51 - 58 |
| | Comparative Performance of Capacitated Vehicle Routing Algorithms for Automotive Parts Logistics under Various Customer Sizes | |
| | ประภาพรรณ เกษราพงศ์, ธฤชวรรณ ประสิทธิ์เวช, พิชาพร พันภัยพาล, กวินธร สัยเจริญ และ จักรินทร์ กลั่นเงิน | |
| 8 | การศึกษาจำนวนก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ..... | 59 - 65 |
| | Study of the optimal number of lotus stems for yarn production in hand embroidery | |
| | วาริ กาลศิริศิลป์, คณภรณ์ ยิ้มชื่น, เยาวมาลย์ นามใหม่ และ โสภิตา วิศาลศักดิ์กุล | |

Influence of Geometric Shapes of Parts on 3D Scanning Accuracy for Reverse Engineering

Niwat Mookam¹, Tavee Madsa², Wichai Pumchan³, Piyawan Sunasuan^{4*}

^{1,2,3,4} Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Wang Klai Kangwon Campus, Huahin, Prachuapkhirkhan 77110, Thailand^{1,2,3,4}

* Corresponding Author: Email: piyawan.sun@rmutr.ac.th

Received: 27-11-2025 Revised: 12-3-2026 Accepted: 06-5-2026

ABSTRACT

This paper investigates the geometric shapes of parts on 3D scanning for reverse engineering. The aim was to develop guidelines for scanner settings with various shapes. Five different geometric shapes were scanned and compared for surface detail reproduction across More details, Standard details, and Less details settings. GOM Inspect software compared standard triangle language files, point clouds, and polygon meshes. The results showed that different geometries lead to different point clouds and surface details after scanning. Point clouds generated with the More details setting are a substantially larger amount compared to those generated using the Standard detail and Less details settings. The mesh size exhibits an inverse relationship with point cloud data. A reduction number of point clouds corresponds to an increase in mesh size. Geometric shapes of triangle, cone, cubic, and sphere can be created with the standard detail, while geometric shape of cylinder requires less details for optimal scanner settings. The reverse deep-drawing of cups was an example demonstrating the benefits of the developed guidelines to show the curved part that is often a problem for the industry and causes thickness variation and tearing during forming. A comparative analysis of the reverse deep-drawing of cups utilized standard details compared with the computer-aided design file. Errors were minimal on the smooth surface, largely within ± 0.10 mm. The nose radius of the cups presented an error range of approximately ± 0.200 mm. When tested with a die created using high drawing speed, the improved nose radius was found to be in the range of 0.470 to 0.480 ± 0.014 mm.

Keywords: Geometric shapes, 3D scan, Point clouds, Polygon meshes, Reverse engineering

1. INTRODUCTION

Three-dimensional (3D) scanning has become an important technology for acquiring the shape and dimensions of physical objects. This technology, employing non-contact measurement techniques, is adapted for applications in reverse engineering, quality control, and rapid prototyping. A method that can capture intricate surface details and complex geometries has revolutionized various industries, offering enhanced flexibility and reliability in measurement, analysis, and storage [1]. Reverse engineering is a technique used to create three-dimensional models of physical objects. 3D measurement devices are employed in this process. When no technical drawings, scanning the object becomes necessary to obtain a 3D model. The resulting model is then digitized and refined using software before being used for production [2]. However, the accuracy and reliability of scanning are influenced by numerous factors, including the scanner calibration, environmental conditions, surface properties of the object, and the scanning parameters [3]. One of the primary factors influencing the accuracy of 3D scanning is the geometric characteristics of the object being scanned [4]. The shape, size, and complexity of the object can significantly impact the quality of the scanned data [5]. Objects with intricate geometries, such as sharp edges, deep cavities, and complex curvatures, pose challenges for optical scanners due to occlusions, reflections, and variations leading to inaccurate measurements. To address these challenges, optimizing scanning parameters can help mitigate the effects of reflections and variations in surface normals, enhancing the accuracy and reliability of the scanned data [6].

Geometric features introduced inaccuracies in 3D scanning due to several contributing factors. Specifically, corners and edges, characterized by abrupt shifts in surface orientation, induced diffraction and scattering of the projected light, thereby compromising the precision of the resultant measured point cloud [7]. Surface properties, including color, texture, and reflectivity, profoundly affect optical 3D scanning outcomes. Dark or absorbent surfaces may not reflect sufficient light back to the sensor, leading to data loss or increased noise. Highly reflective surfaces can cause specular reflections, distorting the scanned data and creating inaccuracies [8]. Rough or textured surfaces may

scatter the projected light, reducing accuracy, while smooth, matte surfaces generally produce better results. Addressing these surface property-related challenges involves a multifaceted approach, incorporating techniques such as applying temporary, diffuse coatings to alter reflectivity, employing specialized scanning technologies less susceptible to surface variations, and optimizing scanning parameters to enhance data acquisition quality [9]. Environmental conditions during scanning substantially influence data quality. Ambient light can interfere with the structured light or laser patterns projected by the scanner, causing noise and reducing accuracy [10]. Thus, the environmental conditions effect on the raw data obtained from 3D scanners often contains noise, outliers, and missing points [11].

The density and distribution of points in a point cloud are intricately linked to the geometric attributes of the scanned object. Curved surfaces often exhibit varying point densities due to the changing angle of incidence of the projected light or laser beam, with areas perpendicular to the scanner yielding higher densities compared to oblique regions [11]. Sharp edges and corners present unique challenges, as the scanner resolution and accuracy limitations may result in rounded or blurred representations. Additionally, intricate and complex geometries can lead to occlusions, where certain surface areas are hidden from the scanner line of sight, causing gaps or missing data in the resultant point cloud. Compressing the measured point data while maintaining the required accuracy is a crucial task during the scanning measurement process [12]. The geometric characteristics of the scanned object significantly influence the creation of polygon meshes from point clouds. Subdivision surfaces provide a compressed shape representation well suited to shape analysis. A method to estimate a subdivision surface from the triangular meshes common in shape analysis [13]. The accurate reconstruction of sharp edges and corners in polygon meshes may require the use of sophisticated algorithms. Moreover, areas with high curvature or intricate details may require adaptive meshing techniques to ensure that the mesh accurately captures the object geometric complexity. This is achieved by refining the mesh density in regions of high detail while maintaining a coarser mesh in flatter areas

[14]. Objects with intricate surface textures or fine geometric features necessitate a high-resolution mesh with a large number of polygons to accurately represent these details. However, employing a high-resolution mesh for simple shapes can result in an unnecessarily large. Inversely, a low-resolution mesh for complex objects can lead to a loss of important geometric [15]. The occurrence of the surface “guessing” and deformed patches in the resulting 3D model during the scan [16]. The effect of geometric shapes on 3D scanning significantly affects data completeness [17]. Thus, geometric shapes of parts exert a considerable influence on the resultant point clouds and polygon meshes derived from 3D scanners [18]. The geometric shapes on 3D scanning for reverse engineering was investigated, focusing on scanning modes performed across five distinct geometric shapes. This approach facilitated a detailed comparison of surface reproduction across varying levels of detail: More Details, Standard Details, and Less Details. The analysis of STL files, point clouds, and polygon meshes was conducted using GOM Inspect software.

2. MATERIALS AND METHODS

The prototype workpieces were machined from medium carbon steel with different shapes, namely workpiece A (triangle), B (cone), C (cubic), D (sphere), and E (cylinder), as shown in figure 1. Before 3D scanning, AESUB, SKD-S2 spraying a coat on the object surface will help reduce the optical effects. GOM, ATOS Core 300 is used to scan workpieces. Technical parameters of ATOS scanner are in the table 1. Optical system calibration was subsequently performed utilizing a calibration object mounted on a rotary table. This calibration was instrumental in ensuring the dimensional consistency of the measuring system. The procedure adhered strictly to the recommended guidelines provided by the manufacturer, GOM GmbH. The computer controls the operation of the 3D scanner using a Dell Precision model M 4800. 3D scanning used for the three-dimensional measurement of objects parts combined with Gom Inspection software. The modes used for scanning parts include Matrix mode with surface data collection includes More details, Standard details, and Less details.

A comparison of the scanned details is performed to determine the mode and settings that are

appropriate for the prototype shape. The appropriate mode was selected, and experiments utilizing sample cup components from the industrial sector were conducted to evaluate the degree of deviation. Subsequently, design and create a deep drawing die of cups, test, and verify the results of the deep drawing process. Finally, inspect the thickness at different locations from the cross-section of the workpiece.

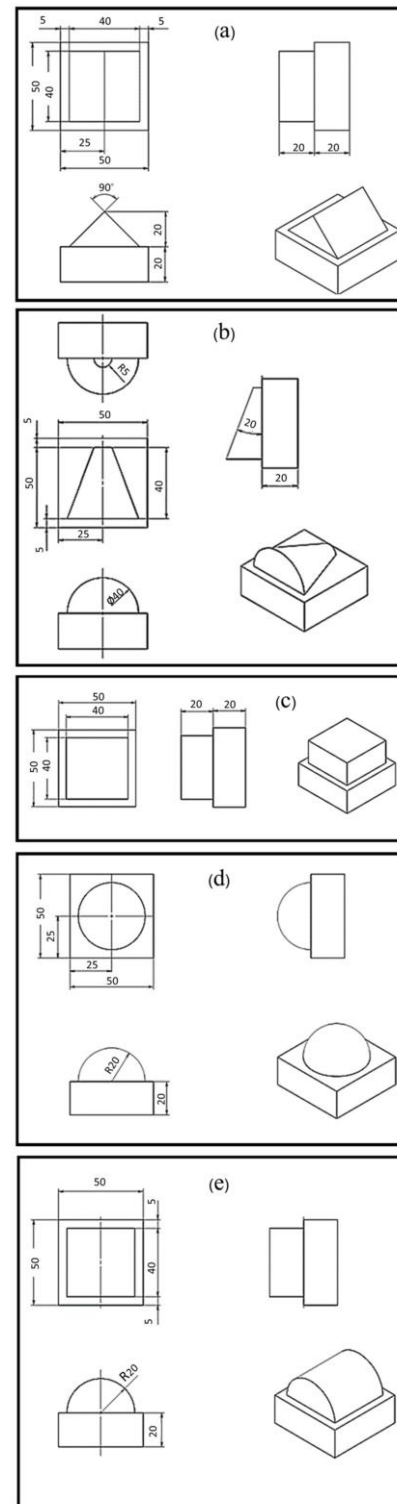


Figure 1 Workpiece shapes and drawing

Table 1 Parameters of 3D scanning

Parameters	Details
Measuring area	300 x 230 mm
Point Spacing	0.12 mm
Sensor Dimensions	361 x 205 x 64 mm
Camera resolution	5 million pixels
Working distance	440 mm
Angle between cameras	28 deg.

3. RESULTS AND DISCUSSION

A comparative evaluation of the scan results emphasizing surface details, point cloud data, and mesh data is provided for each workpiece in figures 2-6. The scanning results for workpiece A as presents in figure 2., revealing negligible differences in point cloud and mesh size between the Standard details and Less detailed settings. Conversely, employing the More detail configuration results in a greater quantity of point clouds and a reduction in mesh size.

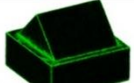
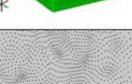
File	Surface Characteristics		
	More Details	Standard Details	Less Details
STL			
All Point Data			
Point Top - View			
Mesh Top - View			

Figure 2 Scan results of workpiece A.

Moreover, the presence of unorganized point clouds is noted at the edge and corner regions of the surface. Therefore, the utilization of Standard details and Less detailed settings yields satisfactory scan results for workpiece A. Workpiece B, geometry is a conical surface as depicted in figure 3. The point cloud distribution is uniform. Similar mesh sizes are observed for both More detail and Standard details settings, while the Less detailed setting exhibits the largest mesh size. Given the

enhanced texture reproduction, More detail and Standard details settings are recommended for this geometry.

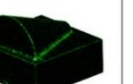
File	Surface Characteristics		
	More Details	Standard Details	Less Details
STL			
All Point Data			
Point Top - View			
Mesh Top - View			

Figure 3 Scan results of workpiece B.

In the case of workpiece C, as illustrated in figure 4. The More detail and Standard details' configurations led to the formation of unorganized point clouds. Conversely, the Less detailed setting produced a uniform and distributed arrangement of point clouds, and sufficient for scanning. According to the data presented in figure 5 (workpiece D), the More detail setting results in a higher concentration of point cloud data. The Standard detail setting yields a more even distribution, although some areas exhibit higher point density. However, the Less detail setting produces a uniformly distributed point cloud but is characterized by a larger mesh size. Workpiece E as depicted in figure 6. The More detail and Standard detail settings generated a distributed point cloud, which facilitated the creation of a fine mesh and complete surface coverage. Conversely, the Less detail setting resulted in a less dense point cloud and a coarser mesh, leading to the presence of numerous surface imperfections. The magnitude of point cloud data was directly proportional to the selected surface of detail during the scanning process. More detail settings correlated with a larger volume of point cloud data. Conversely, utilizing standard detail or less detail settings resulted in a lower point cloud density.

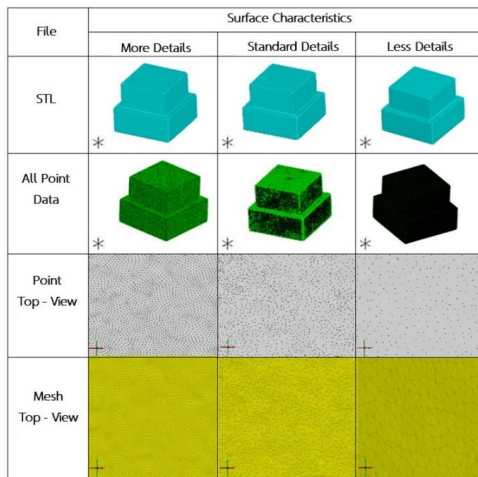


Figure 4 Scan results of workpiece C.

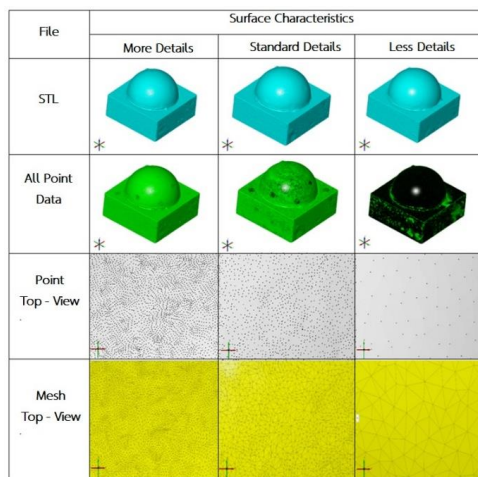


Figure 5 Scan results of workpiece D.

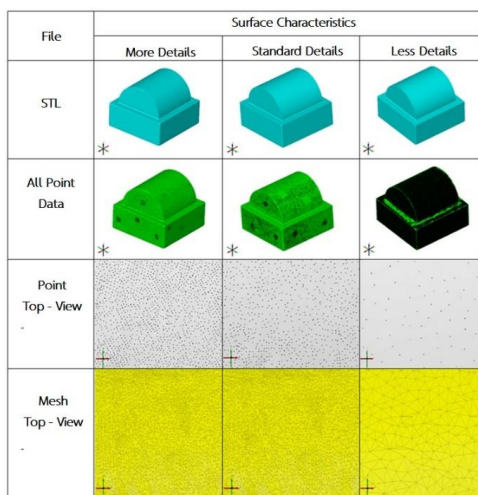


Figure 6 Scan results of workpiece E.

The results were compared point cloud data for all scan workpieces in figure 7. Workpiece D had a larger magnitude of point cloud data than the other part shapes in both modes of More details and Standard details. The Less detailed mode of all workpieces

showed almost identical point cloud data. Thus, the shapes are influenced by point cloud distribution because scanners transfer beams onto objects and receive them back. Point cloud reactions vary depending on the shape and surface types [19].

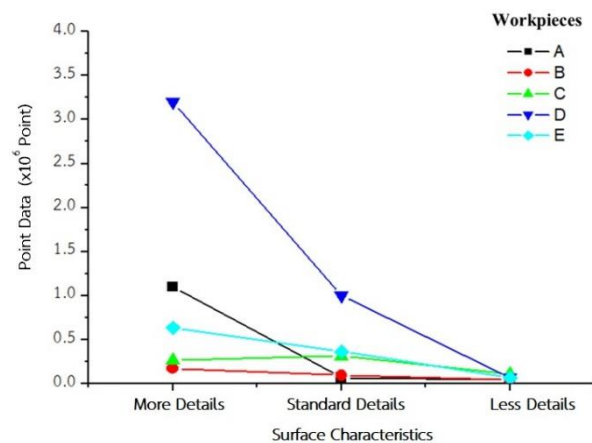


Figure 7 Point cloud data of workpieces.

Generally, the highest resolution during scanning was crucial, as low-resolution models often yielded poor detail quality, blurring smaller elements and only clearly displaying larger, basic components. Although higher resolution scanning facilitated the capture of finer details, this approach also resulted in larger datasets, thus augmenting the requirements for processing power and storage capacity. As a result, engineers were obliged to reconcile the necessity for detailed data with the practical limitations of data management.

During the scanning process, two categories of errors may arise. Accidental errors, stemming from unpredictable anomalies within the scanning system, lack a discernible pattern of occurrence. These errors manifest as outliers or pulse noise during 3D digitalization. In contrast, systematic errors follow predictable patterns arising from identifiable sources. These may include calibration methodologies, sensor sensitivity, attributes of the object under examination, ambient conditions, and the proficiency of the operator conducting the scan. The manifestation of such errors frequently involves the generation of spikes, which subsequently induce irregularities in the resultant curves and surfaces. Surface reconstruction is contingent upon the initial rectification of these errors via point cloud data preprocessing. Filtering, in this context, comprises

two essential operations: the removal of pulse noise and the smoothing of data-points. Post-filtering, the resultant point cloud often contains redundant data-points that can hinder processing efficiency and potentially introduce errors. Mitigating this involves employing techniques to reduce the prevalence of these superfluous data-points. Finally, geometric modeling and preprocessing of surfaces involve either surface approximation or polygonal approximation techniques. Typically, point cloud data undergoes a transformation into STL data file or triangular mesh models through a process known as surface reconstruction [20]. Consequently, point clouds often retain a degree of redundant data, exemplified by Workpieces B, C, and D. This redundancy primarily impedes and decelerates data processing, and in some instances, may introduce inaccuracies. Employing data reduction techniques can resolve this issue by eliminating superfluous data points.

However, the presence of irregularities in point distribution and mismatched alignments can occur in certain patterns, specifically observed in workpieces A, C, and D, when employing the More details scanning mode. These artifacts arise as a consequence of the intricate surface geometry of these workpieces, compounded by the inherent limitations of the optical scanning process [21]. The irregularities in point distribution stem from variations in surface reflectivity and local geometric features, which can lead to inconsistencies in the scanner ability to accurately capture data across the entire surface. This is particularly evident in regions with sharp edges, or complex curvatures, where the scanner's line of sight may be obstructed or the reflected light signal may be distorted. In addition to point distribution irregularities, mismatched alignments can also occur, particularly when the scanner struggles to maintain consistent registration between adjacent scan passes. When the laser scanner scans an object, it calculates the three-dimensional coordinates for each pixel on the object based on the principle of 3D triangulation, as it measures distance, angle, and height of the instrument provided by the user [22]. This phenomenon arises from subtle shifts in the scanner's position or orientation during the scanning process, as well as from accumulated errors in the scanner's internal calibration.

The completeness of a point cloud, which refers to the extent of digitizing gaps, and its accuracy, which is associated with the measurement uncertainty of a 3D point, serve as key indicators of point cloud quality. Moreover, the geometric properties of an object, specifically its dimensions and shape, introduce complexities in achieving uniform data density across the entire surface during optical 3D scanning. Shiny metallic surfaces present substantial challenges in the realm of optical 3D scanning due to their inherent reflective properties, which can lead to specular reflection instead of diffuse reflection [6]. While 3D scanning and point cloud data with even distribution points are orderly can lead to high-quality STL files and a 3D surface model. Table 2. presents scanning suggestions for different workpieces according to shape characteristics.

Table 2 Scanning suggestions for different workpieces

Workpieces	More Details	Standard Details	Less Details
A		✓	✓
B	✓	✓	
C			✓
D		✓	✓
E	✓	✓	

The Standard details mode is generally suitable for scanning all workpieces, except for workpiece C, which benefits from the Less details option. The More Details mode is specifically advantageous for tasks A and B. Conversely, the Less Details mode remains effective for workpieces A, C, and D. However, the case of mode Standard details that most users usually choose to use with the scanner. To quantitatively assess the accuracy of the scanning process, a deviation analysis was performed, comparing the resultant 3D model with the original CAD file. Based on the reverse engineering of the deep-drawing cup part utilizing Standard details. A comparison of the reverse engineering results with the drawing or CAD file, as shown in figure 8. indicates minimal error from scanning and modeling. This is supported by the color bands, where green indicates a difference of -0.1 to +0.1 mm. The curved or concave edge of the cup shows yellow and blue deviations up to ± 0.2 mm. However, deviations exceeding ± 0.2 mm or other colors were not apparent on the scanned workpieces.

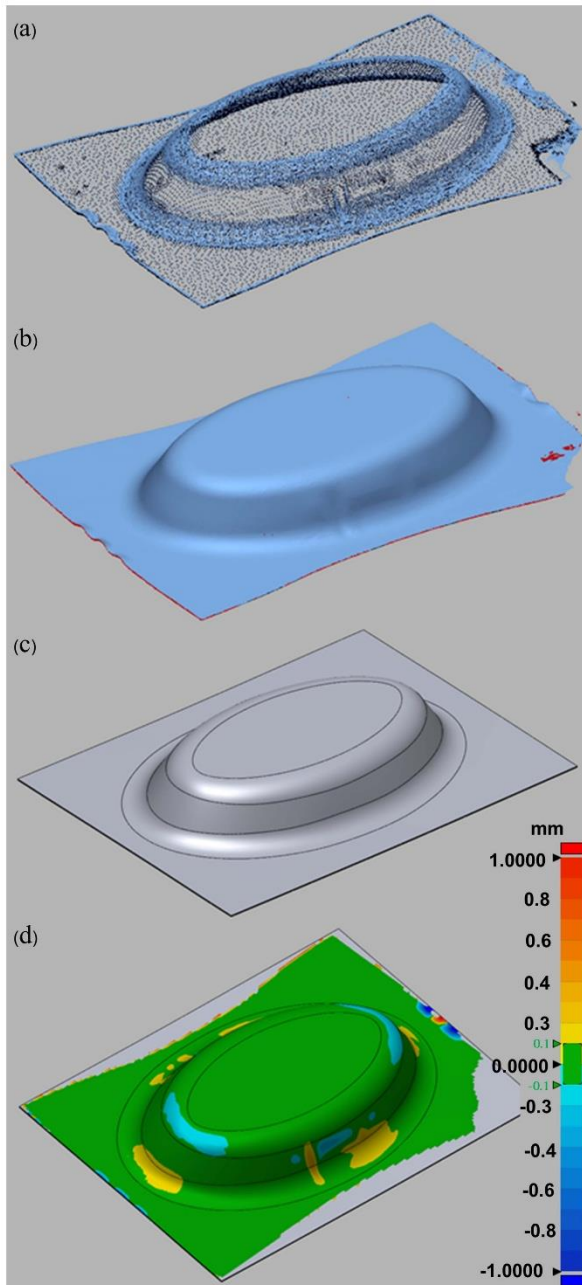


Figure 8 Reverse engineering of the cup shape.

Following the scanning and reverse engineering stages, the design and production of the deep drawing die components were executed, as illustrated in Figure 9 (a). The die components were fabricated from S50C steel as illustrated in figures 9 (b)-(i), while the components in figures 9 (j)-(m) consisted of standard parts. Figure 10. presents the assembled deep drawing die within the stamping machine and the workpiece. The initial blank, a rectangle of 304 stainless steel with a 0.5 mm thickness, 110 mm width, and 170 mm length, underwent forming. Subsequently, a cross-sectional and thickness measurement of the formed sheet metal blank are detailed in figure 11.

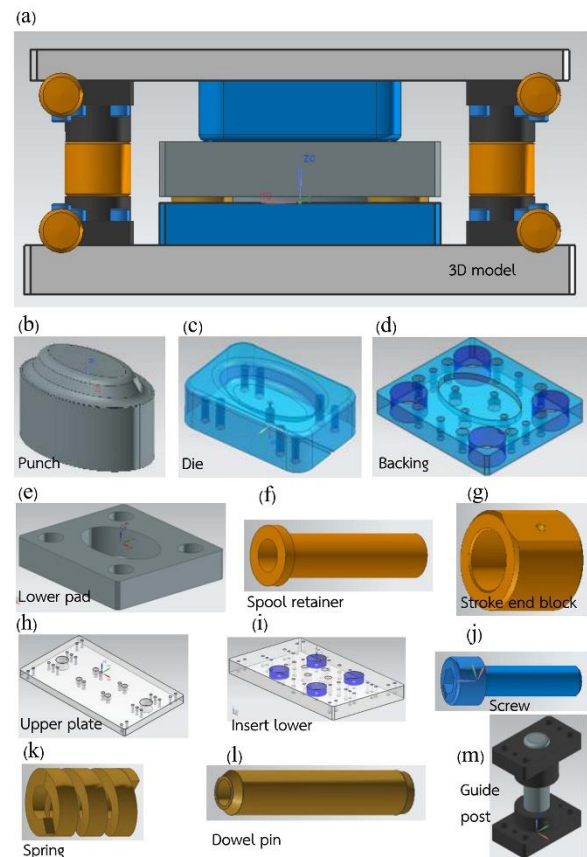


Figure 9 Deep drawing die design.

Figure 12. illustrated the thickness variations at specific locations and their relation to differing punch speeds. The integrity of the cup surface was maintained across all workpieces, with no evidence of tearing detected. However, the rim or flange (location (a)) and the bottom of the cup (location (e)) exhibited consistent thickness across varying punch speeds. The thinning phenomenon was primarily observed at locations (b)-(d), attributable to metal flow during the deep drawing process. The nose radius at location (d) exhibited the most pronounced metal flow, correlating with the area of maximum thinning. Distal to this point, the extent of thinning diminished along the cup wall (location (c)) and nose radius (location (b)). Elevated friction within the flange region promoted material migration from the nose radius and sidewall toward the periphery during forming [23].



Figure 10 Deep drawing die and workpiece.

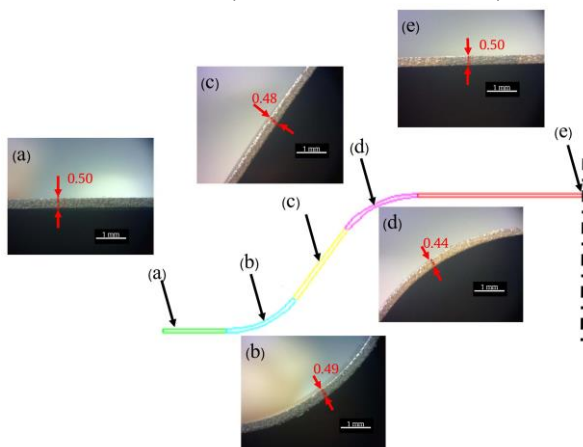


Figure 11 Thickness measurement locations on the drawn cup.

In the deep drawing process, variations in punch speed did not influence the thinning behavior observed at the flange and bottom regions of the cup. Conversely, at locations (b)-(d), an increase in the drawing speed was associated with a greater extent of maximum thinning. This can be attributed to the accelerated strain hardening of the sheet material at higher speeds, which consequently restricted its capacity for uniform deformation. This finding aligns with observations reported by Mohammed [23]. However, exceeding this drawing speed resulted in improved maximum thinning, implying that higher speeds may have promoted

enhanced metal flow and reduced localized thinning. This phenomenon was observed with a drawing speed of 1,500 mm/min, especially at location (d). Thus, the best results were obtained from the drawing speed of 1,500 mm/min according to the uniform thickness distribution and the lowest maximum thinning. Increasing the drawing speed reduced maximum thinning at location (d) where the thickness was 0.47 ± 0.0142 mm. The nose radius at location (b) with thickness was 0.48 ± 0.0141 mm. Compared to reverse engineering, the nose radius deviations were up to ± 0.20 mm. It enabled the thickness variation of the workpiece to be reduced to an acceptable range during forming.

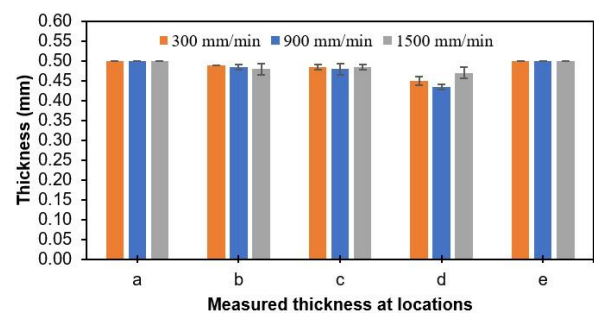


Figure 12 Relation of thickness measurement at locations and punch speed.

4. CONCLUSIONS

The research highlighted the importance of carefully selecting scanning parameters to maximize the precision and reliability of 3D scanning outcomes. The geometric characteristics of parts significantly impact the accuracy and effectiveness of 3D scanning processes. Specifically, variations in surface curvature, the presence of intricate features, and the overall complexity of the geometry significantly impacted the quality and reliability of the generated scan data. The results of scanning revealed that employing Standard details settings facilitated the creation of geometric shapes A (triangle), B (cone), C (cubic), and D (sphere). However, geometric shape E (cylinder) necessitated the use of Less details for achieving optimal scanner performance. An example of the reverse engineering of the deep-drawing cup with a bank thickness of 0.5 mm using Standard details. It was found that the errors on smooth surfaces were generally within the range of ± 0.100 mm. The curved or concave edge and base of the cup exhibited an error range of approximately ± 0.200 mm.

Testing with a die created using high drawing speed indicated that the improved nose radius fell within the range of 0.47 to 0.48 $\pm$ 0.014 mm.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Rajamangala University of Technology Rattanakosin [grant number C51/2567], and sincere appreciation was also expressed to TOOL AND DIE AUTOPART LIMITED PARTNERSHIP for sample application reverse engineering and die design. The authors would like to extend their gratitude to Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus for the laboratory.

6. REFERENCES

- [1] Javaid M, Haleem A, Pratap Singh R, Suman R. Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications. *Sensors Int.* 2021; 2:100114. DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100114.
- [2] Bilušić M, Runje B. Use of optical three-dimensional (3D) scanners in reverse engineering. In: 22nd International Conference on Materials. 2022. p. 12-12.
- [3] Muralikrishnan B, Ferrucci M, Sawyer D, Gerner G, Lee V, Blackburn C, et al. Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precis Eng.* 2015;40:139–150. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.11.002.
- [4] Kersten TP, Mechelke K, Lindstaedt M, Sternberg H. Methods for geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems. *Photogrammetria Fernerkundung Geoinf.* 2009;301–316. DOI: 10.1127/1432-8364/2009/0023.
- [5] Remondino F, Guarnieri A, Vettore A. 3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning In: *Videometrics VIII.* 2005. p. 216–225.
- [6] Mian SH, Mannan MA, Al-Ahmari AM. The influence of surface topology on the quality of the point cloud data acquired with laser line scanning probe. *Sens. Rev.* 2014;34:255–65. DOI: 10.1016/S0141-635900071-4.
- [7] Feng HY, Liu Y, Xi F. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system. *Precis Eng.* 2001;25:185–91.
- [8] Nöll T, Köhler J, Reis G, Stricker D. Fully automatic, omnidirectional acquisition of geometry and appearance in the context of cultural heritage preservation. *J Comput Cult Herit.* 2015;8(1):1–28. DOI: 10.11145/262963.
- [9] Pawłowicz JA. Effect of geometrical features of various objects on the data quality obtained with measured by TLS. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2017;227(1).p.012093.
- [10] Yang T, Li Y, Zhao C, Yao D, Chen G, Sun L, et al. 3D ToF LiDAR in mobile robotics: A review. 2202.11025;2022. DOI: 10.48550/arXiv. 2202.11025.
- [11] Zhao Q, Gao X, Li J, Luo L. Optimization algorithm for point cloud quality enhancement based on statistical filtering. *J Sensors.* 2021;(1):732500. DOI: 10.1155/2021/7325600.
- [12] Li Y, Ma Y, Tao Y, Hou Z. Innovative methodology of on-line point cloud data compression for free-form surface scanning measurement. *Appl Sci.* 2018;8(12):2556. DOI: 10.3390/app8122556.
- [13] Estellers V, Schmidt FR, Cremers D. Compression for smooth shape analysis. DOI: 10.48550/arXiv.1711.1082.
- [14] Xu X, Li K, Ma Y, Geng G, Wang J, Zhou M, et al. Feature-preserving simplification framework for 3D point cloud. *Sci Rep.* 2022;12(1):9450. DOI: 10.1038/s41598-022-13550-1.

- [15] Nielsen MS, Nikolov I, Kruse EK, Garnæs J, Madsen CB. Quantifying the influence of surface texture and shape on structure-from-motion 3D reconstructions. *Sensors*. 2023;23:178. DOI: 10.3390/s23010178.
- [16] Nikolov I, Madsen C. Rough or noisy? Metrics for noise estimation in SfM reconstructions. *Sensors*. 2020;20(19):5725. DOI: 10.3390/s20195725.
- [17] O’banion MS, Olsen MJ, Hollenbeck JP, Wright WC. Data gap classification for terrestrial laser scanning-derived digital elevation models. *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2020;9(12):749. DOI: 10.3390/ijgi9120749.
- [18] Ding S, Chen X, Ai C, Wang J, Yang H. A noise-reduction algorithm for raw 3D point cloud data of asphalt pavement surface texture. *Sci Rep*. 2024;14(1):16633. DOI: 10.1038/s41598-024-65233-8.
- [19] Razali MH, Idris AN, Mohd Nor TNAT, Ghazali R. Accuracy assessment on point cloud dataset from terrestrial laser scanner with different objects surface properties. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2021;767:012007. DOI: 10.1088/1755-1315/767/1/012007.
- [20] Lazarević D, Nedić B, Jović S, Šarkoćević Ž, Blagojević M. Optical inspection of cutting parts by 3D scanning. *Phys. A. Stat. Mech. Its Appl*. 2019;531(1):121583. DOI:10.1016/j.physa.2019.121583.
- [21] Eybpoosh M, Akinci B, Bergés M. Effects of planning and data collection approaches on the quality of processed laser scanned data: Lessons learned. In: *Construction Research Congress 2012: Construction Challenged in a Flat World*: 2012. p. 950–959. DOI: 10.1061/9780784412329.096.
- [22] Ghazali R, Sukri AEE, Latif ARA, Rasam ARA, Latif ZA, Samad AM. Evaluating the relationship between scanning resolution of laser scanner and the accuracy of the 3D model constructed. In: *2011 IEEE Int Conf. Control Syst. Comput. Eng. ICCSCE*;2011. p. 590–595. DOI: 10.1109/ICCSCE.2011.6190595.
- [23] Zhao J, Zhang K, Ma X, Zhang J. Study on the formability of copper foils during multi-step micro deep drawing. *J Mater Res Technol*. 2024;28:2187–2198. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.12.106.

การวิเคราะห์ความแตกต่างของแนวทาง
ในวิสาหกิจภาคการผลิตขนาดเล็กและขนาดกลางของประเทศไทย
Analysis of Differences in Lean Implementation between
Small and Medium-Sized Manufacturing Enterprises in Thailand

นภัสวรรณ คำเกิด¹ และ เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์^{2*}

Napassawan Kamkert¹ and Samerjit Homrossukon^{2*}

สาขาการจัดการทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Department of Engineering Management, Faculty of Engineering, Thammasat University

*Corresponding Author: Email: tsamerji@engr.tu.ac.th

Received: 07-12-2025 Revised: 05-06-2026 Accepted: 05-06-2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษานำร่องและวิเคราะห์ความแตกต่างของแนวทางการดำเนินระบบการผลิตแบบลีนในวิสาหกิจขนาดเล็กและขนาดกลางภาคการผลิตในประเทศไทย โดยประเมินใน 5 ด้าน ได้แก่ องค์ประกอบด้านการจัดการ การใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิต ความสูญเสียเปล่า การวัดผลหลังปรับปรุง และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยเริ่มจากการพัฒนาแบบตรวจสอบขึ้นจากกรอบแนวคิดลีนและเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้อง โดยความตรงเชิงเนื้อหาของแบบตรวจสอบ มีค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.60 – 1.00 และความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมิน 100% และ Gwet's AC1 เท่ากับ 1.00 เบื้องต้นนำไปใช้เก็บข้อมูลจาก SMEs ภาคการผลิตขนาดเล็ก 4 แห่ง และขนาดกลาง 5 แห่งในประเทศไทย ผลการเปรียบเทียบเชิงพรรณนา พบว่า SMEs ทั้งสองขนาดมีแนวทางการดำเนินลีนใกล้เคียงกันหลายด้าน อย่างไรก็ตามยังพบข้อสังเกตเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะการดำเนินงานที่ต่างกันตามบริบทขององค์กร โดย SMEs ขนาดเล็กมีองค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการลีนสูงกว่าขนาดกลางร้อยละ 87.50 อีกทั้งขนาดเล็กมีการดำเนินกิจกรรม 5S ร้อยละ 92.19 ขณะที่ SMEs ขนาดกลางมีแนวโน้มใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิตอย่างเป็นระบบและหลากหลายกว่าร้อยละ 32 และทั้งสองกลุ่มให้ความสำคัญกับการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในระดับเท่ากัน ผลการศึกษานี้สะท้อนแนวโน้มเบื้องต้นของการดำเนินลีนใน SMEs ภาคการผลิตของประเทศไทย และข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางสนับสนุนการประยุกต์ใช้ลีนใน SMEs ภาคการผลิตของประเทศไทย รวมทั้งวางรากฐานสำหรับการศึกษาที่ครอบคลุมอุตสาหกรรมที่หลากหลายขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: การผลิตแบบลีน วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็ก แบบตรวจสอบ

Abstract

This study aimed to conduct a pilot study and explore differences in lean manufacturing practices between small-sized and medium-sized manufacturing enterprises in Thailand. The assessment focused on five dimensions: (1) management components, (2) process analysis tools, (3) production waste, (4) post-improvement measurement, and (5) continuous improvement. The research began with the development of a checklist based on lean manufacturing concepts and relevant literature. The checklist demonstrated satisfactory content validity, with Item-Objective Congruence (IOC) values ranging from 0.60 to 1.00, and high inter-rater reliability, reflected by 100 percent agreement and a Gwet's AC1 coefficient of 1.00. The checklist was preliminarily applied to four small-sized and five medium-sized manufacturing SMEs in Thailand. Descriptive comparison indicated that both groups exhibited similar lean implementation practices across several dimensions. However, preliminary observations revealed differences in operational characteristics. Small-sized SMEs achieved a higher score in management-related components associated with lean implementation at 87.50% and demonstrated a higher level of 5S implementation at 92.19%. In contrast, medium-sized SMEs showed a greater tendency to utilize process analysis tools in a more systematic and diverse manner, with an average score of 32%. Both groups placed equal emphasis on continuous improvement. The findings provide preliminary insights into lean implementation practices among manufacturing SMEs in Thailand. They may serve as practical guidance for supporting lean adoption in manufacturing SMEs and establish a foundation for future studies involving a broader range of industries and organizational contexts.

Keywords : Lean manufacturing, Small and medium-sized enterprises, Checklist

1. บทนำ

แนวความคิดการผลิตแบบลีนเป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต และได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก [1 – 3] ในขณะที่ในประเทศไทยวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็ (SMEs) มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจ แต่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ความรู้ และการสนับสนุนภายในองค์กร ทำให้การนำลีนมาใช้ยังไม่แพร่หลาย [4, 5]

งานวิจัยหลายฉบับชี้ว่าขนาดขององค์กรเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบและระดับของการดำเนินลีน โดยวิสาหกิจขนาดเล็กมีความยืดหยุ่นสูงแต่ขาดระบบสนับสนุน ขณะที่ขนาดกลางมีโครงสร้างและทรัพยากรที่พร้อมกว่า [6 – 7] นอกจากนี้ยังพบว่าวิสาหกิจขนาดเล็กส่วนใหญ่ใช้เครื่องมือพื้นฐาน ส่วนขนาดกลางสามารถใช้เครื่องมือขั้นสูงได้เนื่องจากมีบุคลากรและการจัดการที่พร้อมกว่า [8] อีกทั้ง ยังพบว่าวิสาหกิจขนาดเล็กส่วนใหญ่เริ่มจากการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในระดับนำร่อง ในขณะที่ขนาดกลางสามารถบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูงได้มากกว่า [9]

อย่างไรก็ตามในบริบทประเทศไทยยังขาดงานวิจัยเชิงเปรียบเทียบที่อธิบายความแตกต่างของการดำเนินลีนระหว่างวิสาหกิจทั้งสองขนาด เพื่อทำความเข้าใจระดับความพร้อมและแนวทางการประยุกต์ใช้ลีนในสถานประกอบการไทย และเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดแนวทางสนับสนุนที่เหมาะสมกับศักยภาพขององค์กรแต่ละขนาด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแนวทางการดำเนินระบบลีนระหว่างวิสาหกิจขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทย

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ความแตกต่างของแนวทางการดำเนินการลีนตามขนาดขององค์กร SMEs

SMEs มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจโลก โดยช่วยสร้างการจ้างงานและสนับสนุนการเติบโตของ GDP ในสัดส่วนที่สูงกว่าภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ [4] จากความผันผวนทางเศรษฐกิจและความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ SMEs ต้องเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน [4]

จากการศึกษา พบว่า ภาคการผลิตในสหรัฐอเมริกาและอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มในประเทศบังกลาเทศ แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้ระบบการผลิตแบบลีนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ลดความสูญเปล่า และยกระดับคุณภาพการผลิตขององค์กรได้ [10, 11] อย่างไรก็ตามลักษณะการประยุกต์ใช้ลีนใน SMEs แตกต่างกันไปตามขนาดขององค์กร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดข้อจำกัดและโอกาสในการนำลีนไปใช้ โดยขนาดเล็กมีข้อได้เปรียบสำคัญ คือ โครงสร้างองค์กรที่เรียบง่าย ทำให้การสื่อสารรวดเร็ว สามารถนำแนวคิดลีนขึ้นพื้นฐานไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่พบใน SMEs อุตสาหกรรมเครื่องแต่งกายของประเทศแอฟริกาใต้และโรงงานอุตสาหกรรมขนาด

เล็กในสหรัฐอเมริกา [8, 12, 16] อีกทั้งการปรับปรุงกระบวนการจะเห็นผลเร็ว เพราะผู้ปฏิบัติงานใกล้ชิดกับกระบวนการผลิตโดยตรง แต่มีข้อจำกัดด้านเงินทุน เทคโนโลยี บุคลากร และองค์ความรู้ ทำให้ไม่สามารถนำเครื่องมือลีนเชิงลึกไปสนับสนุนการผลิตได้เต็มรูปแบบ ดังที่รายงานในการศึกษาเกี่ยวกับ SMEs ในประเทศจีน และการศึกษาทบทวนวรรณกรรม SMEs หลายอุตสาหกรรม [9, 13, 14]

ในขณะที่วิสาหกิจขนาดกลางมีศักยภาพด้านบุคลากร โครงสร้างพื้นฐาน และความสามารถในการจัดการสูงกว่า ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ลีนได้ดีกว่า แต่ต้องอาศัยข้อมูลและการวางแผนที่เป็นระบบมากกว่า ดังที่พบในการศึกษาองค์กรภาคการผลิตในสหรัฐอเมริกา [12, 15] อย่างไรก็ตาม ความซับซ้อนของสายการผลิตและจำนวนพนักงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้การรักษาความต่อเนื่องของลีนต้องการการกำกับดูแลและการติดตามผลที่ชัดเจนกว่าของขนาดเล็กลงที่ศึกษาในอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลในประเทศโปรตุเกส [17]

แม้ว่าขนาดองค์กรแตกต่างกัน แต่วิสาหกิจทั้งสองกลุ่มต่างได้รับประโยชน์จากลีนในหลายด้านด้วยเหตุนี้ การนำระบบลีนมาใช้จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญสำหรับ SMEs ไม่เพียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความสูญเสีย และตอบสนองตลาดได้ดีขึ้น [19] แต่ยังช่วยเสริมศักยภาพการแข่งขันในระบบเศรษฐกิจโลกที่มีความผันผวนอย่างต่อเนื่อง เมื่อ SMEs มีบริบท จุดแข็ง และข้อจำกัดแตกต่างกันนี้ รูปแบบการดำเนินลีนของวิสาหกิจขนาดเล็กและขนาดกลางจะแตกต่างกันหรือไม่

2.2 ปัจจัยความสำเร็จของลีนใน SMEs

การนำหลักการลีนมาใช้ใน SMEs ทั้ง 2 ขนาดจะประสบความสำเร็จได้เมื่อมีปัจจัยสำคัญหลายประการที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ การมีส่วนร่วมของบุคลากร การเปลี่ยนแปลงวัฒนธรรมองค์กร การสนับสนุนจากผู้บริหารและการที่ผู้บริหารเป็นผู้นำในการเปลี่ยนแปลง การพัฒนาบุคลากร การวางแผนและการวัดผล และการจัดสรรทรัพยากรที่เพียงพอ ดังที่พบในการศึกษาทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการดำเนินลีนใน SMEs ในประเทศโมร็อกโก การศึกษา SMEs ในยุโรป และการประยุกต์ใช้ลีนในกระบวนการผลิตสายไฟฟ้าประเทศโปรตุเกส [4, 19 – 23]

การนำระบบลีนไปใช้ในองค์กรขนาดเล็กและขนาดกลางไม่เพียงแต่ต้องอาศัยการใช้เครื่องมือลีน [21] แต่ยังต้องการการสนับสนุนจากปัจจัยภายในองค์กร เช่น การมีส่วนร่วมของบุคลากรและการสนับสนุนจากผู้บริหาร เพื่อให้การดำเนินการมีความสำเร็จอย่างยั่งยืน

แม้ว่าปัจจัยความสำเร็จของลีนจะมีลักษณะร่วมกันในวิสาหกิจทั้ง 2 ขนาด แต่รูปแบบการทำงานและระดับความพร้อมที่แตกต่างกันระหว่างขนาดเล็กและขนาดกลางอาจทำให้แนวทางการดำเนินลีนมีความต่างกันเชิงปฏิบัติ

2.3 การเลือกใช้เครื่องมือลีนใน SMEs

ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์กรณีศึกษาในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สามารถสรุปเครื่องมือลีนมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนการดำเนินงาน แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเครื่องมือที่ถูกใช้มากที่สุด คือ 5ส เนื่องจากเข้าใจง่าย ลงทุนต่ำ และสามารถสร้างวินัยในสถานที่ทำงานที่เป็นรากฐานของการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

2.4 ความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต

SMEs ภาคการผลิตมีทรัพยากรจำกัด จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการความสูญเปล่าที่ส่งผลต่อสมรรถนะทางอุตสาหกรรมโดยรวม ความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตแบ่งออกเป็น 8 ประเภท ได้แก่ การผลิตเกินความต้องการ การรอคอย การขนย้าย การทำงานเกินความจำเป็น สินค้าคงคลังส่วนเกิน การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น ของเสียหรือชิ้นงานบกพร่อง และการไม่ใช้ศักยภาพบุคลากร [27, 38]

แม้ความสูญเปล่าทั้ง 8 ประเภทจะพบในทุกอุตสาหกรรม แต่ระดับความสำคัญย่อมแตกต่างกันตามขนาด ลักษณะ วิธีการผลิต และรูปแบบการดำเนินงานของแต่ละองค์กร

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบว่าวิสาหกิจขนาดเล็กและขนาดกลางในบริบทไทยมีรูปแบบความสูญเปล่าที่เหมือนหรือแตกต่างกันเพียงใด

2.5 อุปสรรคในการดำเนินการผลิตแบบลีนใน SMEs

SMEs ภาคการผลิตทั้ง 2 ขนาดต่างเผชิญอุปสรรคหลายประการในการดำเนินการผลิตแบบลีน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากทั้งปัจจัยภายในและภายนอกองค์กร ซึ่งอุปสรรคเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่

(1) อุปสรรคภายนอกองค์กร เช่น ความผันผวนของความต้องการในตลาด [21] และข้อจำกัดด้านอำนาจต่อรองกับซัพพลายเออร์และลูกค้า [40] ซึ่งส่งผลให้ SMEs ควบคุมห่วงโซ่อุปทานได้ยากและขาดความมั่นคงด้านทรัพยากร

ตารางที่ 1 การนำเครื่องมือลีนมาใช้และแนะนำสำหรับวิสาหกิจขนาดเล็กและขนาดกลาง

เครื่องมือลีน	จำนวนการใช้งาน	ประเภทอุตสาหกรรม	ประเทศ	อ้างอิง
Kaizen	8	ยานยนต์, ปศุสัตว์ และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	อินเดีย, มาเลเซีย, สหรัฐอเมริกา, โปแลนด์, โครเอเชีย	[21, 24 – 27, 29, 34, 36]
5ส	17	ปศุสัตว์, ยานยนต์, ชิ้นส่วนยานยนต์, การพิมพ์, กระเบื้องเซรามิก, แปรรูปอาหาร และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	มาเลเซีย, สหรัฐอเมริกา, โปแลนด์, แคนาดา, สหภาพยุโรป, อินเดีย, จีน, ไต้หวัน, โปรตุเกส, อังกฤษ, สเปน, เนเธอร์แลนด์, ฟินแลนด์, ไทย, โครเอเชีย	[12, 14, 18, 21, 24 – 34, 36, 37]
VSM	9	ปศุสัตว์, ยานยนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	สหรัฐอเมริกา, แคนาดา, สหภาพยุโรป, อินเดีย, จีน, ไต้หวัน, โปรตุเกส, โปแลนด์, เนเธอร์แลนด์, ฟินแลนด์, ไทย, ออสเตรเลีย	[14, 21, 26 – 29, 33 – 35]
Kanban	7	ปศุสัตว์, ชิ้นส่วนยานยนต์, การพิมพ์ และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	มาเลเซีย, สหรัฐอเมริกา, โปแลนด์, อังกฤษ, ออสเตรเลีย, โครเอเชีย	[18, 26, 29 – 31, 35, 36]
TPM	9	เครื่องจักรกล, ปศุสัตว์ ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	สหรัฐอเมริกา, โปรตุเกส, มาเลเซีย, อังกฤษ, ออสเตรเลีย, โครเอเชีย	[12, 17, 18, 21, 27, 30, 31, 35, 36]
SMED	7	ปศุสัตว์, ยานยนต์, กาพิมพ์, แปรรูปอาหาร และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	อินเดีย, มาเลเซีย, โปรตุเกส, โปแลนด์, สหรัฐอเมริกา, เนเธอร์แลนด์, ฟินแลนด์, ไทย, ออสเตรเลีย	[21, 27 – 29, 33 – 35]
VM	7	ปศุสัตว์, ยานยนต์, กระเบื้องเซรามิก และอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายอุตสาหกรรม	สหรัฐอเมริกา, แคนาดา, สหภาพยุโรป, อินเดีย, จีน, ไต้หวัน, มาเลเซีย, โปรตุเกส, สเปน	[14, 18, 27, 28, 32, 34, 37]

(2) อุปสรรคภายในองค์กร ครอบคลุมปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความยั่งยืนของระบบสินค้า เช่น ความยากในการปรับเปลี่ยนวัฒนธรรมองค์กรให้สอดคล้องกับสินค้า [20 – 22] การขาดความเข้าใจในหลักการและวิธีการประยุกต์ใช้สินค้า ดังที่พบในการศึกษาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลของประเทศโปรตุเกสและการศึกษาใน SMEs ภาคการผลิตหลายแห่ง [17, 20, 22, 34] การขาดการมีส่วนร่วมของพนักงาน [14, 19, 20, 34, 36] การสนับสนุนจากผู้บริหารที่ไม่เพียงพอและขาดความมุ่งมั่นต่อการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง [4, 7, 14, 36] รวมถึงข้อจำกัดด้านทรัพยากรทางการเงินที่กระทบต่อการลงทุน การฝึกอบรม และการพัฒนากระบวนการ [7, 21] และการเลือกใช้ตัวชี้วัดผลการดำเนินงานที่ไม่สอดคล้องกับเป้าหมายซึ่งพบในการศึกษา SMEs ในยุโรป [19]

อุปสรรคเหล่านี้สะท้อนว่าการนำสินค้ามาใช้ใน SMEs ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือเพียงอย่างเดียว แต่ต้องอาศัยการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง วัฒนธรรม และระบบสนับสนุนที่แตกต่างกันตามขนาดองค์กร ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญสำหรับการศึกษาความแตกต่างของแนวทางสินค้าใน SMEs แต่ละขนาดในงานวิจัยนี้

2.6 ช่องว่างทางวิชาการ

แนวคิดการผลิตแบบสินค้าได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่า เป็นกลยุทธ์สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ในองค์กรขนาดใหญ่ทั่วโลก อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาการดำเนินงานอย่างเป็นระบบใน SMEs ภาคการผลิตยังมีจำนวนจำกัด แม้ SMEs จะมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจอุตสาหกรรมของประเทศ [5, 14] SMEs ยังมีลักษณะเฉพาะ เช่น ทรัพยากรจำกัด โครงสร้างบริหารที่ยืดหยุ่น และข้อจำกัดด้านองค์ความรู้ทางเทคนิค [5, 24] ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อระดับความพร้อมและแนวทางการดำเนินงานที่อาจแตกต่างกันตามขนาดขององค์กร

งานวิจัยที่ผ่านมาชี้ว่า ขนาดขององค์กรเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของระบบสินค้า [7, 19] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการพัฒนาแนวคิด การประยุกต์ใช้ หรือการประเมินผล [41] ยังไม่มีงานวิจัยเชิงเปรียบเทียบที่วิเคราะห์ว่าองค์กรขนาดเล็กและขนาดกลางมีแนวทางการดำเนินงานที่เหมือนหรือแตกต่างกันเพียงใด ทั้งในด้านปัจจัยสนับสนุน ระดับความพร้อม วิธีการใช้เครื่องมือ และข้อจำกัดในการดำเนินงาน การขาดองค์ความรู้ในประเด็นนี้ส่งผลจำกัดความสามารถในการกำหนดแนวทางสนับสนุนสินค้าให้เหมาะสมกับลักษณะของธุรกิจแต่ละขนาด

งานวิจัยนี้จึงใช้แบบตรวจสอบที่ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาและความเชื่อมั่นแล้ว เป็นเครื่องมือในการสำรวจและประเมินแนวทางการดำเนินงานของ SMEs ภาคการผลิตในประเทศไทย โดยมุ่งเปรียบเทียบรูปแบบการดำเนินงานของวิสาหกิจขนาดเล็กและขนาดกลางตามขั้นตอนต่าง ๆ ของสินค้า ข้อมูลที่ได้ช่วยสะท้อนความเหมือนหรือความแตกต่างของการดำเนินงานตามขนาดองค์กร ซึ่งสามารถนำไปใช้วางแผน ปรับใช้ หรือออกแบบ

แนวทางสนับสนุนสินค้าให้สอดคล้องกับศักยภาพของ SMEs แต่ละกลุ่มอย่างเหมาะสม

นอกจากนี้การใช้แบบตรวจสอบยังช่วยให้การเก็บข้อมูลภาคสนามมีความเป็นระบบ ลดข้อผิดพลาด และเพิ่มความชัดเจนในการประเมินแนวทางการดำเนินงาน [42 – 44] ผลการศึกษานี้จึงมีส่วนช่วยและเป็นแนวทางต่อยอดไปสู่การประยุกต์ใช้สินค้าใน SMEs อย่างยั่งยืนในระยะยาว

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเปรียบเทียบ รูปแบบและแนวทางการดำเนินการผลิตแบบสินค้าในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กภาคการผลิตในไทย โดยแบ่งกระบวนการวิจัยแบ่งเป็น 4 ระยะ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

3.1 แนวทางการพัฒนาแบบตรวจสอบ

การวิจัยนี้มุ่งเปรียบเทียบแนวทางการดำเนินการผลิตแบบสินค้าของ SME โดยสร้างแบบตรวจสอบและใช้เป็นเครื่องมือหลักในการรวบรวมข้อมูล ซึ่งองค์ประกอบที่ใช้วิเคราะห์ในแต่ละส่วนได้รับการออกแบบให้สะท้อน 5 กิจกรรมพื้นฐานของสินค้า ได้แก่ การกำหนดคุณค่า การสร้างสายธารคุณค่า การสร้างการไหลของกระบวนการ ระบบดึง และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งคำนึงถึงลักษณะการดำเนินงานและข้อจำกัดที่ SMEs ส่วนใหญ่พบ นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และผลการศึกษาก่อนหน้าในอุตสาหกรรมที่ประยุกต์ใช้สินค้า เพื่อสะท้อนสภาพการปฏิบัติงานในสถานประกอบการได้อย่างครอบคลุม จึงแบ่งแบบตรวจสอบเป็น 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1: องค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการสินค้า

ส่วนที่ 2: การใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิตและความสูญเสียที่เกิดขึ้น

ส่วนที่ 3: แนวทางการใช้เครื่องมือสินค้า

ส่วนที่ 4: การวัดและประเมินผลการปรับปรุง

ส่วนที่ 5: การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

ข้อมูลที่ได้จากแบบตรวจสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์เชิงพรรณนาต่อไป เพื่อสำรวจข้อสังเกตเบื้องต้นเกี่ยวกับการดำเนินสินของ SMEs แต่ละขนาด

3.2 การประเมินคุณภาพของแบบตรวจสอบ

ขั้นตอนระยะที่ 2 ของการวิจัยมุ่งประเมินคุณภาพของแบบตรวจสอบที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้มั่นใจว่ามีความตรงตามเนื้อหา และมีความเชื่อมั่น ก่อนนำไปใช้เก็บข้อมูลจริง ดังนี้

3.2.1 การประเมินความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity Assessment)

ผู้วิจัยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item-Objective Congruence: IOC) เพื่อประเมินว่ารายการคำถามในแต่ละส่วนสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การประเมินหรือไม่ โดยผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านที่มีประสบการณ์ในการดำเนินสินมาร่วมประเมิน ใช้เกณฑ์ค่า IOC ตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไปเป็นรายการที่ยอมรับได้ ส่วนรายการที่ต่ำกว่าเกณฑ์จะได้รับการปรับปรุงหรือตัดออก [45]

3.2.2 การประเมินความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมิน (Inter-rater Reliability Assessment)

โดยผู้เชี่ยวชาญ 2 ท่านที่มีประสบการณ์ด้านสินให้ประเมินแบบตรวจสอบอย่างอิสระ เพื่อวิเคราะห์ระดับความสอดคล้องของผลการให้คะแนน โดยใช้ 2 วิธีร่วมกัน เพื่อช่วยเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบตรวจสอบที่พัฒนาขึ้น ได้แก่ 1) ร้อยละของความเห็นสอดคล้อง (Percent Agreement) มีเกณฑ์ขั้นต่ำที่ร้อยละ 80 [46] และ 2) ดัชนี Gwet's AC1 ซึ่งช่วยลดอิทธิพลของความสอดคล้องโดยบังเอิญ และเหมาะกับข้อมูลเชิงกลุ่ม (Nominal Data) [47]

3.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็ก

ในขั้นตอนระยะที่ 3 ของการวิจัย ได้นำแบบตรวจสอบที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพตามหัวข้อ 3.2 ไปใช้ในการศึกษาการดำเนินระบบการผลิตแบบสินใน SMEs ภาคการผลิตของประเทศ ไทย โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจาก 9 สถานประกอบการที่มีการประยุกต์ใช้สิน ประกอบด้วย วิสาหกิจขนาดเล็ 4 แห่ง และวิสาหกิจขนาดกลาง 5 แห่ง กลุ่มตัวอย่างครอบคลุมอุตสาหกรรมการผลิตหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ การซ่อมบำรุงเครื่องจักร อุตสาหกรรมการผลิตอะไหล่ และชิ้นส่วนรางรถไฟ ไฟฟ้า การผลิตแม่พิมพ์โลหะ การผลิต Pot Bearing การผลิตสกรูและสลักเกลียว การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก และการผลิตเครื่องมือวัด ซึ่งสถานประกอบการส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย

แม้ว่ากลุ่มตัวอย่างจะมีลักษณะอุตสาหกรรมและระดับความซับซ้อนของกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน แต่งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการดำเนินระบบสินในระดับแนวคิดพื้นฐานขององค์กร เช่น การจัดการความสูญเปล่า การดำเนินกิจกรรม 5ส การวัดผลหลังการปรับปรุง และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ใน SMEs ภาคการผลิตหลาย

ประเภท ดังนั้น แบบตรวจสอบจึงถูกออกแบบให้ประเมินแนวทางการดำเนินสินในภาพรวมมากกว่าการประเมินเทคนิคเฉพาะของแต่ละอุตสาหกรรม

อีกทั้ง แม้ว่าจำนวนตัวอย่างจะอยู่ในระดับจำกัด แต่สำหรับการศึกษาเชิงนำร่อง (Pilot Study) กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก (5 – 20 ตัวอย่าง) สามารถใช้ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากช่วยให้ตรวจพบปัญหาได้รวดเร็ว และช่วยกำหนดแนวทางปรับปรุงให้ชัดเจนยิ่งขึ้น [48, 49] ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการศึกษานำร่องด้วยกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าและนำไปสู่การพัฒนางานวิจัยที่กว้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [50, 51]

ข้อมูลจากแบบตรวจสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการดำเนินการสินระหว่างวิสาหกิจขนาดเล็และขนาดกลางในแต่ละด้าน วิธีการดังกล่าวช่วยให้สามารถอธิบายลักษณะการดำเนินงาน พฤติกรรม และข้อสังเกตเบื้องต้นของ SMEs ทั้งสองขนาดได้อย่างเหมาะสมกับบริบทของการศึกษานำร่องและจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มีจำกัด

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการพัฒนาแบบตรวจสอบ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบตรวจสอบเพื่อใช้เป็นเครื่องมือหลักในการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางและลักษณะของการดำเนินสินในกระบวนการผลิต โดยผลลัพธ์จากระยะที่ 2 ของกระบวนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 1 ทำให้ได้แบบตรวจสอบที่ครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญของการดำเนินสินทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1: องค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการสิน ประกอบด้วยรายการตรวจสอบ 12 ข้อ เน้นการประเมินองค์ประกอบด้านการจัดการที่สนับสนุนการดำเนินสิน เช่น ความพร้อมของบุคลากร การสนับสนุนจากผู้บริหาร กระบวนการวางแผน และลักษณะของวัฒนธรรมองค์กร ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการประยุกต์ใช้สินใน SMEs เพื่อพิจารณาว่าการดำเนินงานดังกล่าวมีความแตกต่างกันตามขนาดขององค์กรหรือไม่ โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

ส่วนที่ 2: การใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิตและความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น โดยจะเปรียบเทียบรูปแบบการใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการ ตลอดจนวิเคราะห์ประเภทของความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของ SMEs แต่ละขนาด แบ่งเป็น 2 ด้าน ได้แก่

1) การใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิต เช่น Activity chart ชนิดต่าง ๆ , Time Study, Spaghetti Diagram และ Value Stream Mapping

2) ความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ครอบคลุมความสูญเปล่าทั้ง 8 ประเภทของสิน เช่น จุดคอขวด กิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่า เวลาในการรอ งานระหว่างกระบวนการ การเคลื่อนย้ายที่

ไม่จำเป็น คุณภาพชิ้นงาน งานซ่อม และปริมาณของเสีย รวมถึงการวิเคราะห์ขั้นตอนย่อยในกระบวนการผลิต

ตารางที่ 2 แบบตรวจสอบองค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการสินค้า

รายการตรวจสอบ	มี	ไม่มี
1. สร้างความเข้าใจพื้นฐานด้านสินค้าให้พนักงานอย่างทั่วถึง		
2. ส่งเสริมการมีส่วนร่วมของพนักงานในกิจกรรมสินค้า		
3. ผู้บริหารระดับสูงสนับสนุนและมีส่วนร่วมในการดำเนินการสินค้า		
4. ชี้แจงที่มา แนวคิด วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของสินค้าก่อนดำเนินการ		
5. ทราบลำดับขั้นตอนและการไหลของกระบวนการอย่างละเอียด		
6. ทราบความต้องการวัตถุดิบของกระบวนการ		
7. ทราบความต้องการในการผลิต		
8. เก็บข้อมูลเวลาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ		
9. พิจารณาลักษณะของผลิตภัณฑ์		
10. มีตัวชี้วัดผลหลังดำเนินการระบบสินค้า		
11. องค์กรเปิดรับการเปลี่ยนแปลงแนวคิดและวิธีการทำงานแบบสินค้า		
12. มอบหมายผู้รับผิดชอบหลักในการขับเคลื่อนกิจกรรมสินค้า		

ส่วนที่ 3: แนวทางการใช้เครื่องมือสินค้า ในส่วนนี้พิจารณาการดำเนินการกิจกรรม 5ส ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ได้รับการแนะนำอย่างแพร่หลายสำหรับ SMEs ภาคการผลิต

ประกอบด้วยรายการตรวจสอบ 16 ข้อ เพื่อประเมินระดับการดำเนินงานด้านความเป็นระเบียบ ความสะอาด มาตรฐานการทำงาน และวินัยองค์กร โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แบบตรวจสอบแนวทางการใช้ 5ส

รายการตรวจสอบ	มี	ไม่มี
1. อบรมพนักงานให้มีความรู้และทักษะด้าน 5ส		
2. ส่งเสริมและสร้างแรงจูงใจให้พนักงานทุกคนมีส่วนร่วมในกิจกรรม 5ส		
3. ผู้บริหารสนับสนุนและให้ความสำคัญกับการดำเนินการ 5ส		
4. คัดแยกและนำสิ่งของที่ไม่จำเป็นออกจากพื้นที่ทำงาน		
5. กำหนดพื้นที่จัดวางสิ่งของแต่ละประเภทอย่างชัดเจน		
6. ระบุรายการ ปริมาณ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา		
7. จัดวางสิ่งของอย่างเป็นระเบียบและเข้าถึงง่าย		
8. แบ่งพื้นที่ทำงานและทางเดินอย่างเป็นสัดส่วน		
9. จัดทำคู่มือหรือเอกสารมาตรฐานการทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์		
10. ทำความสะอาดพื้นที่ทำงาน เครื่องมือ และอุปกรณ์ให้สะอาดเสมอ		
11. ทำความสะอาดบริเวณที่เข้าถึงยาก		
12. กำหนดความถี่ในการตรวจสอบ ทำความสะอาด และคัดแยกสิ่งของ		
13. กำหนดมาตรฐานและขั้นตอนดำเนินการ 5ส		
14. ประเมินผลกิจกรรม 5ส และประชุมทบทวนร่วมกัน		
15. กำหนดเกณฑ์และตัวชี้วัดผลของกิจกรรม 5ส อย่างชัดเจน		
16. วัดผลและปรับปรุงกิจกรรม 5ส อย่างสม่ำเสมอให้สอดคล้องสถานการณ์จริง		

ส่วนที่ 4: การวัดและประเมินผลการปรับปรุงระบบสินค้า เพื่อเปรียบเทียบว่า SMEs ภาคการผลิตขนาดเล็กและขนาดกลางของไทยมีการดำเนินการวัดผลหลังปรับปรุงแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งสะท้อนถึงระดับการติดตามผลลัพธ์ของการประยุกต์ใช้สินค้าในแต่ละกลุ่มองค์กร เนื่องจากความสามารถในการจัดทำระบบประเมินผลอาจขึ้นอยู่กับขนาดองค์กร ทรัพยากร และโครงสร้างการบริหาร

ส่วนที่ 5: การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนนี้จะพิจารณาว่าองค์กรแต่ละขนาดให้ความสำคัญหรือมีการดำเนินการเกี่ยวกับการปรับปรุงต่อเนื่องมากน้อยแตกต่างกันหรือไม่

ซึ่งสะท้อนความสามารถขององค์กรในการรักษาผลการปรับปรุงสินค้าในระยะยาว

ผลการประเมินคุณภาพของแบบตรวจสอบมีดังนี้

1) ความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity Assessment) ดำเนินการด้วยดัชนีความสอดคล้องระหว่างรายการคำถามและวัตถุประสงค์ (Index of Item-Objective Congruence: IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญด้านสินค้าจำนวน 5 ท่าน รายการที่มีค่า IOC ต่ำกว่า 0.50 ได้รับการปรับปรุงก่อนใช้งานจริง ผลการประเมินสรุปในตารางที่ 4 พบว่าทุกรายการมีค่า IOC ตั้งแต่ 0.60 – 1.00

ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ แสดงถึงความเหมาะสมและความสอดคล้องของแบบตรวจสอบกับวัตถุประสงค์ของการประเมิน

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความตรงเชิงเนื้อหาของแบบตรวจสอบ

ส่วนของแบบตรวจสอบ	ค่า IOC
ส่วนที่ 1 องค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการ	0.60 – 1.00
ส่วนที่ 2 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์และความสูญเสีย	0.80
ส่วนที่ 3 แนวทางการใช้เครื่องมือ 5ส	0.80 – 1.00
ส่วนที่ 4 การวัดและประเมินผลการปรับปรุง	1.00
ส่วนที่ 5 การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง	1.00

2) ความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมิน (Inter-Rater Reliability Assessment) เป็นการตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบตรวจสอบประเมินจากผลของผลการให้คะแนนโดยผู้เชี่ยวชาญ 2 ท่าน โดยใช้ 2 วิธี ได้แก่ ร้อยละของความเห็นสอดคล้อง (Percent Agreement) และดัชนี Gwet's AC1 ผลการประเมินดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประเมินความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมินของแบบตรวจสอบ

วิธีการประเมิน	ผลการประเมิน	การแปลผล
Percent Agreement	100 %	สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้
Gwet's AC1	1.00	ความสอดคล้องระดับดีมาก [52]

ผลการประเมินดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบตรวจสอบที่พัฒนามีความครบถ้วน ถูกต้องตามเนื้อหา และมีความเชื่อถือได้สูงเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประเมินการดำเนินระบบใน SMEs ทั้ง 5 ส่วน

4.2 ผลการเปรียบเทียบแนวทางการดำเนินระบบระหว่าง SMEs

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยร้อยละของการดำเนินระบบใน SMEs ขนาดเล็กและขนาดกลาง

หัวข้อการประเมิน	ค่าเฉลี่ยร้อยละของ SMEs ขนาดเล็ก	ค่าเฉลี่ยร้อยละของ SMEs ขนาดกลาง	ผลการประเมิน
ส่วนที่ 1 องค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการ	87.50	83.33	มีระดับการดำเนินงานใกล้เคียงกัน
ส่วนที่ 2 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์และความสูญเสีย			
2.1 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิต	15	32	SMEs ขนาดกลางมีแนวโน้มใช้เครื่องมือวิเคราะห์มากกว่าขนาดเล็ก
2.2 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	59.38	70	SMEs ขนาดกลางพบความสูญเสียมากกว่า SMEs ขนาดเล็ก
ส่วนที่ 3 แนวทางการใช้เครื่องมือ 5ส	92.19	83.75	SMEs ขนาดเล็กมีการดำเนินกิจกรรม 5ส ในระดับสูงกว่าขนาดกลาง
ส่วนที่ 4 การวัดและประเมินผลการปรับปรุง	50	60	ทั้งสองกลุ่มมีข้อจำกัดด้านการวัดผล
ส่วนที่ 5 การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง	100	100	ทั้งสองขนาดให้ความสำคัญต่อการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเท่ากัน

เพื่อศึกษาว่าแนวทางการดำเนินระบบใน SMEs ภาคการผลิตในประเทศไทยมีความแตกต่างกันหรือไม่ งานวิจัยได้ใช้แบบตรวจสอบที่พัฒนาขึ้นเพื่อประเมินระดับการดำเนินงานใน 5 ส่วนสำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบด้านการจัดการ การใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิต ความสูญเสียที่พบ การดำเนินกิจกรรม 5ส การวัดผลหลังปรับปรุง และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงนำค่าร้อยละของแต่ละส่วนมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสถิติเชิงพรรณนา เพื่อพิจารณาแนวโน้มการดำเนินระบบใน SMEs ทั้งสองขนาด ผลการวิเคราะห์สรุปในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า SMEs ภาคการผลิตขนาดเล็กและขนาดกลางในไทยมีแนวทางการดำเนินระบบใกล้เคียงกันหลายด้าน โดยเฉพาะด้านองค์ประกอบด้านการจัดการและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม SMEs ขนาดกลางมีแนวโน้มใช้เครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการผลิตและให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์ความสูญเสียมากกว่า ขณะที่ SMEs ขนาดเล็กมีระดับการดำเนินกิจกรรม 5ส สูงกว่าเล็กน้อย

5. สรุปผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า SMEs ภาคการผลิตขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยจำนวน 9 แห่ง สะท้อนว่า SMEs ทั้งสองขนาดมีแนวโน้มการดำเนินระบบใกล้เคียงกันหลายด้าน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเชิงลึกในแต่ละด้าน พบข้อสังเกตเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะการดำเนินงานที่แตกต่างกันตามบริบทขององค์กร ดังนี้

1) องค์ประกอบด้านการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการ พบว่ากลุ่มขนาดเล็กมีความคล่องตัวสูง สามารถเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องและปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานได้ดีกว่า แต่ขนาดกลางมีความเป็นระบบมากกว่าและมีข้อมูลพื้นฐานพร้อมต่อการปรับปรุง ซึ่งเอื้อต่อการพัฒนาระบบการในระยาวอย่างไรก็ตามทั้ง 2 ขนาดยังมีจุดอ่อนที่ควรพัฒนา ได้แก่ การสร้างความเข้าใจเรื่องสินค้าให้แก่พนักงาน การสนับสนุนจากผู้บริหาร และการขาดการประเมินหลังการปรับปรุง

2) การใช้เครื่องมือวิเคราะห์และความสูญเสียเปล่า พบว่าขนาดกลางใช้เครื่องมือที่หลากหลายมากกว่า โดยเฉพาะการใช้ Time Study ขณะที่ขนาดเล็กพึ่งพาประสบการณ์ของพนักงานในการวิเคราะห์ปัญหา ดังนั้น กลุ่มขนาดเล็กควรเริ่มใช้เครื่องมือพื้นฐาน เช่น Time Study หรือ Spaghetti Diagram ขณะที่กลุ่มขนาดกลางควรพัฒนาสู่เครื่องมือขั้นสูง เช่น Value Stream Mapping เพื่อระบุความสูญเสียได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น สำหรับรูปแบบความสูญเสียที่พบ ทั้งสองขนาดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ SMEs ขนาดกลางส่วนใหญ่พบปัญหาที่หลากหลายกว่า อาจเนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการผลิตหรือความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลที่เหนือกว่า

3) กลุ่มขนาดเล็กมีการดำเนินกิจกรรม 5ส อย่างละเอียดและทั่วถึง เนื่องจากขนาดองค์กรไม่ซับซ้อน ทำให้การจัดเก็บ การแยกประเภท และการทำความสะอาดทำได้ง่ายกว่า ส่วนขนาดกลางควรเน้นการกำหนดมาตรฐานการปฏิบัติ 5ส ให้ชัดเจนขึ้นเพื่อสร้างความสม่ำเสมอ ในขณะที่ขนาดเล็กควรเพิ่มการติดตามการทำ 5ส เพื่อรักษาผลลัพธ์ให้ยั่งยืน

4) การประเมินผลการปรับปรุง พบว่า ทั้ง 2 ขนาดยังให้ความสำคัญต่อการกำหนดตัวชี้วัดและการวัดผลหลังการปรับปรุงค่อนข้างน้อย ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถประเมินประสิทธิผลของการปรับปรุงได้อย่างชัดเจน ดังนั้น SMEs ควรเริ่มจากการกำหนดตัวชี้วัดที่ง่ายในการปฏิบัติ เช่น เวลารอบการผลิต อัตราของเสียหรือประสิทธิภาพของกระบวนการ แล้วพัฒนาสู่ระบบติดตามผลที่มากขึ้นในลำดับถัดไป

5) การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง พบว่า SMEs ทั้ง 2 ขนาดต่างให้ความสำคัญต่อการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องและคำนึงถึงทรัพยากรของตนเองเป็นหลัก แต่การไม่ติดตามผลการปรับปรุงหรือไม่มีตัวชี้วัด อาจทำให้เกิดซ้ำหรือไม่สามารถพัฒนาแนวทางปรับปรุงได้อย่างต่อเนื่องตามศักยภาพที่ควรจะเป็น

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษานำร่องการดำเนินการคืนของ SMEs ภาคการผลิตของประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการพัฒนาแนวทางการส่งเสริมสินค้าที่เหมาะสมและนำเสนอข้อสังเกตเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะการดำเนินสินค้ากับ SMEs ทั้งสองขนาด ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่า ปัจจัยด้านโครงสร้างองค์กร ทรัพยากร และรูปแบบการบริหาร มีผลต่อวิธีการดำเนินสินค้าของ SMEs ในลักษณะที่แตกต่างกัน แม้ยังไม่สามารถสรุปเชิงยืนยันในระดับประชากรได้ งานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาไปสู่เครื่องมืออื่น ๆ นอกจากกิจกรรม 5ส เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของการประยุกต์ใช้สินค้าใน SMEs ได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น รวมถึงทำการพัฒนาและขยายแบบตรวจสอบให้มีศักยภาพมากขึ้นในการประเมินระดับความพร้อมและรูปแบบการดำเนินสินค้าของ SMEs ได้อย่างรอบด้าน สำหรับงานวิจัยต่อยอดหากทำการศึกษาความแตกต่างของ SMEs ตามลักษณะกระบวนการผลิตหรือระดับความซับซ้อนของงานซึ่งอาจประสบความสำเร็จและปัญหาที่ไม่เหมือนกัน จะทำให้มีความชัดเจนมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Womack JP, Jones DT, Roos D. The machine that changed the world: The story of lean production-Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry. New York: Simon and Schuster; 2007.
- [2] Jasti NVK, Kodali R. Lean production: literature review and trends. *Int J Prod Res.* 2015;53(3):867-85.
- [3] Swamidass PM. The effect of TPS on US manufacturing during 1981–1998: inventory increased or decreased as a function of plant performance. *Int J Prod Res.* 2007;45(16):3763-78.
- [4] Elkhairi A, Fedouaki F, El Alami S. Barriers and critical success factors for implementing lean manufacturing in SMEs. *Ifac-Papersonline.* 2019;52(13):565-70.
- [5] Belhadi A, Sha'ri YBM, Touriki FE, El Fezazi S. Lean production in SMEs: literature review and reflection on future challenges. *J Ind Prod Eng.* 2018;35(6):368-82.
- [6] Haksever C. Total quality management in the small business environment. *Bus Horiz.* 1996;39(2):33-41.
- [7] Achanga P, Shehab E, Roy R, et al. Critical success factors for lean implementation within SMEs. *J Manuf Technol Manag.* 2006;17(4):460-71.
- [8] Govender P, Mavutha W, Mabotja T. A comparative analysis of lean manufacturing usage in small and medium apparel enterprises in KwaZulu-Natal, South Africa. *Int J Res Bus Soc Sci.* 2025;14(3).

- [9] Anuar A, Saad S, Ghazali MF, Sadek DM, Zawawi AA, Khan HHA, Yusof NHM. Empowering small medium enterprises for Industry 4.0: the impact of Lean 4.0 on operational excellence through digital agility. In: 3rd International Conference on Business, Finance, Management and Economic (BizFAME 2024); 2025 Aug. p. 386–398. Atlantis Press.
- [10] Lathin D, Mitchell R. Lean manufacturing: techniques, people and culture. In: ASQ World Conference on Quality and Improvement Proceedings; 2001; Place not specified. Milwaukee: American Society for Quality. p. 321.
- [11] Ferdousi F, Ahmed A. An investigation of manufacturing performance improvement through lean production: A study on Bangladeshi garment firms. *Int J Bus Manag.* 2009;4(9):106-16.
- [12] Lee CY. The applicability of just-in-time manufacturing to small manufacturing firms: an analysis. *Int J Manag.* 1996;13:249-58.
- [13] Lee CY. TQM in small manufacturers: an exploratory study in China. *Int J Qual Reliab Manag.* 2004 ;21(2):175-97.
- [14] Hu Q, Mason R, Williams SJ, et al. Lean implementation within SMEs: a literature review. *J Manuf Technol Manag.* 2015;26(7):980-1012.
- [15] Shah R, Ward PT. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. *J Oper Manag.* 2003;21(2):129-49.
- [16] Dowlathshahi S, Taham F. The development of a conceptual framework for Just-In-Time implementation in SMEs. *Prod Plan Control.* 2009;20(7):611-21.
- [17] Oliveira J, Sá JC, Fernandes A. Continuous improvement through "Lean Tools": An application in a mechanical company. *Procedia Manuf.* 2017;13:1082-9.
- [18] Rose AMN, Md Deros B, Ab Rahman MN, et al. Lean manufacturing best practices in SMEs. [Report]. 2011.
- [19] Bakås O, Govaert T, Van Landeghem H. Challenges and success factors for implementation of lean manufacturing in European SMES. In: 13th International conference on the modern information technology in the innovation processes of the industrial enterprise (MITIP 2011); 2011; Place not specified. Trondheim: Tapir Academic Press.
- [20] Čiarnienė R, Vienažindienė M. Lean manufacturing: theory and practice. *Econ Manag.* 2012;17 (2):726-32.
- [21] Gupta S, Jain SK. A literature review of lean manufacturing. *Int J Manag Sci Eng Manag.* 2013;8(4):241-9.
- [22] Soliman M. Lean transformation guidance: Why organizations fail to achieve and sustain excellence through lean improvement. *Int J Lean Think.* 2013;4(1).
- [23] Pena R, Ferreira LP, Silva FJG, et al. Lean manufacturing applied to a wiring production process. *Procedia Manuf.* 2020;51:1387-94.
- [24] Wong YC, Wong KY, Ali A. Key practice areas of lean manufacturing. In: 2009 International Association of Computer Science and Information Technology-Spring Conference; 2009; Place not specified. New York: IEEE. p. 267-71.
- [25] Nordin N, Md Deros B, Abd Wahab D. A survey on lean manufacturing implementation in Malaysian automotive industry. *Int J Innov Manag Technol.* 2010;1(4):374-80.
- [26] Worley JM. The role of sociocultural factors in a lean manufacturing implementation. 2004.

- [27] Kiran E, Ozkan-Ozen YD, Ozturkoglu Y. A solution approach proposal with a lean perspective for the poultry sector with WRM and BWM integration. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2023;41(5):1290-1307.
- [28] Dias P, Silva F, Campilho R, Ferreira L, Santos T. Analysis and improvement of an assembly line in the automotive industry. *Procedia Manufacturing*. 2019;38:1444-1452.
- [29] Rewers P, Trojanowska J, Chabowski P. Tools and methods of Lean Manufacturing – a literature review. In: *Proceedings of the 7th International Technical Conference Technological Forum*; 2016. p. 28–30.
- [30] Gunasekaran A, Forker L, Kobu B. Improving operations performance in a small company: a case study. *International Journal of Operations & Production Management*. 2000;20(3):316-336.
- [31] Rothenberg S, Cost F. Lean manufacturing in small- and medium-sized printers. 2004.
- [32] Bonavia T, Marin JA. An empirical study of lean production in the ceramic tile industry in Spain. *International Journal of Operations & Production Management*. 2006;26(5):505-531.
- [33] Belhadi A, Sha’ri YBM, Touriki FE, El Fezazi S. Lean production in SMEs: literature review and reflection on future challenges. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2018;35(6):368-382.
- [34] Zhou B. Lean principles, practices, and impacts: a study on small and medium-sized enterprises (SMEs). *Annals of Operations Research*. 2016;241:457-474.
- [35] Caldera H, Desha C, Dawes L. Evaluating the enablers and barriers for successful implementation of sustainable business practice in ‘lean’ SMEs. *Journal of Cleaner Production*. 2019;218:575-590.
- [36] Leksic I, Stefanic N, Veza I. The impact of using different lean manufacturing tools on waste reduction. *Adv Prod Eng Manag*. 2020;15(1).
- [37] Rose A, Deros BM, Rahman MA. Development of framework for lean manufacturing implementation in SMEs. In: *The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*; 2010. p. 7–10.
- [38] Arunagiri P, Gnanavelbabu A. Identification of major lean production waste in automobile industries using weighted average method. *Procedia Eng*. 2014;97:2167-75.
- [39] El-Namrouty KA, Abushaaban MS. Seven Wastes Elimination Targeted by Lean Manufacturing Case Study “Gaza Strip Manufacturing Firms”. *Int J Econ Finan Manag Sci*. 2013;1(2):68-80.
- [40] Gupta R, Garg D, Gupta H. Difficulties of implementing JIT in SMEs. *Int J Appl Eng Res*. 2011;6(18):3246-50.
- [41] Mostafa S, Dumrak J, Soltan H. A framework for lean manufacturing implementation. *Production & Manufacturing Research*. 2013;1(1):44-64.
- [42] Hales B, Terblanche M, Fowler R, Sibbald W. Development of medical checklists for improved quality of patient care. *International Journal for Quality in Health Care*. 2008;20(1):22-30.
- [43] Martz W. Validating an evaluation checklist using a mixed method design. *Evaluation and Program Planning*. 2010;33(3):215-222.
- [44] Scriven M. The logic and methodology of checklists. 2000.
- [45] Sornlump T. Developing an attribute checklist of synchronous active e-learning technology: consistency between system and real world [master’s thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2023. Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD).

- [46] Supin Simimand SB. Measuring translation and psychometric testing of the Perineal Assessment Tool (PAT) and Incontinence-Associated Dermatitis Intervention Tool (IADIT) among patients in semi-intensive care units: a pilot study. Science, Technology, and Social Sciences Procedia. 2023. Available from: <https://wjst.wu.ac.th/index.php/stssp/article/view/25796>
- [47] Sukamolson S. Various methods to find content validity of a quantitative research tool and how to choose the appropriate ones. Chiang Mai: Language Center, International College Maejo University; 2024. doi: 10.58837/CHULA.PPJ.39.5.
- [48] Bujang MA, Omar ED, Foo DHP, Hon YK. Sample size determination for conducting a pilot study to assess reliability of a questionnaire. Restor Dent Endod. 2024;49(1).
- [49] Sukserm P. Determining the appropriate sample size in EFL pilot studies. Journal of Research Methodology. 2024;37(3):245-264.
- [50] Hertzog MA. Considerations in determining sample size for pilot studies. Res Nurs Health. 2008;31(2):180-191.
- [51] Julious SA. Sample size of 12 per group rule of thumb for a pilot study. Pharm Stat. 2005;4(4):287-291.
- [52] Snijkers JT, et al. Examining the optimal cutoff values of HADS, PHQ-9 and GAD-7 as screening instruments for depression and anxiety in irritable bowel syndrome. Neurogastroenterol Motil. 2021;33(12):e14161.

การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตเครื่องตีก๊อปด้วยหลัก ECRS และ การลดกำลังคน

Improving Copying-Machine Production Line Efficiency Using ECRS Principles and Workforce Reduction

คณิศร ภูนิคม¹, กิตติพงษ์ เพียรพิทักษ์^{2*}, อารี บุตรสอน³, อรุณ บุญสร้าง⁴, ฉัตรชัย พรหมนา⁵ และ อรจิรา ไชยระ⁶
Kanitsorn Poonikom¹, Kittipong Pearmpitak^{2*}, Aree Butsom³, Arun Boonsang⁴, Chatchai Phromana⁵
and Onjira Chaiyara⁶

^{1,6}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

^{2*}สาขาวิชารัฐประศาสนศาสตร์ คณะรัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

^{3,4}กลุ่มวิชาสาธารณสุขศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

⁵สำนักคอมพิวเตอร์และเครือข่าย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

^{1,6}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand

^{2*}Department of Public Administration, Faculty of Political Science, Ubon Ratchathani University, Thailand

^{3,4}Division of Public Health, College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University, Thailand

⁵Office of Computer and Networking Ubon Ratchathani University

*Corresponding Author: Email: kittipong.p@ubu.ac.th

Received: 21-03-2026 Revised: 11-06-2026 Accepted: 12-06-2026

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานในสายการผลิตเครื่องตีก๊อปของบริษัท พี.เจ.ชลบุรี พาราวูด จำกัด โดยใช้แนวคิดการปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลัก ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) ควบคู่กับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเครื่องมือ 5W1H และการจับเวลาเชิงกระบวนการ เพื่อปรับลำดับการทำงานของแรงงานให้เหมาะสมกับการใช้เครื่องจักร การออกแบบการทดลองใช้วิธีเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง ภายใต้สภาวะการผลิตจริง โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือน พฤษภาคม–กันยายน พ.ศ. 2568 และดำเนินการเก็บข้อมูลซ้ำ 5 รอบในแต่ละสภาวะการผลิต จากนั้นจึงปรับลดจำนวนพนักงานจาก 5 คน เหลือ 3 คน พร้อมปรับผังการทำงานและลำดับการปฏิบัติงานให้ต่อเนื่องยิ่งขึ้น ผลการทดลองพบว่า ค่าแรงรวมต่อชั่วโมงลดลงจาก 250 บาท เหลือ 150 บาท (ลดลงร้อยละ 40) และค่าแรงต่อชิ้นลดลงจาก 0.1515 บาท เหลือ 0.1047 บาท (ลดลงร้อยละ 30.89) ขณะที่ผลผลิตเฉลี่ยต่อชั่วโมงลดลงจาก 1,650.07 ชิ้น เหลือ 1,432.39 ชิ้น (ลดลงร้อยละ 13.19) ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์เป้าหมายของโรงงานที่ 1,300-1,350 ชิ้นต่อชั่วโมง การปรับปรุงดังกล่าวช่วยลดเวลารอคอยและการเคลื่อนไหวซ้ำซ้อนของพนักงาน ส่งผลให้การใช้แรงงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นและต้นทุนแรงงานต่อหน่วยลดลง โดยยังคงรักษาระดับผลผลิตให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สะท้อนให้เห็นว่าการจัดสรรทรัพยากรบุคคลและการออกแบบกระบวนการทำงานอย่างเหมาะสมสามารถยกระดับประสิทธิภาพองค์กรและความยั่งยืนของการผลิต

คำสำคัญ : กระบวนการทำงาน เครื่องตีก๊อป การลดจำนวนพนักงาน การปรับปรุงประสิทธิภาพ การบริหารการผลิต

ABSTRACT

This study aimed to improve the efficiency of a copying-machine production line at P.J. Chonburi Parawood Co., Ltd. by applying the ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) principles together with 5W1H analysis and time study to redesign workflow and enhance coordination between workers and machinery. A before–after experimental design was employed under actual production conditions. Data were collected between May and September 2025, with 5 repeated measurements conducted under each production condition. The number of operators was then reduced from 5 to 3, and the workstation layout and work sequence were redesigned to improve workflow continuity. The results revealed that total labor cost per hour decreased from 250 to 150 THB (–40%), and labor cost per unit dropped from 0.1515 to 0.1047 THB (–30.89%), while the average output declined slightly from

1,650.07 to 1,432.39 pieces per hour (-13.19%), remaining within the factory's target range of 1,300-1,350 pieces per hour. The improvement reduced employee waiting time and redundant movements, resulting in more efficient labor utilization and lower labor costs per unit while maintaining production output at an acceptable level. These findings indicate that appropriate human resource allocation and workflow design can enhance organizational efficiency and contribute to the sustainability of the production system.

Keywords: Work process; Copying machine; Workforce reduction; Performance improvement; Production management

1. บทนำ

อุตสาหกรรมไม้ยางพาราเป็นหนึ่งในภาคการผลิตที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย โดยเฉพาะในภาคตะวันออกที่มีโรงงานแปรรูปไม้จำนวนมาก กระบวนการผลิตภายในโรงงานเหล่านี้มักประกอบด้วยขั้นตอนที่ต้องใช้ทั้งเครื่องจักรและแรงงานคนร่วมกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพสูงสุด บริษัท พี.เจ.ชลบุรี พาราว่าด จำกัด เป็นโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ดำเนินการผลิตสินค้าจำพวกเฟอร์นิเจอร์ไม้และส่วนประกอบต่าง ๆ ของไม้ โดยมีเครื่องคัดก๊อปปี (Copying Machine) เป็นเครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปไม้ตามแบบแม่พิมพ์ โดยใช้ระบบใบมีดหมุนกัดเนื้อไม้ให้ได้ขนาดและรูปทรงเดียวกันในทุกชิ้นงาน มักใช้ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และไม้แปรรูป เช่น การผลิตขาโต๊ะหรือพนักเก้าอี้ ซึ่งต้องอาศัยแรงงานช่วยป้อนและยกชิ้นงานออกจากเครื่อง หากขาดการจัดลำดับงานที่เหมาะสมอาจเกิดการรอคอยและการเคลื่อนไหวซ้ำซ้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวถือเป็นกระบวนการสำคัญในการขึ้นรูปไม้ก่อนเข้าสู่การประกอบชิ้นสุดท้าย

จากการสำรวจเบื้องต้นของสายการผลิตเครื่องคัดก๊อปปีพบว่า กระบวนการดังกล่าวใช้พนักงานจำนวน 5 คนต่อหนึ่งไลน์การผลิต มีค่าแรงรวมประมาณ 250 บาทต่อชั่วโมง และมีผลผลิตเฉลี่ย 1,650.07 ชิ้นต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าแรงเฉลี่ย 0.1515 บาทต่อชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบช่วงเวลารอคอยระหว่างการทำงานของพนักงานและเครื่องจักรในหลายขั้นตอน โดยเฉพาะในช่วงที่เครื่องคัดก๊อปปีกำลังทำงานซึ่งพนักงานไม่สามารถปฏิบัติงานอื่นได้ ส่งผลให้เกิดการใช้กำลังคนไม่เต็มประสิทธิภาพและมีความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิต

อย่างไรก็ตาม ปัญหาการใช้แรงงานและทรัพยากรที่ไม่มีประสิทธิภาพดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Budiono et al. [1] ที่พบว่าความซับซ้อนของกระบวนการผลิตและการจัดสรรทรัพยากรที่ไม่เหมาะสมส่งผลต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานของภาคอุตสาหกรรมการผลิต ขณะที่ Purwoko และ Hasan [2] ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงกระบวนการทำงานและการจัดการสายการผลิตสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การปรับปรุงกระบวนการจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและตอบสนองต่อการแข่งขันทางอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีจุดเริ่มต้นจากการสังเกตการทำงานจริงในสายการผลิต ซึ่งพบว่ากระบวนการทำงานของเครื่องคัดก๊อปปีต้องใช้แรงงานถึง 5 คนต่อหนึ่งไลน์การผลิต ทำให้มีค่าใช้จ่าย

แรงงานต่อชั่วโมงสูง และอาจเกิดภาวะแรงงานเกินจำเป็นในช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาทดลองเชิงประจักษ์ในบริบทของสายการผลิตเครื่องคัดก๊อปปีของอุตสาหกรรมไม้ยางพาราที่ประเมินผลกระทบของการลดจำนวนพนักงานต่อประสิทธิภาพการผลิตและต้นทุนแรงงานภายใต้สภาวะการผลิตจริง การวิจัยจึงมุ่งทดสอบแนวทางการปรับลดจำนวนพนักงานจาก 5 คน เหลือ 3 คน เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิต ต้นทุนแรงงาน และความสามารถในการรักษาคุณภาพของสินค้า [3] การดำเนินงานครอบคลุมทั้งการศึกษาขั้นตอนการทำงาน การบันทึกเวลา และการประเมินผลผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง ทั้งนี้ วัตถุประสงค์สำคัญคือเพื่อสร้างแนวทางที่สามารถนำไปใช้ปรับปรุงการจัดการกำลังคนในสายการผลิตได้อย่างเหมาะสม และเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมไม้ยางพาราโดยรวม [4] การศึกษานี้ตั้งสมมติฐานว่าการปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลัก ECRS ร่วมกับการจัดสรรกำลังคนใหม่ จะสามารถลดต้นทุนแรงงานได้โดยยังคงรักษาระดับผลผลิตให้อยู่ในเกณฑ์เป้าหมายของโรงงาน

การศึกษานี้อาศัยหลักการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวคิด ECRC (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) ซึ่งมุ่งเน้นการตัดกิจกรรมที่ไม่จำเป็น รวมกิจกรรมที่ซ้ำซ้อน ปรับลำดับงานใหม่ และทำให้งานง่ายขึ้น เพื่อให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและลดความสูญเสียในระบบ [5] นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้แนวคิด 5W1H เพื่อวิเคราะห์กระบวนการทำงานในแต่ละขั้นตอน โดยตั้งคำถามเชิงโครงสร้าง “ใคร (Who) ทำอะไร (What) ที่ไหน (Where) เมื่อใด (When) ทำไม (Why) และอย่างไร (How)” เครื่องมือทั้งสองแนวคิดนี้ช่วยให้การวิเคราะห์กระบวนการเป็นไปอย่างเป็นระบบและสามารถระบุจุดบกพร่องได้ชัดเจน ทั้งนี้ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการบริหารการผลิตแบบ Lean Manufacturing ที่มุ่งเน้นการลดความสูญเสียเปล่า (Waste) และเพิ่มคุณค่าของกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมผลิตของไทย [6]

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยการจับเวลาเชิงกระบวนการ (Time Study) เพื่อบันทึกและวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุง เพื่อแสดงลำดับการทำงานของพนักงานและเครื่องจักรอย่างเป็นระบบ [7] โดยได้ออกแบบการทดลองในลักษณะก่อนและหลังการปรับปรุงเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการดำเนินงานอย่างเป็นรูปธรรม

การเก็บข้อมูลดำเนินการภายใต้สภาวะการผลิตจริงในโรงงาน โดยเน้นตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ ปริมาณผลผลิตต่อชั่วโมง และต้นทุนแรงงานต่อหน่วย การวิเคราะห์ผลใช้การเปรียบเทียบเชิงเปอร์เซ็นต์ เพื่อหาความแตกต่างของประสิทธิภาพการผลิตระหว่างการใช้อย่าง 5 คน และ 3 คนต่อหนึ่งการผลิต ทั้งนี้ยังมีการตรวจสอบความสอดคล้องของผลผลิตกับมาตรฐานเป้าหมายที่โรงงานกำหนด เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการนำผลไปใช้จริง

จากการดำเนินการศึกษานี้ คาดว่าจะสามารถลดค่าแรงงานรวมต่อชั่วโมงได้ประมาณ 40% และลดต้นทุนแรงงานต่อชิ้นได้ร้อยละ 30 โดยที่ประสิทธิภาพการผลิตลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งยังคงอยู่ในระดับเป้าหมายการผลิตที่โรงงานกำหนดไว้ ผลลัพธ์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการจัดสรรทรัพยากรบุคคลให้เหมาะสมกับลักษณะงานในสายการผลิต รวมถึงเป็นแนวทางในการพัฒนามาตรฐานการทำงาน (Standard Work) และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Improvement) ในอุตสาหกรรมไม้อย่างพารา นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้บริหารโรงงานในการตัดสินใจด้านการบริหารกำลังคน เพื่อเพิ่มผลผลิตโดยไม่กระทบต่อคุณภาพสินค้าและความปลอดภัยในการทำงาน [8] การศึกษานี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญของการพัฒนาแนวทางการผลิตที่สมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความยั่งยืนของแรงงานภาคอุตสาหกรรม

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษานี้ดำเนินการภายในแผนกผลิตของบริษัท พี.เจ. ชลบุรี พาราไวด์ จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานแปรรูปไม้อย่างพาราที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติร่วมกับแรงงานคนในกระบวนการผลิต การทดลองเกิดขึ้นระหว่างวันที่ 5 พฤษภาคม ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2568 โดยเลือกพื้นที่ทดลองเฉพาะสายการผลิตเครื่องตีกรอบที่มีกำลังผลิตต่อชั่วโมงใกล้เคียงกัน โดยมีการควบคุมตัวแปรที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต ได้แก่ ประเภทไม้ ขนาดชิ้นงาน เครื่องตีกรอบที่ชุดเดิม สภาพแวดล้อมในการทำงาน และช่วงเวลาการผลิตให้เหมือนกันตลอดการทดลอง เพื่อให้ข้อมูลมีความเที่ยงตรงและสามารถเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงได้อย่างเหมาะสม

2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เครื่องตีกรอบ 5 เครื่อง ซึ่งเป็นเครื่องจักรหลักในสายการผลิตที่มีการทำงานต่อเนื่องทุกชั่วโมง
2. อุปกรณ์วัดเวลาแบบดิจิทัล (Digital Timer) สำหรับใช้บันทึกระยะเวลาการทำงานในแต่ละขั้นตอน
3. แบบบันทึกข้อมูลการผลิตรายชั่วโมง เพื่อจดบันทึกจำนวนชิ้นงานและเวลาที่ใช้จริงในแต่ละรอบการผลิต
4. โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับจัดเก็บข้อมูลและคำนวณค่าเฉลี่ยผลผลิต ตลอดจนประมวลผลเปอร์เซ็นต์การ

เปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ ปริมาณผลผลิตต่อชั่วโมง (ชิ้น/ชั่วโมง) และค่าแรงงานต่อชิ้น (บาท/ชิ้น)

2.2 การออกแบบการทดลอง กล่าวคือ รูปแบบการทดลองเป็นการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง (Before-After Experiment) โดยเริ่มจากการบันทึกข้อมูลกระบวนการทำงานในสภาวะปกติซึ่งใช้แรงงาน 5 คนต่อหนึ่งไลน์การผลิต จากนั้นจึงดำเนินการปรับลดจำนวนพนักงานเหลือ 3 คน แล้วเก็บข้อมูลภายใต้เงื่อนไขและช่วงเวลาการผลิตที่เท่ากัน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความเที่ยงตรงและเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือและสามารถเปรียบเทียบได้อย่างเป็นระบบ ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ประเมินผลคือ 1) จำนวนผลผลิตต่อชั่วโมง 2) ค่าแรงรวมต่อชั่วโมง และ 3) ค่าแรงต่อชิ้นงาน ก่อนการทดลองในสภาวะปรับปรุง พนักงานได้รับการชี้แจงขั้นตอนการทำงานและทดลองปฏิบัติงานตามรูปแบบใหม่เพื่อสร้างความคุ้นเคยกับลำดับงานที่ปรับปรุงแล้ว ทั้งนี้ การเก็บข้อมูลในแต่ละสภาวะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการผลิตเดียวกัน และมีการเก็บข้อมูลซ้ำ 5 รอบ เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากปัจจัยเฉพาะบุคคล นอกจากนี้ ได้ควบคุมปัจจัยด้านความชำนาญของพนักงาน โดยใช้พนักงานชุดเดิมที่มีประสบการณ์ในการปฏิบัติงานกับเครื่องตีกรอบ และได้รับการชี้แจงขั้นตอนการทำงานก่อนการทดลองในสภาวะปรับปรุง เพื่อลดผลกระทบจากความแตกต่างด้านทักษะของผู้ปฏิบัติงาน

2.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน มี 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. ศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องตีกรอบที่เดิมและบันทึกข้อมูลเวลาการทำงานจริงในแต่ละขั้นตอน
2. จัดทำแผนภาพกระบวนการไหลเพื่อแสดงลำดับงานทั้งหมดของพนักงานในแต่ละตำแหน่ง
3. วิเคราะห์จุดที่เกิดความล่าช้าหรือไม่ก่อให้เกิดคุณค่าโดยใช้หลักการ ECRS
4. วางแผนการลดจำนวนพนักงานและออกแบบลำดับงานใหม่ให้สอดคล้องกับภาระงานของแต่ละเครื่อง
5. ทดลองปฏิบัติจริงภายใต้สภาวะการผลิตปกติและเก็บข้อมูลซ้ำในช่วงเวลาเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบผลก่อนหลัง
6. นำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และร้อยละการเปลี่ยนแปลง (% Change) พร้อมทดสอบความแตกต่างของผลผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยสถิติ Paired Sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญ .05

2.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้อง กล่าวคือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งสองช่วงถูกบันทึกและตรวจสอบความครบถ้วนโดยหัวหน้างานฝ่ายผลิต การเก็บข้อมูลดำเนินการในสภาวะก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงเป็นระยะเวลา 5 วันทำการ โดยมีการบันทึกข้อมูลผลผลิตและเวลาการทำงานรวมทั้งสิ้น 5 รอบการผลิตในแต่ละสภาวะ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการ

วิเคราะห์ จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และร้อยละการเปลี่ยนแปลง เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มประสิทธิภาพหลังการปรับปรุง พร้อมทั้งทดสอบความแตกต่างของผลผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยสถิติ Paired Sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญ .05 เพื่อยืนยันว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ทั้งนี้ ได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับเป้าหมายการผลิตของโรงงาน (ประมาณ 1,300-1,350 ชิ้น/ชั่วโมง) เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการนำผลไปประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการผลิต รวมถึงมีการหารือร่วมกับพนักงานประจำเครื่องเพื่อสอบถามผลกระทบด้านความเหนื่อยล้าและคุณภาพชิ้นงาน เพื่อให้การปรับปรุงเป็นไปอย่างยั่งยืนและคำนึงถึงสภาพการทำงานของแรงงาน ทั้งนี้ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากการเก็บข้อมูลเข้าภายใต้เงื่อนไขการผลิตเดียวกัน และผ่านการตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูล เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองครั้งนี้มุ่งประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานในสายการผลิตเครื่องตีกรอบปีก่อนและหลังการปรับปรุง เพื่อเปรียบเทียบผลในด้านเวลาการทำงานของพนักงาน ปริมาณผลผลิต และต้นทุนแรงงานต่อชิ้น โดยใช้หลักการวิเคราะห์กระบวนการทำงานแบบ ECRS ควบคู่กับเครื่องมือ 5W1H และการจับเวลาเชิงกระบวนการ ภายใต้สภาพการทำงานจริงในโรงงานพาราวัตของ บริษัท พี.เจ. ชลบุรี พาราวัต จำกัด การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 1) การเก็บข้อมูลกระบวนการทำงานเดิมที่ใช้แรงงาน 5 คน และ 2) การทดลองปรับลดจำนวนพนักงานเหลือ 3 คน พร้อมปรับเปลี่ยนลำดับและรูปแบบการทำงานใหม่เพื่อเพิ่มความต่อเนื่องและลดความสูญเปล่าที่เกิดจากการทำงาน

ในการเก็บข้อมูล ได้ดำเนินการจับเวลาการทำงานของพนักงานแต่ละคนในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การนำไม้เข้าวาง การควบคุมเครื่องตีกรอบไปจนถึงการยกชิ้นงานออกจากเครื่อง โดยบันทึกข้อมูลเข้าอย่างน้อย 4 รอบ เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่น่าเชื่อถือ จากนั้นนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลหลังการปรับปรุง พร้อมใช้แผนภาพกระบวนการ และแผนผังพื้นที่ทำงาน (Layout) เพื่ออธิบายลักษณะการปรับเปลี่ยนพื้นที่และลำดับการทำงานให้สอดคล้องกับการลดจำนวนพนักงาน ทั้งนี้ เพื่อให้การแปลผลเป็นระบบ จึงนำเสนอผลการทดลองใน 5 ส่วนตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงการจับเวลาการทำงาน of พนักงานและเครื่องตีกรอบปีก่อนปรับปรุง

เครื่องตีกรอบปีที่	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	เวลา (วินาที)	เวลาเฉลี่ยต่อชิ้น
1	11	25	8	44	11
2	12	21	6	39	9.75
3	15	24	6	45	11.25
4	8	27	6	41	10.25
5	15	28	8	51	12.75

หมายเหตุ: ขั้นตอนที่ 1 คือ นำแผ่นรองใส่ตรงกลางระหว่างชิ้นงานและยกชิ้นงานเข้าเครื่อง, ขั้นตอนที่ 2 คือ เครื่องตีกรอบปีทำงาน, ขั้นตอนที่ 3 คือ ยกชิ้นงานออกจากเครื่อง โดยเวลาเป็นหน่วยวินาทีและมีจำนวนชิ้นไม้ทั้งหมด 4 ชิ้น

จากข้อมูลในตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าเวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นตอนของพนักงาน 5 คน มีความแตกต่างกันชัดเจน โดยเฉพาะขั้นตอนที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นช่วงที่เครื่องตีกรอบปีทำงานอัตโนมัติ พนักงานจำเป็นต้องรอเครื่องจนเสร็จกระบวนการก่อนจึงสามารถทำงานชิ้นต่อไปได้ ทำให้เกิดช่วงเวลาว่าง (Idle Time) และเป็นสาเหตุหลักที่ลดประสิทธิภาพการใช้แรงงานในสายการผลิต การสูญเสียลักษณะนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Ohno (1988) ที่ระบุว่า การรอคอยเป็นหนึ่งในความสูญเปล่าหลัก 7 ประการในระบบ Lean Production ซึ่งต้องได้รับการจัดการอย่างเป็นระบบเพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า [9]

ดังนั้น เพื่อหาทางปรับปรุงกระบวนการทำงาน จึงได้ทำการวิเคราะห์รายละเอียดของปัญหาที่พบในแต่ละขั้นตอนโดยใช้เครื่องมือ 5W1H เพื่อระบุสาเหตุและเงื่อนไขของความสูญเปล่าอย่างเป็นระบบ พร้อมประยุกต์ใช้หลักการ ECRS เพื่อออกแบบแนวทางการปรับปรุงให้เหมาะสมกับบริบทการทำงานจริง ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสรุปไว้ใน ตารางที่ 2 ซึ่งแสดงความเชื่อมโยงระหว่างลักษณะของปัญหาและแนวทางการปรับปรุงที่นำไปใช้ในสายการผลิตของเครื่องตีกรอบปี

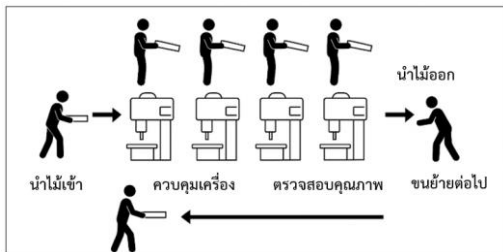
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ปัญหา 5W1H ร่วมกับหลักการ ECRS เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำงานของเครื่องตีกรอบปี

ประเด็น (5W1H)	คำถาม/สถานการณ์	หลักการ ECRS	แนวทางการปรับปรุง
What / Why	พนักงานยืนรอเครื่องทำงาน ไม่สามารถทำงานอื่นได้	Eliminate (ขจัด)	มอบงานเสริมระหว่างรอเครื่อง เช่น ตรวจสอบไม้ หรือเตรียมวัสดุ
When / Why	เครื่องหมุนทำงาน พนักงานว่างงาน	Rearrange (จัดลำดับใหม่)	จัดลำดับงานให้เตรียมไม้ขณะเครื่องทำงาน
Where	จุดวางไม้เข้า-ออกอยู่ห่างกัน	Combine (รวมงาน)	รวมจุดวางไม้เข้า-ออกให้ใกล้กันเพื่อลดการเคลื่อนไหว
How / Why	ยกไม้ด้วยมือหลายครั้ง ใช้แรงมาก	Simplify (ทำให้ง่ายขึ้น)	ใช้ jig หรือ Conveyor ช่วยส่งไม้เพื่อลดแรงงานซ้ำซ้อน

จากผลการวิเคราะห์ในตารางข้างต้น สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการทำงานก่อนการปรับปรุงมีข้อบกพร่องสำคัญอยู่ที่ช่วงเวลารอคอยของพนักงานในระหว่างที่เครื่องจักรกำลังทำงานและการเคลื่อนไหวซ้ำซ้อนที่ไม่เกิดประโยชน์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์และพื้นที่ทำงานที่ไม่เหมาะสม การนำหลักการ ECRS (Eliminate, Combine,

Rearrange, Simplify) มาใช้จึงเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงงาน โดยมุ่งเน้นให้เกิดการใช้แรงงานและเครื่องจักรอย่างคุ้มค่า และลดความสูญเปล่าในทุกขั้นตอน การประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวเริ่มจาก

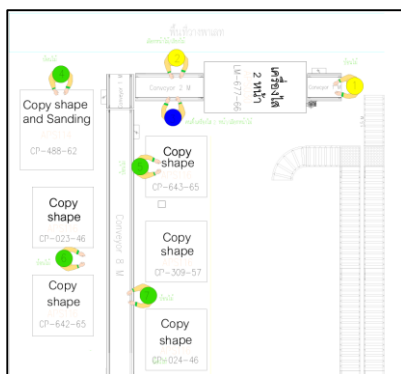
- Eliminate / Combine: มอบหมายงานเสริมให้พนักงานสามารถดำเนินกิจกรรมอื่นในช่วงที่เครื่องกำลังทำงาน เช่น ตรวจสอบคุณภาพไม้หรือเตรียมวัสดุสำหรับรอบต่อไป เพื่อลดเวลาว่างระหว่างรอเครื่อง
- Rearrange: ปรับลำดับการทำงานใหม่ให้เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง โดยให้พนักงานแต่ละตำแหน่งส่งต่อชิ้นงานตามจังหวะของเครื่องจักร เพื่อลดคอขวดในสายการผลิต
- Simplify: ใช้อุปกรณ์ช่วยยก เช่น Jig หรือ Conveyor ขนาดเล็ก แทนการยกไม้ด้วยแรงคน เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความเหนื่อยล้าในการทำงานซ้ำ



ภาพที่ 1 แสดงผังการจัดวางพื้นที่การทำงานของเครื่องตีก๊อบปีก่อนการปรับปรุง

จากแนวทางการปรับปรุง จึงได้ออกแบบ ผังการจัดวางพื้นที่การทำงานใหม่ (Lean Layout Design) โดยปรับตำแหน่งเครื่องตีก๊อบปีให้อยู่ใกล้กับพื้นที่ของพนักงานมากขึ้น เพื่อให้การเคลื่อนไหวของชิ้นงานและแรงงานเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ลดการเดินซ้ำซ้อนและระยะทางการขนย้าย พร้อมเพิ่มจุดรับ-ส่งไม้ระหว่างเครื่องจักรเพื่อให้ทำงานต่อเนื่องโดยไม่ต้องรอเครื่อง การจัดวางใหม่นี้ช่วยให้เกิดการไหลของงานอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow) และสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องจักรกับแรงงานภายใต้ทรัพยากรที่จำกัด ดังแสดงในภาพที่

2



ภาพที่ 2 แสดงแผนภาพ Layout ของการลดจำนวนพนักงานของเครื่องตีก๊อบปีให้เหลือเพียง 3 คน

หลังจากปรับเปลี่ยนผังพื้นที่การทำงานตามที่แสดงในภาพที่ 1 ได้มีการทดลองปฏิบัติงานจริงภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันก่อนการปรับปรุง โดยใช้พนักงานจำนวน 3 คนต่อหนึ่งสายการผลิต เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานและตรวจสอบความเป็นไปได้ของรูปแบบการจัดงานใหม่ การทดลองนี้ใช้ช่วงเวลาและปริมาณชิ้นงานเท่ากันกับการทดลองก่อนปรับปรุง เพื่อให้ผลการเปรียบเทียบมีความเที่ยงตรง ข้อมูลที่ได้จากการจับเวลาการทำงานแต่ละขั้นตอนของพนักงานทั้ง 3 คน ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบกับค่าก่อนการปรับปรุง

ผลการทดลองหลังการปรับปรุงแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสรุปค่าเฉลี่ยระยะเวลาการทำงานของแต่ละขั้นตอน พบว่าแม้เวลาทำงานต่อชิ้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่กระบวนการทำงานโดยรวมมีความต่อเนื่องมากขึ้นและลดช่วงเวลาวางของพนักงานได้อย่างชัดเจน อีกทั้งการทำงานร่วมกันของพนักงานในแต่ละจุดมีความสมดุลมากกว่าเดิม ส่งผลให้กระบวนการผลิตสามารถดำเนินต่อเนื่องโดยไม่เกิดคอขวด และมีการใช้แรงงานอย่างคุ้มค่าตามเป้าหมายของการปรับปรุงในครั้งนี้

ตารางที่ 3 แสดงการจับเวลาการทำงานของพนักงานและเครื่องตีก๊อบปีหลังปรับปรุง

เครื่องตี ก๊อบปีที่	ขั้นตอน ที่ 1	ขั้นตอน ที่ 2	ขั้นตอน ที่ 3	เวลา (วินาที)	เวลาเฉลี่ย ต่อชิ้น
1	15	23	13	51	12.75
2	17	20	10	47	11.75
3	16	28	14	58	14.50
4	11	27	13	51	12.75
5	15	27	14	46	11.50

หมายเหตุ: ขั้นตอนที่ 1 คือ นำแผ่นรองใส่ตรงกลางระหว่างชิ้นงานและยกชิ้นงานเข้าเครื่อง, ขั้นตอนที่ 2 คือ เครื่องตีก๊อบปีทำงาน, ขั้นตอนที่ 3 คือ ยกชิ้นงานออกจากเครื่อง โดยเวลาเป็นหน่วยวินาทีและมีจำนวนชิ้นไม้ทั้งหมด 4 ชิ้น ภายหลังจากปรับปรุง พนักงานจำนวน 3 คน รับผิดชอบการปฏิบัติงานร่วมกันในเครื่องตีก๊อบปีทั้ง 5 เครื่อง โดยข้อมูลที่แสดงเป็นเวลาการทำงานของแต่ละเครื่องตีก๊อบปี

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า การลดจำนวนพนักงานจาก 5 คน เหลือ 3 คน ทำให้เวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นตอนใกล้เคียงกันมากขึ้น แสดงถึงการกระจายภาระงานที่เหมาะสมและลดช่วงเวลารอคอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะขั้นตอนเตรียมไม้และส่งต่อเข้าสู่เครื่องตีก๊อบปี ซึ่งเดิมเป็นคอขวดของสายการผลิต สะท้อนว่าการออกแบบพื้นที่และลำดับงานใหม่ตามหลัก ECRS ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แรงงานได้อย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าผลผลิตเฉลี่ยต่อชั่วโมงลดลงเพียงเล็กน้อย ขณะที่ต้นทุนแรงงานต่อชั่วโมงและต่อชิ้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตโดยรวมดีขึ้นอย่างเด่นชัด

ตารางที่ 4 แสดงเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตเฉลี่ยต่อชั่วโมงของเครื่องตีก๊อปปีก่อนและหลังการปรับปรุง

เครื่องตีก๊อปปีที่	ก่อนปรับปรุง (5 คน)	หลังปรับปรุง (3 คน)	ความต่างปริมาณผลลัพธ์	การเปลี่ยนแปลง (เปอร์เซ็นต์)
1	327.27	282.35	-44.92	-13.73
2	369.23	306.38	-62.85	-17.02
3	320.00	248.27	-71.73	-22.42
4	351.22	282.35	-68.87	-19.61
5	282.35	313.04	+30.69	+10.87
รวม	1650.07	1432.39	-217.68	-13.19

หมายเหตุ: ก่อนและหลังปรับปรุงคิดเป็นจำนวนชิ้นต่อชั่วโมง

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 พบว่า การปรับลดจำนวนพนักงานจาก 5 คน เหลือ 3 คน ส่งผลให้ค่าแรงรวมต่อชั่วโมงลดลงจาก 250 บาท เหลือ 150 บาท คิดเป็นการลดลงร้อยละ 40 ในขณะที่ผลผลิตเฉลี่ยต่อชั่วโมงลดลงจาก 1,650.07 ชิ้น เหลือ 1,432.39 ชิ้น หรือลดลงร้อยละ 13.19 อย่างไรก็ตาม เมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย Paired Sample t-test พบว่าผลผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > .05$) แสดงให้เห็นว่าการลดจำนวนพนักงานไม่ส่งผลกระทบต่อระดับผลผลิตโดยรวมของสายการผลิต ทั้งนี้ผลผลิตหลังการปรับปรุงยังคงอยู่ในช่วงเป้าหมายที่บริษัทกำหนดไว้ประมาณ 1,300–1,350 ชิ้นต่อชั่วโมง นอกจากนี้ ค่าแรงต่อชิ้นงานลดลงจาก 0.1515 บาท เหลือ 0.1047 บาท หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 30.89 สะท้อนให้เห็นว่าการปรับโครงสร้างแรงงานโดยใช้แนวทางการจัดลำดับงานใหม่ช่วยลดต้นทุนแรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่กระทบต่อสมรรถนะหลักของกระบวนการผลิต

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัย ที่ตั้งไว้ว่าการปรับลดจำนวนพนักงานโดยใช้หลักการปรับปรุงกระบวนการที่เหมาะสมสามารถลดต้นทุนแรงงานได้โดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพการผลิตในระดับที่มีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงชี้ให้เห็นว่า ความสูญเสียจากการรอคอย (Waiting Time) และการเคลื่อนไหวซ้ำซ้อน (Motion Waste) ได้รับการจัดการอย่างเป็นระบบผ่านการประยุกต์ใช้หลัก ECRS ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [10]

ในเชิงทฤษฎีผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Frederick W. Taylor [11] และ Frank & Lillian Gilbreth [12] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการศึกษางานด้วยหลัก Time and Motion Study สามารถลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นและเพิ่มประสิทธิภาพของแรงงานได้โดยไม่ต้องเพิ่มทรัพยากร รวมถึงสอดคล้องกับหลักการของ Lean Manufacturing ที่เสนอโดย Womack และ Jones [13] ซึ่งมุ่งเน้นการลดกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างสมดุลระหว่างคน เครื่องจักร และเวลาในการผลิต

นอกจากนี้ การปรับลดจำนวนพนักงานยังช่วยส่งเสริมแนวคิดของ Multi-Skilled Worker และ Human-Centered Lean System ตามแบบ Toyota Production System ของ Taiichi Ohno [14] ที่เน้นการพัฒนาแรงงานให้มีทักษะหลากหลาย สามารถรับผิดชอบงานในหลายขั้นตอน และเข้าใจภาพรวมของสายการผลิตได้ดียิ่งขึ้น จากการสังเกตพบว่าพนักงานที่เหลืออยู่ 3 คน มีความคล่องตัวมากขึ้น สามารถจัดการการไหลของชิ้นงานและการใช้เครื่องจักรได้อย่างต่อเนื่อง ลดปัญหาคอขวดของสายการผลิต และส่งผลให้ประสิทธิภาพเฉลี่ยต่อคนสูงขึ้นร้อยละ 44.7 เมื่อเทียบกับก่อนการปรับปรุง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการเพิ่ม Productivity per Person [15]

ในมิติด้านการยศาสตร์ (Ergonomics) การลดจำนวนพนักงานจาก 5 คน เหลือ 3 คน อาจเพิ่มภาระงานและความเหนื่อยล้าของพนักงานได้ อย่างไรก็ตาม การปรับลำดับงานและผังการทำงานใหม่ตามหลัก ECRS ช่วยลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นและช่วงเวลารอคอย ส่งผลให้การทำงานมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่วนเครื่องตีก๊อปปีหมายเลข 5 มีผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.87 ซึ่งอาจเป็นผลจากการปรับผังการทำงานและการประสานงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้สามารถใช้ศักยภาพของเครื่องจักรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ผลผลิตเฉลี่ยที่ลดลงร้อยละ 13.19 เป็นผลจากการที่พนักงานต้องรับผิดชอบงานหลายขั้นตอนมากขึ้น ภายหลังการปรับลดจำนวนแรงงาน ส่งผลให้เกิดภาระงานที่เพิ่มขึ้นและต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวต่อรูปแบบการทำงานใหม่ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตยังคงอยู่ในเกณฑ์เป้าหมายของโรงงาน สะท้อนให้เห็นว่าการสูญเสียด้านผลผลิตที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลประโยชน์ด้านการลดต้นทุนแรงงานที่ได้รับ

โดยสรุป ผลการทดลองยืนยันว่าการจัดการกำลังคนด้วยแนวคิด ECERS และ Lean สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิตได้จริง โดยลดต้นทุนแรงงานลงในอัตราสูง ไม่ลดคุณภาพหรือปริมาณการผลิตในระดับที่เกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีการจัดการการผลิตสมัยใหม่ที่มุ่งสู่ระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน ซึ่งให้ความสำคัญทั้งต่อประสิทธิภาพเชิงเทคนิค คุณภาพชีวิตของแรงงาน และการพัฒนาองค์กรในระยะยาว

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้หลัก ECERS ร่วมกับการปรับโครงสร้างกำลังคนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แรงงานและลดต้นทุนการผลิตได้ โดยยังคงรักษาระดับผลผลิตให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สะท้อนถึงความเป็นไปได้ของการใช้แนวทางดังกล่าวเพื่อสนับสนุนการบริหารกำลังคนและการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมไม้อย่างพารา

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในครั้งนี้สะท้อนแนวคิดของการบริหารการผลิตยุคใหม่ ที่เน้นการลดความสูญเสียและเพิ่มคุณค่าในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต การนำหลักการ ECERS

และแนวคิด Lean Manufacturing มาประยุกต์ใช้ ช่วยให้กระบวนการทำงานของคนและเครื่องจักรสัมพันธ์กันอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนที่เคยเป็นช่วงเวลารอคอยหรือการเคลื่อนไหวซ้ำซ้อน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียทางเวลา การปรับปรุงครั้งนี้จึงไม่เพียงเป็นการลดจำนวนแรงงานเท่านั้น แต่เป็นการยกระดับรูปแบบการทำงานให้เกิดการเรียนรู้ร่วมกันระหว่างคนกับเทคโนโลยีอย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ การปรับลดแรงงานอาจทำให้พนักงานต้องรับผิดชอบงานเพิ่มขึ้นและอาจเกิดความเหนื่อยล้าหรือความเครียดในระยะยาว หากขาดระบบสนับสนุนด้านการฝึกอบรมและแรงจูงใจที่เหมาะสม ดังนั้น การพัฒนาแรงงานในลักษณะ Multi-Skilled Worker ควรควบคู่กับการสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่ส่งเสริมความปลอดภัยและแรงจูงใจทั้งในมิติของผลผลิตและคุณภาพชีวิตแรงงาน

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาในโรงงานแห่งเดียวและภายใต้ช่วงเวลาการผลิตปกติ ทำให้ไม่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพได้ครบทุกสถานการณ์ เช่น ช่วงเร่งการผลิต หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพการทำงานของพนักงานในระยะยาว อีกทั้งยังไม่ได้รวมการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้านความพึงพอใจและความเหนื่อยล้าของแรงงาน ซึ่งอาจมีอิทธิพลต่อผลการผลิตในเชิงพฤติกรรม

สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตประกอบด้วย 1) ขยายการศึกษาในโรงงานประเภทอื่นเพื่อเปรียบเทียบผลของการปรับโครงสร้างแรงงานในอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรต่างชนิดกัน เช่น อุตสาหกรรมไม้แปรรูปหรือเฟอร์นิเจอร์ 2) เพิ่มตัวชี้วัดด้านคุณภาพและสภาวะแรงงาน เช่น ความพึงพอใจ ความเหนื่อยล้า และความปลอดภัย เพื่อประเมินผลกระทบที่ครอบคลุมมากขึ้น 3) ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัล เช่น ระบบ IoT หรือโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real-time เพื่อตรวจจับเวลารอคอย และประสิทธิภาพของเครื่องจักรได้อย่างแม่นยำ และ 4) ต่อยอดสู่การสร้างมาตรฐานการทำงานและการฝึกอบรมภายใน เพื่อให้การปรับปรุงมีความต่อเนื่องและกลายเป็นวัฒนธรรมองค์กรในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ บริษัท พี.เจ. ชลบุรี พาราวัค จำกัด ที่ให้โอกาสในการเข้าศึกษาและดำเนินการทดลองจริงในกระบวนการผลิตเครื่องตีกรอบปี ตลอดจนให้การสนับสนุนด้านข้อมูล เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ และคำแนะนำจากเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญทุกท่านอย่างเต็มที่ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของการศึกษานี้

6. อ้างอิง

- [1] Budiono HD, Nurcahyo R, Habiburrahman M. Relationship Between Manufacturing Complexity, Strategy, and Performance of Manufacturing Industries in Indonesia. *Heliyon* 2021; 7: e07225.
- [2] Purwoko P, Hasan ZB. Impact of Innovation Leadership on Supply Chain Efficiency: The Role of Process Improvement. *Jurnal Manajemen Bisnis*. 2023; 14(2): 257-273
- [3] Kliment M, Trebuna P, Pekarcikova M, Straka M, Trojan J, Duda R. Production Efficiency Evaluation and Products' Quality Improvement Using Simulation. *International Journal of Simulation Modelling* 2020; 19(3): 470-481.
- [4] Jawjit S, Jawjit W, Pibul P, Wongcharee S, Suwannahong K. Enhancing the Sustainability of the Sawn Rubberwood Industry through Resource-Efficient and Cleaner Production Approaches. *Journal of Cleaner Production* 2024; 497(1) : 143913.
- [5] Taher MA, Al Bashar M. The Impact of Lean Manufacturing Concepts on Industrial Processes' Efficiency and Waste Reduction. *International Journal of Progressive Research in Engineering Management and Science* 2024; 4(6): 338-349.
- [6] Rahmanasari D, Sutopo W, Rohani JM. Implementation of Lean Manufacturing Process to Reduce Waste: A Case Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2021; 1096(1): 012006.
- [7] Knop K. Analysing the Machines Working Time Utilization for Improvement Purposes. *Production Engineering Archives* 2021; 27(2): 137-147.
- [8] Habanik J, Martosova A, Letkova N. The Impact of Managerial Decision-Making on Employee Motivation in Manufacturing Companies. *Journal of Competitiveness* 2020; 12(2): 38-50.

- [9] Arunagiri P, Gnanavelbabu A. Identification of Major Lean Production Waste in Automobile Industries Using Weighted Average Method. *Procedia Engineering* 2014; 97: 2167-2175.
- [10] Gapp T, Neubauer R, Ficko A. Increased Line Efficiency by Improved Work Methods Using Time Study. *Procedia Manufacturing* 2015; 2: 716-721.
- [11] Schachter HL. The Role Played by Frederick Taylor in the Rise of the Academic Management Fields. *Journal of Management History* 2010; 16(4): 437-448.
- [12] Gilbreth FB, Gilbreth LM. *Motion Study: A Method for Increasing the Efficiency of the Workman*. New York: D. Van Nostrand Company; 1911.
- [13] Womack JP, Jones DT. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press, Simon & Schuster Inc.; 1996.
- [14] Yamamoto K, Milstead M, Lloyd R. A Review of the Development of Lean Manufacturing and Related Lean Practices: The Case of Toyota Production System and Managerial Thinking. *International Management Review* 2019; 15(2): 21-40
- [15] Mortada A, Soulhi A. Improvement of Assembly Line Efficiency by Using Lean Manufacturing Tools and Line Balancing Techniques. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2023; 17(4): 89-10

การวิเคราะห์ผลตอบแทนคาร์บอนเครดิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและ บทบาทในการเพิ่มความคุ้มค่าการลงทุนของโครงการ Assessment of Carbon Credit Value Derived from Rooftop Photovoltaic Systems and Their Contribution to Shortening Project Payback Periods

สุรเชษฐ เดชฟุ้ง¹, ณัฏพล เรืองทรัพย์¹ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ^{1*}
Surachet Dechphung¹, Natchapol Ruangsap¹, and Nattachote Rugthaicharoencheep^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand

*Corresponding Author: Email: nattachote.r@rmutp.ac.th

Received: 16-01-2026 Revised: 03-06-2026 Accepted: 12-06-2026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลตอบแทนคาร์บอนเครดิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและบทบาทในการเพิ่มความคุ้มค่าการลงทุนของโครงการ วิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคาด้วยโปรแกรม PVsyst version 7.3.1 และนำผลลัพธ์พลังงานไฟฟ้าจากโปรแกรมมาคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจก จากนั้นนำราคาที่คำนวณได้ลดต้นทุน การคืนทุนของโครงการจะมีระยะเวลาลดลง โดยกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 ไม่พิจารณาคาร์บอนเครดิต กรณีที่ 2 3 และ 4 พิจารณาคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 14 ปีที่ราคาต่ำสุด ราคาเฉลี่ย และราคาสูงสุดตามลำดับ ผลลัพธ์พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนของกรณีที่ 1 2 3 และ 4 เหมาะสมแก่การลงทุน ส่วนระยะเวลาการคืนทุนของโครงการ เงื่อนไขที่ 4 พิจารณาที่ราคาสูงสุด สามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดระยะเวลาคืนทุนลดลงจาก 8.493 ปี เหลือ 7.939 ปี

คำสำคัญ : คาร์บอนเครดิต ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ระยะเวลาการคืนทุน โครงการ

ABSTRACT

This paper presents an analysis of carbon credit returns from rooftop photovoltaic systems and their role in improving the economic viability of renewable energy projects. The electricity generation performance of an integrated rooftop photovoltaic system was analyzed using PVsyst software version 7.3.1. The electricity generation results obtained from the simulation were then used to calculate greenhouse gas emission reductions. Subsequently, the revenue generated from carbon credits was incorporated into the economic analysis to offset project costs, thereby shortening the project payback period. The study was divided into four case studies. Case 1 did not consider carbon credit revenue, while Cases 2, 3, and 4 considered carbon credit revenues over a 14-year period based on the minimum, average, and maximum carbon credit prices, respectively. The results indicate that the Net Present Value, Internal Rate of Return and Benefit-Cost Ratio of all four cases demonstrate favorable investment feasibility. Furthermore, the project payback period was shortest in Case 4, where the highest carbon credit price was considered, indicating that carbon credit revenue can significantly enhance the economic attractiveness of rooftop photovoltaic projects. The project payback period was reduced from 8.493 years to 7.939 years.

Keywords: Carbon Credits, Photovoltaic Rooftop Systems, Payback Period, Project

การวิเคราะห์ผลตอบแทนคาร์บอนเครดิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและ
บทบาทในการเพิ่มความคุ้มค่าการลงทุนของโครงการ
Assessment of Carbon Credit Value Derived from Rooftop Photovoltaic Systems and
Their Contribution to Shortening Project
Payback Periods

สุรเชษฐ เดชฟุ้ง¹, ณัฏพล เรืองทรัพย์¹ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ^{1*}
Surachet Dechphung¹, Natchapol Ruangsap¹, and Nattachote Rugthaicharoencheep^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand

*Corresponding Author: Email: nattachote.r@rmutp.ac.th

Received: 16-01-2026 Revised: 03-06-2026 Accepted: 12-06-2026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลตอบแทนคาร์บอนเครดิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและบทบาทในการเพิ่มความคุ้มค่าการลงทุนของโครงการ วิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคาด้วยโปรแกรม PVsyst version 7.3.1 และนำผลลัพธ์พลังงานไฟฟ้าจากโปรแกรมมาคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจก จากนั้นนำราคาที่คำนวณได้ลดต้นทุน การคืนทุนของโครงการจะมีระยะเวลาลดลง โดยกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 ไม่พิจารณาคาร์บอนเครดิต กรณีที่ 2 3 และ 4 พิจารณาคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 14 ปีที่ราคาต่ำสุด ราคาเฉลี่ย และราคาสูงสุดตามลำดับ ผลลัพธ์พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนของกรณีที่ 1 2 3 และ 4 เหมาะสมแก่การลงทุน ส่วนระยะเวลาการคืนทุนของโครงการ เงื่อนไขที่ 4 พิจารณาที่ราคาสูงสุด สามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดระยะเวลาคืนทุนลดลงจาก 8.493 ปี เหลือ 7.939 ปี

คำสำคัญ : คาร์บอนเครดิต ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ระยะเวลาการคืนทุน โครงการ

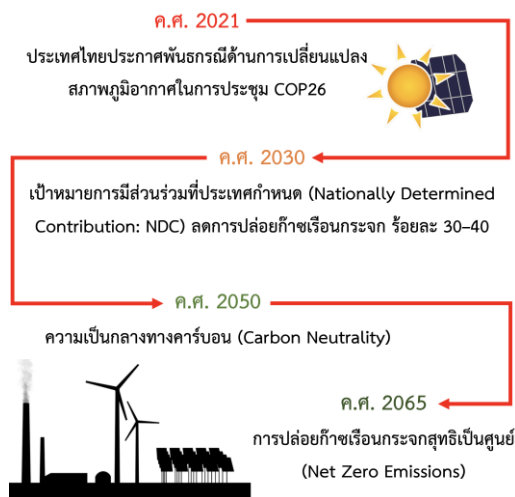
ABSTRACT

This paper presents an analysis of carbon credit returns from rooftop photovoltaic systems and their role in improving the economic viability of renewable energy projects. The electricity generation performance of an integrated rooftop photovoltaic system was analyzed using PVsyst software version 7.3.1. The electricity generation results obtained from the simulation were then used to calculate greenhouse gas emission reductions. Subsequently, the revenue generated from carbon credits was incorporated into the economic analysis to offset project costs, thereby shortening the project payback period. The study was divided into four case studies. Case 1 did not consider carbon credit revenue, while Cases 2, 3, and 4 considered carbon credit revenues over a 14-year period based on the minimum, average, and maximum carbon credit prices, respectively. The results indicate that the Net Present Value, Internal Rate of Return and Benefit-Cost Ratio of all four cases demonstrate favorable investment feasibility. Furthermore, the project payback period was shortest in Case 4, where the highest carbon credit price was considered, indicating that carbon credit revenue can significantly enhance the economic attractiveness of rooftop photovoltaic projects. The project payback period was reduced from 8.493 years to 7.939 years.

Keywords: Carbon Credits, Photovoltaic Rooftop Systems, Payback Period, Project

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้กลายเป็นประเด็นสำคัญระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และคุณภาพชีวิตของประชากรทั่วโลก หลายประเทศจึงได้กำหนดเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อบูรณาการสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในระยะเวลาที่กำหนด [1] เพื่อลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนและสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน ดังนั้น การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงเป็นเป้าหมายสำคัญที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยมีการส่งเสริมมาตรการต่าง ๆ เช่น การใช้พลังงานหมุนเวียน การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การอนุรักษ์พลังงาน การปลูกและฟื้นฟูพื้นที่ป่า รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีทางเศรษฐศาสตร์ด้านคาร์บอน เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่สังคมคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน เป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบโซลาร์เซลล์เกี่ยวข้องกับต้นทุน การสร้างรายได้ และประสิทธิภาพทางการเงิน โดยรวมตลอดอายุการใช้งาน การวิเคราะห์ประเภทนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการตัดสินใจสำหรับโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน และ ระยะเวลาการคืนทุน

ในอดีตมีงานวิจัยวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และประเมินคาร์บอนเครดิต อาทิ Rakesh Naskar และคณะวิจัย (ค.ศ. 2017) ที่ JIS College of Engineering เมือง Kalyani ประเทศอินเดีย มีการประเมินและวิเคราะห์คาร์บอนเครดิตระยะเวลา 25 ปี จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 5 กิโลวัตต์ เปรียบเทียบการคืนทุนแบบพิจารณา และไม่พิจารณาคาร์บอนเครดิต ผลลัพธ์

พบว่าระยะเวลาคืนทุนลดลง 4 ปี เมื่อมีการซื้อขายคาร์บอนเครดิต [2] K. Hermawan และคณะวิจัย (ค.ศ. 2017) ออกแบบแหล่งพลังงานหมุนเวียนสำหรับสนามบิน Kalimantan เมือง Berau บอร์เนียวตะวันออก ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 250 กิโลวัตต์ สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 219,949 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ [3] ณัฏพล เรืองทรัพย์ และคณะวิจัย (ค.ศ. 2024) ประเมินคาร์บอนเครดิตจากระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หลังคาแบบผสมผสานขนาด 25.68 กิโลวัตต์ ประเมินคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 25 ปี ผลการวิจัยพบว่าคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 25 ปี คือ 368.29 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าคิดเป็นเงิน 11,162.74 บาท [4]

เนื่องจากระเบียบคณะกรรมการองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกด้วยหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการพิจารณาโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (T-VER) พ.ศ. 2566 หมวด 4 ข้อ 22 กล่าวว่าอายุโครงการตามข้อ 6 (โครงการประเภทพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานที่ใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล) ให้มีอายุโครงการ 7 ปี และเมื่ออายุโครงการสิ้นสุดสามารถต่ออายุโครงการได้อีก 7 ปี รวมเป็น 14 ปี [5]

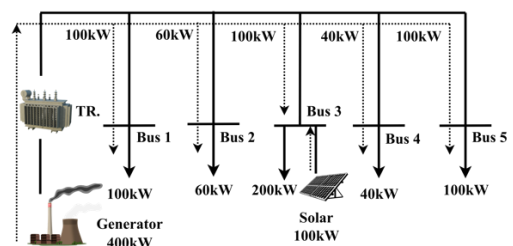
ดังนั้นงานวิจัยนี้มีการต่อยอดจากงานวิจัยในวรรณกรรมปริทัศน์ได้แก่ การนำเกณฑ์อายุโครงการ 14 ปีของ T-VER มาประยุกต์ใช้ในการประเมินร่วมกับราคาคาร์บอน 3 ระดับ และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการพิจารณาคาร์บอนเครดิต

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญในชั้นบรรยากาศของโลก ได้แก่ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO₂) มีเทน (Methane: CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide: N₂O) และโอโซน (Ozone: O₃) “คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า” หรือ “CO₂eq” เป็นค่าที่ใช้อธิบายก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ในหน่วยเดียวกัน [6-7]

การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีความเข้มข้นของคาร์บอน และปริมาณความร้อนสูง ปริมาณที่ลดลงของก๊าซเรือนกระจกขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอน และปริมาณความร้อนจากแหล่งพลังงานที่ถูกแทนที่ พลังงานหมุนเวียนมีความเข้มข้นของคาร์บอน และปริมาณความร้อนต่ำ [8] ระบบจำหน่ายไฟฟ้ากรณีมีการติดตั้งโซลาร์เซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบจำหน่ายกรณีมีการติดตั้งโซลาร์เซลล์

จากภาพที่ 2 เมื่อติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ที่บัส 3 ขนาด 100 กิโลวัตต์ พลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นทาง คือ 400 กิโลวัตต์ เนื่องจากระบบจำหน่ายถูกขดเซย์ พลังงานจากระบบโซลาร์เซลล์ การติดตั้งโซลาร์เซลล์ในระบบจำหน่ายส่งผลให้ลดการใช้พลังงานฟอสซิลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นทางเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากบัสที่ถูกติดตั้งโซลาร์เซลล์ใช้พลังงานจากกริดลดลง

2.2 การคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจก

การคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจกในบทความนี้ใช้ขอบเขตการคำนวณตามวิธีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเพื่อทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบส่งหรือระบบจำหน่ายเข้าสู่ระบบสายส่งตามโครงการ T-VER [9] ซึ่งพัฒนามาจากกลไกการพัฒนาที่สะอาด [10-11]

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ลดลง (Emission Reduction: ER)

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (1)$$

โดยที่ ER_y คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยลดลงในปี y ($\text{tCO}_2\text{e/ปี}$) BE_y คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยลดลงในปี y ของกรณีฐาน ($\text{tCO}_2\text{e/ปี}$) PE_y คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยลดลงในปี y ของโครงการในปี y ($\text{tCO}_2\text{e/ปี}$) LE_y คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่อยู่นอกขอบเขตโครงการในปี y

$$BE_y = BE_{EG, y} = (EG_{\text{consumer}, PJ, y} \times 10^{-3}) \times EF_{EC, PJ, y} \quad (2)$$

โดยที่ BE_{PJ} คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยของการผลิตพลังงานจากกริดในปี y ($\text{tCO}_2\text{eq/year}$) $EG_{\text{consumer}, PJ, y}$ คือ พลังงานไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในปี y (kWh/year) $EF_{EC, PJ, y}$ คือ ก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ถูกปล่อยของกริด ($\text{tCO}_2\text{eq/MWh}$)

EF_{grid} ในบทความนี้อ้างอิงจากก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า/การใช้ไฟฟ้าสำหรับโครงการ และก๊าซเรือนกระจกที่ถูกลดการปล่อยจากกิจกรรม พ.ศ. 2568 โครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนประเภทแสงอาทิตย์ คือ $0.4682 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$

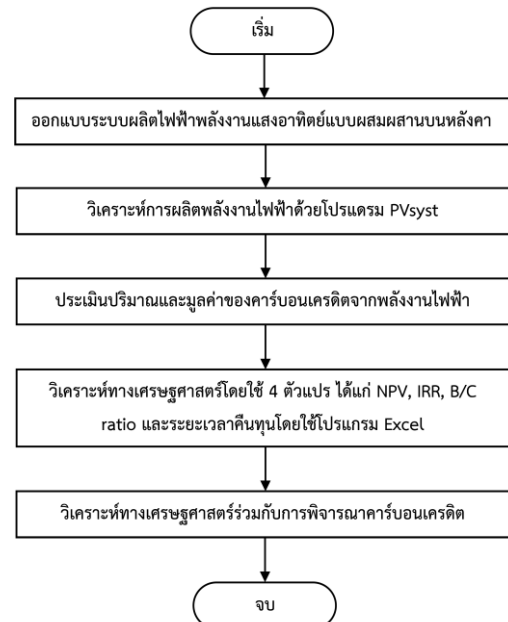
2.3 วิธีการวิจัย

ราคาซื้อขายคาร์บอนเครดิตแยกตามประเภทโครงการ (พลังงานแสงอาทิตย์) ณ วันที่ 14 มกราคม 2569 ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ราคาซื้อขายคาร์บอนเครดิตแยกตามประเภทโครงการ (พลังงานแสงอาทิตย์) [12]

จากภาพที่ 3 ราคาของคาร์บอนเครดิตต่ำสุด (21.50 บาท) ห่างกับราคาสูงสุด (500.00 บาท) ผลต่าง 478.50 บาท คิดเป็นร้อยละ 95.70 ราคาของคาร์บอนเครดิตเฉลี่ย (47.49 บาท) ห่างกับราคาสูงสุด (500.00 บาท) ผลต่าง 453.67 บาท คิดเป็นร้อยละ 90.502 แผนภาพการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภาพการวิเคราะห์

โครงการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานกำลังการผลิต 149.80 กิโลวัตต์ ใช้แผงขนาด 535 วัตต์ จำนวน 280 แผง อินเวอร์เตอร์ขนาด 100 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เครื่อง โรงงานใช้อัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภท 3 กิจการขนาดกลาง แรงดัน 22-33kV อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) ค่าพลังงานไฟฟ้าช่วง Peak 4.1839 บาทต่อหน่วย Off Peak 2.6037 บาทต่อหน่วย ต้นทุนโครงการของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ 5,827,220 บาท กรณีศึกษาการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของบทความนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่

- กรณีที่ 1: ไม่พิจารณาคาร์บอนเครดิต
- กรณีที่ 2: การพิจารณาคาร์บอนเครดิต 14 ปี ที่ราคาต่ำสุด (21.50 บาทต่อตัน)
- กรณีที่ 3: การพิจารณาคาร์บอนเครดิต 14 ปี ที่ราคาเฉลี่ย (47.49 บาทต่อตัน)
- กรณีที่ 4: การพิจารณาคาร์บอนเครดิต 14 ปี ที่ราคาสูงสุด (500.00 บาทต่อตัน)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัย

ผลลัพธ์การประเมินการผลิตพลังงานไฟฟ้าและปริมาณคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 14 ปี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การประเมินการผลิตพลังงานไฟฟ้าและปริมาณคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 14 ปี

ปี	การผลิตพลังงานไฟฟ้า (MWh)	ค่าไฟฟ้าที่สามารถลดได้ (บาท)	ปริมาณคาร์บอนเครดิต (tCO ₂ e)
1	200.378	735,693.31	93.82
2	199.275	731,646.99	93.30
3	198.173	727,600.68	92.78
4	197.071	723,554.37	92.27
5	195.969	719,508.05	91.75
6	194.867	715,461.74	91.24
7	193.765	711,415.43	90.72
8	192.663	707,369.11	90.21
9	191.561	703,322.80	89.69
10	190.459	699,276.49	89.17
11	189.357	695,230.17	88.66
12	188.255	691,183.86	88.14
13	187.153	687,137.55	87.63
14	186.050	683,091.24	87.11
รวม	2,704.99	9,931,491.80	1,266.48

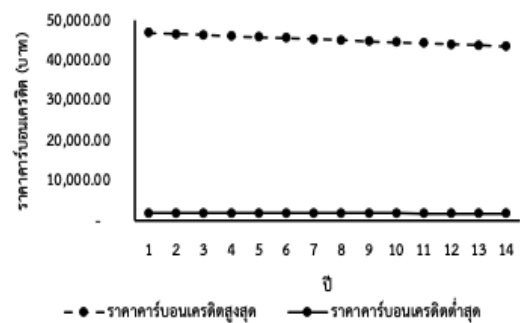
ผลลัพธ์การประเมินผลตอบแทนของคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 14 ปี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การประเมินผลตอบแทนของคาร์บอนเครดิตระยะเวลา 14 ปี

ปี	มูลค่าคาร์บอนเครดิต (บาท)		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
1	2,017.07	46,908.49	4,455.37
2	2,005.97	46,650.49	4,430.86
3	1,994.88	46,392.50	4,406.36
4	1,983.78	46,134.50	4,381.85
5	1,972.69	45,876.50	4,357.35
6	1,961.60	45,618.51	4,332.85
7	1,950.50	45,360.51	4,308.34
8	1,939.41	45,102.51	4,283.84
9	1,928.31	44,844.52	4,259.33
10	1,917.22	44,586.52	4,234.83
11	1,906.13	44,328.52	4,210.32

12	1,895.03	44,070.53	4,185.82
13	1,883.94	43,812.53	4,161.31
14	1,872.84	43,554.53	4,136.81
รวม	27,229.37	633,241.16	60,145.25

จากตารางที่ 2 มูลค่าคาร์บอนเครดิตต่ำสุด สูงสุด และเฉลี่ยรวม 14 ปี มีมูลค่า 27,229.37 บาท 633,241.16 บาท และ 60,145.25 บาท ตามลำดับการเปรียบเทียบมูลค่าคาร์บอนเครดิตต่ำสุดและ สูงสุด 14 ปี ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบมูลค่าคาร์บอนเครดิตต่ำสุด และสูงสุด 14 ปี

จากภาพที่ 5 มูลค่าคาร์บอนเครดิตต่ำสุด และสูงสุด ในปี 7 มีมูลค่า 1,950.50 บาท และ 45,360.51 บาท ตามลำดับมูลค่าคาร์บอนเครดิตต่ำสุดและ สูงสุด ในปี 14 มีมูลค่า 1,872.84 บาท และ 43,554.53 บาท ตามลำดับ ผลลัพธ์การประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทนภายในระยะเวลา 25 ปี (ตลอดอายุของโครงการ) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทนภายในระยะเวลา 25 ปี (ตลอดอายุของโครงการ)

กรณี	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)	อัตราผลตอบแทนภายใน (%)
1	246,849.612	10.570%
2	261,300.440	10.604%
3	278,769.139	10.644%
4	582,915.388	11.356%

จากตารางที่ 3 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ใช้อัตราคิดลด 10 % ผลลัพธ์มูลค่าปัจจุบันสุทธิของกรณี 1, 2, 3 และ 4 คือ 246,849.612 บาท, 261,300.440 บาท, 278,769.139 บาท, และ 582,915.388 บาท ตามลำดับ ซึ่งกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเป็นบวก กล่าวคือมูลค่าเงินสดเข้ามากกว่ามูลค่าเงินสดออก (เหมาะสมแก่การลงทุน) ผลลัพธ์อัตราผลตอบแทนภายในของกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 คือ 10.570 %, 10.604 %, 10.644 % และ 11.356 % ตามลำดับ ซึ่งกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเป็นบวกและเป็นเลขสองหลัก กล่าวคือเหมาะสมแก่การลงทุน ผลลัพธ์

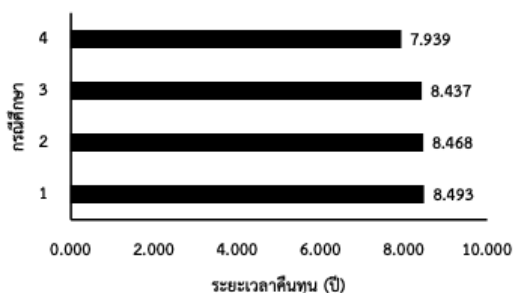
การประเมินอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนและระยะเวลาคืนทุน
ระยะเวลา 25 ปี (ตลอดอายุของโครงการ) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การประเมินอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน
และระยะเวลาคืนทุนระยะเวลา 25 ปี (ตลอดอายุของโครงการ)

กรณี	อัตราส่วนผลตอบแทน ต่อต้นทุน	ระยะเวลาคืน ทุน (ปี)
1	2.771	8.493
2	2.775	8.468
3	2.781	8.437
4	2.879	7.939

จากตารางที่ 3 และ 4 ในปีที่ 1 ถึง 14 กระแสเงินสดนำ
รายได้มาจากค่าประหยัดไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิต ในปี 15 ถึง
25 กระแสเงินสดนำรายได้มาจากค่าประหยัดไฟฟ้าเพียงอย่าง
เดียวโดยไม่มีรายได้จากคาร์บอนเครดิต

ผลลัพธ์อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนของกรณีที่ 1,
2, 3, และ 4 คือ 2.771, 2.775, 2.781 และ 2.879 ตามลำดับ ซึ่ง
กรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่ามากกว่าหนึ่ง กล่าวคือยอมรับในการ
ดำเนินโครงการ การเปรียบเทียบระยะเวลาการคืนทุนของ
โครงการ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบระยะเวลาการคืนทุนของโครงการ

จากภาพที่ 6 ระยะเวลาการคืนทุนของโครงการในกรณีที่ 2
ต่างกับกรณีที่ 1 0.025 ปี คิดเป็นร้อยละ 0.29 ระยะเวลาการคืน
ทุนของโครงการ ในกรณีที่ 3 ต่างกับกรณีที่ 1 0.056 ปี คิดเป็น
ร้อยละ 0.65 ระยะเวลาการคืนทุนของโครงการในกรณีที่ 4 ต่างกับ
กรณีที่ 1 0.554 ปี คิดเป็นร้อยละ 6.52

4. สรุปผล

บทความนี้เสนอการประเมินคาร์บอนเครดิต และการ
ลดระยะเวลาการคืนทุนของโครงการ วิเคราะห์การผลิตพลังงาน
ไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาด้วย
โปรแกรม PVsyst version 7.3.1 และวิเคราะห์การลดระยะเวลา
การคืนทุนด้วยโปรแกรม Excel ประเมินมูลค่าของคาร์บอน
เครดิต 4 เงื่อนไข ได้แก่ ไม่พิจารณาคาร์บอนเครดิต พิจารณาที่
ราคาต่ำสุด (21.50 บาท) ราคาเฉลี่ย (47.49 บาท) และราคา
สูงสุด (500.00 บาท) ผลลัพธ์พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตรา

ผลตอบแทนภายใน และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนของ
กรณีที่ 1, 2, 3, และ 4 เหมาะสมแก่การลงทุน ส่วนระยะเวลา
การคืนทุนของโครงการ เงื่อนไขที่ 4 พิจารณาที่ราคาสูงสุด
สามารถคืนทุนได้เร็วที่สุด

แม้ว่ารายได้จากคาร์บอนเครดิตจะช่วยเพิ่มความคุ้มค่า
ทางเศรษฐศาสตร์และลดระยะเวลาคืนทุนของโครงการระบบ
ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ แต่ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการขึ้น
ทะเบียนโครงการ การทวนสอบ และการรับรองผลการลดก๊าซ
เรือนกระจกภายใต้โครงการ T-VER อาจส่งผลกระทบต่อความ
คุ้มค่าของโครงการขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ซึ่ง
สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ในปริมาณมาก จะมี
ความเหมาะสมและคุ้มค่าต่อการดำเนินโครงการคาร์บอนเครดิต
มากกว่า เนื่องจากสามารถกระจายต้นทุนคงที่ดังกล่าวไปยัง
ปริมาณคาร์บอนเครดิตที่ได้รับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นบทความนี้สามารถเป็นอีกหนึ่งทางเลือกให้แก่ผู้
ลงทุนได้ตัดสินใจเนื่องจากเป็นการสร้างรายได้อีกช่องทางหนึ่ง
และเป็นการประยุกต์ใช้คาร์บอนเครดิตร่วมกับพลังงาน
หมุนเวียน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการต่อยอดในการซื้อขายพลังงาน
ไฟฟ้า และการซื้อขายคาร์บอนเครดิตในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและ
ความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้
สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

6. อ้างอิง

- [1] Rugthaicharoencheep N, Ruangsap N, Nedphokaew S. Shortening the Payback Period of Greenhouse Gas Reduction Benefits from Photovoltaic Rooftop Systems. *Energies*. 2024; 17(23): 6159.
- [2] Naskar R, Ghosh S, Mandal R. Estimation & Analysis of a 5 KWP Solar Photovoltaic Power Plant at JIS College of Engineering, Kalyani. in *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;4(2):223-230.
- [3] Hermawan K. Design analysis of photovoltaic systems as renewable energy resource in airport. 2017 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). 2017 October 18-19; Semarang, Indonesia. 2018. p. 113-116.

- [4] Charlansut N, Ruangsap N, Rugthaicharoencheep N. An Assessment of a Return from Carbon Credit of a Hybrid Solar Rooftop System. 2023 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). 2023 October 18-20; Phrachuap Khirikhan, Thailand. 2024. p. 80-83.
- [5] ระเบียบคณะกรรมการองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกว่าด้วยหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการพิจารณาโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (T-VER) พ.ศ. 2566 [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มกราคม 2569]. จาก: <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/download-tver/65-rules-and-regulations.html>.
- [6] Brander M. Greenhouse Gases, CO₂, CO₂e, and Carbon: What Do All These Terms Mean?. Ecometrica, August 2012.
- [7] Boonthienthong M, Ruangsap N, Charlansut N, Rugthaicharoencheep N. The Economic Analysis Consider Carbon Credit from Hybrid Solar Rooftop System. 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 2023 December 06-09; Chiang Mai, Thailand. 2024.
- [8] Nelson J, Gambhir A, Daukes NE. Solar power for CO₂ mitigation. in Grantham Institute for Climate Change Imperial College London Briefing paper No 11, 2014.
- [9] ระเบียบวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (T-VER-S-METH-01-01) [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มกราคม 2569]. จาก: <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-method/t-ver-classify-methodology/t-ver-methodology1/item/3554-electricity-generation-from-renewable-energy.html>.
- [10] AMS-I.D.: Grid connected renewable electricity generation Version 19.0. [Internet]. [cited 2026 January 12]. Available from: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/VJI9AX539D9MLOPXN2AY9UR1N4IYGD>.
- [11] ACM0002: Grid-connected electricity generation from renewable sources Version 22.0 [Internet]. [cited 2026 January 12]. Available from: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/XB1TX7TAZ6SLWM9B7BC67THHVD16JV>.
- [12] ราคาซื้อขาย TVERs แยกตามประเภทโครงการ [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 14 มกราคม 2569]. จาก: <https://carbonmarket.tgo.or.th/>

การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันเพื่อชุดโอกาสพิเศษ Oil Repellency Finishing for Special Occasion Wear

ภัทรา คุ่มเขต

Pattra Kumkhet

สาขาวิชาการออกแบบแฟชั่น คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
Department of Fashion Design Program. Home Economic Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep,
Bangkok Thailand

* Corresponding Author: Email: Pattra.k@mail.rmutk.ac.th

Received: 25-01-2026 Revised: 15-06-2026 Accepted: 15-06-2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติการสะท้อนน้ำมันของผ้าไหมและผ้าซาติน ก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน เพื่อประเมินสมบัติของผ้าซาตินในการนำมาใช้ทดแทนผ้าไหมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและตัดเย็บชุดโอกาสพิเศษ โดยมุ่งเน้นการเพิ่มสมบัติการใช้งานและความสะดวกในการดูแลรักษา วิธีการวิจัยประกอบด้วย การศึกษาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสมบัติของผ้าไหมและผ้าซาติน รวมถึงการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักผ้า ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพการสะท้อนน้ำมันของผ้า ทั้งสองชนิดก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จ และนำผ้าที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จมาใช้ในการออกแบบและตัดเย็บชุดตัวอย่าง ผลการวิจัยพบว่า หลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน ผ้าซาตินมีน้ำหนักผ้าเพิ่มขึ้นจาก 194.44 เป็น 206.23 กรัมต่อตารางเมตร ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงพบว่า ผ้าซาตินมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงในแนวเส้นด้ายยืนและแนวเส้นด้ายพุ่งเพิ่มขึ้นจาก 1,418.04 และ 1,537.05 นิวตัน เป็น 1,555.67 และ 1,817.99 นิวตัน ตามลำดับ ขณะที่ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดพบว่า ผ้าซาตินมีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดในแนวเส้นด้ายยืนและแนวเส้นด้ายพุ่งเพิ่มขึ้นจาก 36.95 และ 49.57 นิวตัน เป็น 102.95 และ 110.91 นิวตัน ตามลำดับ ในด้านสมบัติการสะท้อนน้ำมัน พบว่า ผ้าไหมและผ้าซาตินก่อนการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันไม่สามารถสะท้อนน้ำมันได้ โดยมีค่าเกรดการสะท้อนน้ำมันเท่ากับ 0 แต่หลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน ผ้าซาตินมีค่าเกรดการสะท้อนน้ำมันเท่ากับ 5.5 ซึ่งสูงกว่าผ้าไหมที่มีค่าเกรดการสะท้อนน้ำมันเท่ากับ 5 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันสามารถเพิ่มสมบัติการใช้งานของผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผ้าซาตินมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ทดแทนผ้าไหมสำหรับการออกแบบและตัดเย็บชุดโอกาสพิเศษ เนื่องจากมีลักษณะปรากฏใกล้เคียงกันและดูแลรักษาได้สะดวกยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ผ้าไหม ผ้าซาติน การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน ชุดโอกาสพิเศษ

ABSTRACT

This research aimed to test and analyze the physical properties and oil repellency of silk and satin fabrics before and after oil repellency finishing in order to evaluate the potential of satin fabric as a substitute for silk for applications in the design and construction of special occasion garments, with an emphasis on enhancing functional performance and ease of maintenance. The research methodology involved studying fundamental information on the properties of silk and satin fabrics and oil repellency finishing technology, followed by testing fabric weight, tensile strength, tear strength, and oil repellency performance of both fabrics before and after finishing. The finished fabrics were then applied to the design and construction of a sample garment. The results showed that after oil repellency finishing, the fabric weight of satin increased from 194.44 to 206.23 g/m². In addition, tensile strength in the warp and weft directions increased from 1,418.04 and 1,537.05 N to 1,555.67 and 1,817.99 N, respectively, while tear strength increased from 36.95 and 49.57 N to 102.95 and 110.91 N, respectively. Regarding oil repellency, both silk and satin fabrics before finishing exhibited an oil repellency grade of 0, indicating no oil repellency. However, after finishing, satin achieved an oil repellency grade of 5.5, which was higher than that of silk, with a grade of 5. The findings demonstrate that oil repellency finishing effectively enhances the functional properties of fabrics, and satin fabric

exhibits suitable properties for use as a substitute for silk in the design and construction of special occasion garments due to its similar appearance and enhanced ease of maintenance.

Keyword: Silk, satin, oil repelling finishing, special occasion costumes

1. บทนำ

การจัดงานสังสรรค์และงานเฉลิมฉลองในสังคมไทย ทั้งในระดับเทศกาลและกิจกรรมส่วนบุคคล เช่น งานแต่งงาน งานรับปริญญา และงานเลี้ยงบริษัท เป็นกิจกรรมที่ต้องการการแต่งกายที่เหมาะสมกับโอกาส โดยเฉพาะ ชุดโอกาสพิเศษ ซึ่งมักออกแบบให้มีความสวยงามโดดเด่น และสะท้อนภาพลักษณ์ของผู้สวมใส่ ผ้าที่นิยมใช้ในการตัดเย็บชุดประเภทนี้ ได้แก่ ผ้าไหมและผ้าซาติน เนื่องจากมีลักษณะผิวมันเงา เนื้อผ้าละเอียด และมีความโดดเด่นสวยงาม [1,2]

ลักษณะการใช้งานชุดโอกาสพิเศษ โดยเฉพาะในงานเลี้ยงแบบcocktailหรือบุฟเฟ่ต์ ซึ่งมีการเคลื่อนไหวและบริโภคอาหารหรือเครื่องดื่มในระหว่างงาน เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวผ้า เป็นคราบที่ทำความสะอาดได้ยากและอาจก่อให้เกิดความเสียหายถาวรต่อเนื้อผ้า ส่งผลให้ต้นทุนในการดูแลรักษาสูงขึ้น โดยเฉพาะผ้าไหมซึ่งมีราคาสูงและมีข้อจำกัดด้านการทำความสะอาด [3]

การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ (textile finishing) จึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาสมบัติการใช้งานของผ้าให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์เฉพาะด้าน หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องคือ การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน (oil repellency finishing) ซึ่งใช้การลดพลังงานพื้นผิวของเส้นใย ทำให้ของเหลวประเภทน้ำมันไม่สามารถแผ่กระจายหรือซึมเข้าสู่โครงสร้างผ้าได้ง่าย [4,5] กระบวนการดังกล่าวไม่เพียงช่วยลดการเกิดคราบ แต่ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทออีกด้วย

งานวิจัยร่วมสมัยด้านวิทยาศาสตร์สิ่งทอรายงานว่า การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันสามารถส่งผลต่อ สมบัติทางกายภาพของผ้า เช่น น้ำหนักผ้า ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการทดสอบและประเมินอย่างเป็นระบบก่อนนำไปใช้งานจริง [6–8] โดยเฉพาะในผ้ากลุ่มแฟชั่นและชุดโอกาสพิเศษ ซึ่งต้องคงไว้ซึ่งทั้งสมรรถนะการใช้งานและความสวยงาม

ในปัจจุบัน แนวโน้มการวิจัยด้านการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันมุ่งเน้นไปที่การพัฒนากระบวนการที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งานเชิงพาณิชย์ รวมถึงการเลือกใช้วัสดุและผ้าที่มีต้นทุนต่ำกว่าแต่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับวัสดุระดับสูง [9] ผ้าซาตินจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับผ้าไหม เนื่องจากมีลักษณะผิวสัมผัสและความเงาคล้ายคลึงกัน แต่มีต้นทุนการผลิตและการดูแลรักษาที่ต่ำกว่า [2,10]

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันบนผ้าไหมและผ้าซาติน โดยนำมาเปรียบเทียบเพื่อประเมินสมบัติของผ้าซาตินนำมาใช้ทดแทนผ้า

ไหมสำหรับตัดเย็บชุดโอกาสพิเศษ เนื่องจากผ้าซาตินมีลักษณะคล้ายผ้าไหม แต่มีต้นทุนต่ำกว่า ทั้งนี้ ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแฟชั่นและธุรกิจเช่าชุด เพื่อช่วยลดต้นทุนวัสดุ เพิ่มความสะดวกในการดูแลรักษา และลดโอกาสการเกิดคราบสกปรกจากการใช้งานได้อย่างเหมาะสม

2. วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการ

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

2.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน คือ ผ้าไหม และผ้าซาติน

2.1.2 สารตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน Starquard ROF

2.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- เครื่องทดสอบความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด

- เครื่องทดสอบหาน้ำหนักของผืนผ้า

- อุปกรณ์ทดสอบหาจำนวนเส้นด้ายต่อหนึ่งหน่วยความยาว

- อุปกรณ์ทดสอบหาขนาดเส้นด้าย

- สารเคมีสำหรับทดสอบการสะท้อนน้ำมัน

- อุปกรณ์ทดสอบสมบัติสะท้อนน้ำมัน

2.2 วิธีการ

2.2.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและการสะท้อนน้ำมันของผ้าก่อนตกแต่งสำเร็จ

- สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับผ้า การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน วิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสาร โดยค้นคว้าเกี่ยวกับ โครงสร้างและสมบัติผ้าฝ้าย การทอผ้า การตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน

- น้ำหนักผ้า โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 3776: 2009

- การหาความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึง โดยใช้มาตรฐาน ISO 13934-1: 2013

- การหาความแข็งแรงของผ้าทอต่อการฉีกขาด โดยใช้มาตรฐาน ISO 13937-2: 2000

- การทดสอบประสิทธิภาพการสะท้อนน้ำมัน โดยใช้มาตรฐาน AATCC 118: 2007

2.2.2 ตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันบนผ้า

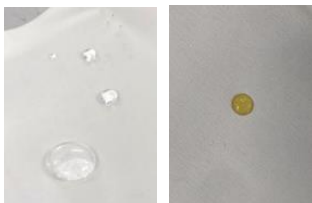
นำผ้าไปผ่านกระบวนการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน โดยใช้สารเคมีตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันประเภทฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งมีชื่อทางการค้า Starquard ROF ในขั้นตอนแรกทำการเตรียมสารเคมีโดยกำหนดความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับผ้า ด้วยการทดสอบกับผ้าตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณสารเคมีสำหรับกระบวนการตกแต่งสำเร็จในเครื่อง จากนั้นนำผ้าเข้าสู่กระบวนการตกแต่งสำเร็จด้วยวิธี การจุ่มปีอัดสารเคมีเข้าสู่เนื้อผ้า (Padding method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ

โดยดำเนินการในเครื่องบีบอัดด้วยลูกกลิ้ง (padder) ให้ผ้าผ่านลงในอ่างที่มีสารเคมีละลายอยู่ตามความเข้มข้นที่กำหนด ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ใช้สารตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน Starquard ROF ในอัตราส่วน 100 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร



ภาพที่ 1 ทดลองสูตรกับผ้าตัวอย่าง

โดยการบีบอัดด้วยลูกกลิ้งจะใช้เปอร์เซ็นต์การบีบอัด (% Pick up) 80 เปอร์เซ็นต์ โดยสารเคมีจะเข้าไปอยู่ในผ้าในปริมาณที่ต้องการ จากนั้นจึงนำผ้าไปทำการอบแห้งด้วยเครื่อง Stenter ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 1 นาที 40 นาที



ภาพที่ 2 ทดลองหยดของเหลวบนผ้าตัวอย่าง

2.2.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและการสะท้อนน้ำมันของผ้าหลังผ่านการตกแต่งสำเร็จ โดยนำผ้าที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จไปทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในข้อ 2.2.1

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการนำการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันมาพัฒนาผ้า โดยการนำผ้ามาทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพการสะท้อนน้ำมันวิเคราะห์ผ้าเปรียบเทียบก่อนและหลังตกแต่งสำเร็จ นำผ้าตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันมาตัดเย็บชุดตัวอย่าง

3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติการสะท้อนน้ำมันของผ้าไหมและผ้าซาติน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการหาน้ำหนักผ้าของผ้าไหมและผ้าซาตินก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน (มาตรฐาน ASTM D 3776 : 2009)

ชนิดผ้า	ก่อนตกแต่ง	หลังตกแต่ง
	น้ำหนักผ้า (กรัมต่อตารางเมตร)	น้ำหนักผ้า (กรัมต่อตารางเมตร)
ผ้าไหม	69.23	72.01
ผ้าซาติน	194.44	206.23

จากตารางที่ 1 พบว่า ผ้าไหมมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจาก 69.23 เป็น 72.01 กรัมต่อตารางเมตร ขณะที่ผ้าซาตินมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจาก 194.44 เป็น 206.23 กรัมต่อตารางเมตร ภายหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน แสดงให้เห็นว่าการตกแต่งสำเร็จด้วยสารสะท้อนน้ำมันส่งผลให้เกิดการเพิ่มมวลของผ้า เนื่องจากการยึดเกาะของสารเคมีตกแต่งบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของกระบวนการตกแต่งสำเร็จแบบจุ่มบีบอัด (padding method) ที่ทำให้สารเคมีแทรกซึมและเคลือบอยู่บนโครงสร้างผ้า [11,12] โดยผ้าซาตินมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมากกว่าผ้าไหม เพราะมีโครงสร้างการทอและความหนาแน่นของเส้นใยที่เอื้อต่อการยึดเกาะของสารตกแต่งมากกว่า

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาความแข็งแรงต่อแรงดึงของผ้าไหมและผ้าซาตินก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน (มาตรฐาน ISO 13934-1 : 2013(E))

ชนิดผ้า	ก่อนตกแต่ง		หลังตกแต่ง	
	แนวเส้นด้ายยืน (นิวตัน)	แนวเส้นด้ายพุ่ง (นิวตัน)	แนวเส้นด้ายยืน (นิวตัน)	แนวเส้นด้ายพุ่ง (นิวตัน)
ผ้าไหม	165.39	328.18	177.22	334.29
ผ้าซาติน	1,418.04	1,537.05	1,555.67	1,817.99

จากตารางที่ 2 พบว่า ภายหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน ผ้าไหมมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นทั้งแนวเส้นด้ายยืนและแนวเส้นด้ายพุ่ง จาก 165.39 และ 328.18 นิวตัน เป็น 177.22 และ 334.29 นิวตัน ตามลำดับ ส่วนผ้าซาตินมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จาก 1,418.04 และ 1,537.05 นิวตัน เป็น 1,555.67 และ 1,817.99 นิวตัน ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าสารตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันสามารถช่วยเสริมความแข็งแรงของผ้าได้ โดยทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดประสานระหว่างเส้นใย ลดการเคลื่อนตัวของเส้นด้ายภายใต้แรงดึง [2] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอที่รายงานว่าการเคลือบผิวเส้นใยด้วยสารฟลูออโรคาร์บอนสามารถเพิ่มความคงทนเชิงกลของผ้าได้โดยไม่ทำลายโครงสร้างหลัก [14]

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมและผ้าซาตินก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน (มาตรฐาน ISO 13937-2 : 2000(E))

ชนิดผ้า	ก่อนตกแต่ง		หลังตกแต่ง	
	แนวเส้นด้ายยืน (นิวตัน)	แนวเส้นด้ายพุ่ง (นิวตัน)	แนวเส้นด้ายยืน (นิวตัน)	แนวเส้นด้ายพุ่ง (นิวตัน)
ผ้าไหม	12.14	30.31	13.18	33.14
ผ้าซาติน	36.95	49.57	102.95	110.91

จากตารางที่ 3 พบว่า ผ้าไหมมีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการตกแต่งสำเร็จ ขณะที่ผ้าซาตินมีการเพิ่มขึ้น โดยแนวเส้นด้ายยืนเพิ่มจาก 36.95 เป็น 102.95 นิวตัน และแนวเส้นด้ายพุ่งเพิ่มจาก 49.57 เป็น 110.91 นิวตัน ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันช่วยลดการลามของรอยฉีกขาด สารเคมีที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใยช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นด้าย [15] ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีด้านโครงสร้างผ้าและงานวิจัยที่ระบุว่าผ้าที่มีการเคลือบผิวอย่างสม่ำเสมอจะมีความต้านทานต่อแรงฉีกขาดสูงขึ้น [16]

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติการสะท้อนน้ำมันของผ้าไหมและผ้าซาตินก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน (มาตรฐาน AATCC 118 : 2007)

ชนิดผ้า	ก่อนตกแต่ง	หลังตกแต่ง
ผ้าไหม	0.0	5
ผ้าซาติน	0.0	5.5

จากตารางที่ 4 พบว่า ผ้าไหมและผ้าซาตินก่อนการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันมีค่าเกรดการสะท้อนน้ำมันเท่ากับ 0 คือไม่สามารถสะท้อนน้ำมันได้ หลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน ผ้าซาตินมีค่าเกรดการสะท้อนน้ำมัน 5.5 ขณะที่ผ้าไหมมีค่าเกรด 5 แสดงให้เห็นว่าผ้าทั้งสองชนิดมีสมบัติในการสะท้อนน้ำมันในระดับดี โดยผ้าซาตินมีสมบัติสูงกว่า ผลดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกของสารฟลูออโรคาร์บอนที่ช่วยลดพลังงานพื้นผิวของเส้นใยทำให้น้ำมันไม่สามารถแผ่กระจายหรือซึมเข้าสู่ผ้าได้ง่าย [17]

3.2 การออกแบบและการตัดเย็บชุดตัวอย่าง ผ้าซาตินที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน นำมาออกแบบและตัดเย็บเป็นชุดโอกาสพิเศษ โดยยังคงความงามและความเหมาะสมต่อการใช้งาน สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติการสะท้อนน้ำมันของผ้าที่ดีขึ้น



ภาพที่ 3 ชุดตัวอย่าง

4. สรุปผลการทดลอง

ผลของสมบัติทางกายภาพของผ้าหลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน พบว่า ผ้าไหมและผ้าซาตินมีน้ำหนักผ้าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะของสารเคมีตกแต่งบนพื้นผิวเส้นใย โดยผ้าซาตินมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมากกว่าผ้าไหม ซึ่งสะท้อนถึงโครงสร้างผ้าและความหนาแน่นของเส้นใยที่เอื้อต่อการเคลือบสารตกแต่ง ในด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด พบว่าผ้าทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหลังการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะผ้าซาตินที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในแนวเส้นด้ายยืนและแนวเส้นด้ายพุ่ง แสดงให้เห็นว่าสารสะท้อนน้ำมันมีบทบาทช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเส้นด้าย ส่งผลให้โครงสร้างผ้ามีความคงทนขึ้น

ผลของประสิทธิภาพการสะท้อนน้ำมันของผ้าก่อนการตกแต่งสำเร็จ พบว่า ผ้าไหมและผ้าซาตินไม่สามารถสะท้อนน้ำมันได้ แต่หลังการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมัน ผ้าทั้งสองชนิดมีค่าเกรดการสะท้อนน้ำมันอยู่ในระดับดี โดยผ้าซาตินมีค่าเกรดสูงกว่าผ้าไหม แสดงให้เห็นว่าสารตกแต่งสามารถลดพลังงานพื้นผิวของเส้นใยทำให้น้ำมันไม่สามารถซึมเข้าสู่ผ้าได้ง่าย และผ้าซาตินมีความเหมาะสมต่อการพัฒนาผ้าสะท้อนน้ำมันสำหรับงานเครื่องแต่งกายมากกว่า

การประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ พบว่า ผ้าซาตินที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จสะท้อนน้ำมันสามารถนำมาออกแบบและตัดเย็บเป็นชุดโอกาสพิเศษได้ โดยยังคงความสวยงามและเพิ่มสมบัติการใช้งานของผ้า งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นแนวทางการพัฒนาผ้าซาตินให้สามารถใช้ทดแทนผ้าไหมในงานออกแบบเครื่องแต่งกาย ช่วยลดต้นทุนวัสดุและเพิ่มความสะดวกในการดูแลรักษา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแฟชั่นและธุรกิจเข้าชุดได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่สนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gulrajani ML. Silk: Production, Properties and Processing. Cambridge: Woodhead Publishing; 2021.
- [2] Kadolph SJ. Textiles. 12th ed. New York: Pearson Education; 2020.
- [3] Broadbent AD. Basic Principles of Textile Coloration. Bradford: Society of Dyers and Colourists; 2020.
- [4] Schindler WD, Hauser PJ. Chemical Finishing of Textiles. Cambridge: Woodhead Publishing; 2021.
- [5] Holme I. Innovative technologies for water- and oil-repellent textiles. Textile Progress. 2021;53(2):69–121.
- [6] Wang X, et al. Recent advances in oil-repellent finishing of textile materials. Journal of Industrial Textiles. 2022;51(6):894–912.
- [7] Rungruangkitkrai N, et al. Water and oil repellent coatings for textile substrates. Polymers. 2024; 16(19):2790.
- [8] Shabanian S. Durable oil-repellent textile finishes without long-chain fluorocarbons. Journal of Textile Science and Engineering. 2023;13(4):1–9.
- [9] Paul R. Functional Finishes for Textiles: Improving Comfort, Performance and Protection. Cambridge: Woodhead Publishing; 2022.
- [10] Booth JE. Principles of Textile Testing. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2020.
- [11] Schindler WD, Hauser PJ. Chemical finishing of textiles. Cambridge: Woodhead Publishing; 2004.
- [12] Gulrajani ML. Finishing of textiles. New Delhi: Woodhead Publishing India; 2018.
- [13] Wang X, Hu J. Effect of fluorocarbon finishing on mechanical properties of fabrics. Text Res J. 2021;91(3–4):345–356.
- [14] Saville BP. Physical testing of textiles. Cambridge: Woodhead Publishing; 2020.
- [15] Das A, Ishtiaque SM. Influence of fabric structure on tear strength. J Text Inst. 2020;111(5):699–708.
- [16] AATCC. Technical Manual. Research Triangle Park: AATCC; 2019.
- [17] Zhang Y, Liu L. Oil repellency finishing of fabrics using fluorocarbon compounds. J Ind Text. 2022;52(1):45–60.

การพัฒนาดีซีออปติไมเซอร์ด้วยวงจรฟลายแบคสองสวิตช์โดยใช้หลักการแปลงผันกำลังบางส่วน

Development of a DC Optimizer Using a Two-Switch Flyback Converter with Partial Power Conversion

โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีต¹ และ มณฑนา รังสิโยภาส^{2*}

Chokchai Chuenwattanapraniti¹ and Montana Rungsiyopas^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

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

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

*Corresponding Author: Email: montana@eng.buu.ac.th

Received: 04-05-2026 Revised: 16-06-2026 Accepted: 16-06-2026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาดีซีออปติไมเซอร์ (DC Optimizer) ที่ใช้ติดตั้งกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแก้ปัญหาลดลงของกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความไม่เท่าเทียมกันในสภาวะการทำงานของโมดูลที่ต่ออนุกรมกันในสตริง การประยุกต์ใช้โครงสร้างวงจรฟลายแบคชนิดสองสวิตช์ (Two-Switch Flyback) ร่วมกับเทคนิคการแปลงผันกำลังบางส่วน (Partial Power Conversion) ที่จัดการเฉพาะส่วนต่างของกำลังไฟฟ้าแทนที่จะเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด ส่งผลให้ได้ดีซีออปติไมเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและลดขนาดของวงจรภาคกำลังลงได้ แนวทางในการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับวงจรภาคกำลัง แบบจำลองของระบบ และการออกแบบระบบควบคุมถูกนำเสนอต้นแบบออปติไมเซอร์ถูกทดสอบในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน พบว่าที่อัตราส่วนแรงดันอินพุตต่อแรงดันเอาต์พุตระหว่าง 0.55 ถึง 0.75 กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรฟลายแบคมีค่าเพียง 30-50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และส่วนที่เหลือถูกป้อนตรงไปยังด้านเอาต์พุต ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมของระบบสูงขึ้น 12-15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพของวงจร ฟลายแบคและยังคงความสามารถในติดตามจุดกำลังสูงสุดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: ดีซีออปติไมเซอร์ วงจรฟลายแบคชนิดสองสวิตช์ การแปลงผันกำลังบางส่วน เซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

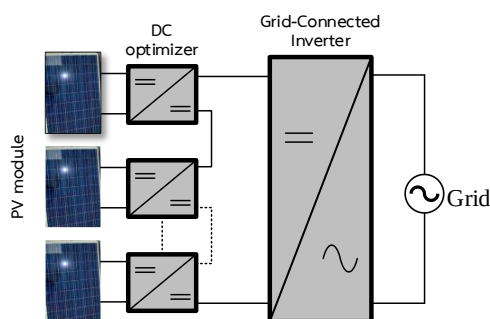
This article presents the development of a DC Optimizer designed for installation on solar cell modules to solve the problem of power reduction caused by module mismatch under series-connected string configurations. The approach applies to a two-switch flyback converter structure combined with the Partial Power Conversion technique, which processes only the power difference rather than the total generated power. As a result, the proposed optimizer achieves high efficiency while significantly reducing the size of the power circuit. The appropriate design guidelines for the power circuit, system modeling, and control system design are presented. The optimizer prototype was tested under various operating conditions. The results indicated that at an input-to-output voltage ratio ranging from 0.55 to 0.75, the power processed through the flyback circuit accounted for only 30-50% of the total power generated by the PV module, while the remainder was transferred directly to the output. Consequently, the overall system efficiency increased by 12-15% compared to the converter's efficiency, maintaining the ability to accurately track the maximum power point of the photovoltaic modules.

Keywords: DC Optimizer, Two-Switch Flyback Converter, Partial Power Conversion, Solar Cell.

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อกับกริด (Grid-Connected PV System) โดยทั่วไปจะใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์หลายโมดูลเชื่อมต่อกันเป็นสตริง (Strings) เพื่อให้ได้ระดับแรงดันสูงเพียงพอสำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่มักเกิดขึ้นโดยเฉพาะในการติดตั้งบนหลังคาที่ปกคลุมด้วยเงา คือ สภาวะความไม่สอดคล้องกันของโมดูล (Module Mismatch Conditions) ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดทางกายภาพของพื้นที่ติดตั้ง เช่น พื้นที่หลังคาที่มีจำกัด เงาจากต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง หรือสภาพแวดล้อมโดยรอบ และฝุ่นละออง ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) ที่แต่ละโมดูลได้รับมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งลดทอนประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าของทั้งสตริงลงอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อโมดูลบางส่วนถูกตัดออกจากระบบเนื่องจากการนำกระแสของไดโอดบายพาส (Bypass Diode) จนก่อให้เกิดจุดกำลังสูงสุดหลายจุด และอาจทำให้ระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking หรือ MPPT) ทำงานผิดพลาดได้ [1], [2]

การใช้อินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก (Micro Inverter) ติดตั้งไว้ที่ด้านหลังแต่ละโมดูลช่วยลดผลกระทบจากความไม่สมดุลระหว่างโมดูลได้ เนื่องจากการแปลงผันไฟฟ้าของแต่ละโมดูลทำงานเป็นอิสระจากกัน [3], [4] แต่มีข้อเสียคือ ต้นทุนระบบจะสูงกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์แบบสตริงอยู่ประมาณ 15-20% ทำให้ระยะเวลาคืนทุนนานขึ้น [5] และวงจรอาจมีอายุการใช้งานสั้นลงภายใต้สภาวะการทำงานได้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง [6], [7] การใช้วงจรช่วยถ่ายโอนพลังงานระหว่างโมดูลที่เชื่อมต่อกันเพื่อปรับความสมดุลแรงดัน (Voltage Equalizer) [8], [9] สามารถช่วยแก้ปัญหาความแตกต่างกันของสภาวะการทำงานแต่ละโมดูลได้ แต่วงจรส่วนใหญ่มีความซับซ้อนในการเชื่อมต่องจรระหว่างโมดูลต่อโมดูล ทำให้ไม่สะดวกในการติดตั้ง และต้องมีการสื่อสารระหว่างโมดูลกับหน่วยประมวลผลกลาง



ภาพที่ 1 ระบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อกับกริด (grid-connected PV system) ที่มีการติดตั้งออปติไมเซอร์

การใช้ดีซีออปติไมเซอร์ (DC Optimizer) [10]-[12] ดังภาพที่ 1 เป็นอีกทางเลือกที่ได้รับความนิยม โดยออปติไมเซอร์เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่ควบคุมการแปลงผันพลังงานและติดตามจุดที่ทำให้กำลังสูงสุดของแต่ละโมดูลเพื่อส่งต่อพลังงานไปยังอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้พัฒนาขึ้นทำให้แผงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าต่อโมดูลมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการใช้ออปติไมเซอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้การแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเต็มพิกัด (Full Power Conversion) [13] จะทำให้วงจรภาคกำลังมีขนาดใหญ่ (ราคาสูง) นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดปัญหาด้านการจัดการความร้อน (Thermal Management) อันเนื่องมาจากค่าความสูญเสียภายในวงจรที่สูงขณะทำงาน

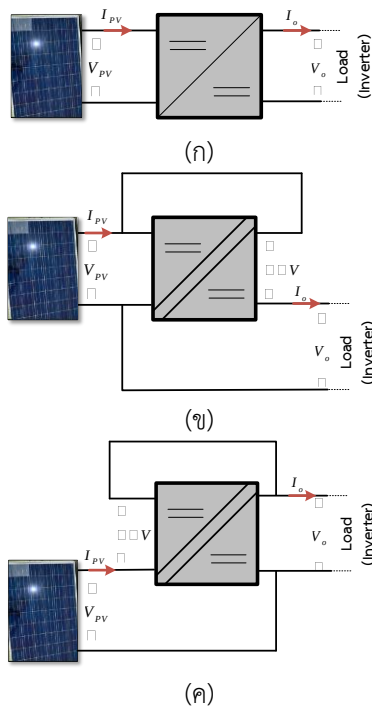
บทความนี้นำเสนอการพัฒนาดีซีออปติไมเซอร์โดยการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลายแบคสองสวิตช์ (Two-Switch Flyback Topology) ร่วมกับเทคนิคการแปลงผันกำลังบางส่วน (Partial Power Conversion) ซึ่งจะช่วยลดพิกัด (ขนาด) วงจรภาคกำลังลงได้ และยังช่วยยกระดับประสิทธิภาพของออปติไมเซอร์ให้สูงขึ้น

2. การแปลงผันกำลังบางส่วน

เทคนิคการแปลงผันกำลังไฟฟ้าบางส่วนเป็นรูปแบบการเชื่อมต่อพิเศษระหว่างด้านแหล่งจ่าย (อินพุต) กับโหลด (เอาต์พุต) ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแตกต่างจากการแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเต็มรูปแบบทั่วไปที่แสดงในภาพที่ 1(ก) เทคนิคดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน อาทิ ระบบปรับสมดุลแรงดันแบตเตอรี่ (Battery Equalizers) ยานอวกาศ และเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Systems) [14], [15] รูปแบบการต่อวงจรของระบบแปลงผันกำลังบางส่วน สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะ [16] ดังภาพที่ 2 (ข) และ (ค) ได้แก่

(1) โครงสร้างแบบอินพุตขนาน-เอาต์พุตอนุกรม (Input-Parallel-Output-Series: IPOS) แหล่งจ่าย (โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์) ต่อขนานกับด้านหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโหลด (อินเวอร์เตอร์) ต่ออนุกรมกับอีกด้านหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง

(2) โครงสร้างแบบอินพุตอนุกรม-เอาต์พุตขนาน (Input-Series-Output-Parallel: ISOP) แหล่งจ่ายต่ออนุกรมกับด้านหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโหลดต่อขนานกับอีกด้านหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 2 (ก) การแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเต็มพิกัด (ข) การแปลงผันกำลังบางส่วน IPOS และ (ค) การแปลงผันกำลังบางส่วน ISOP

โครงสร้างระบบการแปลงผันกำลังบางส่วน ที่แสดงในภาพที่ 2 (ข) และ (ค) หากเป็นกรณีการยกแรงดัน (Step-up) เครื่องหมายของ DV จะเป็นลบและบวก ตามลำดับ แรงดันเอาต์พุต (V_o) แรงดันโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{PV}) และแรงดันที่ขั้วของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DV) จึงมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$V_o = V_{PV} + DV \quad (1)$$

สำหรับกรณี IPOS เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง สัดส่วนกำลังไฟฟ้า (K_p) ที่ถูกแปลงผันผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DP) ต่อกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$K_p = \frac{DP}{P_o} = 1 - G_v \quad (2)$$

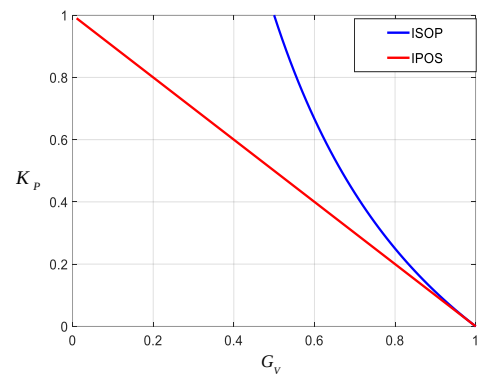
โดย G_v คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันเอาต์พุต ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง สำหรับกรณีการยกแรงดัน

สำหรับกรณี ISOP สัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ถูกแปลงผันผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ

$$K_p = \frac{1}{G_v} - 1 \quad (3)$$

กราฟในภาพที่ 3 แสดงสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องแปลงผันผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเห็นได้ว่า สัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องแปลงผันผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าลดลงเมื่อ G_v มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง โครงสร้าง IPOS กับ ISOP จะพบว่าโครงสร้างแบบ IPOS มีข้อได้เปรียบคือ ค่าสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องแปลงผันผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำกว่ากรณี ISOP เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน G_v เดียวกัน

นอกจากนี้สำหรับโครงสร้างแบบ ISOP เมื่อ G_v มีค่าต่ำกว่า 0.5 จะส่งผลให้ไม่เกิดการทำงานแบบแปลงผันกำลังบางส่วน ($K_p > 1$)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_p กับ G_v

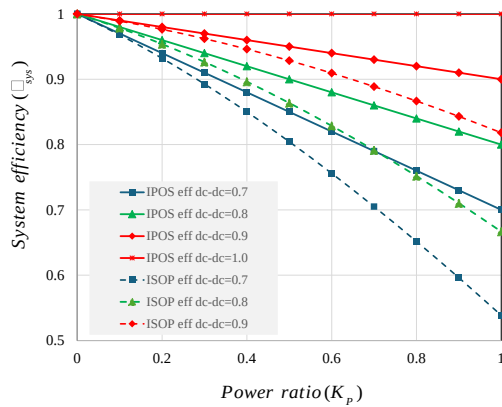
เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการแปลงผันกำลังบางส่วนมีค่าเท่ากับ $h_{dc/dc}$ ประสิทธิภาพรวมของระบบการแปลงผันกำลังบางส่วน (h_{sys}) สำหรับโครงสร้างแบบ IPOS มีค่าเท่ากับ

$$h_{sys} = \frac{P_o}{P_{PV}} = 1 - K_p (1 - h_{dc/dc}) \quad (4)$$

และสำหรับโครงสร้างแบบ ISOP มีค่าเท่ากับ

$$h_{sys} = \frac{1 - K_p^2 (1 - h_{dc/dc})}{1 + K_p (1 - h_{dc/dc})} \quad (5)$$

กราฟในภาพที่ 4 แสดงประสิทธิภาพของระบบแปลงผันกำลังบางส่วน เมื่อวงจรแปลงผันไฟตรงมีค่าประสิทธิภาพต่างๆ กัน ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคแปลงผันกำลังบางส่วนที่มีโครงสร้างแบบ IPOS จะช่วยยกระดับประสิทธิภาพให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการแปลงผันแบบเต็มกำลังได้ตลอดช่วงอัตราส่วน K_p แต่สำหรับโครงสร้างแบบ ISOP ประสิทธิภาพของระบบจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นสำหรับ K_p ค่าต่ำๆ เท่านั้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพและช่วงของการทำงานที่สามารถทำงานแบบแปลงผันกำลังบางส่วนได้ สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างแบบ IPOS มีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับระบบการแปลงผันที่ต้องการยกระดับแรงดัน



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพของระบบแปลงผันกำลังบางส่วนแบบ
ยกระดับแรงดันที่มีโครงสร้างแบบ IPOS และ ISOP

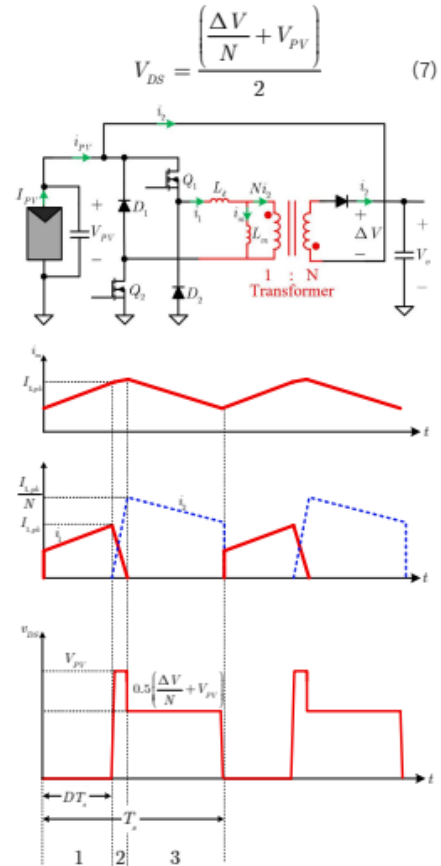
3. หลักการทำงาน และการวิเคราะห์วงจร ฟลายแบค สองสวิตช์ในระบบแปลงผันกำลังบางส่วน

โครงสร้างของระบบแปลงผันกำลังบางส่วนแบบ IPOS ตามภาพที่ 2 (ข) จำเป็นต้องมีการใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า (Isolation) ระหว่างสองด้านของวงจรเมื่อนั้นจะเกิดการลัดวงจรแหล่งจ่ายด้านอินพุต วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดฟลายแบค (Flyback Converter) เป็นวงจรที่มีจำนวนอุปกรณ์น้อย ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำเป็นที่นิยมอย่างมากสำหรับกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 100 วัตต์ ซึ่งขีดจำกัดดังกล่าวเกิดจากปัญหาความเครียดแรงดัน (Voltage Stress) ตกคร่อมสวิตช์สารกึ่งตัวนำด้านปฐมภูมิที่อยู่ในระดับสูง และกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงในวงจรแคลมป์ที่ใช้สำหรับดูดซับพลังงานจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลในหม้อแปลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรฟลายแบคลดลงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อกำลังไฟฟ้าและความถี่การสวิตช์มีค่าสูงขึ้น การเลือกใช้วงจร ฟลายแบคแบบสองสวิตช์ (Two-Switch Flyback Topology) ที่แสดงในภาพที่ 5 เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหานั้นที่กล่าวมาข้างต้น โดยลำดับการทำงานวงจรอธิบายได้ดังนี้

ช่วงที่ 1: มอสเฟต Q_1 และ Q_2 ถูกสั่งให้นำกระแส (Turn ON) พร้อมกัน เกิดกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นทำให้เกิดการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance, L_m)

ช่วงที่ 2: เมื่อมอสเฟตทั้งสองตัวถูกสั่งให้หยุดนำกระแส (Turn OFF) กระแสในตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะระบายไปทางด้านทุติยภูมิ และอีกส่วนหนึ่งไปประจุตัวเก็บประจุแผ่นเอาต์พุตในมอสเฟต (Output Capacitance, C_{oss}) แรงดันตกคร่อม Q_1 และ Q_2 จึงเพิ่มค่าขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถูกจำกัด (Clamp) ให้เท่ากับแรงดันอินพุต (V_{pv}) เมื่อเกิดการนำกระแสของไดโอด D_1 และ D_2 ในช่วงนี้พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลจะคืนกลับไปยังแหล่งจ่ายด้านอินพุตโดยผ่านไดโอดทั้งสอง

ช่วงที่ 3: เมื่อพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลคายกลับคืนแหล่งจ่ายด้านอินพุตจนหมด ไดโอด D_1 และ D_2 จึงหยุดนำกระแส แรงดันตกคร่อม Q_1 และ Q_2 จะเท่ากับ

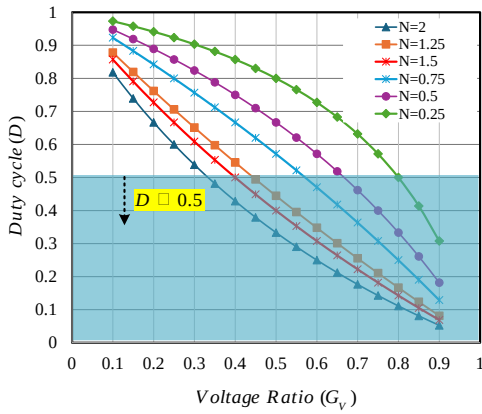


ภาพที่ 5 วงจรแปลงผันฟลายแบคสองสวิตช์ใน
ระบบการแปลงผันกำลังบางส่วน

ในช่วงนี้พลังงานที่สะสมไว้ในตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก ในช่วงที่ 1 จะถูกถ่ายโอนไปยังด้านเอาต์พุตของวงจร ในการออกแบบเพื่อไม่ให้ไดโอดทั้งสองนำกระแส จะต้องให้แรงดันที่สะท้อนจากฝั่งทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิมีค่าไม่เกินแรงดันอินพุต ดังนั้นวัฏจักรงานของการสวิตช์ (Duty Cycle, D) สำหรับวงจรฟลายแบคชนิดสองสวิตช์ต้องไม่เกิน 0.5

เมื่อกำหนดอัตราส่วนแรงดันโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ต่อแรงดันเอาต์พุต (G_v) สัดส่วนรอบของหม้อแปลงฟลายแบค (N) จะต้องถูกเลือกให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้ช่วงการทำงานเกินข้อจำกัดของวัฏจักรงาน ตามเงื่อนไขในสมการที่ (8)

$$D = \frac{1 - G_v}{G_v(N - 1) + 1} < 0.5 \quad (8)$$



ภาพที่ 6 บริเวณการทำงานที่ทำให้ $D < 0.5$

ภาพที่ 6 แสดงบริเวณทำงานที่เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (8) โดยพบว่าเมื่อ N มีค่าสูง ระบบแปลงผันจะสามารถรองรับแรงดันอินพุตได้ในช่วงกว้าง (เมื่อพิจารณาที่แรงดันเอาต์พุตคงที่) อย่างไรก็ตามการเลือกค่า N ที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาจากกำลังสูญเสียในขดลวดหม้อแปลง (P_{cu}) ด้วย

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} = I_{1,rms}^2 R_1 + I_{2,rms}^2 R_2 \quad (9)$$

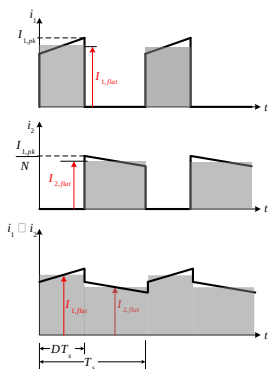
โดย P_{cu1} และ P_{cu2} คือ การสูญเสียที่ขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

R_1 และ R_2 คือ ความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

$I_{1,rms}$ และ $I_{2,rms}$ คือ กระแสที่ไหลในขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

ในกรณีที่การกระเพื่อมของกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มีค่าต่ำ รูปคลื่นกระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสองด้านของหม้อแปลงสามารถประมาณให้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 7 โดยมีขนาดเป็น $I_{1,flat}$ และ $I_{2,flat}$ ตามลำดับ และสัมพันธ์กันตามสัดส่วนรอบของหม้อแปลง

$$I_{2,flat} = \frac{I_{1,flat}}{N} \quad (10)$$



ภาพที่ 7 กระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในวงจรแปลงผันฟลายแบคสองสวิตช์ และการประมาณให้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยม

การประมาณให้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมจะทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสทั้งสองด้านของหม้อแปลง คำนวณได้ดังสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

$$I_{1,rms} = \sqrt{D} I_{1,flat} \quad (11)$$

$$I_{2,rms} = \sqrt{\frac{D}{D'}} \frac{I_{1,rms}}{N} \quad (12)$$

จากสมการที่ (11) และ (12) เมื่อกำหนดให้ค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density, J) ในขดลวดทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิจะสัมพันธ์กันดังนี้

$$R_2 = N^2 \sqrt{\frac{D}{D'}} R_1 \quad (13)$$

เมื่อแทนสมการที่ (11) (12) และ (13) ลงในสมการที่ (9) จะได้สมการกำลังสูญเสียรวมในขดลวดหม้อแปลง ดังสมการที่ (14)

$$P_{cu} = \left(1 + \sqrt{\frac{D'}{D}}\right) P_{cu1} \quad (14)$$

และ P_{cu1} คำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$P_{cu1} = \sqrt{D} I_{1,flat} J r l_1 \quad (15)$$

โดย r คือ ความต้านทานจำเพาะวัสดุที่นำมาพันขดลวด (Resistivity) และ l_1 คือ ความยาวของขดลวดปฐมภูมิ

โครงสร้างการแปลงผันกำลังบางส่วนตามภาพที่ 5 กระแสที่ออกจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{PV}) จะเป็นค่าเฉลี่ยของผลรวมของกระแส i_1 กับ i_2 ดังสมการที่ (16)

$$I_{PV} = D I_{1,flat} + D' I_{2,flat} \quad (16)$$

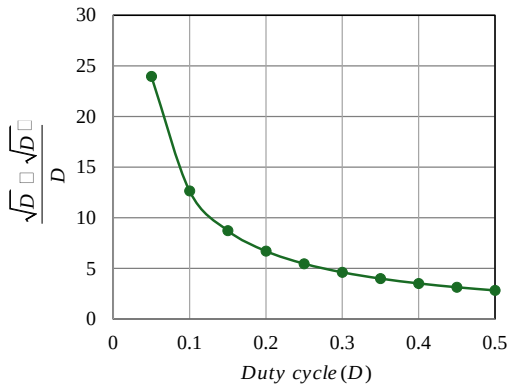
โดยอาศัยสมการที่ (8) (11) และ (12) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_{PV} กับ $I_{1,flat}$ ได้

$$I_{1,flat} = \left(\frac{1-G_v}{D}\right) I_{PV} \quad (17)$$

และสามารถเขียนสมการกำลังสูญเสียรวมในขดลวดหม้อแปลงใหม่ได้ ดังสมการที่ (18)

$$P_{cu} = I_{PV} J \rho l_1 (1-G_v) \left(\frac{\sqrt{D} + \sqrt{D'}}{D}\right) \quad (18)$$

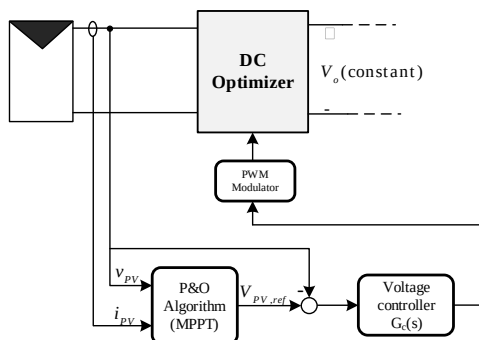
เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (18) ที่สภาวะการทำงาน I_{PV} และ G_V คงที่ค่าหนึ่ง การสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับเทอม $\frac{\sqrt{D} + \sqrt{D}\phi}{D}$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของวัฏจักรงาน โดยภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อวัฏจักรงานมีค่าสูงขึ้น ฟังก์ชันดังกล่าวจะมีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบเมื่อกำหนดค่า G_V แล้วจะต้องเลือกค่า N ที่ทำให้จุดทำงานอยู่บริเวณวัฏจักรงานใกล้เคียงกับ 0.5 ซึ่งจะมีผลให้การสูญเสียในขดลวดมีค่าต่ำ



ภาพที่ 8 กราฟของฟังก์ชัน $\frac{\sqrt{D} + \sqrt{D}\phi}{D}$

4. การติดตามจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT)

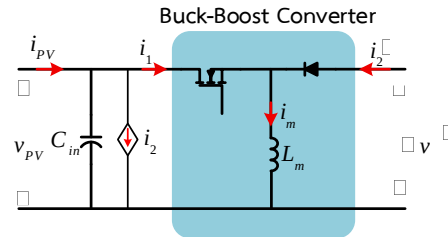
การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แสดงในภาพที่ 9 เป็นวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe, P&O) บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (voltage based MPPT) [15] โดยมีหลักการสำคัญคือ การรบกวนแรงดันไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัลกอริทึมจะดำเนินการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ($V_{PV,ref}$) ในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่อง เพื่อขับเคลื่อนจุดทำงานของระบบให้เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point, MPP)



ภาพที่ 9 การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

การออกแบบตัวควบคุมแรงดัน ($G_c(s)$) จะต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างวัฏจักรงานกับแรงดันไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสำหรับวงจรฟลายแบคที่อยู่ในระบบแปลงผันกำลังบางส่วนตามโครงสร้างในภาพที่ 6 เมื่อทำการถ่ายโอนปริมาณด้านพหุคูณมายังด้านปฐมภูมิสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงวงจรทอน-ทบระดับได้ดังภาพที่ 10 โดย $i_2 = Ni_1$

$$\text{และ } (Dv)^\phi = \frac{(Dv)}{N}$$



ภาพที่ 10 ระบบแปลงผันกำลังบางส่วนเทียบเคียงเป็นวงจรทอน-ทบระดับ

ดังนั้นในส่วนที่เป็นวงจรเทียบเคียงวงจรทอน-ทบระดับจะสามารถแทนด้วยแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small-Signal Equivalent Circuit) ของวงจรทอน-ทบระดับได้ [17] สำหรับด้านอินพุตของวงจรจะวิเคราะห์หาแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของปริมาณด้านเข้าดังสมการที่ (18)

$$\%p_{PV} = C_{in} \frac{d\theta_{pV}}{dt} + \%i_1 + \%i_2 \quad (19)$$

โดยหาเทอมองค์ประกอบขนาดเล็กของ $\langle x(t) \rangle$

โครงสร้างระบบการแปลงผันกำลังบางส่วน ตามภาพที่ 5 แรงดัน v_o มีค่าคงตัวจากการควบคุมของฟีดแบ็กอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น

$$Dv\phi = -\frac{\theta_{pV}}{N} \quad (20)$$

ด้านเอาต์พุตของแบบจำลองจึงแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 11

จากภาพที่ 11 กระแส i_1 , i_2 และ i_m สัมพันธ์กันดังนี้

$$i_1 + i_2 = i_m \quad (21)$$

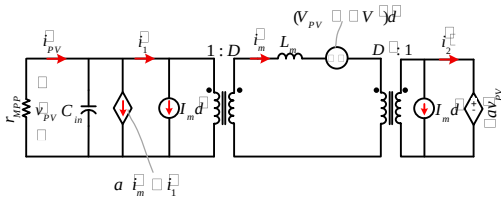
ดังนั้นกระแส i_2 สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$\%i_2 = \frac{(\%i_m - \%i_1)}{N} \quad (22)$$

แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของโมดูลแสงอาทิตย์ที่สภาวะอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{cell}) และความเข้มรังสีดวง

อาทิตย์ที่โมดูลได้รับ (G) คงที่ ขณะทำงานรอบๆ จุดกำลังสูงสุด แทนได้ด้วยความต้านทานสมมูล r_{MPP} [15]

$$r_{MPP} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (23)$$



ภาพที่ 11 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของออปติไมเซอร์ที่นำเสนอ

ภาพที่ 11 แสดงแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของออปติไมเซอร์ที่นำเสนอ โดย x แทนปริมาณ ณ จุดทำงานนิ่งสงบ (Quiescent Point) ของ $\langle x(t) \rangle$

โดยการวิเคราะห์แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กในภาพที่ 11 จะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน ดังสมการที่ (24)

$$G_p(s) = \frac{\tilde{v}_{pv}}{\tilde{d}} = G_{dc} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{\left(\frac{s}{\omega_0} \right)^2 + \frac{s}{Q\omega_0} + 1} \right) \quad (24)$$

โดย

$$G_{dc} = -\frac{(V_{pv} + \Delta V')}{K} \\ \omega_z = \frac{K}{\left(\frac{N-1}{N} \right) \frac{V_{pv} + \Delta V'}{L_m I_m}} \\ \omega_0 = \frac{K}{\sqrt{L_m C_m}} \\ Q = Kr_{pv} \sqrt{\frac{C_m}{L_m}} \\ \text{และ } K = D + \frac{D'}{N}$$

5. การออกแบบและผลการทดสอบ

ต้นแบบดีซีออปติไมเซอร์ (DC Optimizer) บนโครงสร้างพื้นฐานวงจรฟลายแบคสองสวิตช์ถูกออกแบบให้ทำงานกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 และกำหนดให้แรงดันด้านเอาต์พุตคงที่เท่ากับ 60 V

ตารางที่ 1 ค่าพิกัดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

พิกัดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (จำลองโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่โปรแกรมได้)	
กำลังสูงสุด (P_{mpp})	200 W
แรงดันไฟฟ้า ณ จุดกำลังสูงสุด (V_{mpp})	36.9 V
กระแสไฟฟ้า ณ จุดกำลังสูงสุด (I_{mpp})	5.42 A

แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	44.9 V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	5.85 A

จากพิกัดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในตารางที่ 1 และแรงดันเอาต์พุตของออปติไมเซอร์ กำหนดอัตราการแปลงแรงดันให้อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.75 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากกราฟในภาพที่ 6 อัตราส่วนรอบของหม้อแปลงฟลายแบคที่เหมาะสมจึงมีค่าเท่ากับ 1.25 เพื่อจะทำให้วัฏจักรงานของการสวิตช์อยู่ระหว่าง 0.21 ถึง 0.444 (ซึ่งเป็นช่วงที่ใกล้เคียง 0.5 ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3)

เมื่อกำหนดอัตราการแปลงแรงดันและสัดส่วนรอบของหม้อแปลงได้แล้ว เมื่อพิจารณา ณ จุดกำลังสูงสุดของโมดูล (200 วัตต์) จะสามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ต้องแปลงผ่านวงจรฟลายแบคได้ประมาณ 77 วัตต์ จากนั้นทำการออกแบบหม้อแปลงฟลายแบคด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (Area Product Method) [17] จะได้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของวงจรฟลายแบคแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ในวงจรฟลายแบคสองสวิตช์

อัตราการแปลงแรงดัน (G_v)	0.5-0.75
สัดส่วนกำลังไฟฟ้า (K_p)	0.25-0.5
ความถี่สวิตช์	80 kHz
แกนเหล็กเฟอร์ไรท์ EI-40	$B_m=0.12T$
สัดส่วนรอบ ($1:N$)	1 : 1.25
ความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (L_m)	83 μH
กระแสทำแม่เหล็กเฉลี่ย (I_m)	6.25 A
การกระเพื่อมกระแส (DI_m)	30%
ตัวเก็บประจุอินพุต (C_{in})	100 μF

5.1 การออกแบบวงจรควบคุมแรงดัน

เมื่อแทนพารามิเตอร์ที่สำคัญจากตารางที่ 1 และ 2 ลงไปในสมการที่ (24) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน (ณ บริเวณจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญตามรูปแบบมาตรฐานระบบอันดับสอง แสดงดังตารางที่ 3

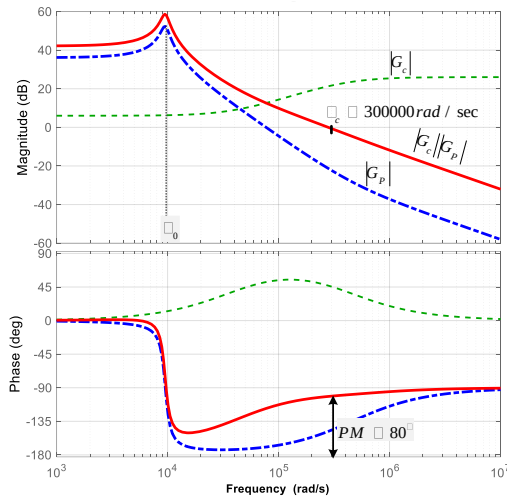
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ในฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$

G_{dc}	w_z	w_0	Q	r_{MPP}
-63.9	463154	9521	6.48	6.8 Ω

จากแผนภาพโบเดของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ ในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่าระบบมีค่าการเฟส (Phase Margin) ที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรของระบบ จึงทำการใส่ตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า (Lead Compensator) เพื่อเพิ่มมุมเฟสในบริเวณใกล้กับความถี่ตัดผ่าน (Crossover Frequency) ทำให้การเฟสเพิ่มขึ้นเป็น 80 องศา จากนั้นก็เพิ่มอัตราขยายที่

ความถี่ต่ำเพื่อลดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady-State Error) โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแสดงดังสมการที่ (25)

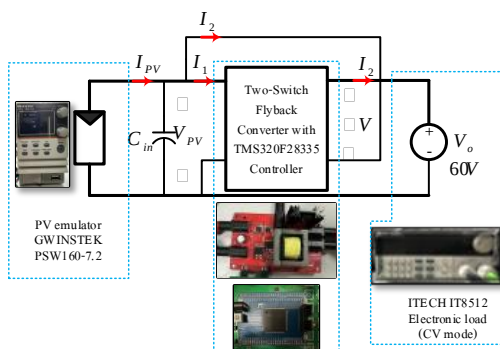
$$G_c(s) = 2 \frac{\left(1 + \frac{s}{40000}\right)}{\left(1 + \frac{s}{400000}\right)} \quad (25)$$



ภาพที่ 12 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ $G_c(s)$ และ $G_c(s)G_p(s)$

5.2 การทดสอบระบบติดตามจุดให้กำลังสูงสุด

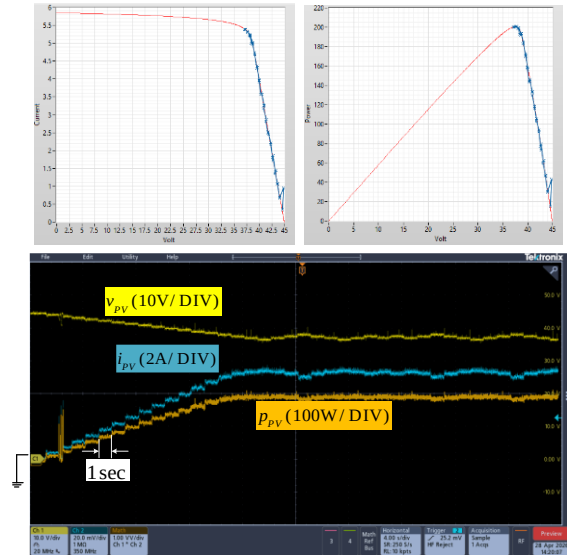
ภาพที่ 13 แสดงระบบที่ใช้ทดสอบการติดตามจุดให้กำลังสูงสุดของต้นแบบดีซีออปติไมเซอร์ที่นำเสนอ โดยอุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ GWINSTEK รุ่น PSW160-7.2 นำมาใช้จำลองพฤติกรรมการทำงานของไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และโหลดอิเล็กทรอนิกส์ ITECH รุ่น IT8512 ที่ตั้งค่าให้ทำงานในโหมดแรงดันคงที่ (Constant Voltage Mode) เพื่อใช้จำลองเป็นแรงดันเอาต์พุตซึ่งเป็นค่าคงที่ (ถูกควบคุมแรงดันโดยอินเวอร์เตอร์) สำหรับการควบคุมระบบใช้ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล (DSP) TMS320F28335



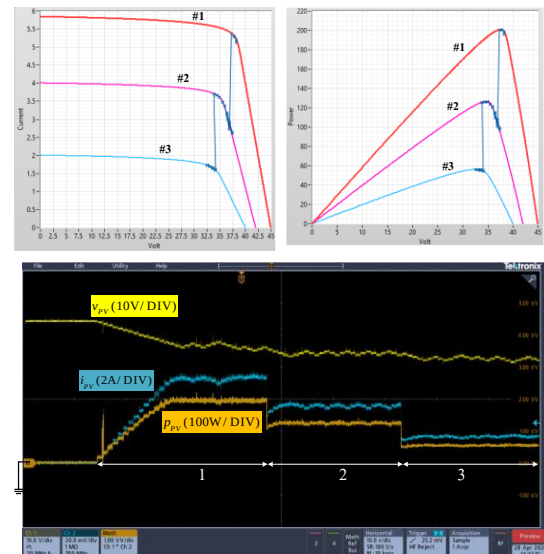
ภาพที่ 13 ระบบที่ใช้ทดสอบดีซีออปติไมเซอร์

ผลการทดสอบภายใต้สภาวะการทำงานคงที่ (ตามตารางที่ 1) แสดงดังภาพที่ 14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของจุด

ทำงานเริ่มต้นที่ค่าแรงดัน ไฟฟ้าเปิดวงจร จากนั้นอัลกอริทึมที่ใช้ติดตามจุดกำลังสูงสุดจะทำการปรับและสังเกตทุกๆ 1 วินาที และสั่งให้วงจรควบคุมแรงดัน ทำการลดแรงดันของโมดูลลง มีผลให้กระแสจากโมดูลค่อยๆ เพิ่มค่าขึ้น กำลังที่จ่ายออกจากโมดูลจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงตัว ณ จุดที่เกิดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลารวมในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 15 วินาทีโดยประมาณ



ภาพที่ 14 การเคลื่อนที่ของจุดทำงาน ภายใต้สภาวะการทำงานตามตารางที่ 1

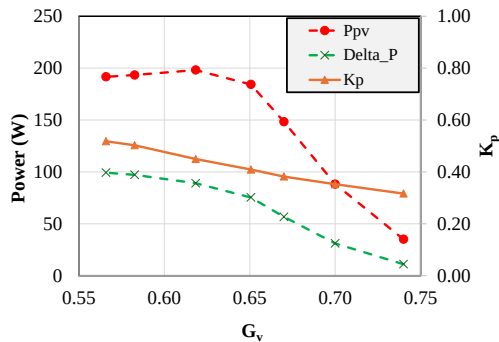


ภาพที่ 15 การเคลื่อนที่ของจุดทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานอย่างฉับพลัน

เพื่อที่จะประเมินการทำงานของอัลกอริทึมติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของโมดูลอย่างฉับพลัน ได้ทำการกำหนดเส้นกราฟคุณลักษณะแรงดัน-กระแส ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 รูปแบบที่แตกต่างกันดังภาพที่ 15 (เปรียบเสมือนการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง) โดยในขณะที่ออปติไมเซอร์กำลังทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดของคุณลักษณะทางไฟฟ้าหมายเลข 1

ได้ทำการสั่งให้เปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้ามายังเส้นกราฟหมายเลข 2 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการลดลงของกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากโมดูลอย่างฉับพลันในช่วงแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น จากนั้นอัลกอริทึมติดตามจุดกำลังสูงสุดจะทำการค้นหาจุดกำลังสูงสุดใหม่ โดยส่งลดแรงดันที่โมดูลลงทำให้จุดทำงานเคลื่อนที่ไปยังจุดกำลังสูงสุดใหม่ และเมื่อเปลี่ยนจากเส้นกราฟที่ 2 มาเป็น 3 ก็ให้ผลลัพธ์ถูกต้องเช่นกัน โดยกระบวนการทั้งหมดใช้เวลาประมาณ 2-3 วินาที ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากจุดกำลังสูงสุดใหม่

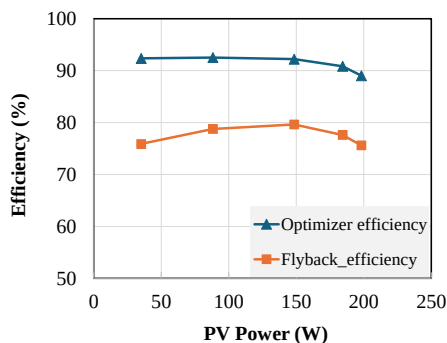
5.3 การทดสอบสัดส่วนการแปลงผันกำลังและประสิทธิภาพของออปติไมเซอร์



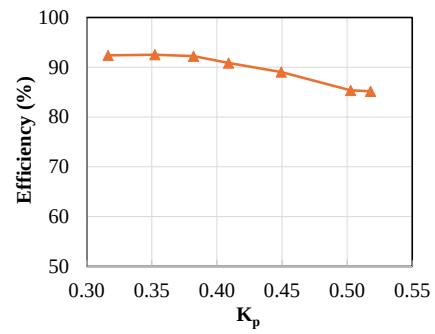
ภาพที่ 16 สัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ผ่านวงจรฟลายแบค

ผลการทดสอบในภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่แปลงผันผ่านวงจรฟลายแบคมีค่าตั้งแต่ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากโมดูล โดยเมื่อ G_v มีค่าสูงขึ้น สัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องแปลงผ่านวงจรฟลายแบคก็จะยิ่งน้อยลง ซึ่งหมายถึงปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยตรงจะเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอ

ประสิทธิภาพของวงจรฟลายแบคและออปติไมเซอร์ถูกตรวจวัดที่สภาวะอัตราการแปลงแรงดันต่างๆ กัน ภาพที่ 17 แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพออปติไมเซอร์เมื่อใช้เทคนิคการแปลงผันกำลังบางส่วน โดยประสิทธิภาพออปติไมเซอร์มีค่าสูงขึ้นจากประสิทธิภาพวงจรฟลายแบคประมาณ 12-15 เปอร์เซ็นต์ และภาพที่ 18 แสดงให้เห็นการลดลงของประสิทธิภาพออปติไมเซอร์ เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ต้องแปลงผันผ่านวงจรฟลายแบคมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพของวงจรฟลายแบค และออปติไมเซอร์



ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพของออปติไมเซอร์ที่ K_p ต่างๆ กัน

6. สรุปผล

ผลการทดสอบต้นแบบและออปติไมเซอร์บนพื้นฐานวงจรฟลายแบคแบบสวิตช์คู่ทำงานแบบแปลงผันกำลังบางส่วน ยืนยันถึงความสามารถในการติดตามจุดกำลังสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควบคู่ไปกับการเพิ่มประสิทธิภาพระบบแปลงผันกำลังให้สูงขึ้นได้ 12-15 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ ถือเป็นแนวทางสำคัญในการรองรับความต้องการของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังสูงขึ้นในอนาคต โดยไม่ต้องใช้วงจรแปลงผันกำลังที่มีขนาดใหญ่ และช่วยให้การเลือกตำแหน่งการติดตั้งแต่ละโมดูลที่ต่อเนื่องกันมีผลต่อประสิทธิภาพมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Makhloufi S, Mekhilef S. Logarithmic PSO-based global/local maximum power point tracker for partially shaded photovoltaic systems. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2022;10(1):375-86.
- [2] Yang F, Wu H, Li X, Gao Z, Alkanderi M. Optimized maximum power point tracking for PV system under partial shading conditions. In: 2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS); 2023. p. 697-703.
- [3] Boyar A, Kabalci E. Two-stage flyback microinverter for solar power conversion. In: 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM); 2020 Oct 20-23; Izmir, Turkey. IEEE; 2020. p. 6-11.
- [4] Kabalci E, Boyar A. An Interleaved Flyback Micro Inverter with H5 Topology for Photovoltaic Applications. In: 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM); 2020 Oct 20-23; Izmir, Turkey. IEEE; 2020. p. 12-7.

- [5] Godoi RR, Felipe TA, Melo FC, Freitas LCG. Comparison of string inverter and microinverters: a case study concerning energy yield and accuracy of MPPT algorithms. In: 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC); 2023 Mar 19-23; Orlando, FL, USA. IEEE; 2023. p. 3075-82.
- [6] Yang S, Bryant A, Mawby P, Xiang D, Ran L, Tavner P. An industry-based survey of reliability in power electronic converters. In: 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition; 2009 Sep 20–24; San Jose, CA, USA. IEEE; 2009. p. 3151–7.
- [7] Petrone G, Spagnuolo G, Teodorescu R, Veerachary M, Vitelli M. Reliability issues in photovoltaic power processing systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008; 55(7):2569–80.
- [8] Nakane T, Shinohara T, Uno M. Single-switch voltage equalizer based on forward-flyback resonant voltage multiplier for partially-shaded series-connected photovoltaic modules. In: TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference; 2017 Nov 5–8; Penang, Malaysia. IEEE; 2017. p. 1115–20.
- [9] Shams I, Mekhilef S, Tey KS. Modular voltage equalizer topology with reduced number of switch count for enhancing the energy yield during partial shading conditions for PV system. In: 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition- Asia (ECCE-Asia); 2021. p. 1063-7.
- [10] Sajadian S, Ahmadi R. Distributed maximum power point tracking using model predictive control for photovoltaic energy harvesting architectures based on cascaded power optimizers. IEEE J Photovolt. 2017;7(3):849-57.
- [11] Choi S, Hong J, Park S, Won J. Development and demonstration of an adaptive DC optimizer to solve mismatched output power in PV systems. In: 2024 3rd International Conference on Power Systems and Electrical Technology (PSET); 2024. p. 294-300.
- [12] Elkamouny K, Lakssir B, Hamedoun M, Benyoussef A, Mahmoudi H. Simulation, design and test of an efficient power optimizer using DC-DC interleaved isolated boost PV-micro inverter application. In: 2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD); 2017 Mar 28–31; Marrakech, Morocco. IEEE; 2017. p. 518–25.
- [13] Zhao J, Yeates K, Han Y. Analysis of high efficiency DC/DC converter processing partial input/output power. In: 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL); 2013 Jun 23–26; Salt Lake City, UT, USA. IEEE; 2013. p. 1–8.
- [14] Zapata J, Kouro S, Carrasco G, Meynard T. Step-down partial power DC-DC converters for two-stage photovoltaic string inverters. Electronics. 2019;8(3):87.
- [15] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, Vitelli M. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems. IEEE Ind Electron Mag. 2013;7(3):66-7.
- [16] Erickson RW, Maksimovic D. Fundamentals of power electronics. 2nd ed. New York (NY): Springer; 2001.
- [17] Mohan N. Power electronics: a first course. 1st ed. Hoboken (NJ): Wiley; 20

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดเส้นทางขนส่งอะไหล่รถยนต์ ภายใต้จำนวนลูกค้าที่แตกต่างกัน

Comparative Performance of Capacitated Vehicle Routing Algorithms for Automotive Parts Logistics under Various Customer Sizes

ประภาพรณ เกษราพงศ์¹ ธฤชวรรณ ประสิทธิ์เวช² พิชชาพร พันภัยพาล³ กวินธร สัยเจริญ⁴ และ จักรินทร์ กลั่นเงิน^{5*}
Prapapan Ketsarapong¹, Titsawan Prasittiwach², Phitchaphon Phonphaiphan³, Kawinthon Saicharoen⁴
and Jakkarin Klunngien^{5*}

^{1,2,3,5}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

^{1,2,3,5}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

⁴Department of Industrial Engineering and Management, Silpakorn University

*Corresponding Author: Email: jakkarin.k@ku.th

Received: 08-06-2026 Revised: 22-06-2026 Accepted: 23-06-2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี 4 วิธี คือ วิธีการค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุด (Nearest Neighbor Algorithm: NNA) วิธีการแบบประหยัด (Clarke-Wright Savings Algorithm: CW) วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) และวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm: EA) ในการหาเส้นทางขนส่งที่มีระยะทางรวมและเวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการบริษัทกรณีศึกษาต่อไป ผลที่ได้จากการทดลองกับกลุ่มลูกค้าจำนวน 10 20 30 50 80 และ 100 ราย พบว่า เมื่อขนาดปัญหาที่มีจำนวนลูกค้าไม่เกิน 100 ราย วิธี EA ให้ระยะทางรวมที่น้อยที่สุด ในขณะที่วิธี NNA ใช้เวลาในการคำนวณแต่ละกลุ่มน้อยที่สุด

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ, วิธีการค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุด, วิธีการแบบประหยัด, วิธีเชิงพันธุกรรม, วิธีเชิงวิวัฒนาการ

ABSTRACT

The objective of this research is to compare four algorithms, namely the Nearest Neighbor Algorithm (NNA), the Clarke-Wright Savings Algorithm (CW), the Genetic Algorithm (GA), and the Evolutionary Algorithm (EA), in finding transportation routes that minimize both total distance and computation time. These findings are intended for further application in the logistics management of the case study company. The experimental results obtained from customer groups of 10, 20, 30, 50, 80, and 100 indicated that for problem sizes with up to 100 customers, the EA yielded the shortest total distance, while the NNA required the least computational time for each group.

Keyword: Vehicle Routing Problems, Nearest Neighbor Algorithm, Saving Algorithm, Genetic Algorithm Evolutionary Algorithm

1. บทนำ

ปัจจุบันการบริหารจัดการโลจิสติกส์และการขนส่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อองค์กร โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งมีความซับซ้อนของห่วงโซ่อุปทานและความต้องการในการจัดส่งอะไหล่ที่รวดเร็ว ถูกต้อง และทันเวลา การจัดส่งทางขนส่งจึงเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อระยะทาง เวลา และ

ต้นทุนในการดำเนินการ ซึ่งเป็นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) ที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในงานวิจัยด้านวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ [1] การแก้ปัญหา VRP สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีแม่นยำ (Exact Algorithms) กับวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) และวิธีเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic) ซึ่งถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถแก้ปัญหา

ที่มีความซับซ้อนภายในเวลาที่สั้น โดยอัลกอริทึมแต่ละประเภทมีข้อได้เปรียบและข้อจำกัดแตกต่างกันในด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาในการประมวลผล [2-3] งานวิจัยในช่วงหลังได้มุ่งเน้นการพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเหล่านี้ภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลาย เช่น ข้อจำกัดด้านเวลา ความจุ และลักษณะของข้อมูลลูกค้า [4] อย่างไรก็ตาม หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึมคือ จำนวนลูกค้า (Problem Size) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อระดับความซับซ้อนของปัญหา เมื่อจำนวนลูกค้าเพิ่มขึ้น ขนาดของปัญหาและจำนวนความเป็นไปได้ของเส้นทางจะเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ ส่งผลให้อัลกอริทึมบางประเภทอาจไม่สามารถรักษาระดับประสิทธิภาพเดิมได้ ทั้งในด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาในการหาคำตอบ [5] ดังนั้น การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมภายใต้จำนวนลูกค้าที่แตกต่างกันจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเลือกใช้อัลกอริทึมให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาในสถานการณ์จริง ฌ็องท์พัชร์ และ กนกกาญจน์ [6] นำเสนอวิธีการแบบประหยัด (Clarke-Wright Savings Algorithm: CW) และวิธีการค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุด (Nearest Neighbor Algorithm: NNA) ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการจัดเส้นทางนำดื่มของบริษัทรถบรรทุก พบว่าวิธี CW สามารถลดระยะทางในการขนส่งได้ดีกว่า บุชกร และคณะ [7] เปรียบเทียบวิธีการจัดเส้นทางเดินรถของรถซ่อมบำรุงตู้จ่ายน้ำมัน โดยเปรียบเทียบ 3 วิธีคือ วิธีการเดิม วิธี CW และวิธี NNA ซึ่งต้องการให้ระยะทางรวมและจำนวนเส้นทางเดินรถน้อยลง ผลที่ได้พบว่าวิธี CW ให้ผลดีที่สุดโดยสามารถลดระยะทางรวมจาก 5,050.1 กิโลเมตร เหลือ 1,017.8 กิโลเมตร และลดจำนวน เส้นทางรวมจาก 16 เส้นทางเหลือ 4 เส้นทาง ทศนียวรรณ และสราวุธ [8] ใช้วิธี CW ในการจัดเส้นทางเดินรถขนส่งสินค้า ซึ่งสามารถลดขนาดของปัญหา และปรับจำนวนลูกค้าในแต่ละเส้นทางให้สอดคล้องกับข้อจำกัดของบริษัทได้ ทำให้ระยะทางลดลงร้อยละ 37.94 และต้นทุนลดลงร้อยละ 23.33 นอกจากนี้แล้ว วิธี CW ยังถูกนำมาใช้ในการจัดหาเส้นทางขนส่งน้ำดื่มเพื่อให้ได้ระยะทางที่สั้นที่สุดของบริษัท ABC จำกัด, การจัดเส้นทางตารางการรดน้ำต้นไม้ของสวนสาธารณะเมืองบันดุง เมื่อรถบรรทุกน้ำมีความจุ 5,000 ลิตร, การแจกจ่ายข้าวของรัฐบาลอินโดนีเซียให้กับศูนย์กระจายจำนวน 42 จุดเพื่อลดต้นทุนการแจกจ่ายให้น้อยสุด, การจัดเส้นทางขนส่งน้ำผึ้งของฟาร์มน้ำผึ้งโฆสิตเนื่องจากการส่งแบบเดิมไม่สามารถส่งได้ภายในเวลา 17.00 น. และมีต้นทุนที่สูง เมื่อนำวิธี CW มาใช้สามารถลดต้นทุนการขนส่งได้ร้อยละ 7 ของต้นทุนค่าขนส่ง, การเก็บขยะมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนตำบลเขาคันทรง จังหวัดชลบุรีที่จัดเก็บ 5 วันต่อสัปดาห์เมื่อรวมจุดเก็บขยะในเส้นทางที่เหมาะสมพบว่าสามารถลดต้นทุนในการขนส่งได้ และเมื่อนำวิธี CW มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางในกรณีที่มีการรับและ

ส่งสินค้าพร้อมกัน พบว่าระยะทางในการขนส่งน้อยกว่าวิธีการ NNA ถึง 22% [9-15] สำหรับการแก้ปัญหาอีกวิธีที่ได้รับความนิยมคือวิธี GA ซึ่งได้นำมาใช้แก้ปัญหาการรับส่งสินค้าของมหาวิทยาลัยในขณะที่มีรถในการบริการ 8 คัน นอกจากนี้ได้มีการทดลองนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการขนส่งที่มีค่าใช้จ่ายคงที่ รวมถึงการจัดเส้นทางสำหรับยานยนต์ไร้คนขับของระบบขนส่งอัจฉริยะ การกระจายสินค้าจากโรงงานผู้ผลิตไปยังศูนย์กระจายสินค้าและส่งต่อไปยังลูกค้า ผลที่ได้พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเร็วขึ้นในขณะที่ปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้น สามารถลดระยะทางและต้นทุนการขนส่งได้สูง [16-20]

บริษัทรถบรรทุกเป็นบริษัทซ่อมบำรุงและจัดจำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่แบบมีบริการจัดส่งไปยังลูกค้า โดยยานพาหนะมีความสามารถในการบรรทุกได้ 1,000 กิโลกรัม การบริการจัดส่งสินค้าในปัจจุบันบริษัทจัดส่งตามความต้องการของลูกค้าโดยจะส่งไปยังลูกค้าเพียงครั้งละ 1 ราย และเมื่อให้บริการเสร็จยานพาหนะจะต้องกลับมาที่จุดเริ่มต้นทำให้ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการขนส่งสูง บริษัทมีความต้องการที่จะปรับปรุงการให้บริการให้ดีขึ้นและลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ และได้ทำการเปรียบเทียบระยะทางในการขนส่ง และเวลาในการหาคำตอบ ด้วยวิธีการ 4 วิธี คือ NNA, CW, GA และ EA เพื่อที่จะนำ 1 ใน 4 วิธีไปใช้ในการพัฒนาการจัดการบริษัทให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

2.วัตถุประสงค์การวิจัย

เปรียบเทียบระยะทางในการขนส่งรวมและเวลาในการหาคำตอบ ด้วยวิธีการ 4 วิธี คือ NNA, CW, GA และ EA เพื่อให้ได้ระยะทางรวมและเวลาในการหาคำตอบน้อยสุด

3.วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นนำผลวิจัยไปใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นภายในบริษัทรถบรรทุกที่ต้องการลดระยะทางและเวลาในการขนส่งชิ้นส่วนยานยนต์ ในขณะเดียวกันบริษัทรถบรรทุกมีนโยบายในการขยายกิจการไปยังลูกค้าในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล จึงอยากรักษาและปรับปรุงการบริหารจัดการการให้บริการให้ดีขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา มีดังต่อไปนี้

1. ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง รถกระบะ Toyota Hilux Vigo (หัวเดียว) สามารถบรรทุกได้สูงสุด (Q) เท่ากับ 1,000 กิโลกรัม [21]
2. ชิ้นส่วนยานยนต์ที่บริษัทรถบรรทุกจัดจำหน่ายเป็นชิ้นส่วนของรถ Honda มีทั้งหมด 95 ชนิด แต่ละชนิดมีน้ำหนักดังแสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 1

3. สถานที่ตั้งของร้านกรณีศึกษาและลูกค้า เดิมที่มีการจัด (ไม่รวมร้านกรณีศึกษา) ระยะทางในการจัดส่งใช้ Google map
จำหน่ายชิ้นส่วนยานยนต์และส่งมอบให้กับลูกค้าจำนวน 13 ราย ในการหาพิกัด ข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างรายการชิ้นส่วนยานยนต์และหนักหนักของแต่ละชิ้นส่วน (หน่วย : กิโลกรัม)

ลำดับ	ชื่อสินค้า	น้ำหนัก
1	เครื่องยนต์เบนซิน 1.8L R18Z Honda Civic 8 (FD) City 5 (GM)	135.6
2	เกียร์อัตโนมัติ Honda Civic FC (2016-2020)	89.4
3	เครื่องยนต์ L15 Honda Jazz (2008-2013)	110.8
4	เกียร์อัตโนมัติ Honda Civic FB (2012-2015)	90.1
5	เครื่องยนต์ L15A Honda City (2008-2013)	108.3
6	เกียร์ธรรมดา Honda City ZX (2003-2007)	54.6
7	เครื่องยนต์ L15B Turbo Civic FC/CR-V	145.7
8	ผ้าเบรกหน้า Honda City 2014-2019	3.2
9	ปั๊มคลัตช์ Honda Accord (2008-2012)	2.6
10	กรองน้ำมันเชื้อเพลิง Honda Civic FC (2016-2020)	0.9
...	...	...
95	หม้อน้ำ Honda Accord 2013-2017	3.3

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสถานที่ตั้งของร้านกรณีศึกษาและลูกค้าแต่ละราย

รหัส	บริษัท/ร้าน	พิกัด (Lat, Lng)
WH (ร้านกรณีศึกษา)	อู่ซ่อมรถ honda เทอดไท	13.709539723177574, 100.43989157112067
G01	บจก. เอกกิจ ออโต้ การาจ	13.711818351917842, 100.43047890750644
G02	บจก. สหยนต์บางนา	13.669147201621774, 100.62612024412849
G03	อู่พรพัฒน์	13.720699955616624, 100.428981052691
G04	อู่ช่างรงค์ช. เพชรเกษม 66	13.713432708947847, 100.42097903904114
G05	อู่ ที.พี.เอส ออโต้ บอดี	13.710607895897532, 100.4204871085914
G06	โออีโอโต้คาร์ สายไหม 65	13.921909598396061, 100.67852199480255
G07	ร้าน SJ รุ่งเรืองอะไหล่รถยนต์	13.922016628057307, 100.67608546829395
G08	อู่ช่างอ้วน สายไหม 74	13.921582909059035, 100.67519575897445
G09	ป. สอนดี สายไหม 63	13.92221377576662, 100.67485960482168
G10	ช่างเฉลิมพล แอร์รถยนต์	13.676967159234973, 100.60899960570104
G11	อู่ฉิมบริการ	13.665785091572534, 100.62312322811371
G12	บริษัท ธาณีพาร์ท จำกัด	13.676829704759934, 100.60802966621311
G13	อู่บางแคเซอร์วิส	13.70746331899585, 100.43033220673186

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. HP Laptop 15s Intel Core i5-10210U CPU 2.1 GHz, RAM 8 GB , SSD 256 GB Windows 64-bit
2. Google Maps
3. Microsoft Excel ใช้ร่วมกับ Visual Basic for Applications (VBA)

4. วิธีที่ใช้เปรียบเทียบ NNA, CW, GA และ EA

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบมีข้อจำกัดด้านความสามารถในการบรรทุก สามารถสร้างสมการคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

ดัชนี i แทน จุดเริ่มต้น โดยที่ $i \in V$ j แทน จุดสิ้นสุด โดยที่ $j \in V$ k แทน ยานพาหนะคันที่ k โดยที่ $k \in K$ พารามิเตอร์ d_{ij} แทน ระยะทางหรือเวลาจากจุด i ไปจุด j q_i แทน ปริมาณความต้องการของลูกค้า ณ จุด i Q แทน ความสามารถในการบรรทุกสูงสุดของรถแต่ละคัน V แทน เซตของจุดเริ่มต้นและลูกค้าทั้งหมดในระบบ K แทน เซตของยานพาหนะทั้งหมดตัวแปรตัดสินใจ x_{ij}^k แทน การตัดสินใจ จะเท่ากับ 1 ถ้ารถคันที่ k เดินทางจาก i ไป j และเท่ากับ 0 ถ้าเป็นกรณีอื่นๆ u_i แทน น้ำหนักบรรทุกสะสมของรถหลังจากทำการส่งสินค้าให้ลูกค้า i สมการวัตถุประสงค์

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} d_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} x_{ij}^k = \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ji}^k, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0j}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} x_{i0}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} q_i x_{ij}^k \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$u_i - u_j + q_j \leq Q \left(1 - \sum_{k \in K} x_{ij}^k \right) \quad (7)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (9)$$

เมื่อสมการ (1) เป็นสมการวัตถุประสงค์ที่ทำให้เกิดระยะทางรวมหรือเวลารวมน้อยสุด สมการ (2) คือลูกค้าแต่ละรายจะได้รับบริการเพียงครั้งเดียวจากยานพาหนะคันเดียวเท่านั้น สมการ (3) คือจำนวนครั้งที่ยานพาหนะเข้าไปบริการลูกค้าใดๆ จะเท่ากับ

จำนวนครั้งที่ยานพาหนะออกจากลูกค้ารายนั้น สมการ (4) คือยานพาหนะทุกคันจะต้องออกจากจุดเริ่มต้นเพียงครั้งเดียว สมการ (5) คือยานพาหนะทุกคันเมื่อให้บริการเสร็จจะต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้นเสมอ สมการ (6) คือยานพาหนะทุกคันไม่สามารถบรรทุกมากกว่าความสามารถในการบรรทุกสูงสุดของยานพาหนะคันนั้น สมการ (7) คือสมการป้องกันการเกิดวงรอบย่อย (Subtour Elimination) และช่วยส่งผ่านค่าน้ำหนักบรรทุกสะสมของยานพาหนะขนส่งเมื่อเดินทางจากลูกค้าที่จุด i ไปยังจุด j สมการ (8) คือการกำหนดขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของน้ำหนักบรรทุกสะสมของยานพาหนะขนส่งที่ลูกค้ารายใดๆ โดยต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับความต้องการของลูกค้ารายนั้น และต้องไม่เกินความจุสูงสุดของรถ สมการ (9) คือการกำหนดให้ตัวแปรการตัดสินใจเลือกเส้นทางเดินรถมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

2. ทำการจำแนกกลุ่มชุดข้อมูลทดสอบออกเป็น 3 ระดับ เพื่อประเมินความสามารถในการหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม ประกอบด้วย ปัญหาขนาดเล็กมีจำนวนลูกค้า 10 และ 20 ราย ปัญหาขนาดกลางมีจำนวนลูกค้า 30 และ 50 ราย ปัญหาขนาดใหญ่มีจำนวนลูกค้า 80 และ 100 ราย

3. การพัฒนาและติดตั้งระบบสำหรับขั้นตอนวิธี 4 รูปแบบ โดยการเขียนและรวบรวมโปรแกรมขั้นตอนวิธีทั้งหมดภายใต้ HP Laptop โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel VBA

วิธีที่ 1 NNA : พัฒนาขั้นตอนวิธีแบบฮิวริสติก เพื่อสร้างคำตอบเริ่มต้น (Initial Feasible Solution) ด้วยการเลือกเส้นทางไปยังจุดที่ใกล้ที่สุดถัดไปตามลำดับ โดยปริมาณสินค้าจะต้องไม่เกินความสามารถในการบรรทุกได้ของยานพาหนะ

วิธีที่ 2 CW : พัฒนาขั้นตอนวิธีแบบฮิวริสติกอีกวิธีที่คลาสสิก เพื่อให้รถวิ่งส่งของครบทุกจุดโดยใช้ระยะทางหรือต้นทุนรวมที่น้อยที่สุด Clarke and Wright [22] หลักการคือจับคู่ลูกค้าคู่ที่ให้รถคันเดียวกันวิ่งไปส่งต่อเนื่องกัน จะช่วยให้ประหยัด (Savings) ระยะทางได้มากกว่า โดยการคำนวณค่าประหยัดคือ

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij} \quad (10)$$

โดยที่ S_{ij} คือ ค่าประหยัดที่ได้จากการเชื่อมจุด i และ จุด j เข้าด้วยกัน

C_{i0} คือ การเดินทางจากจุด i กลับคลัง (0)

C_{0j} คือ ค่าเดินทางจากคลัง (0) ไปยังจุด j

C_{ij} คือ ค่าเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j

เมื่อได้ค่าประหยัด ขั้นตอนต่อไปทำการจัดเรียงลำดับความคุ้มค่าของค่าประหยัดจากมากไปหาน้อยที่สุด หลังจากนั้นนำมา

รวมเส้นทางเข้าด้วยกัน โดยจะต้องตรวจสอบเงื่อนไขไม่ให้เกิดความสามารถในการบรรทุก

วิธีที่ 3 GA : พัฒนาเมทาฮิวริสติกแบบประชากร (Population-based Metaheuristic) ที่ประกอบด้วยกระบวนการคัดเลือกโครโมโซม (Selection) การไขว้เปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อวิวัฒนาการกลุ่มคำตอบอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะถึงเงื่อนไขการหยุด

วิธีที่ 4 EA : ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการเป็นระเบียบวิธีค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงในกลุ่มเมทาฮิวริสติก (Metaheuristics) ซึ่งจำลองแบบแผนแนวคิดมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการตามธรรมชาติและการคัดเลือกเผ่าพันธุ์ ขั้นตอนวิธีนี้ทำงานกับกลุ่มประชากรของผลเฉลย (Population of Solutions) แทนที่จะเป็นผลเฉลยเดี่ยว เพื่อร่วมกันวิวัฒนาการผ่านโครงสร้างการถ่ายทอดทางพันธุกรรมในแต่ละรุ่น (Generations) ทำให้เหมาะสมสำหรับการนำไปแก้ปัญหาที่มีระดับความซับซ้อนสูงและมีขอบเขตพื้นที่คำตอบขนาดใหญ่อย่างปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ซึ่งจัดเป็นปัญหาประเภท NP-hard

3.4 การปรับแต่งพารามิเตอร์และการกำหนดสภาพแวดล้อมการคำนวณ

ในการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีทั้ง 4 รูปแบบ คือ NNA CW GA และ EA การควบคุมและกำหนดค่าพารามิเตอร์เชิงคำนวณรวมถึงการควบคุมสภาพแวดล้อมฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เป็นปัจจัยวิกฤตที่ส่งผลโดยตรงต่อความเที่ยงตรง ความน่าเชื่อถือ และ

ความสามารถในการทำซ้ำได้ของการทดลองเชิงคำนวณ (Reproducibility) โดยมีรายละเอียดการดำเนินการดังต่อไปนี้:

1. การปรับแต่งพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองกลุ่มหลัก ได้แก่ ขั้นตอนวิธีฮิวริสติกแบบกำหนดนิยามคำตอบหลัก (Deterministic Heuristics) และขั้นตอนวิธีเมทาฮิวริสติกแบบสุ่มค้นหาเชิงโครงสร้างวิวัฒนาการ (Stochastic Population-based Metaheuristics) ซึ่งมีแนวทางการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านการตรวจสอบประสิทธิภาพดังนี้

1.1 ขั้นตอนวิธี NNA และ CW เป็นขั้นตอนวิธีแบบกำหนดโครงสร้างคำตอบในขั้นตอนเดียว (Constructive Heuristics) จึงไม่มีพารามิเตอร์สุ่มในระบบที่ต้องทำการปรับแต่ง โดยขั้นตอนวิธี NNA จะสร้างเส้นทางโดยการเลือกเยี่ยมชมลูกค้าที่อยู่ใกล้ที่สุดถัดไปตามลำดับ ขณะที่ขั้นตอนวิธี CW จะคำนวณผลรวมความประหยัดของระยะทางในการยุบรวมเส้นทางระหว่างลูกค้าผ่านตรรกะทางคณิตศาสตร์อย่างเป็นระบบ

1.2 ขั้นตอนวิธี GA และ EA เนื่องจากประสิทธิภาพในการค้นหาขอบเขตคำตอบของทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรม งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameter Tuning) บนชุดข้อมูลทดสอบเพื่อระบุค่าที่เหมาะสมที่สุด ที่ช่วยรับประกันการเข้าสู่จุดคำตอบที่ดีที่สุด ในขอบเขตการคำนวณที่กำหนด และหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (Local Optima)

รายละเอียดการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของขั้นตอนวิธีต่างๆ แสดงไว้ในตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของขั้นตอนวิธีต่างๆ

ขั้นตอนวิธี	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด
NNA	พารามิเตอร์เชิงสุ่ม	ไม่พบพารามิเตอร์เชิงสุ่ม
CW	พารามิเตอร์เชิงสุ่ม	ไม่พบพารามิเตอร์เชิงสุ่ม
Genetic Algorithm (GA)	ขนาดประชากรเริ่มต้น	100
	อัตราการกลายพันธุ์ของยีน	0.8
	ขนาดกลุ่มคัดเลือกแบบทัวร์นาเมนต์	5
	จำนวนรอบการสืบทอดแบบยัดเยียด	Top 1
	จำนวนรอบการวิวัฒนาการสูงสุด	500
Evolutionary Algorithm	ขนาดประชากรเชิงวิวัฒนาการ	100
	อัตราการกลายพันธุ์เชิงวิวัฒนาการ	0.8
	อัตราส่วนการคัดเลือกเพื่อสืบพันธุ์	0.45
	ขีดจำกัดกรณีคำตอบหยุดนิ่ง	30
	เกณฑ์หยุดทำงานสูงสุดของระบบ	500

2. การกำหนดสภาพแวดล้อมเชิงคำนวณ เพื่อควบคุมความแปรปรวนเชิงคำนวณและรับประกันว่าการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (Execution Time หรือ CPU Time ในหน่วยวินาที) เป็นไปอย่างเที่ยงตรงและยุติธรรมสูงสุด การทดสอบเชิงคำนวณทั้งหมดจึงดำเนินการภายใต้โครงสร้างระบบจำเพาะที่มีคุณสมบัติคงที่ตลอดการทดลอง ด้วย HP Laptop สำหรับการวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ในกระบวนการรันการทดลองเชิงคำนวณ ระบบปฏิบัติการจะถูกจำกัดการรันโปรแกรมระบบส่วนหลัง (Background Processes) ทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกแซงการประมวลผลของ CPU ในขณะที่ทำการทดสอบวัดเวลา นอกจากนี้ เนื่องจากขั้นตอนวิธี GA และ EA มีกลไกการทำงานในลักษณะสุ่มค้นหาทางเลือกคำตอบ ผู้วิจัยจึงดำเนินการรันการทดลองซ้ำจำนวน 10

รอบด้วยการใช้เมล็ดการสุ่ม (Random Seed) ที่แตกต่างกันในแต่ละอินสแตนซ์ของโจทย์ปัญหา เพื่อใช้ประโยชน์จากการประเมินผลค่าเฉลี่ยทางสถิติและยืนยันระดับความทนทานของคำตอบที่ได้รับอย่างเป็นระบบ สำหรับผลการทดลองจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดเส้นทางของขั้นตอนวิธีทั้ง 4 วิธี ในด้านระยะทางที่ใช้ในการเดินทางรวมและเวลาที่แต่ละขั้นตอนวิธีใช้ในการประมวลผล แยกตามขนาดของปัญหาซึ่งมีจำนวนลูกค้าแตกต่างกัน 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ระยะทางที่แต่ละขั้นตอนวิธีใช้สำหรับขนาดปัญหาแต่ละกลุ่ม (หน่วย : กิโลเมตร)

วิธีการ	จำนวนลูกค้า (ราย)					
	10	20	30	50	80	100
NNH	126.00	203.96	198.80	220.67	246.29	350.09
CW	127.00	163.82	213.36	254.95	322.71	422.42
GA	102.40	133.16	151.82	178.33	212.46	308.06
EA	96.80	123.46	146.58	173.97	206.93	296.40

ตารางที่ 5 เวลาที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับปัญหาขนาดต่างๆ แต่ละกลุ่ม (หน่วย : วินาที)

วิธีการ	จำนวนลูกค้า (ราย)					
	10	20	30	50	80	100
NNH	0.13	0.13	0.14	0.16	0.18	0.20
CW	0.15	0.20	0.31	0.84	3.13	6.97
GA	8.68	26.95	34.61	54.55	107.27	146.58
EA	44.66	121.82	333.19	3,953.82	10,232.29	14,348.00

4.2 อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่าขั้นตอนวิธีทั้ง 4 สามารถแก้ปัญหาเมื่อขนาดของลูกค้าเปลี่ยนไปทั้ง 6 กลุ่มได้ และผลที่ได้พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ นพวง [23] ซึ่งวิธี EA ให้ระยะทางรวมที่สั้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด แต่เมื่อพิจารณาด้านเวลาในการหาคำตอบวิธีอีวิริสติกพื้นฐานอย่าง NNH และ CW หาคำตอบได้เร็วกว่าเมื่อจำนวนลูกค้าไม่เกิน 100 ราย

5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนวิธีทั้ง 4 สามารถหาเส้นทางของการขนส่งอะไหล่รถยนต์ไปให้ลูกค้าได้ โดยวิธีกลุ่มเมทาอีวิริสติกคือวิธี EA และ GA จะให้ค่าระยะทางในการขนส่งที่น้อยกว่ากลุ่มวิธีอีวิริสติกคือวิธี NNH และ CW อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยจะต้องทดลองขยายปัญหาให้ใหญ่ขึ้น คือต้องมีจำนวนลูกค้ามากกว่า 100 ราย เพื่อดูเวลาในการหาคำตอบของขั้นตอนวิธีต่างๆ เพิ่มขึ้น และนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการบริหารจัดการภายในร้านกรณีศึกษาต่อไป

6.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้ขยายแนวคิดมาจากโครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย KUSRCBR69-2022

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2022). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *European Journal of Operational Research*, 302(2), 385–410.
- [2] Lacomme P, Prins C, Sevaux M. A memetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *RAIRO - Operations Research*. 2008;42(3):415-431. doi:10.1051/ro:2008021
- [3] Gendreau, M., Jabali, O., & Rei, W. (2021). 50th anniversary invited article—Future research directions in stochastic vehicle routing. *Transportation Science*, 55(4), 759–774.
- [4] Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2021). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1–21.
- [5] Cattaruzza D, Absi N, Feillet D, Vidal T. A memetic algorithm for the Multi Trip Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*. 2014;236(3):833-848.
- [6] กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ และณัฏฐพัชร วัฒนชัยกุล. (2567). การปรับปรุงประสิทธิภาพการขนส่งน้ำดื่มสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ กรณีศึกษา โรงงานน้ำดื่มดีซี. *วารสารสหศาสตร์ศรีปทุม ชลบุรี* (Online), 10(3), 46-61.
- [7] บุษกร อุ่นสวัสดิ์, สุธาวี คำแดงไสย, วาสนา พ่วงพรพิทักษ์ และชนาธิป กาลจักร. (2569). การจัดเส้นทางเดินรถซ่อมบำรุงตู้จ่ายน้ำมัน โดยใช้วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัดและวิธีเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด กรณีศึกษา: บริษัท เอบีซี จำกัด. *วารสารสหศาสตร์ศรีปทุม ชลบุรี* (Online), 12(1), 174-188.
- [8] ทศนีย์วรรณ ส่องแสง และสรารุจ จันทร์สุวรรณ. (2562). การจัดเส้นทางเดินรถเพื่อขนส่งสินค้าหลายจุด กรณีศึกษา บริษัทXYZ. การประชุมวิชาการสถิติประยุกต์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ระดับชาติ ประจำปี 2562. 30 ตุลาคม 2562.
- [9] นคร ไชยวงศ์ศักดิ์ ประเวศ อนันต์เอื้อ นิเวศ จินะบุญเรือง เสกสรรค์ วินยาศกุล ขวัญเรือน สันณรงค์ ธนากร จักรแก้ว วุฒิชัย ใจบาล และณัฐวุฒิ ศรีสว่าง. (2558). การจัดเส้นทางขนส่งโดยใช้เซฟวิ่งอัลกอริทึมและตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย กรณีศึกษาโรงงานน้ำดื่ม. *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*, 3(1), 51-61.
- [10] S Kristina and Jason. (2019). Minimize transportation cost with clark and wright algorithm saving heuristic method with considering traffic congestion factor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/673/1/012080.
- [11] Filscha Nurprihatin and Hendy Tannady. (2018). An Integrated Transportation Models and Savings Algorithm to Minimize Distribution Costs. *The 1st Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering (APCoRISE) 2018*, 216-221.
- [12] ศรัณย์ ไชยพานิช. (2566). การวางแผนเส้นทางเดินรถโดยใช้ SAVING ALGORITHM ด้วยโปรแกรม SOLVER กรณีศึกษา ฟาร์มน้ำผึ้งโสมสิต [วิทยาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรังสิต; 2566.
- [13] ถนิมนันท์ กล้วยไม้. (2566). การจัดเส้นทางเดินรถขนส่งสำหรับรถเก็บขยะมูลฝอย กรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลเขาคันทรง จังหวัดชลบุรี [วิทยาสตรมหาบัณฑิต]. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2566.
- [14] จิตติมา วงศ์อินตา ชุตินา หวังรุ่งชัยศรี และอนิรุทธ์ ชันธสะอาด. (2561). กระบวนการลดต้นทุนค่าขนส่งและเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเส้นทางเดินรถแบบมัลติครัน สำหรับกรณีศึกษา บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 8(1), 71-91.
- [15] ยลพัชร อังกูรสิทธิ์ ดันติกร พิษณุพิบูล แดทเลีย ธนาถนอมกุล จิรวุฒิ หลอมประโคน และธันวาท สิริวรภัทร พุทธพงษ์ศิริพร. (2560). การประยุกต์ใช้วิธีการประหยัด เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ในรูปแบบที่มีการรับและส่งสินค้าพร้อมกัน. *วารสารวิชาการบริหารธุรกิจ*, 6(2), 175-188.
- [16] M.A. Mohammed, M.K. Abd Gani, R.I. Hamed, S.A. Mostafa, M.S. Ahmad and D.A. Ibrahim. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution. *Journal of Computational Science*, 21 (2017), 255–262.

- [17] Mitsuo Gen, Juno Choi and Kenichi Ida. (2000). Improved genetic algorithm for generalized transportation problem. *Artif Life Robotics* 4: 96-102.
- [18] Jens Gottlieb and Lutz Paulmann. Genetic Algorithms for the Fixed Charge Transportation Problem. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC)* 1998, 330-335.
- [19] Mahdi Abbasi, Milad Rafiee, Mohammad R. Khosravi, Alireza Jolfaei, Varun G. Menon and Javad Mokhtari Koushyar. (2020). An efficient parallel genetic algorithm solution for vehicle routing problem in cloud implementation of the intelligent transportation systems. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 9: 6. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-0157-4>
- [20] Mitsuo Gen, Fulya Altiparmak, Lin Lin. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *OR Spectrum* 28: 337–354. DOI 10.1007/s00291-005-0029-9.
- [21] PCauto. Toyota Hilux Champ รองรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่าไร? [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อ 28 พฤษภาคม 2569]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.pcauto.com/th/faq/what-is-the-maximum-load-capacity-of-the-toyota-hilux-champ-faq2040>
- [22] Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568-581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- [23] นพรุจ สัจข์แป้น และสุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา. (2557). การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาเส้นทางการขนส่งของโรงกำจัดซากไก่ . *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 24 (3), 526-536

การศึกษาจำนวนก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ

Study of the optimal number of lotus stems for yarn production in hand embroidery

วารี กาลศิริศิลป์¹, คณภรณ์ ยิ้มชื่น², เยาวมาลย์ นามใหม่³ และ โสภิตา วิศาลศักดิ์กุล^{2*}
Waree Kalsirisilp¹, Kanaporn Yimchuen², Yaowamal Nammal³ and Sopida Wisansakkul^{2*}

¹โรงเรียนสาธิตนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³กองกลาง ฝ่ายพิพิธภัณฑ์บัว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹RMUTT Innovation Demonstration School

²Department of Home Economics, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³Department Lotus and Waterlily Museum, General Administration Division, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Corresponding Author: Email: sopida_w@rmutt.ac.th

Received: 17-04-2026 Revised: 17-06-2026 Accepted: 26-06-2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจำนวนก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ และทดลองประยุกต์ใช้เส้นด้ายจากก้านบัวหลวงในงานปักผ้าด้วยมือ โดยกำหนดปัจจัยที่ศึกษาเป็นจำนวนก้านบัวหลวง 3 ระดับ ได้แก่ 3 ก้าน 6 ก้าน และ 9 ก้าน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และนำเส้นด้ายที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความหนา และความชื้น ผลการวิจัยพบว่า เส้นด้ายจากก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้านมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานปักผ้าด้วยมือมากที่สุด | โดยมีค่าความต้านทานแรงดึง 1.20 ± 0.02 นิวตัน ค่าความหนา 0.16 ± 0.02 มิลลิเมตร และค่าความชื้นร้อยละ 16.07 ± 1.09 เส้นด้ายที่ได้มีความยืดหยุ่น ไม่เปราะขาดง่าย และสามารถคงรูปได้ดีเมื่อนำไปทดลองปักผ้า ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าก้านบัวหลวงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นเส้นด้ายธรรมชาติสำหรับงานหัตถกรรม และสามารถต่อยอดสู่ผลิตภัณฑ์สร้างสรรค์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้

คำสำคัญ : ก้านบัวหลวง, เส้นด้ายปักผ้า, งานปักผ้าด้วยมือ

ABSTRACT

This research aimed to determine the optimal number of lotus stems for producing hand embroidery yarn and to experiment with the application of lotus-stem yarn in hand embroidery. The experimental factor was the number of lotus stems, with three levels: 3 stems, 6 stems, and 9 stems. A completely randomized experimental design was used, and the resulting yarns were tested for physical properties, including tensile strength, thickness, and moisture content. The results showed that yarn made from 6 lotus stems was the most suitable for hand embroidery, with a tensile strength of 1.20 ± 0.02 N, a thickness of 0.16 ± 0.02 mm, and a moisture content of $16.07 \pm 1.09\%$. The yarn was flexible, not brittle, and retained its shape well during embroidery. This study indicates that lotus stems have the potential to be developed into natural yarn for handicrafts and further into creative products from agricultural waste.

Keyword: Lotus stem, Embroidery thread, Hand embroidery

1. บทนำ

บัวหลวง (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) เป็นพืชชุ่มน้ำที่มีความสำคัญทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรมของประเทศไทย โดยมีการนำส่วนต่าง ๆ ของบัวหลวง ได้แก่ ดอก เมล็ด ใบ และเหง้า มาใช้ประโยชน์ในด้านอาหาร ยาสมุนไพร และการประกอบพิธีกรรมทางศาสนา อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวดอกและเมล็ดบัว ก้านบัวหลวงจำนวนมากถูกทิ้งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกำจัดโดยการหมักและทิ้งในแหล่งน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสียและยังขาดการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงสร้างสรรค์อย่างเป็นระบบ [1] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ก้านบัวหลวงได้รับความสนใจในฐานะวัตถุดิบสำหรับการผลิตเส้นใยธรรมชาติ (Lotus Fiber) เนื่องจากเส้นใยที่ได้มีคุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่ น้ำหนักเบา สัมผัสนุ่ม ระบายอากาศได้ดี ดูดซับความชื้นได้ดี และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2] และในปัจจุบันเส้นใยบัวหลวงถูกนำมาใช้ในการผลิตผ้าทอในประเทศเมียนมา กัมพูชา และเวียดนาม จนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่มีมูลค่าสูงและได้รับการยอมรับในระดับสากล [3] อย่างไรก็ตาม เส้นใยบัวหลวงมีข้อจำกัดด้านการแปรรูป เนื่องจากก้านบัวต้องนำมาสกัดเส้นใยภายในระยะเวลาอันสั้นหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเส้นใย และยังขาดองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมคุณสมบัติของเส้นด้ายที่ผลิตได้

งานปักผ้าด้วยมือเป็นศิลปหัตถกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มคุณค่าเชิงสุนทรียะให้แก่เครื่องนุ่งห่มและเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน โดยสะท้อนถึงความประณีต ความชำนาญ และอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมของผู้สร้างสรรค์อย่างชัดเจน ในอดีตการปักผ้านิยมใช้เส้นไหมสีขาวและดำเนินการปักผ้าด้วยมือทั้งหมด เนื่องจากเป็นงานที่ต้องอาศัยความละเอียดอ่อนสูง ต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับเปลี่ยนรูปแบบโดยใช้เส้นด้ายสีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความหลากหลายและความสวยงามให้กับผลงาน [4] ปัจจุบันงานปักผ้ายังคงเป็นงานหัตถกรรมที่สามารถประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติได้อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะเส้นใยที่มีความละเอียดอ่อนตัว และสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นด้ายได้อย่างต่อเนื่อง จึงนับเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและพัฒนาผลิตภัณฑ์หัตถกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตเส้นใยจากวัสดุธรรมชาติหลายชนิด เช่น เส้นใยกล้วย เส้นใยสับปะรด และเส้นใยถั่วเขียว รวมถึงมีรายงานเกี่ยวกับการผลิตเส้นใยจากก้านบัวหลวงเพื่อใช้ในงานสิ่งทออยู่บ้าง [5-6] แต่การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการนำก้านบัวหลวงมาพัฒนาเป็นเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือยังมีจำกัด โดยเฉพาะข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนหรือปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นด้าย เช่น ความต้านทานแรงดึง ความหนา และความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อศักยภาพในการนำเส้นด้ายไปประยุกต์ใช้ในงานหัตถกรรม

ดังนั้น ช่องว่างขององค์ความรู้ (Research Gap) ของการศึกษานี้ คือ การขาดข้อมูลเชิงประจักษ์เกี่ยวกับผลของปริมาณก้านบัวหลวงต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นด้าย และยังไม่

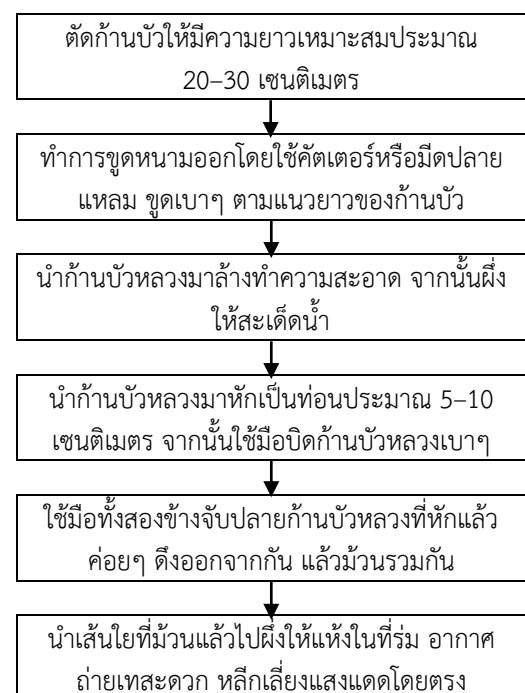
มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่าปริมาณก้านบัวหลวงเท่าใดจึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ ด้วยเหตุนี้ การศึกษาปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ จึงมีความสำคัญทั้งในเชิงวิชาการและเชิงประยุกต์ โดยมุ่งเน้นการสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของก้านบัวหลวง การพัฒนากระบวนการผลิตด้าย และการประเมินสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายที่ผลิตจากก้านบัวหลวงในปริมาณต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเส้นด้ายจากเส้นใยบัวหลวงและการประยุกต์ใช้ในงานหัตถกรรมจากเส้นใยธรรมชาติในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

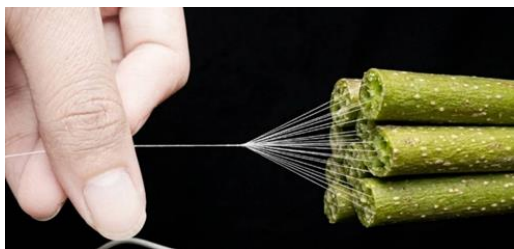
2.1 การศึกษาปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ

2.1.1 การเตรียมก้านบัวหลวง

ทำการคัดเลือกก้านใบบัวหลวงสดสายพันธุ์บัวหลวงพระราชินี (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) ซึ่งปลูกภายในพิพิธภัณฑสถานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย โดยเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนตุลาคมพ.ศ. 2568 คัดเลือกก้านบัวที่มีอายุหลังแทงก้านประมาณ 4 สัปดาห์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0–1.5 เซนติเมตร และความยาวเฉลี่ย 50–70 เซนติเมตร โดยก้านบัวที่นำมาใช้ต้องมีลักษณะสด มีความสมบูรณ์ ไม่เน่าเสีย และไม่มียอดแตก รอยชำหรือเชื้อรา หลังการเก็บเกี่ยว นำก้านบัวมาทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดและซับให้แห้ง ก่อนนำไปสกัดเส้นใยภายใน 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเส้นใยและการสูญเสียความชื้นตามธรรมชาติ โดยมีขั้นตอนตามกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการเตรียมเส้นใยจากก้านบัวหลวง



ภาพที่ 2 การดึงเส้นใยจากก้านบัวหลวง

2.1.2 การศึกษาปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้าย

ทำการศึกษาก่อนการเก็บข้อมูลที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้าย โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ จำนวนก้านบั่วหลวง แปรเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3 ก้าน 6 ก้าน และ 9 ก้าน ตามปริมาณจากการศึกษาทดลองในเบื้องต้น ทำการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) จากนั้นนำเส้นใยที่ได้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพสิ่งทอทดลอง 3 จำพวก เพื่อคัดเลือกปริมาณก้านบั่วหลวงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ ดังนี้

2.1.2.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น DS500 (DESK, Germany) ทำการเตรียมตัวอย่างเส้นด้ายความยาว 100 มิลลิเมตร ทดสอบที่ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยทำการทดสอบสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ และบันทึกค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Maximum tensile strength) หน่วยนิวตัน (N)

2.1.2.2 การทดสอบความหนา

ทำการวัดความหนาของเส้นด้ายโดยใช้เครื่องวัดความหนาดิจิทัล (Digital Thickness Gauge) รุ่น Mitutoyo 547-401 (Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Japan) ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ทำการเตรียมตัวอย่างของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวงทั้ง 3 สิ่งทดลอง โดยการใช้นิ้วหัวแม่มือกดด้ามจับเหมือนการถือแก้ว เพื่อเปิดช่องว่างสำหรับใช้เส้นด้ายจากก้านบัวหลวงปล่อยมือเพื่อให้หัวกลิ้งแม่เหล็กลงที่ตัวด้ายจากก้านบัวหลวง ทดสอบสิ่งทดลองละ 3 จุด แล้วทำการบันทึกผลเป็นหน่วยมิลลิเมตร (mm)

2.1.2.3 การทดสอบความชื้น

ทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของเส้นด้ายตามวิธีอบแห้งในตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven Method) โดยใช้ตู้อบลมร้อน รุ่น JSOF-Series Convection Oven (JCR, Korea) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 0.001 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่แล้ว นำมาพักในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที ก่อนชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณร้อยละความชื้น (% Moisture Content) ตามสมการ

$$\text{ร้อยละความชื้น (\%)} = [(W1 - W2)/W1] \times 100$$

เมื่อ $W1$ = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

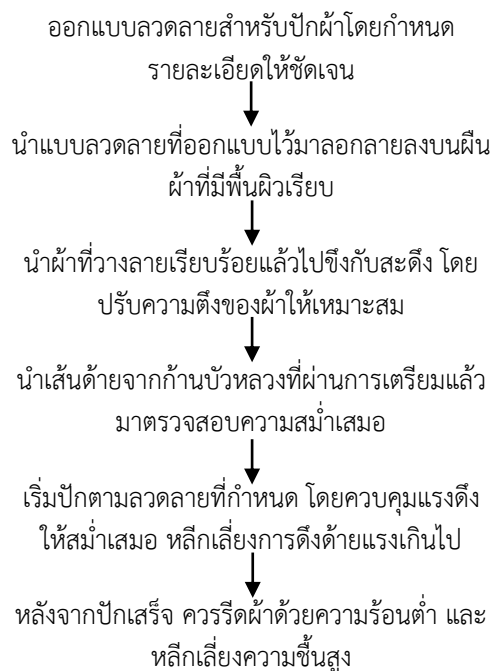
W2 = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง (กรัม)

ดำเนินการทดสอบสิ่งทดลองละ 3 ขั้ว และบันทึกค่าความชื้น
ที่ได้

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของทั้ง 3 สิ่งทดลอง ทำการพิจารณาจากความต้านทานแรงดึง ค่าความหนา และค่าความชื้น โดยนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่าความแตกต่าง เพื่อทดสอบหาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new Multiple Test (DMRT) แล้วนำสิ่งทดลองไปดำเนินการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2.2 การศึกษากระบวนการปักผ้าจากเส้นใยบัวหลวง

นำเส้นใยจากก้านบัวหลวงที่ผ่านการทดสอบสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุด มาศึกษากระบวนการปักผ้าจากเส้นใยบัวหลวง ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการปักผ้าจากเส้นใยบัวหลวง



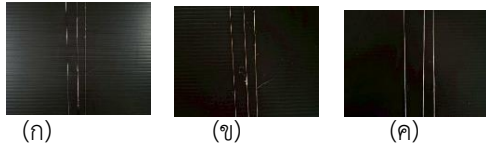
ภาพที่ 4 แบบร่างลวดลายดอกบัวสำหรับงานปักผ้า

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัย

3.1.1 การศึกษาปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ

จากผลการศึกษาปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมในการผลิตเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้าด้วยมือทั้ง 3 สิ่งทดลอง มีลักษณะที่ปรากฏดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะที่ปรากฏของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวง (ก) ปริมาณ 3 ก้าน, (ข) ปริมาณ 6 ก้าน และ (ค) ปริมาณ 9 ก้าน

จากภาพที่ 5 แสดงลักษณะปรากฏของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวงทั้ง 3 สิ่งทดลอง โดยผลการศึกษาพบว่า ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้าน ให้เส้นด้ายที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะเหนียว แข็งแรง และมีขนาดสม่ำเสมอในระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้สามารถนำไปใช้งานประดิษฐ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่การใช้อันบัวหลวงจำนวน 3 ก้าน พบว่าเส้นด้ายมีลักษณะบาง ขาดความแข็งแรง และมีแนวโน้มขาดได้ง่าย ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการความคงทน ส่วนการใช้อันบัวหลวงจำนวน 9 ก้าน แม้จะให้เส้นด้ายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น แต่กลับมีลักษณะค่อนข้างหยาบและแข็ง ซึ่งอาจส่งผลต่อความยืดหยุ่นและความละเอียดในการนำไปใช้งานประดิษฐ์ โดยเฉพาะงานปักผ้าด้วยมือที่ต้องการความประณีต

3.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวง

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวง ประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานแรงดึง การทดสอบความหนา และการทดสอบความชื้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาค่าสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวงสำหรับงานปักผ้าด้วยมือ

สิ่งทดลอง	ค่าความต้านทานแรงดึง (นิวตัน)	ค่าความหนา (มม.)	ค่าความชื้น (ร้อยละ)
1	$0.80^c \pm 0.02$	$0.09^c \pm 0.01$	$12.88^c \pm 0.87$
2	$1.20^b \pm 0.02$	$0.16^b \pm 0.02$	$16.07^b \pm 1.09$
3	$2.01^a \pm 0.04$	$0.20^a \pm 0.01$	$18.18^a \pm 0.65$

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวงทั้ง 3 สิ่งทดลอง ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง ความหนา และความชื้น พบว่า ปริมาณก้านบัวหลวงที่ใช้ในการศึกษาเมื่อเทียบกับสมบัติของเส้นด้ายอย่างชัดเจน ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยในด้านความต้านทานแรงดึง พบว่า สิ่งทดลองที่ 3 (ใช้ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 9 ก้าน) มีค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2.01 นิวตัน แสดงถึงความสามารถในการรับแรงดึงที่ดีและมีความแข็งแรงสูง รองลงมาคือสิ่งทดลองที่ 2 (จำนวน 6 ก้าน) มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.20 นิวตัน และสิ่งทดลองที่ 1 (จำนวน 3 ก้าน) มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 0.80 นิวตัน แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าการเพิ่มจำนวนก้านบัวหลวงส่งผลให้เส้นด้ายมีความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากจำนวนมัดเส้นใยภายในเส้นด้ายที่เพิ่มขึ้นและสามารถกระจายแรงได้ดีขึ้น

สำหรับในด้านความหนา พบว่า สิ่งทดลองที่ 3 มีค่าความหนาเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 0.20 มิลลิเมตร รองลงมาคือสิ่งทดลองที่ 2 มีค่าความหนาเฉลี่ย 0.16 มิลลิเมตร และสิ่งทดลองที่ 1 มีค่าความหนาเฉลี่ย 0.09 มิลลิเมตร โดยข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนก้านบัวหลวงส่งผลให้เส้นด้ายมีขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับ อย่างไรก็ตาม ความหนาที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อความละเอียดในการใช้งาน โดยเฉพาะในงานปักผ้าด้วยมือที่ต้องการความประณีต

และจากการศึกษาค่าความชื้น พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 มีค่าร้อยละความชื้นเฉลี่ย 12.88 ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ สะท้อนถึงการดูดซับความชื้นของเส้นใยที่ต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่น ขณะที่สิ่งทดลองที่ 2 มีค่าร้อยละความชื้นเฉลี่ย 16.07 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ส่งผลให้เส้นด้ายมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่น สามารถนำไปผลิตเป็นด้ายปักผ้าและใช้งานประดิษฐ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกัน สิ่งทดลองที่ 3 มีค่าร้อยละความชื้นเฉลี่ย 18.18 ซึ่งค่อนข้างสูง อาจส่งผลกระทบต่อการใช้งาน และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดเชื้อรา

จากการสังเกตลักษณะปรากฏของเส้นด้ายเบื้องต้น พบว่า สิ่งทดลองที่ใช้ก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้านให้เส้นด้ายที่มีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอและสามารถนำไปทดลองประยุกต์ใช้ในงานปักผ้าได้ กล่าวโดยสรุป เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพโดยรวมร่วมกัน ทั้งในด้านความแข็งแรง ความหนา และความชื้น พบว่า สิ่งทดลองที่ 2 (ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้าน) มีสมบัติทางกายภาพอยู่ในระดับกึ่งกลางระหว่างสิ่งทดลองที่ 1 และสิ่งทดลองที่ 3 และแสดงศักยภาพเบื้องต้นในการนำไปพัฒนาต่อเป็นเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้า เนื่องจากมีสมดุลของคุณสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานจริง ทั้งด้านความแข็งแรงในระดับที่เพียงพอ ความหนาที่เหมาะสม และค่าความชื้นที่ส่งเสริมความยืดหยุ่นของเส้นด้าย

อันเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำไปใช้งานในงานปักผ้าด้วยมือและงานประดิษฐ์อื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

3.1.3 ผลการศึกษากระบวนการปักผ้าจากเส้นใยบัวหลวง

จากการศึกษากระบวนการปักผ้าจากเส้นใยบัวหลวง สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์งานปักผ้าลายดอกบัวพร้อมใส่กรอบรูปตกแต่งได้โดยขนาด (กว้าง X ยาว) 17.50 x 22.50 เซนติเมตร มีน้ำหนักรวมโดยประมาณ 300 กรัม ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลิตภัณฑ์งานปักผ้าลายดอกบัวจากเส้นใยบัวหลวง

จากภาพที่ 6 พบว่า เส้นด้ายจากก้านบัวหลวงสามารถร้อยผ่านเข็มและขึ้นลวดลายบนผืนผ้าได้ โดยเส้นด้ายยังคงความต่อเนื่องตลอดกระบวนการปักและสามารถจัดเรียงแนวเส้นได้ตามรูปแบบที่ต้องการ ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพเบื้องต้นของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวงในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับสร้างชิ้นงานปักผ้าต่อไป

3.2 อภิปรายผล

ผลการศึกษาครั้งนี้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของก้านบัวหลวงสายพันธุ์บัวหลวงพระราชินี ซึ่งเป็นพันธุ์พื้นเมืองของไทยที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเส้นใยธรรมชาติ โดยก้านบัวมีความยาวมาก มีโครงสร้างเส้นใยภายในที่ต่อเนื่อง และมีความเหนียวในระดับหนึ่ง ซึ่งเอื้อต่อการสกัดและแปรรูปเป็นเส้นด้าย ทั้งนี้ ลักษณะทางกายภาพของก้านบัว เช่น ความแข็ง ความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลาง มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเส้นใยที่ได้ [7] ทั้งนี้ หากพิจารณาในเชิงโครงสร้าง ก้านบัวประกอบด้วยมัดเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber bundles) ที่สามารถดึงออกมาเป็นเส้นใยต่อเนื่องได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นเส้นด้ายและผลิตภัณฑ์สิ่งทอ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทางกายภาพของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวง พบว่า ปริมาณก้านบัวที่ใช้มีอิทธิพลต่อความแข็งแรง ความหนา และความชื้นของเส้นด้ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยสิ่งทดลองที่ 3 (ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 9 ก้าน) ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 2.01 นิวตัน สอดคล้องกับหลักการของโครงสร้างเส้นใยที่เมื่อมีจำนวนเส้นใยรวมมากขึ้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง เนื่องจากจำนวนมัดเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นด้ายมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถกระจายแรงที่กระทำได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้จะมีความแข็งแรงสูง แต่ค่าความหนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.20 มิลลิเมตร ส่งผลให้เส้นด้ายมีลักษณะหยาบ ซึ่งไม่สอดคล้องกับ

คุณลักษณะของด้ายปักผ้ามาตรฐานที่ต้องการความละเอียดและความยืดหยุ่นในการใช้งาน [8] ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ เกษา ลาวงษา [9] ที่รายงานว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติในโครงสร้างของเส้นด้ายส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เส้นด้ายมีขนาดใหญ่และมีความหยาบเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ในทางกลับกัน สิ่งทดลองที่ 1 (ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 3 ก้าน) แม้จะให้เส้นด้ายที่มีความบาง แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ โดยมีค่าเท่ากับ 0.80 นิวตัน และค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 12.88 ส่งผลให้เส้นด้ายมีความแห้งและเปราะ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน โดยเฉพาะในงานปักที่ต้องการความต่อเนื่องของเส้นด้ายและความยืดหยุ่นในการขึ้นรูป ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้านเส้นใยธรรมชาติของพรศิริ และคณะ [10] ที่ระบุว่าความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความยืดหยุ่นและสมบัติทางกลของเส้นด้าย ทั้งนี้ เส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถดูดซับความชื้นได้ดี ดังนั้น เมื่อปริมาณความชื้นในเส้นด้ายลดลง จะทำให้เส้นใยสูญเสียความอ่อนตัวและมีแนวโน้มเปราะหรือขาดได้ง่ายขึ้น

สำหรับสิ่งทดลองที่ 2 (ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้าน) พบว่ามีสมมูลของสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือ มีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่าเท่ากับ 1.20 นิวตัน มีค่าความหนาเท่ากับ 0.16 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับเส้นด้ายจากวัสดุอื่นและค่าร้อยละความชื้นอยู่ในช่วงเหมาะสม ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.07 ส่งผลให้เส้นด้ายมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่น สามารถนำไปใช้งานปักผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ความสมมูลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาเส้นด้ายผสมหรือเส้นใยธรรมชาติที่ต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง ความละเอียด และความยืดหยุ่น เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริง [11-12]

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร่วมกับแนวทางการพัฒนาเส้นใยจากวัสดุธรรมชาติอื่น เช่น เส้นใยใบอ้อยหรือเส้นใยผสม พบว่าการควบคุมสัดส่วนวัตถุดิบและกระบวนการผลิตมีผลต่อคุณสมบัติของเส้นด้ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในด้านความสม่ำเสมอ ความแข็งแรง และความยืดหยุ่น [10] ซึ่งผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าการเลือกปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเส้นด้ายให้มีคุณภาพ ซึ่งค่าความหนาของเส้นด้ายจากก้านบัวหลวงที่ได้จากการศึกษานี้อยู่ในช่วง 0.16–0.20 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับผลการศึกษาเส้นด้ายจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น เช่น เส้นใยกล้วยและเส้นใยสับปะรด (0.15–0.25 มิลลิเมตร) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเส้นใยบัวหลวงในการพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานสิ่งทอและงานหัตถกรรม

ดังนั้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า สิ่งทดลองที่ 2 (ปริมาณก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้าน) มีสมบัติทางกายภาพอยู่ในระดับที่ก้ำกึ่งระหว่างสิ่งทดลองที่ 1 และ 3 และอาจมีศักยภาพสำหรับการนำไปพัฒนาต่อเป็นเส้นด้ายสำหรับงานปักผ้า เนื่องจากมีสมมูลของสมบัติทางกายภาพ ทั้งในด้านความแข็งแรง ความละเอียด

และความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทดแทนจากเส้นใยธรรมชาติ และสนับสนุนแนวคิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืนต่อไปได้อย่างเป็นรูปธรรม

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณก้านบัวหลวงที่เหมาะสมต่อการผลิตเส้นด้ายจากเส้นใยธรรมชาติ โดยทำการทดลอง 3 ระดับ ได้แก่ การใช้ก้านบัวหลวงจำนวน 3, 6 และ 9 ก้าน และประเมินสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความหนา และค่าความชื้น ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณก้านบัวหลวงมีผลต่อคุณสมบัติของเส้นด้ายอย่างชัดเจน โดยสิ่งทดลองที่ใช้ก้านบัวหลวง 9 ก้าน ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 2.01 นิวตัน แต่มีความหนามากและลักษณะหยาบ ขณะที่สิ่งทดลองที่ใช้ก้านบัวหลวงในปริมาณ 3 ก้าน ให้เส้นด้ายที่บางแต่มีความแข็งแรงต่ำและเปราะง่าย สำหรับสิ่งทดลองที่ใช้ก้านบัวหลวงในปริมาณ 6 ก้าน มีสมบัติทางกายภาพอยู่ในระดับปานกลางระหว่างทั้งสองสูตร และแสดงศักยภาพเบื้องต้นในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเส้นด้ายสำหรับงานหัตถกรรม อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังไม่ได้ประเมินสมบัติเชิงกลเพิ่มเติม เช่น ความเหนียว ความยืดหยุ่น ความสม่ำเสมอของเส้นด้าย ความคงทนต่อการใช้งานและการเก็บรักษา รวมถึงยังไม่มีมีการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานจริงในงานปักผ้า ดังนั้นจึงยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าสิ่งทดลองที่ใช้ก้านบัวหลวงจำนวน 6 ก้านเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตด้ายปักผ้า

ผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าก้านบัวหลวงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นเส้นด้ายธรรมชาติสำหรับงานหัตถกรรม และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเส้นใยบัวหลวงในอนาคต ทั้งนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการย้อมสี ความคงทนต่อการใช้งานและการเก็บรักษา การเปรียบเทียบกับด้ายปักเชิงพาณิชย์ และการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านงานปัก เพื่อยืนยันศักยภาพการนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพิพิธภัณฑ์บัว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบตลอดระยะเวลาในการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทดสอบผลิตภัณฑ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรณิการ์ บุญยัง. การพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากด้วยการสร้างมูลค่าเพิ่มจากบัวหลวงของชุมชน ตำบลยกกระบัตร อำเภอสามเภา จังหวัดตาก. วารสารวิชาการนอร์ทเทิร์น. 2566;10(2):27-43.
- [2] จิตต์โสภา เกลียวศักดิ์, น้ำฝน คุุเจริญไพศาล, สโรชา จงภู, อิศราภรณ์ ฉายแก้ว. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมแผ่นเส้นใยจากเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยขานอ้อยร่วมกับตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังเพื่อประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 2568;34(1):88-107.
- [3] Yusuf, M., Sharma, D., Khan, M. B., Mian, S. S., & Asif, M. Overview of lotus fiber: types, sustainable properties and eco-friendly aspects. International Journal of Pharmaceutical Sciences and Innovations; 2024; 4(2): 1-9.
- [4] อ้อยทิพย์ ผู้พัฒน์, มาลา ฤทธินิม. ศิลปะงานตัดต่อผ้าและการปักตกแต่งลวดลายสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2555.
- [5] Pickering, K. L., Efendy, M. A., & Le, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016;83:98-112.
- [6] Pandey, R., Sinha, M. K., & Dubey, A. Amarish. Cellulosic fibers from Lotus (*Nelumbo nucifera*) peduncle. Journal of natural fibers. 2020;17(2):298-309.
- [7] ณรัช พรนิธิบุญ, ปิยะพงษ์ ยงเพชร, ปณณรัช ฤกษ์ภักดี. การพัฒนาเส้นด้ายจากเส้นใยบัวหลวงผ่านการทดสอบคุณภาพด้วยเทคนิคการเข้าเกลียวแบบภูมิปัญญาชาวบ้าน. SciTech Research Journal. 2568;8(2):31-40.
- [8] จิรัชญา วันจันทร์, อนุชา แพงเกษร. มรดกภูมิปัญญาทางวัฒนธรรม: คุณค่าหัตถศิลป์ผ้าปักโบราณของไทย. ศิลปกรรมสาร. 2567;17(2):1-20.
- [9] เกชา ลาวงษา, สุชีรา ผ่องใส, ขยัญภัทร์ ก่ออารีโย, สาคร ชลสาคร, จรัสทิพย์ วังเย็น. การพัฒนาเส้นด้ายผสมระหว่างเส้นใยไหมกับเส้นใย ฟิลาเจน. วารสารคหกรรมศาสตร์และวัฒนธรรม อย่างยั่งยืน. 2567;6(1):91-102.

- [10] พรศิริ หลงหนองคุณ, ศรีกาญจนา จตุพัฒน์วิโรตม, สาคร ชล
สาคร. การพัฒนากระบวนการผลิตด้ายจากใบอ้อย. วารสาร
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น: วิศวกรรมศาสตร์และ
เทคโนโลยี. 2560;5(2):18–22.
- [11] ณธชา พันธบัว. สมบัติของเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจาก
เส้นใยบัวหลวง (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) แบบ Z on
Z. วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่และการใช้
ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal). 2565;15
(2):38-51.
- [12] ถาวร อินทโร, สุบิน ใจหา, ปภาวดี เนตรสุวรรณ. การศึกษา
สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเส้นใยสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย
นางแลและภูแลในเขตจังหวัดเชียงราย. วารสารมหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
2567;16(32):1–15.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 8-15 หน้า ในรูปแบบ 1 หรือ 2 คอลัมน์

บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 8-15 หน้า ในรูปแบบ 1 หรือ 2 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาการกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่านรูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจาก การกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาการกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เพื่อดำเนินการในส่วนต่อไป

2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อให้เกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

3.2 กระดาษ

ขนาด A4 ขนาด 8.3 x 11.7 นิ้ว หรือ 21 x 29.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ TH SarabunPSK

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระชับ ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน และ Email

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวข้อใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารเอกสารอ้างอิง/Reference (ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็กจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท**4.1 บทความวิจัย****A. ส่วนปก**

- 1. ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- 2. ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ Email address ที่สามารถติดต่อได้
- 3. ตัวเลขยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
- 4. บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของ การศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการอภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้อง มีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
- 5. คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการสืบค้น ในระบบฐานข้อมูล หมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

B. ส่วนเนื้อหา

- 1. บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการ ทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 2. วัตถุประสงค์การวิจัย** ข้อความที่แสดงให้เห็น ถึงสิ่งที่นักวิจัยต้องการศึกษา ที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจง สามารถ เขียนแสดงเป็นข้อ ๆ
- 3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควร อธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
- 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND DISCUSSION)** เสนอผลการ ทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตาราง ของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ
เป็นการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรเอกสารอ้างอิงทฤษฎีหรือ เปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มี อยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจนเหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่ป็นรูปถ่ายเส้นให้วาดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลข รูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ จัดแบบตรงกลาง

ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง

5. **สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย
6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่มีก็ได้)
7. **เอกสารเอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการเอกสารอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การเอกสารอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่เอกสารอ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหาเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วยและคณะหรือ et al.
8. **การเอกสารอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)** การเอกสารอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver> 2011.pdf

ตัวอย่างการเขียนเอกสารเอกสารอ้างอิง

หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อหนังสือ(Title of the book)./ครั้งที่พิมพ์(Edition)./เมืองที่พิมพ์(Place of Publication):สำนักพิมพ์(Publisher);ปี(Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.
- รังสรรค์ ปัญญาญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อบทความ(Title of the article)./ชื่อวารสาร(Title of the Journal)./ปีที่พิมพ์(Year);เล่มที่ของวารสาร(Volume):หน้า(Pages).

- ชนิตรา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบุญ ตั้งวโรตมนกุล และคณะ. การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on English as a foreign language students' word recognition and comprehension of the English language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]./สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]./จาก (Available from): <http://.....>

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10149/improving-palliative-care-for-cancer>.

- “กำเนิด” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การเอกสารอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ./บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม./วัน เดือน ปีที่ประชุม./สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์./สำนักพิมพ์./ปีที่พิมพ์./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- อีระ ฤชตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จุฑะพุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี.กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

B. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (INTRODUCTION) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (CONCLUSION) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารเอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1.
2.
3.

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1.
2.
3.

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย..... ถนน.....

ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

Email..... โทรศัพท์..... โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็น การเข้าช้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจนโยบายการรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

บทความของท่านได้ผ่านขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ
(peer Reviewer) จำนวน 3 ท่าน จากสถาบันภายนอก หลายหลายสถาบัน และหลากหลายสาขาวิชา
ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง และท่านได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเป็นที่เรียบร้อยแล้ว
โดย ตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่..... ฉบับที่ พ.ศ.

(.....)

บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

