วารสาร มทร.อีสาน
RMUTI JOURNAL

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Science and Technology

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2566
Vol. 16 No. 1 (January - April 2023)

ISSN (Online): 2672-9369

INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2
(https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index)

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เน้นบทความทางด้าน Physical Sciences ในสาขาวิชา Chemistry, Engineering, Materials Science, Environmental Science และ Mathematics บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญอย่างน้อย 3 ท่าน แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน
ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม
ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม
ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป
ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	ดุลย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัศวสุขี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ	วงค์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ่นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล	วรพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาววลีรักษ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ
Table of Contents

รูปแบบการจัดวางเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่เหมาะสมสำหรับการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ในโรงเรือน

Suitable Layout of Semi-transparent Solar Cells for Planting Strawberries in Greenhouses

Tadam Vongpanya[1] สุลักษณา มงคล[1] และสราวุธ พลวงษ์ศรี[1*]
Tadam Vongpanya[1] Sulaksana Mongkon[1] and Sarawut Polvongsri[1*]

Received: *November 21, 2022;* ***Revised:*** *March 9, 2023;* ***Accepted:*** *March 20, 2023*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหารูปแบบการจัดวางเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่เหมาะสมกับการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ในโรงเรือนปลูกพืช โดยการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบสมรรถนะทางด้านไฟฟ้าและปริมาณแสงที่พืชต้องการในการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Photon Flux Density: PPFD) ในการศึกษาจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Solar Cell) ขนาด 4.72 วัตต์ต่อเซลล์ นำมาจัดวางเซลล์ใน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 เว้นระยะห่างแบบที่ 2 และแบบกระดานหมากรุก เพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสขนาด 2 ตารางเมตร จากการศึกษาพบว่า รูปแบบการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างที่ 2 และแบบกระดานหมากรุก มีค่า PPFD เท่ากับ 755.47 และ 751.17 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที และมีความเหมาะสมกับการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ และเมื่อทำการทดสอบสมรรถนะของแผงสามารถสร้างสมการเพื่อทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของทั้ง 2 รูปแบบ ในส่วนที่ 2 เป็นการนำสมการที่ได้จากส่วนที่ 1 ไปทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีนำไปติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่แบบ Lean to ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 12 เมตร สูง 4.95 เมตร พบว่า รูปแบบการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างที่ 2 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 7,309.58 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี เทียบเท่าเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 32,893.11 บาทต่อปี โดยลงทุน 197,500 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 6 ปี ในขณะที่รูปแบบการจัดวางเซลล์แบบกระดานหมากรุกสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 7,477.09 กิโลวัตต์ต่อปี เทียบเท่าค่าไฟฟ้า 33,646.91 บาทต่อปี โดยลงทุนเท่ากันที่ 197,500 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 5.87 ปี

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใส; รูปแบบการจัดวางเซลล์; ประสิทธิภาพ; โรงเรือนปลูกพืช; สตรอว์เบอร์รี่

[1] *วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่*
[1] *School of Renewable Energy, Maejo University, Chiangmai*
[*] *Corresponding Author, Tel. 09 3496 1324, E - mail: sarawut-energy@hotmail.com*

Abstract

This research investigated the most suitable arrangement of semi-transparent solar cells for strawberries planting in greenhouses. The study was divided into two parts. The first part was to evaluate the electrical performance and the amount of Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) that strawberry required for photosynthesis. In this case, 4.72 watts per cell of polycrystalline solar cell was used to arrange in 3 patterns: spacing type 1, spacing type 2, and chessboard type and a 2 m^2 of semi-transparent solar panel was created. The study revealed that the spacing type 2 and checkerboard type obtained PPFD of 755.47 and 751.17 $\mu mol/m^2/s$, respectively, which were suitable for strawberry planting. The solar panel performance was tested to develop empirical equations for predicting the power production from both patterns. In the second part, the equations obtained from the first part of the study were used to simulate energy production in the case of installing on a Lean-to strawberry greenhouse roof with a width of 6 m, a length of 12 m and a height of 4.95 m. It was found that the spacing type 2 model of semi-transparent solar panel could produce 7,309.58 kWh of electrical energy, equivalent to 32,893.11 Baht/year of electricity charge from the investment of 197,500 Baht and a payback period of 6.00 years. On the other hand, the chessboard of semi-transparent solar panel was able to produce 7,477.09 kWh/year of electrical energy, equivalent to 33,646.91 Baht/year with the same investment of 197,500 Baht and a payback period of 5.87 years.

Keywords: Semi-transparent Solar Panel; Solar Cell Arrangement; Efficiency; Greenhouse; Strawberry

บทนำ

การขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดความต้องการการใช้พลังงานที่สูงขึ้นด้วยทั้งการใช้พลังงานในภาคการคมนาคม ภาคการบริการ ภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม พลังงานที่นำมาใช้ส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีปริมาณที่จำกัดและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานทดแทนมาใช้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างยั่งยืน [1] การทำเกษตรกรรมในประเทศไทยมีการนำพลังงานทดแทนมาใช้โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ที่ประเทศไทยมีศักยภาพสูง ตามแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2542 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 17.40 เมกกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี (4.83 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อวัน) สอดคล้องกับงานวิจัย [2] ที่ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอนหรือผลึกรวม ติดตั้งภายใต้สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอนมีผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 4.36 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลวัตต์สูงสุด [3] รวมทั้งอีกหลาย ๆ งานวิจัยที่ทั้งทดสอบเรื่องสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [4] - [7] สำหรับในการปลูกพืชนั้น ได้มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาใช้ในการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงเรือนปลูกพืช (Greenhouse) เช่น ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องสูบน้ำ ระบบควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือน ระบบให้แสงแก่พืช เป็นต้น โดยส่วนมากจะเป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนดินเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากหากนำไปติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนปลูกพืชจะเป็นการบังแสงทำให้พืชไม่สามารถได้รับแสงในปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตได้

ISSN 2672-9369 (Online)

ซึ่งจากการติดตั้งบนพื้นดินทำให้เกษตรกรต้องมีต้นทุนของที่ดินเพิ่มมากขึ้นและเป็นการแย่งพื้นที่ในการปลูกพืช ส่งผลให้ต้นทุนในการปลูกพืชเพิ่มสูงขึ้น การแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสบนหลังคาโรงเรือนปลูกพืช โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งโปร่งใสไปใช้งาน เช่น การศึกษาการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบกึ่งโปร่งใสเพื่อใช้ร่วมกับอาคารประหยัดพลังงานของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอนแบบกึ่งโปร่งใสสำหรับการใช้ประโยชน์ทั้งจากพลังงานไฟฟ้าและแสงธรรมชาติภายในอาคารโดยมีรูปแบบของการเว้นระยะห่างระหว่างเซลล์มีค่าเท่ากับ 12.5 - 4 เซนติเมตร ทำการติดตั้งแผงดังกล่าวบนผนังของอาคารแบบจำลองในแนวตั้งฉาก และหันส่วนของผนังด้านที่ทำการติดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังทิศใต้พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลขที่มีระยะห่าง 3 รูปแบบจากระยะห่างน้อยไปมากมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 7.27 7.00 และ 6.78 % ตามลำดับ และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 64.6 50.8 และ 43.8 วัตต์ชั่วโมงต่อวัน ส่วนผลการทดสอบทางด้านแสงสว่างจากธรรมชาติในอาคารแบบจำลอง พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งโปร่งใสที่มีระยะห่างเซลล์มากที่สุดมีค่าความสว่างเฉลี่ยสูงสุด 2,964 ลักซ์ ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ส่วนโปร่งแสงน้อยลงมีค่าความสว่างภายในอาคารเพียง 1,049 และ 1,330 ลักซ์ [8] - [10] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองการออกแบบต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสสำหรับการประยุกต์ใช้ในเรือนกระจกทางการเกษตร โดยการจำลองนำเอากระดาษที่มีขนาดเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์มาติดบนกระจกแล้วทำการทดสอบหาค่า PPFD ในโรงเรือนทดสอบ 3 รูปแบบคือ แบบเว้นระยะห่างที่ 1 เว้นระยะห่างแบบที่ 2 แบบหมากรุก การศึกษาพบว่า ค่า PPFD ในโรงเรือนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1,055.34 576.99 และ 537.52 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ [11]

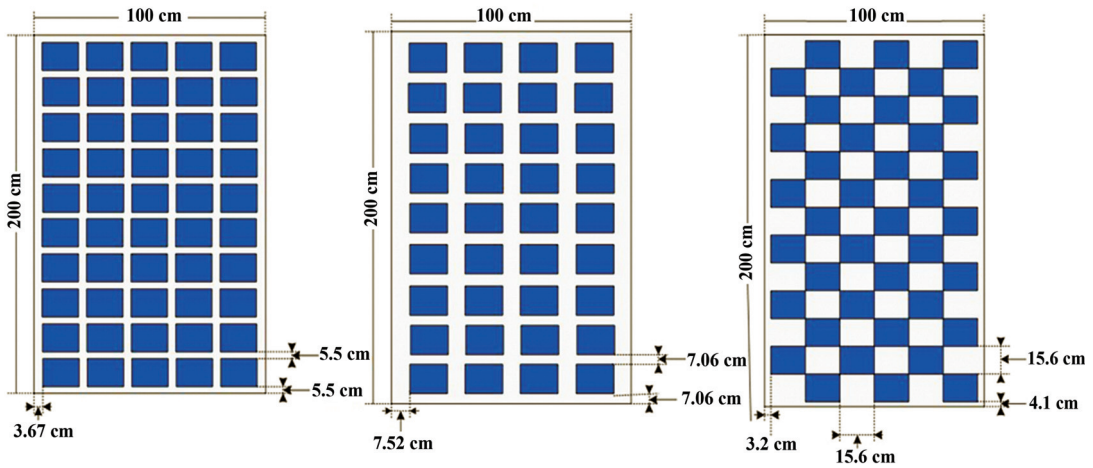
จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสไปประยุกต์ใช้งานในโรงเรือนปลูกพืชน้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย อีกทั้งพืชแต่ละชนิดที่ปลูกในโรงเรือนปลูกพืชก็มีความต้องการปริมาณแสงที่ไม่เท่ากัน สตรอว์เบอร์รี่เป็นพืชผลไม้อีกชนิดที่นิยมปลูกในโรงเรือนปลูกพืชและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการควบคุมอุณหภูมิอากาศค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องการอากาศเย็นและความชื้นที่เหมาะสม ในขณะที่ปริมาณแสงที่สตรอว์เบอร์รี่ต้องการมีค่าระหว่าง 400 - 1,200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที [12] ดังนั้นหากต้องการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสเข้ามาติดตั้งบนโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ในโรงเรือน เช่น ปั๊มน้ำ ระบบทำความเย็นแบบระเหย และระบบการให้น้ำและปุ๋ยอัตโนมัติ เป็นต้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าและสตรอว์เบอร์รี่ยังสามารถเจริญเติบโตได้ดีนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงชนิด ขนาด และรูปแบบการจัดวางเซลล์ที่เหมาะสม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาชนิด ขนาดและรูปแบบการจัดวางเซลล์เพื่อประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่เหมาะสมกับการติดตั้งกับหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ โดยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนแรกเป็นการศึกษารูปแบบการจัดวางเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับความต้องการแสงของสตรอว์เบอร์รี่ โดยในการศึกษาจะนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (Polycrystalline Solar Cell) ขนาด 4.72 วัตต์ มีความกว้าง 157 เซนติเมตร ยาว 157 เซนติเมตร มาจัดวางเซลล์เพื่อประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งโปร่งใสขนาด 2 ตารางเมตร โดยจัดวางใน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 มีระยะห่างเซลล์ด้านกว้าง 5.5 เซนติเมตร ด้านยาว 3.67 เซนติเมตร ใช้เซลล์จำนวน 50 เซลล์ (คิดเป็นกำลังไฟฟ้าติดตั้ง 200 วัตต์ต่อแผง) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2 มีระยะห่างเซลล์ด้านกว้าง 7.06 เซนติเมตร ด้านยาว

7.52 เซนติเมตร ใช้เซลล์จำนวน 36 เซลล์ (คิดเป็นกำลังไฟฟ้าติดตั้ง 150 วัตต์ต่อแผง) และแบบกระดานหมากรุก มีระยะห่างเซลล์ด้านกว้าง 15.6 เซนติเมตร ด้านยาว 15.6 เซนติเมตร ใช้เซลล์จำนวน 39 เซลล์ (คิดเป็นกำลังไฟฟ้าติดตั้ง 160 วัตต์ต่อแผง) รายละเอียดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2 และแบบกระดานหมากรุก

โดยคณะวิจัยได้รับความอนุเคราะห์การผลิตแผงจากบริษัท ฟูโซล่าร์ จำกัด และทางบริษัทได้ทำการทดสอบแผงตามมาตรฐานโดยมีรายละเอียดแผงแต่ละรูปแบบ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบในแต่ละรูปแบบการจัดวาง

รายละเอียด	เว้นระยะห่างแบบที่ 1	เว้นระยะห่างแบบที่ 2	แบบกระดานหมากรุก
P_{mp} (วัตต์)	200	150	160
I_{mp} (แอมแปร์)	8.27	8.37	8.37
V_{mp} (โวลต์)	25.24	18.13	19.37
I_{sc} (แอมแปร์)	8.94	8.91	9.01
V_{sc} (โวลต์)	31.82	23.09	24.89
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45	45	45

จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งโปร่งใส โดยติดตั้งแผงเอียงทำมุม 18 องศา หันหน้าแผงไปทางทิศใต้ ทำการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเครื่อง PV Analyzer (Model PROVA รุ่น 210, Range 0-60 โวลต์) เก็บค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง Pyranometer (Model Apogee SP-110) ค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมโดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Model Elitech รุ่น GSP-6, ความถูกต้องแม่นยำ ±0.5 องศา) และคำนวณประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (1) พร้อมสร้างสมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่แผงผลิตได้

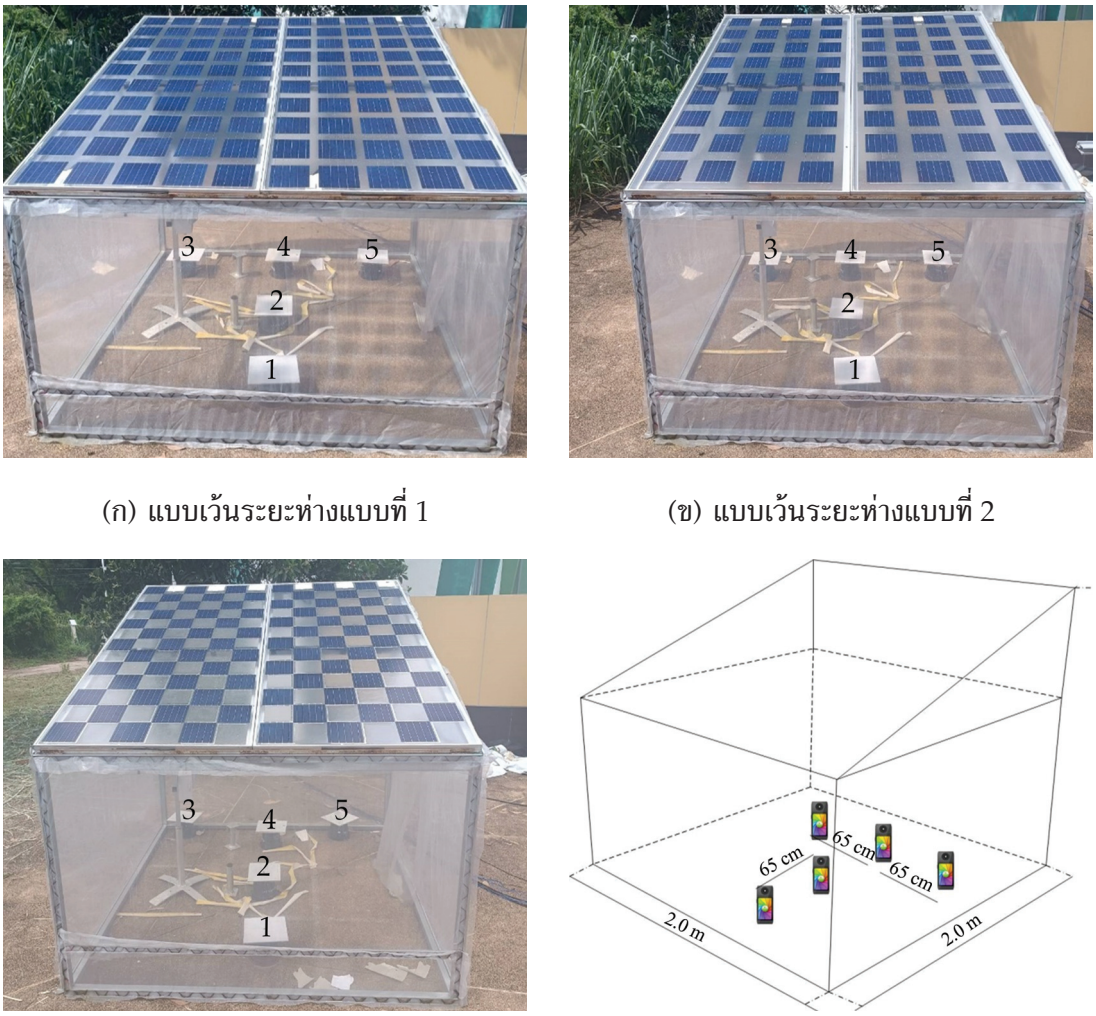
ISSN 2672-9369 (Online)

$$\eta_{pv} = \frac{P_{DC}}{I_T \times A_a} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ

η_{pv} คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
P_{DC} คือ กำลังไฟฟ้ากระแสตรง (วัตต์)
I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
A_a คือ พื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ (ตารางเมตร)

จากนั้นนำแผงทั้ง 3 รูปแบบ ไปติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนจำลองขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร เพื่อทำการทดสอบหาค่าปริมาณแสงที่พืชต้องการในการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Photon Flux Density: PPFD) ที่ตกกระทบในโรงเรือนจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่จัดวางเซลล์ทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยเครื่องวัด Spectrophotometer (Model: UPRtek's PG100N) โดยมีจุดวัดทั้งหมด 6 จุด ได้แก่ บริเวณด้านนอก 1 จุด และด้านในโรงเรือน 5 จุดโดยมีระยะห่างจุดตรวจวัดที่ 65 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลทุก 30 นาที รายละเอียดดังรูปที่ 2

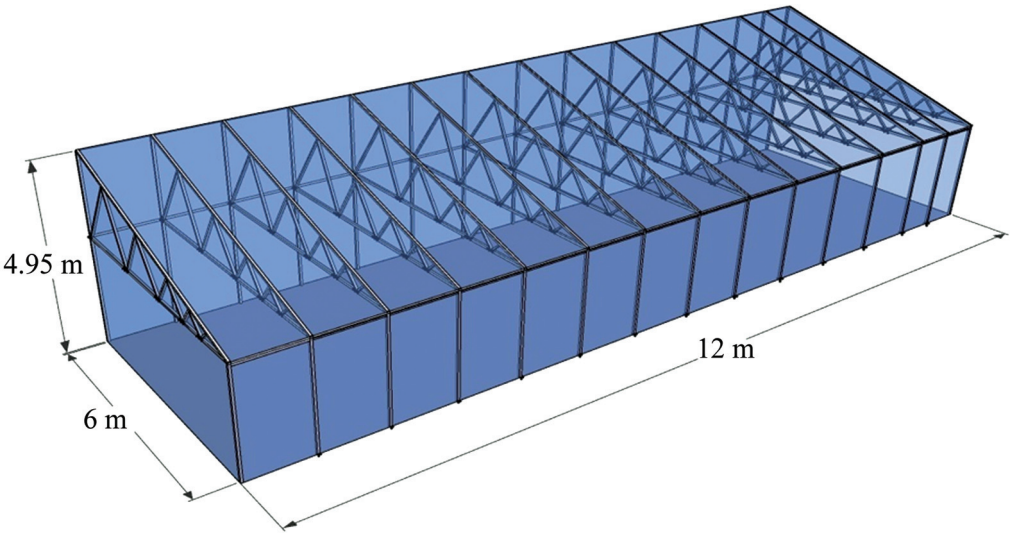


(ก) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 (ข) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2

(ค) แบบกระดานหมากรุก (ง) จุดตรวจวัดค่าปริมาณแสงในโรงเรือน

รูปที่ 2 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสและจุดตรวจวัดค่าปริมาณแสงบนโรงเรือนจำลอง

ส่วนที่สอง จะใช้สมการทำนายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่ได้จากส่วนที่แรกมาทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณผลผลิตการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ และจำลองการติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่แบบ Lean to ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 12 เมตร สูง 4.95 เมตร รายละเอียดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่แบบ Lean to

ทำการคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ Net Present Value (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายในการลงทุน Internal Rate of Return (IRR) ตามสมการที่ (2) - (4)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิรายปี}} \tag{2}$$

$$NPV = \sum_{n=1}^{N} \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \tag{3}$$

เมื่อ

R_n คือ ผลตอบแทนในปีที่ n (บาท)
C_n คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n (บาท)
N คือ ระยะเวลาของโครงการ
i คือ อัตราส่วนลด (%)
TIC คือ เงินลงทุนเบื้องต้น (บาท)

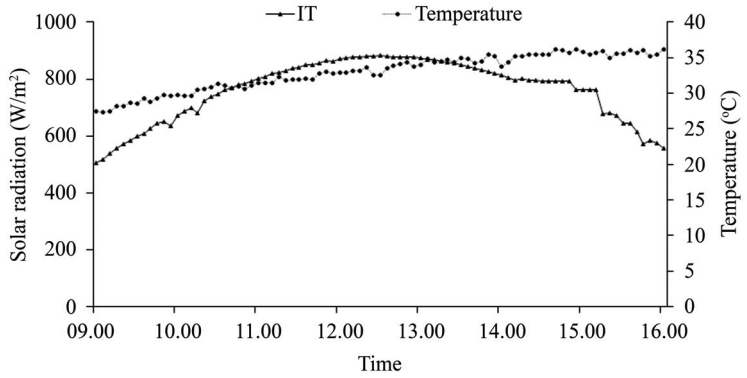
อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คือ อัตราผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมดมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC = 0 \tag{4}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

ผลการวิจัย

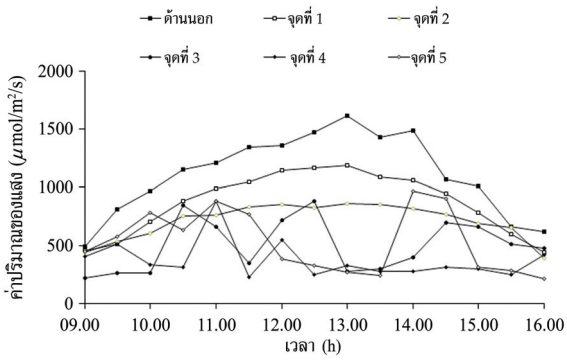
การทดสอบในส่วนที่ 1 ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์และเก็บข้อมูล ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2565 ซึ่งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสทั้ง 3 รูปแบบ จากรูปที่ 4 แสดงค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในวันทดสอบซึ่งพบว่า ในวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งวันประมาณ 761.1 วัตต์ต่อตารางเมตร มีค่าสูงสุด 882.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 12.30 น. และมีค่าต่ำสุด 504.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 09.00 น. สำหรับค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งวันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 27.8 - 34.7 °C



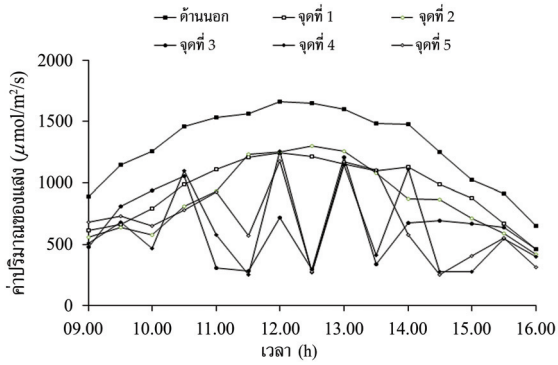
รูปที่ 4 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในวันทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส

สำหรับค่า PPFD ด้านในและด้านนอกโรงเรือนของรูปแบบการจัดวางเซลล์ทั้ง 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 5 พบว่า ค่า PPFD ด้านนอกโรงเรือนมีค่าสูงกว่าด้านในโรงเรือนในทุกรูปแบบการจัดวางเซลล์ ในการจัดวางในรูปแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 รูปแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2 และรูปแบบกระดานหมากรุก จะมีค่า PPFD ด้านนอกโรงเรือนสูงในช่วง 11.00 - 14.00 น. โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,616 1,663 และ 1,658 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 486.8 546.7 และ 648.2 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และตลอดทั้งวันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,112 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที 1,200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที และ 1,303 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในขณะที่ค่า PPFD ณ จุดต่าง ๆ ภายในโรงเรือนพบว่า ด้านในโรงเรือนบริเวณจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับค่า PPFD ด้านนอกโรงเรือน โดยจุดที่ 1 ของแต่ละรูปแบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 866.07 899.40 และ 946.96 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับจุดที่ 2 ของแต่ละรูปแบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 730.35 785.43 และ 905.51 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า PPFD จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ต่ำกว่าด้านนอกโรงเรือนเนื่องจากแสงส่องผ่านพลาสติกของผนังโรงเรือนทำให้ค่า PPFD ลดลง สำหรับค่า PPFD จุดที่ 3 4 และ 5 มีค่าไม่สม่ำเสมอ โดยช่วงบางช่วงเวลาที่มีค่าลดลงเกิดจากเงาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการจัดวางในทั้ง 3 รูปแบบ ส่วนช่วงเวลาที่มีค่าสูงขึ้นเป็นช่วงที่แสงส่องผ่านช่องว่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสพอดี สังเกตได้จากเวลา 12.00 น. เป็นช่วงที่มีค่า PPFD สูงกว่าเวลาอื่น ๆ มีค่ามากกว่า 1,000 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ขณะที่ค่าต่ำสุดมีค่าไม่น้อยกว่า 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เกิดขึ้นหลายช่วงเวลาตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส โดยจุดที่ 3 ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 เว้นระยะห่างแบบที่ 2 และแบบหมากรุก ตลอดทั้งวันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 540.88 758.67 และ 637.56 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับจุดที่ 4 ตลอดทั้งวันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 374.38

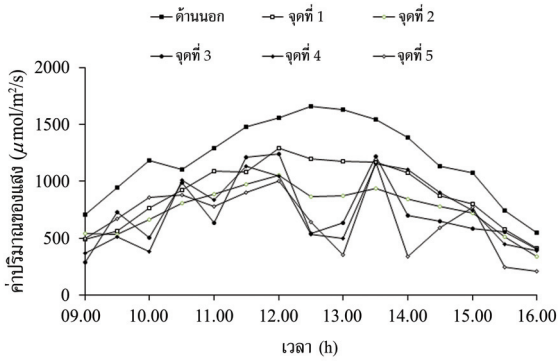
737.07 และ 619.32 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจุดที่ 5 ตลอดทั้งวันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 531.12 660.2 และ 677.82 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยจากผลทั้งหมดสรุปได้ว่า ค่า PPFD ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่มีการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 ที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2 และแบบหมากรุก เนื่องจากจำนวนเซลล์มากกว่าทำให้เกิดเงาภายในโรงเรือนมากกว่า ในขณะที่แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2 และแบบหมากรุก มีจำนวนเซลล์ต่างกันเพียงเล็กน้อยทำให้ค่า PPFD เฉลี่ยตลอดทั้งวันในแต่ละจุดมีค่าใกล้เคียงกัน รายละเอียดดังตารางที่ 2



(ก) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1



(ข) แบบกระดานหมากรุก



(ค) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2

รูปที่ 5 ค่า PPFD ด้านในและด้านนอกโรงเรือนในแต่ละรูปแบบการจัดวางเซลล์

ตารางที่ 2 ค่า PPFD ด้านในและด้านนอกโรงเรือนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสในแต่ละรูปแบบการจัดวางเซลล์

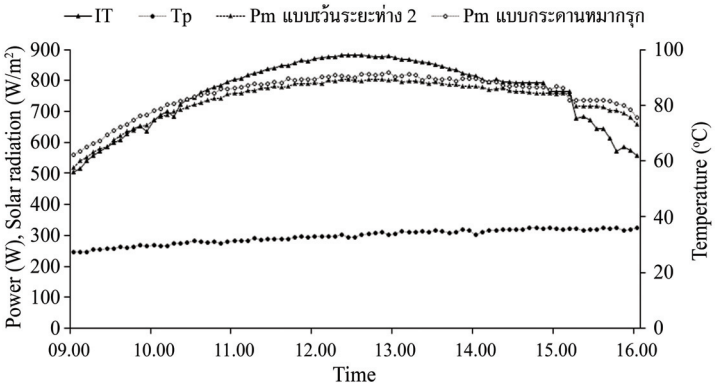
รายละเอียด	เว้นระยะห่างแบบที่ 1	เว้นระยะห่างแบบที่ 2	แบบกระดานหมากรุก
ค่าปริมาณแสงนอกโรงเรือน (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)	1,112.99	1,200.73	1,303.42
ค่าปริมาณแสงด้านในโรงเรือน (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)	595.95	755.47	751.17

จากข้อมูลค่า PPFD ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสตรอว์เบอร์รี่มีค่าอยู่ในช่วง 400 - 1,200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที [12] และจากการตรวจวัดจริงในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่พบว่าควรจะมีค่า PPFD มากกว่า 700 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการจัดวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 มีค่า PPFD น้อยเกินไปจึงไม่เหมาะสมในการ

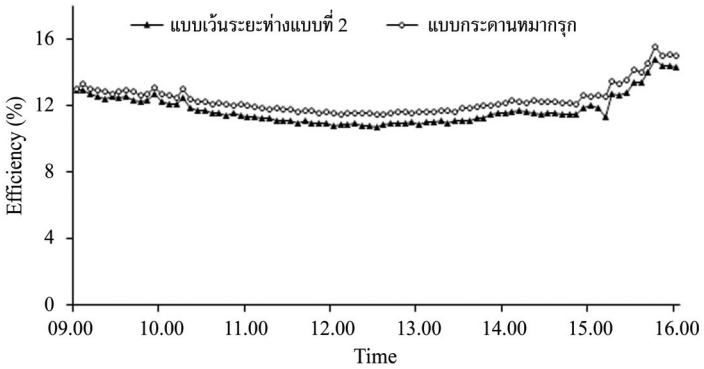
ISSN 2672-9369 (Online)

ปลูกสตรอว์เบอร์รี่ ในขณะที่แบบเว้นระยะห่างที่ 2 และแบบหมากรุก มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ ดังนั้นจึงใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสเพียง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบเว้นระยะห่างที่ 2 และรูปแบบกระดานหมากรุกในการทดสอบประสิทธิภาพแผงและนำไปสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อไป

ในส่วนของการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส 2 รูปแบบ จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 พบว่า ทั้ง 2 รูปแบบการจัดวางเซลล์เมื่อค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยกรณีแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสในการจัดวางรูปแบบกระดานหมากรุกมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงเนื่องจากมีจำนวนเซลล์ 39 เซลล์ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งวัน 84.16 วัตต์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด 91.79 วัตต์ กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 62.07 วัตต์ และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 11.76 % ซึ่งสูงกว่าการจัดวางเซลล์ในรูปแบบเว้นระยะห่างที่ 2 ที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งวัน 81.91 วัตต์ มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 89.38 วัตต์ กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 57.57 วัตต์ และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 12.39 % เนื่องจากว่าในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบ ลวดที่ใช้ในการเชื่อมระหว่างเซลล์มีความยาวและขนาดไม่เท่ากันจึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานไม่เท่ากัน



รูปที่ 6 ค่ารังสีอาทิตย์ กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสของการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างที่ 2 และแบบกระดานหมากรุก

เมื่อพิจารณาแผงที่มีการจัดวางเซลล์ทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า เมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นนอกจากจะเป็นผลมาจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงแล้วยังเป็นผลมาจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมด้วย ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดสามารถทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสทั้ง 2 รูปแบบ ได้ดังสมการที่ (5) - (6) โดยใช้โปรแกรมทำนาย (ML Regression)

สมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2

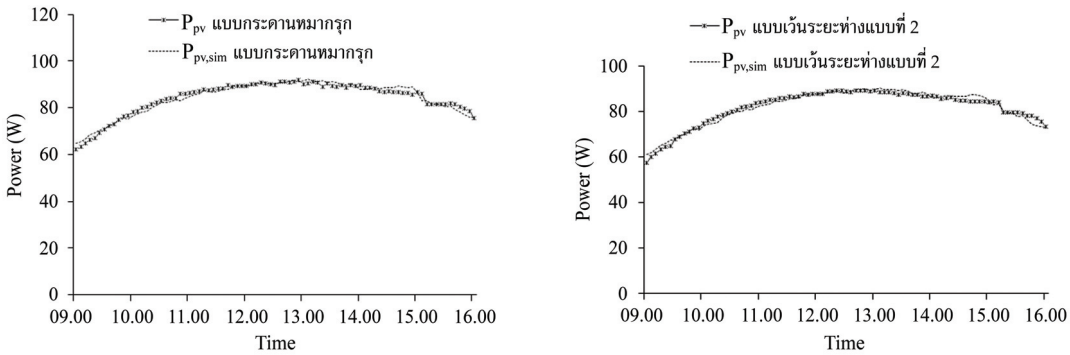
$$P_{pv/sim,36cell} = 1.2526 \times \left(I_T^{0.26362}\right) \times \left(T_a^{0.22848}\right) \times \left(T_P^{0.39954}\right) \quad (5)$$

สมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสแบบเว้นระยะห่างแบบกระดานหมากรุก

$$P_{pv/sim,39cell} = 0.6061 \times \left(I_T^{0.41226}\right) \times \left(T_a^{0.38328}\right) \times \left(T_P^{0.20207}\right) \quad (6)$$

I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
T_a คือ ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (องศา)
T_P คือ ค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (องศา)

โดยเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและเป็นไปตามทิศทางเดียวกัน โดยการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากสมการตามสมการที่ (5) และสมการที่ (6) 1.95 และ 1.97 % ดังรูปที่ 8



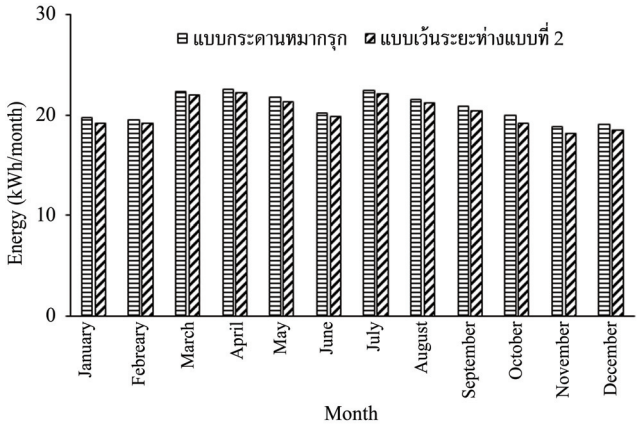
(ก) รูปแบบกระดานหมากรุก (ข) รูปแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2

รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากสมการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

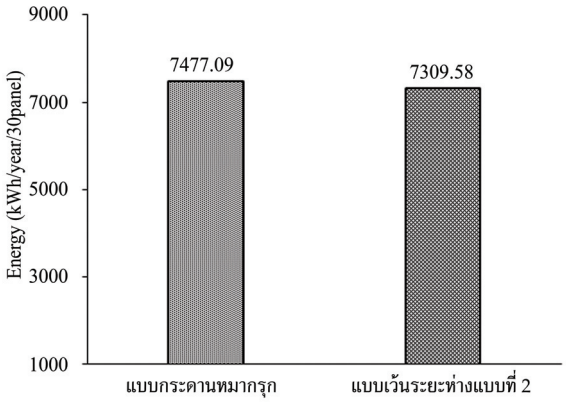
เมื่อพิจารณาการจำลองการนำแผงที่มีรูปแบบการจัดวางเซลล์ทั้ง 2 รูปแบบไปติดตั้งกับโรงเรือนปลูกพืชแบบ Lean to ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 12 เมตร สูง 4.95 เมตร โดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์และค่าอุณหภูมิแวดล้อมจังหวัดเชียงใหม่ตั้งแต่เวลา 07.00 - 17.00 น. พบว่าในเดือนเมษายนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างที่ 2 และแบบกระดานหมากรุกสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด 22.32 และ 22.60 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ในขณะที่เดือนธันวาคมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยที่สุด 18.58 และ 19.11 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน และตลอดทั้งปีแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่มีการจัดวางเซลล์แบบกระดานหมากรุกสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 7,477.09 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี (คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 33,646 บาทต่อปี) ซึ่งมากกว่าแผงที่จัดวางเซลล์ในรูปแบบเว้นระยะห่างที่ 2 ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 7,309.58 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี (คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 32,893.11 บาทต่อปี) ดังรูปที่ 9 และ 10 โดยในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสทั้ง 2 รูปแบบมีเงินลงทุนเท่ากันที่ 197,500 บาท เนื่องจากว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบมีเซลล์ห่างกันเพียงแค่ 3 เซลล์จึงไม่ได้ส่งผลต่อต้นทุนทางบริษัทฟูโซล่าร์ จึงคิดราคาแผงเท่ากัน ดังนั้นทำให้การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส

ISSN 2672-9369 (Online)

แบบกระดานหมากรุกบนหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่มีความเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากจะมีระยะเวลาคืนทุน 5.87 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ 175,299.70 บาท และมีอัตราผลตอบแทนภายใน 16.02 % ในขณะที่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเว้นระยะห่างที่ 2 บนหลังคาโรงเรือนที่มีระยะเวลาคืนทุน 6 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ 166,955.44 บาท และมีอัตราผลตอบแทนภายใน 15.59 % รายละเอียดดังตารางที่ 3



รูปที่ 9 พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นรายเดือน



รูปที่ 10 พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นรายปี

ตารางที่ 3 มูลค่าเงินลงทุนและพลังงานที่ประหยัดได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส

รายละเอียด	แบบหมากรุก	เว้นระยะห่างแบบที่ 2
พลังงานไฟฟ้าที่แผงผลิตได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)	7,477.09	7,309.58
คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (บาทต่อปี)	33,646.91	32,893.11
เงินลงทุน (บาท)	197,500	197,500
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	5.87	6
NPV (บาท)	175,299.70	166,955.44
IRR (%)	16.02	15.59

หมายเหตุ อ้างอิงค่าไฟฟ้าประมาณ 4.50 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง ใช้อัตราดอกเบี้ย 6.09 % (ธนาคารกสิกรไทย) อายุโครงการ 20 ปี

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบการจัดวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่เหมาะสมกับการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ในโรงเรือนปลูกพืช โดยใช้การทดสอบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีนำไปติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่จริง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษารูปแบบการจัดวางเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ารูปแบบเว้นระยะห่างที่ 1 สามารถจัดวางเซลล์ได้ 50 เซลล์ คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ต่อแผง เมื่อติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนจำลองวัดค่า PPFD ได้เฉลี่ย 595.95 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที รูปแบบเว้นระยะห่างที่ 2 สามารถจัดวางเซลล์ได้ 36 เซลล์ คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ต่อแผง เมื่อติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนจำลองวัดค่า PPFD ได้เฉลี่ย 755.47 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที และในรูปแบบกระดานหมากรุก สามารถจัดวางเซลล์ได้ 39 เซลล์ คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 160 วัตต์ต่อแผง เมื่อติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนจำลองวัดค่า PPFD ได้เฉลี่ย 751.17 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาจากค่า PPFD ที่สตรอว์เบอร์รี่ต้องการพบว่าการจัดวางเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบเว้นระยะห่างที่ 2 และแบบกระดานหมากรุกเหมาะสมในการใช้กับโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใส 2 รูปแบบ คือ เว้นระยะห่างแบบที่ 2 และแบบกระดานหมากรุก พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใสมีค่า 11.76 และ 12.39 % และสามารถสร้างสมการทำนายเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใส ดังนี้

สมการทำนายผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2 สมการที่ (7)

$$P_{pv/sim,36cell} = 1.2526 \times \left(I_T^{0.26362}\right) \times \left(T_a^{0.22848}\right) \times \left(T_P^{0.39954}\right) \tag{7}$$

สมการทำนายผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสแบบกระดานหมากรุก สมการที่ (8)

$$P_{pv/sim,39cell} = 0.6061 \times \left(I_T^{0.41226}\right) \times \left(T_a^{0.38328}\right) \times \left(T_P^{0.20207}\right) \tag{8}$$

ส่วนที่ 2 เมื่อนำสมการที่ (7) และ (8) ไปทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีนำไปติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่แบบ Lean to ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 12 เมตร สูง 4.95 เมตร พบว่า รูปแบบการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างที่ 2 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 7,309.58 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าไฟฟ้า 32,893.11 บาทต่อปี โดยลงทุน 197,500 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 6 ปี ในขณะที่รูปแบบการจัดวางเซลล์แบบกระดานหมากรุก สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้.7,477.09 กิโลวัตต์ต่อปี คิดเป็นค่าไฟฟ้า 33,646.91 บาทต่อปี โดยลงทุนเท่ากันที่ 197,500 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 5.87 ปี ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการจัดวางเซลล์ที่เหมาะสมกับการนำไปติดตั้งบนหลังคาโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่คือแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่จัดวางเซลล์แบบกระดานหมากรุก

ISSN 2672-9369 (Online)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบคุณสำนักงานบริหารกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์ (ส.กทอ.) กระทรวงพลังงาน ที่สนับสนุนทุนวิจัยโครงการต้นแบบโรงเรือนปลูกพืชผสานเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งแสง รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (SEEU) ที่ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือเครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัยมา ณ ที่นี้

References

[1] Yaibok, T., Phethuayluk, S., WeawSak, J., Mani, M., and Buaphet, P. (2010). Development the Fish Drying Process with a Solar-Electrical Combined Energy Dryer under the Southern of Thailand Climate. **Thaksin J**. Vol. 12, No. 3, pp. 110-118 (in Thai)

[2] Phowan, A., Sripadungtham, P., Limmanee, A., and Hattha, E. (2011). Performance Analysis of Polycrystalline Silicon and Thin Film Amorphous Silicon Solar Cells Installed in Thailand by Using Simulation Software. In **ECTI-CON 2011 - 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011 academic conference**. pp. 625-628. (in Thai)

[3] Xia-Li, Ou., Ming, Xu., Jing Feng, and Hong-Bo, Sun. (2016). Flexible and Efficient ITO-free Semitransparent Perovskite Solar Cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 157, pp. 660-665. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.07.010

[4] Padmavathi, K. and Arul Daniel, S. (2013). Performance Analysis of a 3 MWp Grid-Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India. **Energy for Sustainable Development**. Vol. 17, Issue 6, pp. 615-625. DOI: 10.1016/j.esd.2013.09.002

[5] Ayompe, L. M. Duffy, A., McCormack, S. J., and Conlon, M. (2011). Measured Performance of a 1.72 kW Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System in Ireland. **Energy Conversion and Management**. Volume 52, Issue 2, pp. 816-825. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.08.007

[6] Renu, S. and Sonali, G. (2017). Performance Analysis of a 11.2 kWp Roof Top Grid-Connected PV System in Eastern India. **Energy Reports**. Vol. 3, pp. 76-84. DOI: 10.1016/j.egyr.2017.05.001

[7] Yadav, S., Panda, S. K., Tiwari, G. N., Ibrahim, M. A. H., and Caroline, H. V. (2022). Periodic Theory of Greenhouse Integrated Semi-transparent Photovoltaic Thermal (GiSPVT) System Integrated with Earth Air Heat Exchanger (EAHE). **Renewable Energy**. Vol. 184. pp. 45-55. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.063

[8] Wang, D., Liu, H., Li, Y., Zhou, G., Zhan, L., Zhu, H., Li, C.-Z. (2021). High-performance and eco-friendly Semitransparent Organic Solar Cells for Greenhouse Applications. **Joule**. Vol. 5, Issue 4, pp. 945-957. DOI: 10.1016/j.joule.2021.02.010

[9] Ladthavong, P., Polvongsri, S., Mongkon, S., and Intaniwet, A. (2021). The Analysis of Energy and Luminance Properties of Semi-Transparent Building Integrated Photovoltaic Window Louvers. **Engineering Journal Chiang Mai University**. Vol. 28, No. 1, pp. 45-60 (in Thai)

[10] Sinworarangsi, P., Songtrai, S., Udomdechanat, N., Kittisonthirak, S., Singthong, A., Krachangsang, T., Sritharathikun, C., and Sripracha, K. (2015). Evaluation of Rooftop Solar PV Performance of Different PV Module Technologies Operating in Thailand. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 32, No. 2, pp. 19-24 (in Thai)

[11] Vongpanya, T., Phuphanphet, R., Futhrem, J., Mongkon, S., and Polvongsri, S. (2022). An Experimental of Semi-Transparent Solar Cell Prototype Design for the Application in Agricultural Greenhouse. In **International Conference**. pp. 11-15

[12] Morgan, L. (2006). **Hydroponic Strawberry Production. A Technical Guide to Hydroponic Production of Strawberries**. Suntec NZ, Tokomaru, NZ. p. 117

ISSN 2672-9369 (Online)

การเตรียมกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง สำหรับประยุกต์ใช้ตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดิน

The Preparation of pH Indicator Paper from Bagasse Fiber with Anthocyanin Extract from Butterfly Pea Flower, Purple Cabbage and Lxora Coccinea for an Acid-Base Soil Monitoring Application

ภาวิณี เทียมดี[1*] ภคพร ชาวปลายนา[1] และศิรประภา พลธนะ[2]

Pawinee Theamdee[1*] Pakaporn Chawpaina[1] and Siraprapha Polthana[2]

Received: *November 28, 2022;* ***Revised:*** *January 13, 2023;* ***Accepted:*** *January 15, 2023*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง สำหรับประยุกต์ใช้ตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดิน การเตรียมกระดาษทำโดยนำเยื่อชานอ้อยต้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 20 %w/v อุณหภูมิ 90 - 95 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วฟอกเยื่อด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 25 %w/v เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยชานอ้อย 40 50 60 และ 70 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยม ผึ่งแดด 2 วัน จนแห้งสนิท จากนั้นนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกล ได้แก่ ความหนา การดูดซึมน้ำ การละลายน้ำ การต้านทานแรงกด การต้านทานแรงเจาะ และศึกษาการย่อยสลาย จากการศึกษาพบว่ากระดาษจากเส้นใยชานอ้อยน้ำหนัก 60 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นทำให้แห้งที่ 45 °C เป็นเวลา 30 นาที ทำการหยดสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีสีม่วง และดอกเข็มแดง ปริมาตร 50 μL ลงบนกระดาษ ทิ้งกระดาษให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1-14 และตรวจสอบความเป็นกรด-เบสในดิน พบว่ากระดาษบ่งชี้จากเส้นใยชานอ้อย

[1] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี*

[2] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร*

[1] *Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi*

[2] *Faculty of Science and Technology, Kamphang Phet Rajabhat University, Kamphang Phet*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 6213 6336, E - mail: pawinee.t169@gmail.com*

ที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินแสดงการตอบสนองที่ชัดเจนต่อการแปรผันของค่า pH และมีอัตราการย่อยสลายร้อยละ 61.12 ดังนั้นกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จึงมีศักยภาพในการตรวจสอบดินที่เป็นกรด-เบส และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งมีต้นทุนที่ต่ำและเป็นอินดิเคเตอร์ที่ไวต่อ pH

คำสำคัญ : กระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์; แอนโทไซยานิน; กระดาษชานอ้อย; เส้นใย; ดิน

Abstract

The objective of this research was to prepare pH indicator paper from bagasse fiber with anthocyanin extract from butterfly pea flower, purple cabbage and Ixora coccinea to acid-base soil monitoring. The handmade paper was prepared by treating bagasse with 20 %w/v sodium hydroxide at 90 - 95 degrees Celsius for 3 hours, and pulp was bleached with 25 %v/v hydrogen peroxide for 2 hours. Afterward, different weights, 40, 50, 60, and 70 grams, of bagasse fiber were separately prepared into paper by molding in rectangular shape trays and subsequently dried at ambient conditions for 2 days After drying, the physical and mechanical properties of paper from bagasse; water absorption, compression test, puncture strength, and degradation were evaluated. As a result, the appropriate weight was 60 grams of bagasse fiber. The paper from bagasse fiber (60 grams) was dried at 45 degrees Celsius for 30 minutes before loading the indicator. During loading, 50 microlite anthocyanin extracts from butterfly pea flower, purple cabbage and Ixora coccinea were deposited on the paper. After loading, the paper was dried at the ambient condition for 30 minutes. The efficiency of the indicator paper from bagasse fiber with anthocyanin extract was studied in different buffer solutions of pH ranging 1-14 and tested for acid-base soil monitoring. The indicator paper from bagasse fiber with anthocyanin extract showed a clear response to pH variation. The degradation study of the paper from the bagasse (60 grams) sample was buried under the ground (8 - 10 cm depth) for 8 months at ambient temperature (28±2 degrees Celsius), which was degraded by 61.12 Percentage. Therefore, which could be used as a green route monitoring for acid-base soil using low-cost and sensitive pH indicators. In addition, this made of natural material is biodegradable which can reduce the amount of waste.

Keywords: Indicator Paper; Anthocyanin; Bagasse Paper; Fiber; Soil

บทนำ

ดินถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอันดับต้นของการปลูกพืช ถ้าดินมีความเป็นกรด-ด่างที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยปกติแล้วดินส่วนใหญ่ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในช่วง pH 6.0 – 6.5 เป็นช่วงที่เหมาะที่สุด โดยดินกรดหรือดินเปรี้ยว คือ ดินที่มีระดับ pH ต่ำกว่า 7.0 และดินด่าง คือ ดินที่มีระดับ pH สูงกว่า 7.0 [1] งานวิจัยที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญในการพัฒนาที่ยั่งยืน ผู้วิจัยสนใจทำการศึกษาการพัฒนากระดาษที่สามารถบ่งชี้ความเป็นกรด-ด่างในดินทางการเกษตร โดยเส้นใยจากธรรมชาติที่นำมาเตรียมกระดาษนั้นมีหลายชนิด เช่น เส้นใยลูกสน (*Pinus pinea* L.) [2] เส้นใยใบสับปะรด [3] เส้นใยกาบกล้วย [4] เส้นใยผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.) [5] และเส้นใยฟางข้าว [6]

ISSN 2672-9369 (Online)

เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยมุ่งศึกษาการผลิตกระดาษจากวัสดุจากธรรมชาติจากเส้นใยชานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยองค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อยประกอบด้วยเซลลูโลส 42.3 % เฮมิเซลลูโลส 18.8 % ลิกนิน 24.7 % และเถ้า 3.5 % ซึ่งโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของผลึกในเส้นใยของอ้อยมีค่าสูงและมีความแข็งแรงของเส้นใยสูง [7] - [8] จึงนำมาเตรียมกระดาษจากชานอ้อย เพื่อทดแทนปริมาณเยื่อจากไม้ และเพื่อลดการนำเข้าเยื่อจากต่างประเทศ ซึ่งอาจจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มวัตถุดิบในการทำเยื่อกระดาษ อีกทั้งยังสามารถใช้วัสดุเหลือใช้มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ได้มากขึ้น

ปัจจุบันอินดิเคเตอร์ที่ใช้กันทั่วไป เป็นอินดิเคเตอร์สังเคราะห์โดยให้สีที่ชัดเจน แต่สารสังเคราะห์ประเภทนี้เป็นอันตราย ราคาสูง และทำลายสิ่งแวดล้อม มีรายงานการวิจัยที่ศึกษาการสกัดสีจากพืชธรรมชาติเพื่อนำมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์ เช่น การใช้สารสกัดจากกุหลาบ (*Rosa* sp), กระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sabdariffa* L) [9], บีทรูท (*Beta vulgaris* L), ชบา (*Hibiscus rosa-sinensis*) [10], ดอกทองอุไร (*Tecoma stans* Juss.), ดอกคูณ (*Cassia fistula* L.) [11], และมันม่วง (*Ipomoea batatas* L.) [12] เป็นต้น เนื่องจากมีสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) เป็นรงควัตถุให้สีตามธรรมชาติที่พบได้ทั่วไปในพืชทั้งในดอกไม้ ผลไม้ และใบหรือลำต้นของพืช ละลายน้ำได้ดี โดยสีของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่าง กล่าวคือ ในสภาพที่เป็นกรด สารแอนโทไซยานินมีสีแดง ในสภาพที่ค่อนข้างเป็นกลาง สารแอนโทไซยานินมีสีม่วง และเมื่อสภาพเป็นเบสแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน สีที่แตกต่างกันของแอนโทไซยานิน เกิดจากโครงสร้างเรโซแนนซ์ของอิออนฟลาไวเลียม ทำให้ pH มีผลต่อคุณสมบัติของ แอนโทไซยานินด้วย [13] งานวิจัยนี้ได้นำสารสกัดจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง เป็นพืชท้องถิ่นที่มีอยู่มากในจังหวัดลพบุรี และมีสารแอนโทไซยานินเป็นส่วนประกอบสำคัญมีคุณสมบัติความเป็นอินดิเคเตอร์ธรรมชาติที่เหมาะสมสามารถทดแทนการใช้อินดิเคเตอร์สังเคราะห์ โดยจากงานวิจัยของ [14] ได้เตรียมอินดิเคเตอร์กระดาษอย่างง่ายโดยใช้อินดิเคเตอร์จากธรรมชาติ ได้แก่ กะหล่ำปลีม่วง อัญชัน กุหลาบ และกล้วยไม้ เพื่อทำเป็นชุดทดสอบวัดความเป็นกรดเป็นเบสของสารเคมีในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ [15] ได้ศึกษาการเตรียมกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากสารสกัดต้อยติ่งเทศ (*Ruellia Simplex*) ในการตรวจวัดความสดของกุ้งจนถึงเน่าเสีย โดยการดูการเปลี่ยนสีบนกระดาษจากสีชมพูอมม่วงกลายเป็นสีเทาอมเหลือง สามารถช่วยตอบโจทย์ของผู้บริโภคในยุคปัจจุบันได้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจเพื่อศึกษาการเตรียมกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง สำหรับประยุกต์ใช้ตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดิน พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางกล รวมถึงศึกษาอัตราการย่อยสลายของกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อย เพื่อเป็นแนวทางให้กับชุมชนผลิตใช้เองได้ง่าย ใช้วัตถุดิบที่ไม่ใช้แล้วให้เกิดประโยชน์ สามารถทำได้สะดวก ต้นทุนต่ำ พกพาสะดวกและเมื่อใช้งานเสร็จแล้วสามารถทิ้งให้ย่อยสลายตามธรรมชาติได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การเตรียมกระดาษจากชานอ้อย

เตรียมชานอ้อยแห้งแช่น้ำไว้ 1 คืน จากนั้นเตรียมกระดาษชานอ้อยโดยวิธีการทำกระดาษด้วยมือดัดแปลงตามวิธี [16] โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักแห้งของชานอ้อยต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และนำไปฟอกสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 25 โดยปริมาตร จากนั้นนำเส้นใยมาล้างน้ำบีบน้ำออกจนหมด ปั่นเส้นใยด้วยเครื่องปั่น อบด้วยตู้อบลมร้อนจนเส้นใยแห้ง ดังรูปที่ 1 นำไปชั่งน้ำหนักโดยกำหนดให้ใช้น้ำหนักของวัสดุที่จะขึ้นรูปกระดาษแต่ละแผ่น ใช้เยื่อเป็น 40 50 60 และ 70 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) ปั่นผสมกับน้ำจนเป็นเนื้อเดียวกัน ร่อนบนตะแกรงที่ขึงด้วยกรอบไม้ขนาด 30 x 20 เซนติเมตร เกลี่ยเส้นใยให้ทั่วตะแกรงจนได้เป็นแผ่นที่เนื้อเยื่อสม่ำเสมอ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณของเส้นใยที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

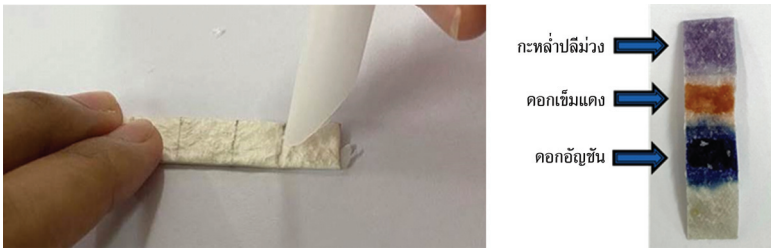
รูปที่ 1 เส้นใยจากชานอ้อย

2. เตรียมสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง

ดัดแปลงตามวิธี [17] สกัดสารโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย นำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง อบให้แห้งแล้วบดด้วยเครื่องปั่นผสมไฟฟ้า (Sharp, EM-ICE 2, ประเทศไทย) ชั่งผงตัวอย่าง 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 5 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้นาน 5 นาที กรองสารสกัดด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 1 ใส่ขวดสีชาที่อุณหภูมิห้อง ได้สารสกัดจากตัวอย่างเพื่อนำไปใช้เป็นอินดิเคเตอร์

3. เตรียมกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง

ดัดแปลงตามวิธี [14] โดยนำกระดาษชานอ้อยมาตัดขนาด 5 x 1 เซนติเมตร จากนั้นนำเทียนไขที่เหลาให้คล้ายไส้ดินสอมาขีดช่องลงบนกระดาษชานอ้อย แต่ละช่องมีความกว้าง 1 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง จากนั้นนำกระดาษชานอ้อยไปอังบนเครื่องให้ความร้อนประมาณ 1 นาที ความร้อนจะทำให้เทียนหลอมเหลวและซึมตามแถวแบ่งช่อง หยดสารสกัดทั้ง 3 ชนิด (50 ไมโครลิตร) ลงบนช่องบนกระดาษชานอ้อย แต่ละช่องให้หยดด้วยสารสกัดเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ทิ้งกระดาษให้แห้งก่อนที่จะนำไปทดสอบความเป็นกรด-เบส ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการสร้างกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานิน

4. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกล

การวัดความหนาของกระดาษ ด้วย Micrometer (Mitutoyo, ญี่ปุ่น) โดยทำการวัดกระดาษตำแหน่งต่าง ๆ กัน 5 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

สมบัติการละลายน้ำ (Water Solubility) ดัดแปลงจากวิธี [18] โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2.0 x 2.0 เซนติเมตร (ชิ้นงาน 1 ตัวอย่าง สุ่มตัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ มา 3 ชิ้น) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105±2 ^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_1) นำไปแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่านกระดาษกรองที่ชั่งน้ำหนักแล้ว (a_1) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105±2 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง (a_2) บันทึกผลและคำนวณดังสมการที่ (1)

ISSN 2672-9369 (Online)

$$\text{ร้อยละการละลายน้ำ} = \frac{W_1(a_2 - a_1)}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ดัดแปลงจากวิธี [19] โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2.0 x 2.0 เซนติเมตร นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105±2 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_0) นำไปแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานชั่งน้ำหนัก (W_1) บันทึกผลและคำนวณดังสมการที่ (2)

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยชานอ้อยและสารแอนโทไซยานินจากพืช ด้วยใช้เครื่อง FTIR Spectrometer (Perkin Elmer, รุ่น Spectrum 100 FTIR System Universal, ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีช่วงเลขคลื่นในการวิเคราะห์เท่ากับ 4,000 - 400 cm^{-1}

การศึกษาคุณสมบัติทางกลการต้านทานแรงเจาะและการต้านทานแรงเฉือน (Puncture Strength and Shear Test)

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Texture Analyser (Stable Microsystems, TA-XT2, ประเทศอังกฤษ) ทดสอบการต้านทานแรงเฉือน ใช้หัววัด HDP/BS Blade Set ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 6 × 9 เซนติเมตร ความเร็วหัววัดขณะกดตัวอย่าง 1 mm/sec และระยะที่กดผ่านตัวอย่าง 4 mm สำหรับการทดสอบการต้านทานแรงเจาะใช้หัววัด HDP/CFS และ HDP/90 Heavy Duty Platform ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ความเร็วหัววัดขณะกดตัวอย่าง 5 mm/sec และระยะที่กดลงตัวอย่าง 3 mm โดยแต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ [20] - [21]

5. ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง ในการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสสารละลายกรด-เบส

ทดสอบการเปลี่ยนสีของกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง จากนั้นหยดสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 1-14 จำนวน 2 - 3 หยด บันทึกผลการทดลอง

6. ศึกษาการประยุกต์ใช้กระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง เพื่อตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดิน

ดัดแปลงตามวิธี [22] - [23] โดยดินที่ใช้ในการทดลองเก็บจากพื้นที่เพาะปลูก 2 สภาวะ คือ ดินสภาวะเป็นกรดและด่าง จากตำบลดอนดึง อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี ด้วยการเก็บตัวอย่างดิน ขุดดินที่ความลึก 0 - 20 เซนติเมตร แล้วนำดินมาวิเคราะห์ โดยใช้น้ำเป็นสารสกัดใช้สัดส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:1 จากนั้นวิเคราะห์ค่า pH ด้วยกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดงทดสอบความเป็นกรด-เบสในดิน และบันทึกผลการทดลอง

7. ศึกษาอัตราการย่อยสลายของกระดาษจากชานอ้อย

โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2 x 5 เซนติเมตร นำมาชั่งน้ำหนัก (A) จากนั้นนำไปฝังลงในดิน ซึ่งมีลักษณะเป็นดินร่วน ทำการทดลองฝังดินในกระถางเพาะชำขนาด 55 x 39 x 28 เซนติเมตร และฝังชิ้นงานให้มีความลึกประมาณ 8 - 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 5 เดือน ที่อุณหภูมิ 33±2 °C โดยไม่มีการให้น้ำ ความชื้นเริ่มต้นของดินเท่ากับร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักชิ้นงานทุกเดือน (B) โดยทำการหาน้ำหนักที่หายไป (ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป) ดังสมการที่ (3) [24]

$$\text{ร้อยละการย่อยสลาย} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (3)$$

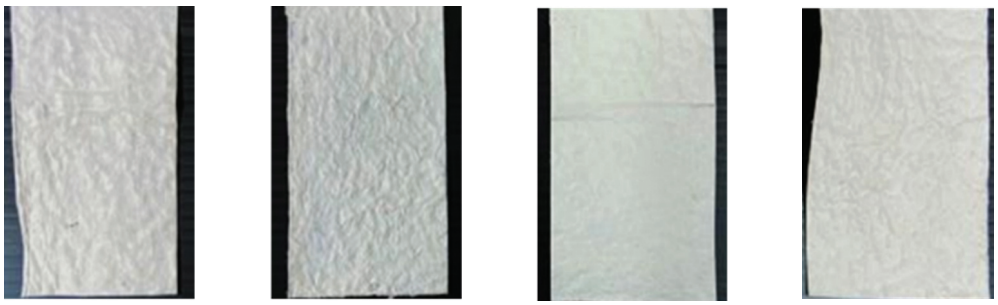
7. **การวิเคราะห์ผลทางสถิติ**

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS® Version 12 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและการอธิบายผล

1. **ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระดาษชานอ้อย**

กระดาษชานอ้อยที่น้ำหนักเส้นใย 40 50 60 และ 70 กรัม พบว่ากระดาษชานอ้อย 40 และ 50 กรัม (รูปที่ 3(ก) และ (ข)) มีลักษณะขรุขระ แผ่นบาง พับงอแล้วขาด กระดาษชานอ้อย 60 กรัม (รูปที่ 3(ค)) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ หนาพอดี พับงอแล้วไม่ขาด และกระดาษชานอ้อย 70 กรัม (รูปที่ 3(ง)) มีลักษณะขรุขระเล็กน้อย และมีความหนาค่อนข้างมาก เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพของกระดาษชานอ้อย พบว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยของชานอ้อยมากขึ้นกระดาษมีความหนาเพิ่มขึ้น

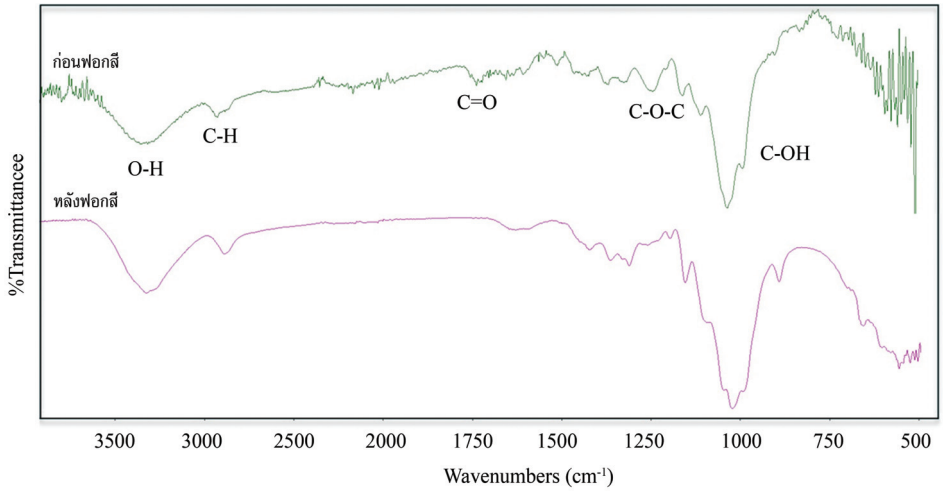


(ก) 40 กรัม (ข) 50 กรัม (ค) 60 กรัม (ง) 70 กรัม

รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวกระดาษชานอ้อยที่น้ำหนักเส้นใย

จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยจากชานอ้อยก่อนและหลังการฟอกสีด้วยเครื่อง FTIR ดังรูปที่ 4 พบว่าลักษณะสเปกตรัมของส้นใยชานอ้อยก่อนฟอกสี ช่วงเลขคลื่น 3,300 - 3,500 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ -OH และช่วงเลขคลื่น 3,000 - 2,800 cm^{-1} แสดงการสั่นของ aliphatic-CH และช่วงคลื่น 1,100 - 1,000 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C-OH ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส ช่วงเลขคลื่น 1,765 - 1,715 cm^{-1} แสดงหมู่ C=O ของเฮมิเซลลูโลส และช่วงคลื่น 1,250 cm^{-1} แสดงหมู่ C-O-C ของลิกนิน จากสเปกตรัมเส้นใยชานอ้อยหลังฟอกสี พบว่าสัญญาณของตำแหน่งเซลลูโลสยังคงปรากฏอยู่แต่สัญญาณของตำแหน่งเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลงอย่างชัดเจน แสดงว่ามีการทำลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน สอดคล้องกับงานวิจัย [25]

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 4 สเปกตรัม FT-IR ของเส้นใยชานอ้อยก่อนฟอกสีและหลังฟอกสี

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษเส้นใยชานอ้อย จากการศึกษาค่าความหนาของกระดาษ พบว่ามีค่าความหนาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อปริมาณเส้นใยชานอ้อยมากขึ้น จากการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำและค่าการละลายน้ำ พบว่าค่าของการดูดซึมน้ำและการละลายน้ำของกระดาษชานอ้อยมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยชานอ้อยมากขึ้น ($p<0.05$) เนื่องจากเส้นใยชานอ้อยมีองค์ประกอบเคมีหลักเป็นเซลลูโลสจากธรรมชาติ มีความเหนียว ผนังเซลล์แข็งและหนา รวมถึงความหนาของกระดาษมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำและการละลายน้ำลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยชานอ้อยเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย [26]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษจากชานอ้อย

ตัวอย่าง	ความหนา (mm)	การดูดซึมน้ำ (%)	การละลายน้ำ (%)
B40	0.76 ± 0.15^{b}	452.64 ± 15.63^{a}	6.14 ± 0.14^{a}
B50	0.83 ± 0.13^{ab}	447.05 ± 14.79^{a}	6.06 ± 0.13^{a}
B60	0.87 ± 0.17^{ab}	347.85 ± 11.37^{b}	5.08 ± 0.11^{b}
B70	1.10 ± 0.10^{a}	315.25 ± 7.36^{c}	4.87 ± 0.12^{b}

หมายเหตุ: $^{a-c}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$)

จากตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการต้านแรงเจาะและการต้านแรงฉีกขาดของกระดาษชานอ้อย พบว่าค่าของการต้านแรงเจาะและการต้านแรงฉีกขาดของกระดาษชานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น ($p\leq0.05$) เนื่องจากเส้นใยชานอ้อยมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ซึ่งโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งมีผลทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงที่ดี เมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นสามารถต้านแรงเจาะและแรงฉีกขาดได้ดีกว่ากระดาษที่มีปริมาณเส้นใยที่น้อยกว่า [27]

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของกระดาษจากชานอ้อย

ตัวอย่าง	ความต้านทานแรงเจาะ (N/m^2)	ความต้านทานแรงเฉือน (N/m^2)
B40	10.28 ± 0.85^{c}	69.61 ± 12.57^{d}
B50	15.07 ± 1.33^{b}	108.16 ± 12.91^{c}
B60	31.95 ± 2.52^{a}	153.27 ± 17.61^{b}
B70	35.30 ± 2.25^{a}	188.56 ± 19.00^{a}

หมายเหตุ: $^{a-d}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

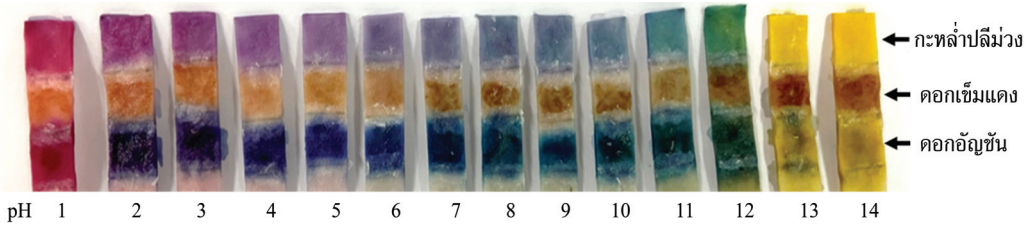
จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่ากระดาษชานอ้อยปริมาณเส้นใย 60 กรัม มีการทดสอบโดยรวมเหมาะสมที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติของกระดาษอินดิเคเตอร์ที่เหมาะสมนั้นควรมีผิวกระดาษที่เรียบ ไม่หนาและบางเกินไป ทำให้ในการหยดสารสกัดจากพืชลงบนกระดาษมีความเรียบเนียนที่ดีกว่า ซึ่งลักษณะพื้นผิวกระดาษชานอ้อยที่น้ำหนักเส้นใย 60 กรัม (ดังรูปที่ 3) มีจุดเด่นคือ พื้นผิวกระดาษมีความเรียบไม่ขรุขระ พับงอแล้วไม่ขาด การดูดซึมน้ำและการละลายน้ำไม่สูงเกินไป ส่วนสมบัติทางกลนั้นมีค่าสูงเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับกระดาษชานอ้อยที่น้ำหนักเส้นใย 70 กรัม แต่ใช้ปริมาณเส้นใยที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกกระดาษชานอ้อยที่น้ำหนักเส้นใย 60 กรัม มาศึกษาในการทำกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อย โดยการหยดสารสกัดของพืชทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ อัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง บนช่องของกระดาษ พบว่ากระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดทั้ง 3 ชนิด เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1-14 ดังรูปที่ 6 ใกล้เคียงกับสีของสารสกัดในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1-14 (รูปที่ 5) แถบสีของกระดาษอินดิเคเตอร์แถบสีที่มีสารสกัดกะหล่ำปลีม่วงมีช่วงการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนอยู่ คือ การเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีม่วง (pH 1-5) การเปลี่ยนสีจากม่วงเป็นสีฟ้าอมม่วง (pH 6-10) และการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีเหลือง (pH 11-14) ส่วนแถบสีของกระดาษอินดิเคเตอร์แถบสีที่มีสารสกัดดอกเข็มแดงมีช่วงการเปลี่ยนสีจากสีชมพูเป็นสีชมพูน้ำตาลอ่อน (pH 1-4) การเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้ม (pH 5-10) และการเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีน้ำตาลเหลือง (pH 11-14) และแถบสีของกระดาษอินดิเคเตอร์แถบสีที่มีสารสกัดอัญชันมีช่วงการเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน (pH 1-2) การเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นเขียวอมฟ้า (pH 3-10) และการเปลี่ยนสีจากสีเขียวอมฟ้าเป็นสีเหลือง (pH 11-14) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปรากฏความชัดเจนของสีตามการเปลี่ยน pH ของสารละลายบัฟเฟอร์

(ก) สารสกัดกะหล่ำปลีม่วง (ข) สารสกัดดอกเข็มแดง (ค) สารสกัดอัญชัน

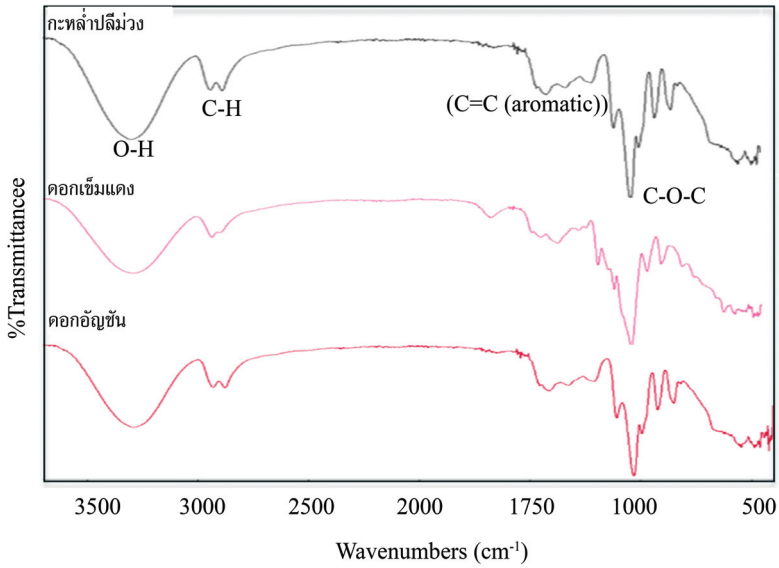
รูปที่ 5 การเปลี่ยนสีของสารสกัดในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1-14 ของสารสกัด

จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันของแอนโทไซยานินจากสารสกัดจากกะหล่ำปลีม่วง สารสกัดดอกเข็มแดง และสารสกัดอัญชัน พบว่าแอนโทไซยานินพบหมู่ฟังก์ชันของ -OH ที่ตำแหน่ง 3,400 cm^{-1}, C-H ที่ตำแหน่ง 2,979 cm^{-1}, C=C ในวงอะโรมาติกที่ตำแหน่ง 1,650 cm^{-1} และ C-O-C ที่ตำแหน่ง 1,040 cm^{-1} ยืนยันได้ว่ามีสารแอนโทไซยานินอยู่ในสารสกัดทั้ง 3 ชนิดจริง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [28]

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 6 กระดาษอินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดหลังสัมผัสสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1-14



รูปที่ 7 สเปกตรัม FT-IR ของสารแอนโทไซยานินจากสารสกัดกะหล่ำปลีม่วง สารสกัดดอกเข็มแดง และสารสกัดดอกอัญชัน

จากการศึกษาการย่อยสลายของกระดาษจากเส้นใยชานอ้อย 60 กรัม โดยทำการฝังลงดิน และวิเคราะห์ตัวอย่างทุก ๆ 2 เดือน ดังตารางที่ 3 พบว่ากระดาษจากเส้นใยชานอ้อยมีการย่อยสลายร้อยละ 61.12 ในเวลา 8 เดือน ทั้งนี้เนื่องมาจากโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นโมเลกุลชีวภาพจึงย่อยสลายได้ประกอบกับจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินจึงช่วยให้กระดาษจากเส้นใยชานอ้อยย่อยสลายได้ [29] - [30]

ตารางที่ 3 การย่อยสลายของกระดาษจากเส้นใยชานอ้อย

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ ระยะเวลา (เดือน) 0	2	4	6	8	การย่อยสลาย (ร้อยละ)
กระดาษจากเส้นใยชานอ้อย (60)						61.12

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้กระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินเพื่อตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดิน โดยนำดินตัวอย่างนำมาละลายในน้ำ นำกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จุ่มลงไปในสารละลายดิน วิเคราะห์โดยเทียบสีที่ได้กับตัวอย่างแถบสีในรูปที่ 3(ข) ว่ามีค่า pH อยู่ระดับใด พบว่ากระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงแถบสีบนกระดาษเมื่อ pH ของสารละลายดินเปลี่ยนไป ซึ่งอ่านค่าระดับ pH

ได้ที่ pH = 5 และ pH = 8 ดังตารางที่ 4 จากผลที่ได้กระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์ยังเปลี่ยนสีได้ไม่ชัดเจนมากนัก มีข้อจำกัดในเรื่องของความละเอียดและความแม่นยำ แต่ใช้งานง่ายและพกพาสะดวก

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินก่อนและหลังสัมผัสสารละลายดินตัวอย่าง

กระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์ (สัมผัสสารละลายดินตัวอย่าง)		
ก่อนสัมผัส	หลังสัมผัสระดับค่า	
	pH = 5	pH = 8
		

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์จากเส้นใยชานอ้อยที่มีสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง สำหรับประยุกต์ใช้ตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดิน พบว่าจากการศึกษา สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกล ปริมาณที่เหมาะสมในการเตรียมกระดาษ คือ น้ำหนักเส้นใยจากชานอ้อยปริมาณ 60 กรัม มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็นกระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์ และการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบดิน พบว่ากระดาษจากเส้นใยชานอ้อยปริมาณ 60 กรัม มีการย่อยสลายได้ร้อยละ 61.12 ในเวลา 8 เดือน จากนั้นนำสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และดอกเข็มแดง มาหยดลงบนกระดาษจากเส้นใยชานอ้อยปริมาณ 60 กรัม พบว่ากระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1-14 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดความเป็นกรด-เบสในดินได้ จากการศึกษาสรุปได้ว่ากระดาษบ่งชี้อินดิเคเตอร์ใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นส่วนประกอบหลัก แสดงผลการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และสามารถใช้งานได้สะดวก เมื่อใช้งานเสร็จสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งสารสกัดที่มีสีจากพืชธรรมชาตินำมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์สามารถทดแทนอินดิเคเตอร์สังเคราะห์ได้ เป็นทางเลือกหนึ่งที่ประหยัด และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ ได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี สถาบันวิจัยและพัฒนา ประจำปีงบประมาณ 2565 และขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี (ค.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

ISSN 2672-9369 (Online)

References

[1] Sammayo, S., Poomipan, P., Thepsilvisul, O., and Chakhatrakan, S. (2019). Effects of Soil pH and Phosphorus Fertilizer on Efficiency of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, *Glomus intraradices* on Maize Production in Infertile Soil. **Thai Science and Technology Journal**. Vol. 27, No. 1, pp. 78-87 (in Thai)

[2] Arrakhiz, F. Z., Benmoussa, K., Bouhfid, R., and Qaiss, A. (2013). Pine Cone Fiber/Clay Hybrid Composite: Mechanical and Thermal Properties. **Materials & Design**. Vol. 50, pp. 376-381. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.03.033

[3] Vaithanomsat, P., Kongsin, K., Trakunjae, C., Boonyarit, J., Jarerat, A., Sudesh, K., and Chollakup, R. (2021). Biosynthesized Poly(3-Hydroxybutyrate) on Coated Pineapple Leaf Fiber Papers for Biodegradable Packaging Application. **Polymers**. Vol. 13, Issue 11, pp. 1-15. DOI: 10.3390/polym13111733

[4] Luepong, K., Sasithorn, N., and Manarungwit, K. (2016). Kraft Paper Preparation from Water Hyacinth, Pineapple Leaves and Leaf Sheath of Banana Tree. **RMUTP Research Journal**. Vol. 11, No. 1, pp. 15-22 (in Thai)

[5] Islam, M. N., Rahman, F., Papri, S. A., Faruk, M. O., Das, A. K., Adhikary, N., and Ahsan, M. N. (2021). Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.) as an Alternative Raw Material for the Production of Bio-Compost and Handmade Paper. **Journal of Environmental Management**. Vol. 294, pp. 1-9. DOI:10.1016/j.jenvman.2021.113036

[6] Kaur, D., Bhardwaj, N. K., and Lohchab, R. K. (2017). Prospects of Rice Straw as a Raw Material for Paper Making. **Waste Management**. Vol. 60, pp. 127-139. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.08.001

[7] Rocha, G. J. M., Martín, C., Silva, V. F. N., Gómez, E. O., and Gonçalves, A. R. (2012). Mass Balance of PilotScale Pretreatment of Sugarcane Bagasse by Steam Explosion Followed by Alkaline Delignification. **Bioresource Technology**. Vol. 111, pp. 447-452. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.005

[8] Rocha, G. J. M., Nascimento, V. M., Gonçalves, A. R., Silva, V. F. N., and Martín, C. (2015). Influence of Mixed Sugarcane Bagasse Samples Evaluated by Elemental and Physical-Chemical Composition. **Industrial Crops and Products**. Vol. 64, pp. 52-58. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.11.003

[9] Paristiowati, M., Moersilah, M., Stephanie, M. M., Zulmanelis, Z., Idroes, R., and Puspita, R. A. (2019). *Rosa sp* and *Hibiscus sabdariffa* L Extract in Ethanol Fractionas Acid Base Indicator: Application of Green Chemistry in Education. In **4th Annual Applied Science and Engineering Conference Journal of Physics: Conference Series**. ID: 055041. DOI: 10.1088/1742-6596/1402/5/055041

[10] Madushan, R., Vidanarachchi, J, K., Prasanna, P. H. P., Werellagama, S., and Priyashantha, H. (2021). Use of Natural Plant Extracts as a Novel Microbiological Quality Indicator in Raw Milk: An Alternative for Resazurin Dye Reduction Method. **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 144, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111221

[11] Singh, S., Bothara, S.B., Singh, S., Patel, R., and Mahobia, N. (2010). Preliminary Pharmaceutical Characterization of Flowers as Natural Indicator: Acid - Base Indicator. **The Pharma Research**. Vol. 4, pp. 83-90. DOI: 10.5530/pj.2011.22.8

[12] Becerril, R., Nerín, C., and Silva, F. (2021). Bring Some Colour to Your Package: Freshness Indicators Based on Anthocyanin Extracts. **Trends in Food Science & Technology**. Vol. 111, pp. 495-505. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.042

[13] Zheng, Luman., Liu, L., Yu, J., and Shao, P. (2022). Novel Trends and Applications of Natural pH-Responsive Indicator Film in Food Packaging for Improved Quality Monitoring. **Food Control**. Vol. 134, pp. 1-16. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108769

[14] Chawloei, M. and Chairam, S. (2020). Fabrication of Simple Paper-Based Indicator for using in Acid-Base Learning. **Journal of Science and Science Education**. Vol. 3, No. 1, pp. 61-72 (in Thai)

[15] Listyarini, A., Sholihah, W., and Imawan, C. (2018). A Paper-Based Colorimetric Indicator Label using Natural Dye for Monitoring Shrimp Spoilage. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 367, No. 1, pp. 1-7. DOI: 10.1088/1757-899X/367/1/012045

[16] Ritthisorn, S. and Chamdit, S. (2020). Production of Bagasse Paper with Antibacterial Activity Against Foot-Odor Causing Bacteria. **Science and Technology RMUTT Journal**.Vol. 10, No. 1, pp. 10-18 (in Thai)

[17] Thongpoon, C. and Kraison, P. (2015). Acid-Base Titration by using Butterfly Pea Extract as Indicator. **Rajabhat Journal of Sciences, Humanities and Social Sciences**. Vol. 16, No. 2, pp. 156-166 (in Thai)

[18] Sanyang, M. L., Sapuan, S., Jawaid, M. M., Ishak, M. R., and Sahari, J. (2016). Development and Characterization of Sugar Palm Starch and Poly (lactic acid) Bilayer Films. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 146, pp. 36-45. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.03.051

[19] Velazquez, G., Cazón, P., and Vázquez, M. (2018). Cellulose-Glycerol-Polyvinyl Alcohol Composite Films for Food Packaging: Evaluation of Water Adsorption, Mechanical Properties, Light-Barrier Properties and Transparency. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 195, pp. 432-443. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.04.120

[20] Theamdee, P., Chomjan, S., and Pansuma, P. (2022). Development of Bio-foam from Banana Sheath and Cassava Starch (81 cultivar) with Natural Wax as Coating Agent for Food Packaging. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 96-109 (in Thai)

[21] Luepong, K., Sasithorn, N., and Manarungwit, K. (2017). Kraft Paper Preparation from Water Hyacinth, Pineapple Leaves and Leaf Sheath of Banana Tree. **RMUTP Research Journal**. Vol. 11, No. 1, pp. 15-22 (in Thai)

[22] Kanthiya, N. and Aumtong, S. (2014). Effects of Soils, Water Regimes and pH on Availability of Phosphorus Fractions. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 42, pp. 314-321 (in Thai)

[23] Damrongrak, I. (2019). Acid Soil Improvement by Ash from Bioelectric Power Plant for Baby Corn Planting. **Thaksin University Journal**. Vol. 22, No. 2, pp. 37-43 (in Thai)

[24] Konruang, S., Kaewyai, K., Tepnual, T., and Chatwannasi, M. (2020). Production of Biodegradable Plastics from Sago Fibers. **Thaksin University Journal**. Vol. 23, No. 2, pp. 65-73 (in Thai)

ISSN 2672-9369 (Online)

[25] Maduang, T., Chunhachart, O., and Pawongrat, R. (2018). The Effect on Morphological Change of Cellulose Fibers by Sonochemical-Assisted Pretreatment of Lignocellusic Biomass. **RMUTSB Academic Journal**. Vol. 6, No. 1, pp. 26-36 (in Thai)

[26] Kiangkoo, N., Ngencharoen, S., and Tanghengjarern, C. (2017). Manufacturing of Thermal Insulation Sheet from Beverage Labelling Waste and Bagasse fiber. **Thaksin University Journal**. Vol. 20, No. 2, pp. 44-53 (in Thai)

[27] Uddin, A. J., Yamamoto, A., Gotoh, Y., Nagura, M., and Iwata, M. (2010). Preparation and Physical Properties of Regenerated Cellulose Fibres from Sugarcane Bagasse. **Textile Research Journal**. Vol. 80, No. 17, pp. 1846-1858. DOI: 10.1177/0040517510369408

[28] Csóka, L., Dudić, D., Petronijević, I., Rozsa, C., Halasz, K., and Djoković, V. (2015). Photo-Induced Changes and Contact Relaxation of the Surface AC-Conductivity of the Paper Prepared from Poly(ethyleneimine)-TiO_2-Anthocyanin Modified Cellulose Fibers. **Cellulose**. Vol. 22, No. 1, pp. 779-788. DOI: 10.1007/s10570-014-0537-3

[29] Xia, Q., Chen, C., Yao, Y., Li, J., He, S., Zhou, Y., Li, T., Pan, X., Yao, Y., and Hu, L. (2021). A Strong, Biodegradable and Recyclable Lignocellulosic Bioplastic. **Nature Sustainability**. Vol. 4, pp. 627-635. DOI: 10.1038/s41893-021-00702-w

[30] Zhiliang, H., Liwu, Q., Qianjuan, Y., Na, Y., Tingguo, L., and Dong, T. (2018). Biodegradability Studies of Poly(butylene succinate) Composites Filled with Sugarcane Rind Fiber. P**olymer Testing**. Vol. 66, pp. 319-326. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.02.003

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์รีไซเคิล

Properties of Concrete Mixed with Recycled Crumb Rubber-Tires

สุธางค์ โพธิ์หิรัญ[1] ปรัชญา ก้านบัว[1*] และณัฐวุฒิ อินทบุตร[1]

Sutang Phohirun[1] Prachya Kanbua[1*] and Nuttawut Intaboot[1]

Received: *December 6, 2022;* ***Revised:*** *January 25, 2023;* ***Accepted:*** *February 4, 2023*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์บด โดยทดสอบค่าความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และโมดูลัสแตกร้าว การศึกษานี้ใช้เศษยางรถยนต์บดแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของทราย จากการทดสอบพบว่า ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่ผสมเศษยางรถยนต์บดมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์บด อย่างไรก็ตามความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมีน้ำหนักเบาลงและทึบน้ำมากขึ้น อีกทั้งคอนกรีตมีความสามารถในการแอ่นตัวสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติเพิ่มขึ้น และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมีค่าแตกต่างจากการคำนวณอยู่ประมาณร้อยละ 60 ถึง 70

คำสำคัญ : คอนกรีตผสมเศษยาง; ยางรถยนต์บดละเอียด; โมดูลัสยืดหยุ่น; กำลัง

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ*

[1] *Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 6877 4155, E - mail: prachya.k@rmutsb.ac.th*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

The objective of this paper was to study the physical and mechanical properties of concrete mixed with recycled crumb rubber-tires. The density, water absorption, compressive strength, tensile strength, bending strength, modulus of elasticity and modulus of rupture were tested. This study replaced sand with crumb rubber-tires in the ratios of 5, 10, 15 and 20 percent by weight. The results revealed that the density, water absorption, compressive strength, tensile strength, bending strength, modulus of elasticity and modulus of rupture of concrete mixed with recycled crumb rubber-tires decreased with an increase in the amount of crumb rubber-tires. However, the reduction in density and water absorption showed that concrete was lighter and more impermeable. In addition, the concrete had an increased maximum deflection before failure and the modulus of elasticity obtained by the test was about 60-70 percent different from the calculation.

Keywords: Concrete Mixed with Crumb Rubber-tires; Crumb Rubber-tires; Modulus of Elasticity; Strength

บทนำ

ยางรถยนต์เก่าที่ใช้แล้วนั้นเป็นปัญหาใหญ่ระดับประเทศและระดับโลก เพราะยากต่อการกำจัดซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะและเป็นต้นกำเนิดไฟไหม้ในหลายพื้นที่ เพราะมีส่วนผสมจากสารเคมีและสารสังเคราะห์อื่น ๆ อีกมากมาย นอกจากนั้นการย่อยสลายของยางรถยนต์เป็นไปได้ยาก การทำลายโดยวิธีเผาไหม้โดยสมบูรณ์ในเตาระบบปิดอาจเป็นวิธีแก้ แต่อย่างไร ก็ตามในการเผาไหม้ยังต้องใช้พลังงานในการทำลายยางรถยนต์อยู่มาก และจากผลการสำรวจข้อมูลของระบบฐานข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ดำเนินการสำรวจข้อมูลโดยสถาบันพลาสติก โดยใช้ข้อมูลการสำรวจจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตยางล้อรถยนต์จำนวน 23 ราย มีผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย ยางนอกรถกระบะ ยางนอกรถบรรทุกและรถโดยสารและยางนอกรถยนต์นั่ง พบว่าการผลิตยางรถยนต์เกือบทุกประเภทมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปี ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตและอัตราการใช้ยางในประเทศไทย [1]

ปี	ยางนอกรถกระบะ			ยางนอกรถบรรทุกและรถโดยสาร			ยางนอกรถยนต์นั่ง		
	Capacity	Production	Cap. U	Capacity	Production	Cap. U	Capacity	Production	Cap. U
2557	7,952,045	7,547,521	94.9%	6,477,595	3,578,860	55.2%	50,436,872	46,347,367	91.9%
2558	8,256,783	8,035,578	97.3%	6,911,862	3,694,634	53.5%	54,151,897	49,370,852	91.2%
2559	10,080,751	8,524,664	84.6%	9,107,170	5,961,610	65.5%	64,394,824	54,264,323	84.3%
2560	12,831,073	9,502,428	74.1%	13,043,820	7,224,289	55.4%	77,186,286	60,241,602	78.0%
2561	39,218,745	15,574,304	39.7%	46,988,783	11,980,665	25.5%	202,654,822	79,149,716	39.1%
2562	50,219,412	18,305,088	36.5%	46,801,652	13,775,301	29.4%	223,360,178	74,976,576	33.6%

ยางรถยนต์มีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นสูง มีความเหนียวและทนต่อแรงดึงได้ดีแม้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากต้องรองรับน้ำหนักของรถยนต์ในการเคลื่อนที่บดไปกับพื้นและต้องสัมผัสกับพื้นผิวหลายรูปแบบ อายุการใช้งานโดยเฉลี่ยแล้วจะอยู่ที่ 3.5 ปี หรือประมาณ 50,000 กิโลเมตร เมื่อยางรถยนต์หมดอายุการใช้งานแล้ว จะเป็นวัสดุเหลือใช้ที่นำมาใช้งานแปรรูปเป็นรูปแบบต่าง ๆ หรือกระทั่งเผาทำลาย ซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษได้ เนื่องจากยางรถยนต์มีสารเคมีที่ใช้เป็นส่วนผสมค่อนข้างมากที่ผ่านมายางรถยนต์ได้ถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตแล้ว [2] โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์และการใช้ผงยางรถยนต์แทนที่ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์:ทราย:ปูนขาว:อลูมิเนียมเท่ากับ 30:50:20:0.1 และใช้ผงยางรถยนต์แทนทรายในอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0 จนถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าสามารถนำมาทำบล็อกรับน้ำหนักที่ผ่านเกณฑ์ มอก. 57-2533 ได้ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยในด้านนี้ยังไม่แพร่หลายนัก ต่อมามีงานวิจัยที่ใช้ผงยางรถยนต์มาเป็นส่วนผสมทดแทนมวลรวมบางส่วนในการศึกษาถึงพฤติกรรมของคอนกรีต โดยนำผงกากยางรถยนต์เก่ามาผสมในคอนกรีตบล็อกปูผิวทางแบบอ่อน [3] จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตบล็อกที่ผสมผงยางรถยนต์มีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงแต่มีแนวโน้มในการดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น และต่อมามีการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้ผงยางรถยนต์เป็นส่วนผสม [4] โดยทดสอบคุณสมบัติด้านการรับแรงอัดและสภาพการนำความร้อน พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดและการนำความร้อนลดลงตามปริมาณผงยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ ทางผู้วิจัยได้เล็งเห็นว่าเศษยางรถยนต์บดเป็นอีกหนึ่งในวัสดุเหลือใช้ ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงและมีความเหนียว จึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์นำเศษยางรถยนต์บดละเอียดมาใช้แทนที่ทรายในคอนกรีต โดยมีสมมุติฐานที่ว่าเศษยางรถยนต์นั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในด้านการยืดหยุ่นหรือการรับพลังงานให้กับคอนกรีตได้ และศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตที่ผสมเศษยาง เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์และลดปริมาณการใช้วัสดุใหม่จากธรรมชาติให้มากที่สุด เนื่องจากวัสดุที่มีตามธรรมชาตินั้นเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด

วิธีดำเนินงานวิจัย

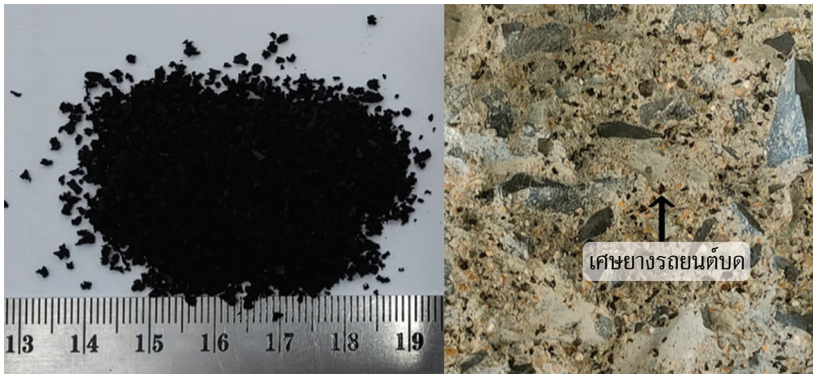
1. **วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ**

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อทรายและหินเป็น 1:2:4 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.55 ปริมาณของเศษยางรถยนต์บดละเอียดเบอร์ 20 ดังรูปที่ 1 ใส่แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 ของน้ำหนักทราย และมีสัญลักษณ์ที่ใช้เรียกคือ XXCon55 โดย XX คือปริมาณร้อยละของเศษยางรถยนต์บดละเอียดดังตารางที่ 2 และคุณสมบัติพื้นฐานของหิน ทราย และเศษยางรถยนต์บดละเอียด ได้แก่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความละเอียด มีค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

Symbol	Cement (kg/m^3)	Sand (kg/m^3)	Gravel (kg/m^3)	Crumb Rubber Tires (kg/m^3)	Water (kg/m^3)
Con55	282	676	1288	0	155
5Con55	282	642	1288	34	155
10Con55	282	608	1288	68	155
15Con55	282	574	1288	101	155
20Con55	282	540	1288	135	155

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 1 เศษยางรถยนต์บดและการกระจายตัวของเศษยางรถยนต์ในคอนกรีต

ตารางที่ 3 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [5]

Aggregate	Bulk Density (kg/m^3)	Specific Gravity	Water Absorption (%)	Fineness Modulus
Sand	1678.85	2.65	1.85	3.00
Gravel	1600.20	2.60	1.00	6.03
Crumb Rubber	589.80	0.89	1.70	2.62

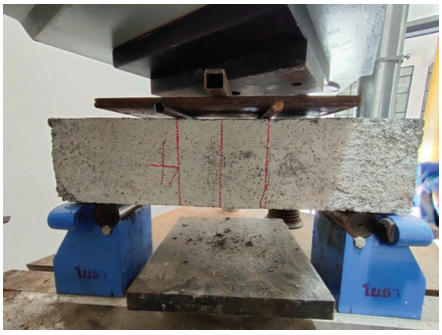
2. วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสมเพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการรายงานผลแต่ละการทดสอบรายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 [6] การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [7] การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496 [8] โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 469 [9] โดยการทดสอบดังกล่าวใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ดังรูปที่ 2 และทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตทำตามมาตรฐาน ASTM C 78 [10] เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์บดละเอียด จะใช้การทดสอบคานคอนกรีตแบบแรงกระทำ 3 จุด (Third - Point Loading) โดยที่คานคอนกรีตมีขนาดหน้าตัด 15 ซม. X 15 ซม. ยาว 60 ซม. และอ่านค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 1 ใน 3 ของความยาวจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ดังรูปที่ 3

(ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด

(ข) การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

รูปที่ 2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์



(ก) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบแรงดัด

(ข) หน้าตัดตัวอย่างทดสอบหลังเกิดการวิบัติ

รูปที่ 3 การทดสอบแรงดัดของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

สำหรับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ร้อยละ 40 [11] โมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณและโมดูลัสแตกร้าว หาได้จากสมการที่ (1) - (3)

$$E_{40} = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \tag{1}$$

เมื่อ

E_{40} หมายถึง โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ร้อยละ 40 (ksc)

S_2 หมายถึง ความเค้นอัดของคอนกรีตที่ร้อยละ 40 ของกำลังอัดประลัย (ksc)

S_1 หมายถึง ค่าความเค้นอัดที่เกิดความเครียดเท่ากับ 0.00005 (ksc)

ε_2 หมายถึง ค่าความเครียดที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ S_2

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} \tag{2}$$

เมื่อ

E_c หมายถึง โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (ksc)

f'_c หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ksc)

$$R = PL / bd^2 \tag{3}$$

เมื่อ

R หมายถึง โมดูลัสแตกร้าว (ksc)

P หมายถึง แรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ (kg)

L หมายถึง ความยาวของช่วงระหว่างจุดรองรับ (cm)

b หมายถึง ความกว้างของตัวอย่างทดสอบ (cm)

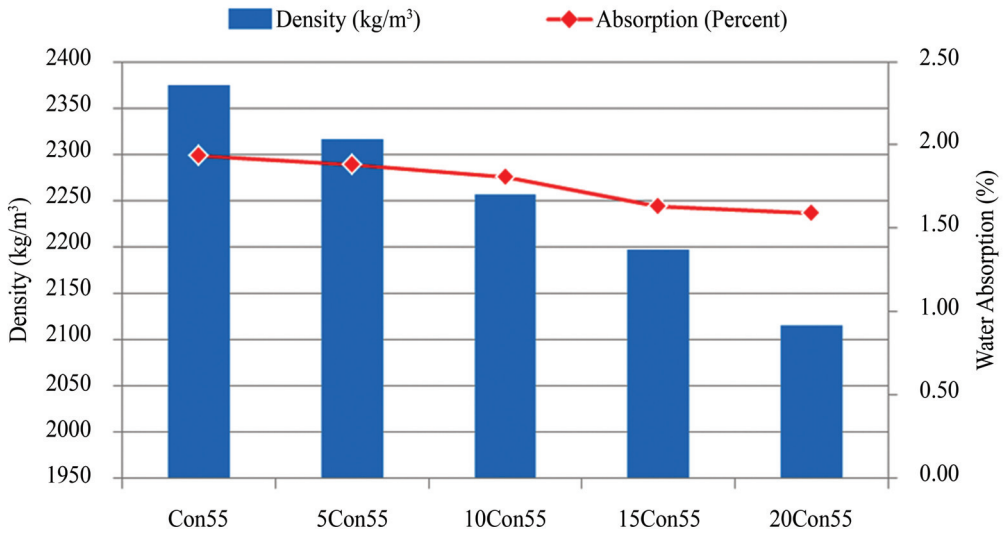
d หมายถึง ความลึกหรือความสูงของตัวอย่างทดสอบ (cm)

ISSN 2672-9369 (Online)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ (Density and Water Absorption)

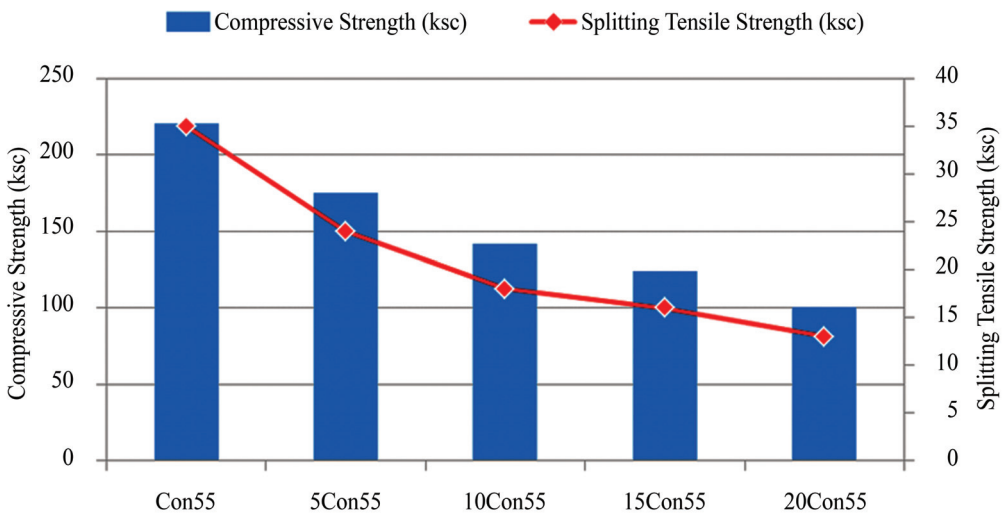
การทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ มีค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสมดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์บดละเอียดเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำจะลดลง เนื่องจากยางรถยนต์บดละเอียดมีส่วนผสมทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารไฮโดรคาร์บอน เช่นผงเขม่าดำ (Carbon Black) และอื่น ๆ [12] จึงมีความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำน้อยกว่าทรายดังตารางที่ 3 ส่งผลทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาลง ความหนาแน่นลดลงและการดูดซึมน้ำน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของแต่ละอัตราส่วนผสมกับคอนกรีตควบคุม พบว่าความหนาแน่นจะลดลงประมาณร้อยละ 2.5 และการดูดซึมน้ำลดลงประมาณร้อยละ 3 - 5 ทุก ๆ การเพิ่มปริมาณยางรถยนต์บดละเอียดร้อยละ 5



รูปที่ 4 ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

2. กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Compressive Strength and Splitting Tensile Strength)

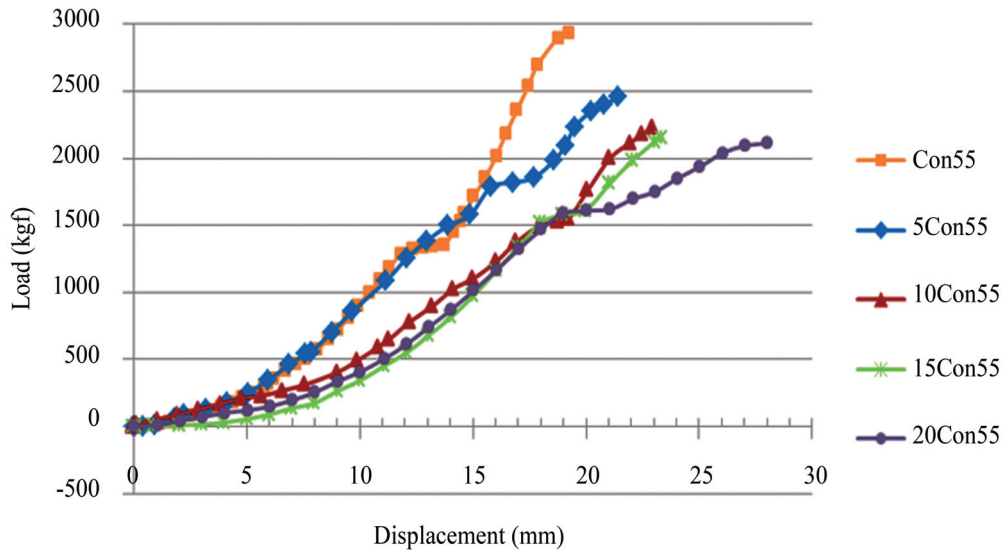
การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก มีค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสมดังรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มลดต่ำลงตามปริมาณของยางรถยนต์บดละเอียดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเศษยางรถยนต์บดละเอียดมีการยึดเกาะกับซีเมนต์ไม่ดีและเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro Crack) จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง และยางรถยนต์บดละเอียดไม่ได้เพิ่มกำลังรับแรงดึงให้กับคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมจะแยกตัวออกจากกันเมื่อคอนกรีตรับแรงดึงและยางรถยนต์บดละเอียดไม่ได้มีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต จึงไม่มีส่วนช่วยในการรับแรงดึง [13] - [14]



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

3. **กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)**

การทดสอบกำลังรับแรงดัดมีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักกดสูงสุดและการแอ่นตัว (วัดการแอ่นตัวที่ตำแหน่งของแรงกระทำหรือ 1 ใน 3 ของช่วงความยาวด้วยเครื่อง UTM เพื่อใช้คำนวณการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลาง) ของตัวอย่างทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสมดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าส่วนผสมที่ไม่ใส่เศษยางรถยนต์จะมีค่าการแอ่นตัวอยู่ที่ 19.3 มิลลิเมตร เมื่อผสมเศษยางรถยนต์มากขึ้นค่าการแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งส่วนผสมที่ใส่เศษยางรถยนต์มากที่สุดที่ร้อยละ 20 จะมีค่าการแอ่นตัวได้ถึง 28 มิลลิเมตร ส่วนน้ำหนักกดสูงสุดจะมีค่าลดลงตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่น้ำหนักกดสูงสุดลดลงเนื่องจากเมื่อเกิดแรงดัดพื้นที่เหนือแกนสะเทินจะเกิดหน่วยแรงอัดและพื้นที่ใต้แกนสะเทินจะเกิดหน่วยแรงดึง ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 5 การใส่เศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงลดลงดังนั้นจึงส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงด้วยเช่นกัน [15]

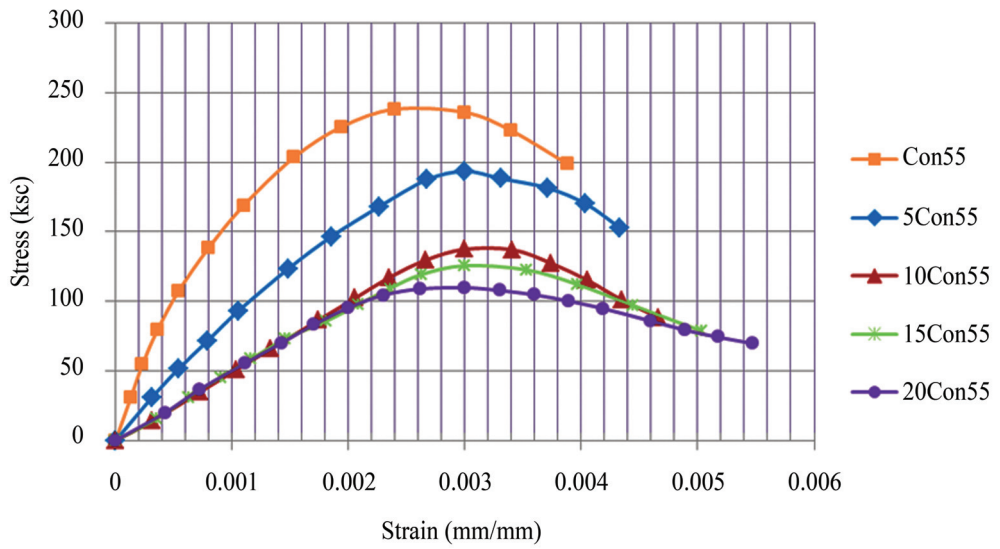


รูปที่ 6 แรงกระทำและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

ISSN 2672-9369 (Online)

4. โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Elasticity and Modulus of Rupture)

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดข้างต้น สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยนำตัวแทนของแต่ละอัตราส่วนผสมมาแสดงได้ดังรูปที่ 7 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตทั่วไป [16] - [17] โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ร้อยละ 40 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณ และค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบ ดังตารางที่ 4



รูปที่ 7 ความเค้นและความเครียดของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

ตารางที่ 4 โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

Symbol	Modulus of Elasticity at 40 % E_{40} (ksc)	Modulus of Elasticity from Calculation (ksc)	Percent Differential of Modulus of Elasticity (%)	Modulus of Rupture R (ksc)
Con55	207100	233019	11.12	39.10
5Con55	88500	210076	57.87	32.79
10Con55	55000	177027	68.93	29.75
15Con55	51300	169261	69.69	28.67
20Con55	47800	158247	69.79	28.18

จากกราฟในรูปที่ 7 และค่าในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแตกร้าวมีค่าลดลงตามปริมาณยางรถยนต์บดละเอียดที่เพิ่มขึ้น [13] เมื่อนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณพบว่ามีค่าแตกต่างกันประมาณร้อยละ 10 ในส่วนของคอนกรีตควบคุม (Con55) แต่สำหรับคอนกรีตที่ผสมเศษยางรถยนต์มีค่าแตกต่างกันมากถึงประมาณร้อยละ 60 - 70 ทำให้สมการประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั่วไปอาจไม่สามารถใช้กับคอนกรีตประเภทนี้ได้ ส่วนโมดูลัสแตกร้าวมีแนวโน้มลดลงสาเหตุเนื่องจากเศษยางรถยนต์บดละเอียดมีการยึดเกาะกับซีเมนต์ที่ไม่ดี (ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน) [18] เมื่อคอนกรีตรับแรงดัดจะมีส่วนที่รับหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึง ในส่วนที่รับหน่วยแรงดึงมวลรวมจะแยกตัวออกจากกัน จึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวมีค่าลดลง

สรุปผลการวิจัย

การเพิ่มเศษยางรถยนต์บดละเอียดเข้าไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีตแทนที่ทรายโดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 และ 20 ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และโมดูลัสแตกร้าวลดลง โดยคอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงประมาณร้อยละ 2.5 การดูดซึมน้ำลดลงประมาณร้อยละ 3 - 5 กำลังรับแรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 20 กำลังรับแรงดึงลดลงประมาณร้อยละ 15 - 30 ทุก ๆ การเพิ่มปริมาณยางรถยนต์บดละเอียดร้อยละ 5 แต่จะไปช่วยเสริมข้อดีในด้านที่ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาและการยืดตัวสูงสุดก่อนการวิบัติเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยในเรื่องการทึบน้ำที่เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่สามารถใช้สมการประมาณค่าเหมือนคอนกรีตควบคุมได้ เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบแตกต่างจากสมการมากถึงประมาณร้อยละ 60 - 70 สุดท้ายแล้วการใช้เศษยางรถยนต์บดละเอียดผสมเข้าไปในคอนกรีตอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดขยะและลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากการเผาทำลายยางรถยนต์เก่าซึ่งเป็นการรีไซเคิลของเสียจากอุตสาหกรรมรถยนต์ คอนกรีตชนิดนี้จึงเหมาะแก่การนำไปใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบาหรือชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการความสามารถในการแอ่นตัวหรือยืดตัวได้มากขึ้น เช่น คานที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่มาก (คานรัดหัวเสา) หรือจุดเชื่อมต่อที่มักเกิดการขยับตัว (รอยต่อคานและเสาสำเร็จรูป) เป็นต้น ดังนั้นควรมีการทดสอบในส่วนของคานคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์บดเสริมเหล็กหรือทดสอบการนำคอนกรีตชนิดนี้ไปใช้กับจุดเชื่อมต่อของโครงสร้างต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยของขอบคุณคณาจารย์และนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ที่มีส่วนช่วยให้การทดสอบในงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

[1] Institute of Plastics. (2014). **Rubber Particles**. Access (1 April 2022). Available (http://rubber.oie.go.th/ ELibrary.aspx?cid=75)

[2] Budnumpetch, T. and Tanpaiboonkul, N. (2016). Properties of Lightweight Concrete Containing Crumb Rubber and Cement Replacing with Fly Ash from Coal Power Plant. Veridian E-Journal, **Science and Technology Silpakorn University**. Vol. 3, No. 4, pp. 62-75. (in Thai)

[3] Chaikaew, C. (2004). Study on The Use of Wasted Tire Particles on Soft Surface Concrete Paving Block. In **4th International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading (CONSEC04)**. Korea: Seoul National University

[4] Duangseang, C. and Kiatwongtong, S. (1998). **Mechanical Properties Study of Concrete Using Tire Particles as Ingredient. Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology**. Access (1 December 2021). Available (https://uatscimath.ipst.ac.th/2021/project-computer/item/6404-2016-09-09-03-49-35-6404)

[5] Intaboot, N. and Kanbua, P. (2021). Investigation of Concrete Blocks Mixed with Recycled Crumb Rubber: A Case Study in Thailand. **Engineering and Applied Science Research**. Vol. 49, No. 3, pp. 413-424. DOI: 10.14456/easr.2022.42

ISSN 2672-9369 (Online)

[6] ASTM C642. (1997). **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[7] ASTM C39. (2021). **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[8] ASTM C496. (1996). **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[9] ASTM C469. (2014). **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[10] ASTM C78. (1994). **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[11] Pangdaeng, S., Ngamtavee, S., Tho-in, T., Hanjitsuwan, S., and Phoo-ngernkham, T. (2021). Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 2, pp. 1-10 (in Thai)

[12] Karnjana worawanit, B. (2004). **Tires**. Article of National Metal and Materials Technology Center. Access (6 November 2022). Available (https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/ 214_20-24.pdf)

[13] Khaloo, A. R., Dehestani, M., and Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical Properties of Concrete Containing a High Volume of Tire-Rubber Particles. **Waste Management**. Vol. 28, Issue 12, pp. 2472-2482. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.01.015

[14] Eldin, N. N. and Senouci, A. B. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregates. **American Society of Civil Engineers**. Vol. 5, Issue 4, pp. 478-496

[15] Miah, M. J., Babafemi, A. J., Paul, S. C., Kong, S. Y., Li, Y., and Jang, J. G. (2022). Eco-Friendly Concrete with Chemically Treated End-of-Life Tires: Mechanical Strength, Shrinkage and Flexural Performance of RC Beams. **Construction and Building Materials**. Vol. 351, p. 128970. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128970

[16] Jiravacharadet, M. (2014). **Reinforced Concrete Design (Strength Design Method)**. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. pp. 4-5

[17] Seangatith, S. (2013). **Mechanical Properties of Polyester Polymer Concrete under Compressive and Flexural Loads. Research Reports**. Access (25 December 2022). Available (https://http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5415/2/Fulltext.pdf)

[18] Hanjitsuwan, S., Tho-in, T., and Phoo-ngernkham, T. (2021). Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 1-10 (in Thai)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์

Design and Development of Automatic Charcoal Briquette Machine Controlled by Programmable Logic Controllers

กันญา โกสุมภ์[1*] กฤษณพงศ์ ชาตัน[1] กฤษณพงศ์ วังหอม[1] และสหัสวรรษ มั่นหมาย[1]

Kanya Kosum[1*] Kritsanapong Chatan[1] Kritsanapong Wanghom[1] and Sahatsawat Manmay[1]

Received: *November 23, 2022;* ***Revised:*** *January 23, 2023;* ***Accepted:*** *January 24, 2023*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบ พัฒนา และทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ที่กว้าง 1.7 ม. ยาว 1.5 ม. สูง 1.2 ม. ด้วยการออกแบบให้โปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ให้ทำการควบคุมการทำงานของระบบการจ่ายส่วนผสมและความยาวของแท่งถ่าน ผลจากการทดสอบพบว่า ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติของเครื่องสามารถควบคุมการทำงานให้เริ่มและหยุดการทำงานได้ตรงตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้งานกำหนด ระบบควบคุมการจ่ายส่วนผสมและความยาวของแท่งถ่านสามารถทำงานได้ตามที่ผู้ใช้งานตั้งค่า โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถอัดแท่งถ่านให้มีความสมบูรณ์ มีอัตราคุณภาพงานสูงถึงร้อยละ 95 มีประสิทธิภาพในการทำงาน (คิดจากเวลา) คือร้อยละ 87 มีความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งถ่านที่ 1.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าทนแรงกดของแท่งถ่านในแนวนอนเฉลี่ยที่ 204.86 นิวตัน มีกำลังการผลิตที่ 1,590 แท่งต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ 2.55 วัตต์ต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : เครื่องอัดแท่งถ่าน; ถ่านอัดแท่ง; PLC; ระบบอัตโนมัติ

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา*

[1] *Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 7343 1107, E - mail: kk_changnoi@yahoo.com*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

The objective of this research was to design, develop and test the functionality of an automatic charcoal briquette machine controlled by a programmable logic controller with a width of 1.7 m., a length of 1.5 m., and a height of 1.2 m. The programmable logic controller was designed to control the operation of a mixing system and the length of the charcoal bar. It was found that the automatic control system of the machine could control the start and stop the machine's operation according to the conditions specified by the user. The dispensing system and the charcoal bar length could be operated according to the user's setting. The developed machine could compress the charcoal briquettes almost to perfection with a quality rate of up to 95 %. The work efficiency (calculated from time) was found to be 87 %. The average density of the charcoal bars was found to be 1.09 g/cm^3. The average horizontal pressure strength of the bars was found to be 204.86 newtons. The machine had the capacity to produce 1,590 charcoal bars per hour and had a power consumption rate of 2.55 watts per hour.

Keywords: Charcoal Briquette Machine; Charcoal Briquette; PLC; Automatic System

บทนำ

ถ่าน คือ ไม้ที่เผาจนสุก มีสีดำ [1] โดยส่วนมากแล้วจะถูกนำมาเป็นพลังงานทางความร้อนเพื่อปรุงอาหารหลากหลายเมนูให้สุกก่อนการบริโภค โดยเฉพาะเมนูปิ้งย่าง เช่น หมูปิ้ง ลูกชิ้นปิ้ง ไก่ย่าง เนื้อย่างฯลฯ ซึ่งเป็นอาหารยอดนิยมในปัจจุบันที่สามารถหารับประทานได้ง่ายสำหรับผู้บริโภค หรือแม้แต่อาหารบางเมนูที่ยังคงมีการปรุงสุกด้วยเตาถ่าน เพราะผู้ปรุงอาหารต้องการรักษากลิ่นที่เฉพาะตัวที่จะไม่เกิดขึ้นหากปรุงสุกด้วยเตาไฟฟ้าหรือเตาแก๊ส จึงทำให้ถ่านยังคงเป็นเชื้อเพลิงพลังงานที่จำเป็นและถูกเลือกใช้อยู่นั่นเอง และประกอบกับสถานการณ์พลังงานในปัจจุบันที่มีราคาสูงขึ้นจึงทำให้เกิดความต้องการถ่านเพิ่มสูงขึ้น แต่การผลิตถ่านโดยวิธีดั้งเดิมนั้นไม่สามารถควบคุมคุณภาพของถ่านได้จึงทำให้เกิดการแตกหักของก้อนถ่านออกเป็นเศษเล็กเศษน้อยหรือเป็นผงเมื่อได้รับการกระแทกจากการเคลื่อนย้าย ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียรายได้ของผู้ทำอาชีพเผาถ่านขาย เพราะต้องเอาเฉพาะถ่านที่ยังคงเป็นก้อนไปบรรจุถุงเพื่อจำหน่าย หรือก่อให้เกิดความสูญเสียในแง่ของผู้ที่ซื้อถ่านมาใช้คือผู้ใช้งานมักจะหยิบเอาเฉพาะถ่านที่ยังเป็นก้อนขนาดที่หยิบได้ง่าย ส่วนเศษถ่านหรือผงถ่านจะถูกทิ้ง ทั้งที่เศษเล็กเศษน้อยหรือผงถ่านเหล่านั้นยังมีคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงอยู่ครบถ้วน ดังนั้นจึงได้มีการนำเศษถ่านเหล่านั้นมาอัดเป็นแท่ง ซึ่งการทำถ่านอัดแท่งคือ การใช้เศษถ่านที่เหลือมาผสมกับแป้งมันแล้วอัดออกมาเป็นแท่ง [2] หรือการนำวัตถุดิบมาเผาให้เป็นถ่านวัตถุดิบความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 จากนั้นลดขนาดด้วยการบดผสมผงถ่านกับตัวประสานและน้ำแล้วอัดให้ถ่านเป็นแท่งแล้วนำไปตาก [3] - [4] เพื่อช่วยลดปริมาณการทิ้งเศษถ่านที่เกิดการแตกหัก และเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเศษถ่านนั้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มคุณภาพของถ่านและเพิ่มระยะเวลาการใช้งานของถ่านได้มากขึ้น โดยการผลิตถ่านอัดแท่งมี 2 วิธี คือ 1) การอัดร้อน เป็นการอัดวัสดุโดยที่วัสดุไม่จำเป็นต้องเป็นถ่านมาก่อนเมื่ออัดเป็นแท่งเสร็จ แล้วค่อยนำเข้าเตาให้เป็นถ่านอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเครื่องอัดชนิดนี้ราคาค่อนข้างสูง และ 2) การอัดเย็น เป็นการอัดวัสดุที่เผาถ่านมาแล้วแล้วนำมาผสมกับแป้งมันกับน้ำในอัตราส่วนตามที่ต้องการเพื่อให้สามารถยึดเกาะกันและขึ้นรูปเป็นแท่งได้ง่าย [5] ซึ่งความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากการอัดจะทำให้เวลาในการติดไฟของถ่านอัดแท่งนานขึ้นและสะดวกในการขนส่ง [6] - [7] โดยที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ของถ่านอัดแท่งที่ดีนั้นควรมีค่าวัดผลอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เช่น ค่าความร้อนไม่ควรต่ำกว่า 3,000 กิโลแคลอรี่

ต่อกิโลกรัม ค่าคาร์บอนคงตัวไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 15 เถ้าไม่ควรเกินร้อยละ 20 ค่ากำมะถันรวมไม่ควรเกินร้อยละ 2 [8] และควรมีระยะการเผาไหม้อยู่ในช่วง 60 - 90 นาทีต่อกิโลกรัม [9]

โดยเครื่องอัดแท่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ [10] คือ

1. เครื่องอัดแท่งแบบลูกสูบ (Piston Press) ซึ่งมีหลักการทำงานคือ ลูกสูบอัดวัสดุเข้าไปในปลายท่อ (Barrel) หรือกระบอกอัดที่มีลักษณะเป็นตัวรีดรูปกรวย (Conical Chock) หรือรูปเกลียวที่ทำหน้าที่ในการต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุ ผลจากการต้านนี้รวมทั้งการขัดสีวัสดุกับผนังท่อทำให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 150 - 300 °C โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกอัดแท่งออกมาในรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 - 100 mm. ซึ่งเครื่องอัดแบบนี้มีความสามารถในการผลิตได้ 40 - 1,000 kg/hr แต่พบว่ามีปัญหาของการสึกกร่อนจากการขัดสีของกระบอกอัดและการแตกของลูกสูบ

2. เครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll Press) มีการทำงานโดยจะเริ่มจากการอัดวัตถุดิบที่ตกลงมาในระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้วัตถุดิบถูกอัดแน่นเข้าไปในตัวรองรับแท่นอัด (Pillow-Shaped Briquetted) การอัดแท่งแบบนี้ต้องการวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าการอัดแบบอื่นและแท่งอัดที่ได้มีความทนทานน้อยกว่าแท่งอัดที่ได้จากการอัดแบบอื่นเนื่องจากช่วงเวลาในการอัดสั้น ทำให้ยากต่อการสร้างสภาวะของอุณหภูมิแรงอัดในการหลอมละลายลิกนินได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นการอัดแท่งด้วยวิธีนี้จะได้ผลสำเร็จดีจำเป็นต้องใช้ตัวประสานเข้าช่วยที่ทำให้วัสดุเกาะติดกัน

3. เครื่องอัดเม็ดหรืออัดเป็นแท่งเล็ก ๆ (Pelletizing Press) เครื่องอัดแบบนี้ต้องอาศัยแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์กับลูกกลิ้งทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดสีและทำการอัดวัตถุดิบผ่านแม่พิมพ์ที่เจาะเป็นรู ซึ่งมี 2 แบบ คือ เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk Matrix Press) และเครื่องอัดแม่พิมพ์วงแหวน (Ring Matrix Press) แท่งอัดเม็ดที่ถูกอัดออกมาแล้วจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดความยาวที่กำหนดให้ซึ่งปกติจะมีความยาวน้อยกว่า 30 mm. และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 515 mm. ถ้าแท่งอัดมีขนาดใหญ่กว่านี้แล้วจะใช้การอัดเป็นลูกบาศก์ (Cubing) แทนการอัดเม็ด

4. เครื่องอัดแบบเกลียว (Screw Press) ที่ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น

4.1 เครื่องอัดแบบเกลียวรูปกรวย (Conical Screw Press) ที่มีหลักการทำงานคือ เกลียวรูปกรวยจะดันให้วัสดุเคลื่อนตัวไปข้างหน้า เมื่อพ้นเกลียวไปวัสดุถูกดันผ่านกระบอกอัดขนาด 25 mm. การไหลผ่านของวัสดุเข้าไปในกระบอกอัดเพิ่มขึ้นพร้อมกับแรงเสียดทานที่มากขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 100 - 200 °C ส่งผลให้ลิกนินหลอมละลายทำหน้าที่เป็นตัวประสานหลังจากระบายความร้อนจะได้แท่งเชื้อเพลิงอัด โดยกำลังในการผลิตของเครื่องอัดแท่งแบบนี้อยู่ในช่วง 500 - 1,000 kg/hr อัตรากำลังของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนอัดอยู่ระหว่าง 35 - 75 kW วัสดุที่ใช้ทำการอัดควรมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดและมีความชื้นร้อยละ 8 - 10

4.2 เครื่องอัดแบบเกลียวพร้อมด้วยขดลวดความร้อนที่กระบอกอัด (Screw Press with a Heated Die) มีหลักการทำงานคือ วัสดุถูกดันโดยเกลียวที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือรูปกรวยเล็กน้อยผ่านเข้าไปในท่อ (Barrel) หรือกระบอกอัดที่มีอุณหภูมิจากขดลวดความร้อนระหว่าง 200 - 350 °C ความร้อนนี้ทำให้วัสดุที่สัมผัสกับท่อเกิดการเผาไหม้และได้ผลิตภัณฑ์ที่ถูกยึดตัวกันดี ลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกหกเหลี่ยมขนาดประมาณ 50 mm. โดยเฉพาะการออกแบบของหัวเกลียวทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีรูกลวงตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 mm. เพื่อเป็นช่องให้ก๊าซหรือควันที่เกิดในระหว่างการอัดถ่ายเทออกมา มีกำลังในการผลิตของเครื่องอัดแบบนี้อยู่ในช่วง 50 - 500 kg/hr วัสดุที่ใช้มีลักษณะเม็ดละเอียดและมีปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 8 - 12 ปัญหาใหญ่ของเครื่องอัดแบบนี้คือ การขัดสีของเกลียวและกระบอกอัด

4.3 เครื่องอัดแบบเกลียวคู่ (Twin-Screw Press) เครื่องอัดแบบนี้มีเกลียวอัด 2 อันต่อกับเพลาที่สวมเข้ากับชิ้นส่วนของเกลียว (Screw Parts) ที่เปลี่ยนความเร็วในการหมุนได้ เนื่องจากแรงอัดและแรงเสียดทานสูงทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบสูงถึง 250 °C จึงต้องมีส่วนหล่อเย็นที่กระบอกอัด วัตถุดิบที่ใช้อัดควรมีขนาด 30 - 80 mm. และวัตถุดิบมีความชื้นร้อยละ 25 ขึ้นไป จึงจะสามารถทำการอัดได้โดยไม่ต้องทำให้

ISSN 2672-9369 (Online)

แห้งเสียก่อน กำลังการผลิตของเครื่องนี้อยู่ในช่วง 2,800 - 3,600 kg/hr ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งเครื่องอัดถ่านแท่งที่วางจำหน่ายในปัจจุบัน พบว่าแต่ละแบบจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น เครื่องอัดถ่านแท่งที่ใช้ไฮดรอลิคเป็นต้นกำลังในการผลิต มีข้อดีคือ แท่งถ่านมีความหนาแน่นสูง แต่ข้อเสียคือ ราคาเครื่องสูง มีอัตราการผลิตต่ำ และการที่ผู้ใช้งานต้องทำการผสมส่วนผสมต่าง ๆ ให้เรียบร้อยก่อนที่จะนำมาอัดเป็นแท่งในเครื่องอัดถ่านแท่งทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน หรือบางแบบไม่สามารถปรับความยาวของแท่งถ่านที่อัดให้ตรงตามความต้องการนำไปใช้ในแต่ละงาน

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ผู้วิจัยและคณะได้ทำการพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านขึ้นโดยการนำเอาโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ (PLC) มาเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่อง ซึ่งการที่ PLC จะทำงานได้นั้นจะต้องมีการป้อนคำสั่งเข้าไปและจะทำงานตามขั้นตอนของโปรแกรมที่ป้อนเข้าไป โดยที่ตัว PLC จะสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของซอฟต์แวร์ที่ตรงกับสภาพความเป็นจริงเปรียบเสมือนว่ามีอุปกรณ์เหล่านั้นบรรจุอยู่ในตัวของ PLC จริง [11] และเงื่อนไขในการออกแบบขนาดของเครื่องนั้นคือ ให้เหมาะสมกับสรีระของผู้ใช้งานคนไทย ให้สามารถอำนวยความสะดวกในการทำงานให้กับผู้ใช้งาน และสามารถลดขั้นตอนการทำงานของผู้ใช้งานคือ เครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัตินี้ ผู้ใช้งานจะทำหน้าที่เทส่วนผสมต่าง ๆ ในการทำถ่านอัดแท่งลงในถังบรรจุส่วนผสมแต่ละถัง จากนั้นผู้ใช้งานทำการตั้งค่าควบคุมการไหลของส่วนผสมและตั้งค่าความยาวของแท่งถ่านได้ 3 ระดับ จากตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่าน เมื่อเครื่องทำงานผู้ใช้งานมีหน้าที่รอรับแท่งถ่านในภาชนะรองรับเพื่อนำถ่านไปตากแห้งและบรรจุขายหรือใช้งานต่อไป

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยและคณะได้มุ่งเน้นที่การออกแบบเพื่อพัฒนาการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านให้ได้เครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ดังนั้นจึงได้แบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน คือ 1) การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง 2) การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแท่งถ่าน และ 3) การทดสอบและวิเคราะห์ผล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

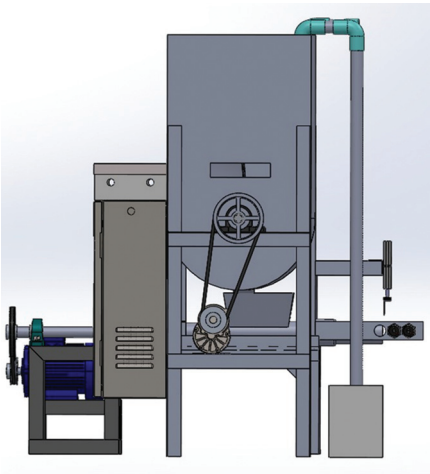
1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลเบื้องต้นก่อนการออกแบบและการจัดสร้างขึ้น เช่น การทดสอบเครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบอัดเกลียวเย็นพบว่า ที่ความเร็วเกลียวอัด 500 rpm และอัตราส่วนตัวประสานคือ ผงถ่านวัตถุดิบต่อแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำ (2:1:0.5) จะให้แท่งถ่านที่มีเนื้อประสานกันดี ไม่มีรอยแตกร้าว [4] หรือการศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากผงถ่านวัสดุชีวมวลด้วยชุดเกลียวอัดพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของเกลียวอัดจะทำให้ความหนาแน่นและความแข็งแรงของแท่งถ่านลดลง [7] หรือการออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดถ่านแท่งแบบสกรูเกลียวขนาดกว้าง 7.5 cm. ยาว 13 cm. ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/4 hp ความเร็วรอบ 1,450 rpm เมื่อทดสอบแล้วพบว่า เครื่องอัดถ่านแท่งด้วยอัตราส่วนผสมผงถ่าน 1,000 g น้ำ 800 ml แป้งมัน 60 g สามารถตัดและอัดถ่านแท่งได้ยาวขนาด 7 - 10 cm. [2] โดยมีความหนาแน่น 0.63 - 0.74 g/cm^3 จากเครื่องอัดถ่านแท่งระบบไฮดรอลิกสามารถอัดถ่านแท่งให้ [12] และ 0.907 g/cm^3 จากเครื่องอัดถ่านไม้แบบเกลียวอัดเย็นที่มีมอร์เตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง [13]

2. การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแท่งถ่าน

ผลจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ผู้วิจัยและคณะจึงทำการออกแบบเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติที่ต้องการพัฒนาขึ้นดังรูปที่ 1 ซึ่งอยู่ภายใต้แนวคิดที่ต้องการให้การทำงานของเครื่องไม่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2 เพื่อให้ผู้ที่ใช้งานสามารถบำรุงรักษาเบื้องต้นได้ มีขนาดกะทัดรัด (กว้าง 1.7 ม. ยาว 1.5 ม. สูง 1.2 ม.) เพื่อความสะดวกของการจัดวางในพื้นที่ว่างข้างบ้านได้โดยไม่ต้องต่อเติมพื้นที่จัดวาง เหมาะสมกับสรีระของคนไทยในวัยทำงาน เพื่อลดความเมื่อยล้าหรือการเจ็บปวดจากการลุก นั่ง ก้ม เงย จากการทำงานผิดท่า สะดวกต่อการใช้งาน

ด้วยการนำเอาการควบคุมอัตโนมัติเข้ามาควบคุมการทำงานของเครื่อง และอะไหล่ที่ใช้ประกอบตัวเครื่องหากชำรุดสามารถหาซื้อมาเปลี่ยนได้ตามร้านอะไหล่ทั่วไป ทั้งนี้ผู้วิจัยและคณะได้ทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังสมการที่เกี่ยวข้องโดยจากสมการที่ (1) ทำให้ได้เพลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และจากสมการที่ (2) ทำให้ได้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 3 แรงม้า



(ก) แบบเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติ

(ข) เครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติต้นแบบ

รูปที่ 1 เครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติ

ขนาดของเพลาในถังกวน [14] จากสมการที่ (1)

$$d = \sqrt[3]{(16/\pi\tau_d)\left[(C_t T)^2 + (C_m M)^2\right]^{1/2}} \tag{1}$$

เมื่อ

d	คือ	ขนาดของเพลาตัน (mm)
τ_d	คือ	ความเค้นเฉือนในการออกแบบ (N/mm^2)
T	คือ	แรงบิด $(N \cdot m)$
M	คือ	โมเมนต์ดัด $(N \cdot m)$
C_m	คือ	ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัด
C_t	คือ	ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด

แรงบิด [14] จากสมการที่ (2)

$$T = \frac{W_p}{2\pi n} \tag{2}$$

เมื่อ

W_p	คือ	กำลังงาน (W)
n	คือ	ความเร็วรอบ (rpm)

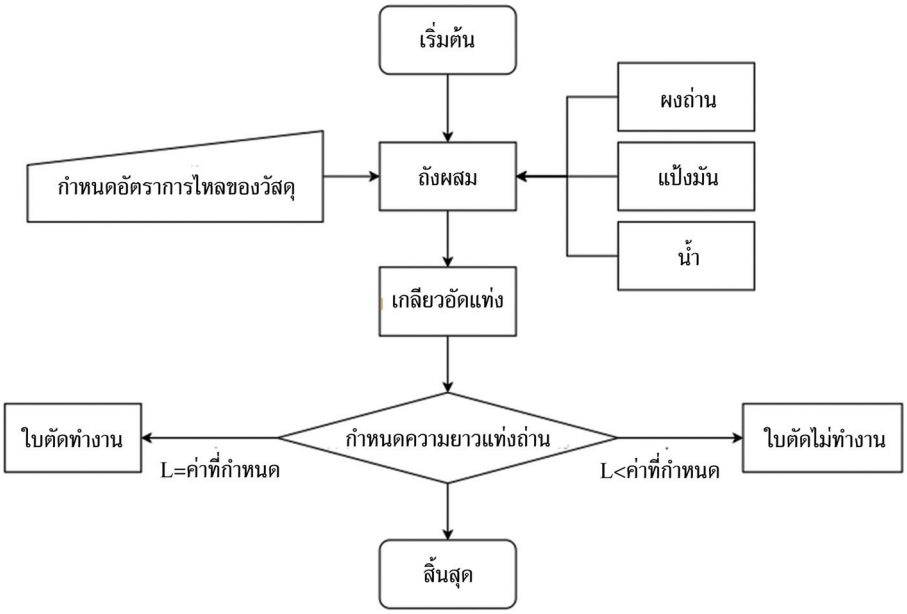
ISSN 2672-9369 (Online)

ความเร็ววิกฤตของเพลาในถังกวน [14] จากสมการที่ (3)

$$n_c = 945\left(\sum Wy / Wy^2\right)^{1/2} \tag{3}$$

เมื่อ

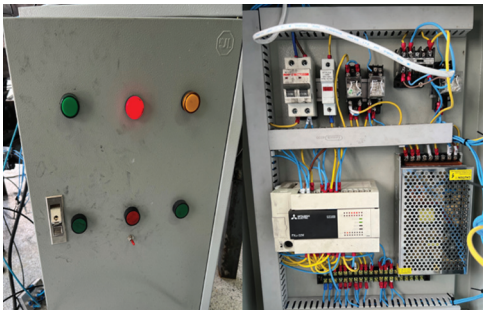
n_c คือ ความเร็ววิกฤต (*rpm*)
W คือ น้ำหนัก (*N*)
y คือ ระยะโก่ง (*mm*)



รูปที่ 2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติ

จากรูปที่ 3 แสดงถึงส่วนประกอบของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ ที่ผู้วิจัยและคณะได้สร้างขึ้นโดยเครื่องอัดแท่งถ่านฯ นี้จะมีถังบรรจุเศษถ่านหรือผงถ่าน 1 ถัง และถังบรรจุแป้งมันสำปะหลัง 1 ถัง อยู่ที่ด้านบนของเครื่องดังรูปที่ 3(ก) โดยที่ด้านล่างของถังจะมีช่องสำหรับปล่อยให้ส่วนผสมทั้ง 2 ชนิดนั้นลงไปที่ถังผสม ซึ่งที่ช่องปล่อยนี้จะสามารถปรับขนาดความกว้างของช่องเพื่อกำหนดปริมาณการไหลของส่วนผสมทั้ง 2 ชนิด ส่วนน้ำจะถูกปล่อยออกที่ท่อที่ต่อไว้ด้านในของถังกวนเช่นกันโดยที่ส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดนั้น จะสามารถควบคุมปริมาณการปล่อยลงไปในถังกวนได้ด้วยการควบคุมของโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ที่ติดตั้งอยู่ในตู้ควบคุมการทำงานบริเวณด้านข้างของเครื่องดังรูปที่ 3(ข) เมื่อส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดถูกปล่อยลงไปในถังกวนที่มีใบกวนอยู่ที่ด้านล่างของถังดังรูปที่ 3(ค) จะทำให้ที่ในการกวนส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดให้เข้ากัน นอกจากใบกวนจะทำหน้าที่กวนส่วนผสมแล้วยังทำหน้าที่ในการกวาดเอาส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดที่ผสมกันแล้วให้ออกมาที่ช่องทางออกเพื่อลงไปสู่เกลียวอัดที่จะทำหน้าที่ในการอัดส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด ให้เป็นแท่งถ่านที่ออกมาที่ช่องทางออกดังรูปที่ 3(ง) และที่ช่องทางออกนี้จะมีใบตัดแท่งถ่าน ที่จะทำหน้าที่ในการตัดถ่านที่ออกมาจากเกลียวอัด โดยการทำงานของใบตัดจะควบคุมการทำงานด้วยการตั้งค่าขนาดความยาวของแท่งถ่านจากเซนเซอร์จับวัตถุ ดังรูปที่ 3(จ) ที่สามารถปรับความยาวของแท่งถ่านได้ตามต้องการ แต่ไม่เกิน 15 เซนติเมตร ด้วยการปรับตำแหน่งของเซนเซอร์ และก้านโยกซ้ายขวาที่อยู่ที่ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องเพื่อเลือกระดับของความยาว

(ก) ถังบรรจุวัตถุดิบในการทำถ่านอัดแท่ง



(ข) ตู้ควบคุมการทำงานของ
เครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุม

(ค) ใบกวนส่วนผสม

(ง) ทางออกของส่วนผสมและเกลียวอัด

(จ) ใบตัดแท่งถ่าน

รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์

3. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

ความเร็วรอบของใบกวนผสม 3 ระดับ (62 72 และ 82 *rpm*) ทดสอบระดับละ 5 ซ้ำ

3.2 ค่าชี้ผลในการดำเนินงานวิจัย

1) ประสิทธิภาพในการทำงาน (คิดจากเวลา) ดังสมการที่ (4)

$$\eta = \{(t_{total} - t_{break}) \times 100\%\} / t_{total} \tag{4}$$

เมื่อ

η คือ ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่อง

t_{total} คือ เวลาเดินเครื่องทั้งหมด

t_{break} คือ เวลาในการหยุดเดินเครื่องจักร

2) อัตราคุณภาพงาน (คิดจากสิ่งที่ผลิต) ดังสมการที่ (5)

$$QualilyRate = (N_{total} - N_{loss}) / N_{total} \tag{5}$$

เมื่อ

N_{loss} คือ จำนวนชิ้นงานที่เสียหาย

ISSN 2672-9369 (Online)

3) ความหนาแน่นของถ่านที่อัดแท่ง จากสมการที่ (6)

$$\rho = m / v \tag{6}$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (g/cm^3)
m คือ มวลของถ่านอัดแท่ง (g)
v คือ ปริมาตรของถ่านอัดแท่ง (cm^3)

4) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า จากสมการที่ (7)

$$Ratio_{energy} = kW \times hr \tag{7}$$

เมื่อ

$Ratio_{energy}$ คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า
kW คือ กำลังไฟฟ้า
hr คือ เวลาที่ใช้

3.3 **วิธีการทดสอบ**

1) ตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่อง ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน

2) ตั้งค่าการปล่อยส่วนผสม (น้ำ เศษถ่าน แป้งมัน) ที่ต้องการจากตู้ควบคุมการทำงาน โดยการทดสอบนี้อ้างอิงที่อัตราส่วนผสมผงถ่านต่อแป้งมันต่อน้ำ (2:1:0.5) [4]

3) ตั้งค่าความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมที่ต้องการ (3 ระดับ 62 72 และ 82 *rpm*) จากตู้ควบคุมการทำงาน โดยการทดสอบนี้กำหนดค่าความเร็วของเกลียวอัดคงที่ที่ 1,260 *rpm*

4) ตั้งค่าความยาวของแท่งถ่านที่ต้องการจากตู้ควบคุมการทำงาน

5) เทส่วนผสม (เศษถ่าน แป้งมัน) ลงในถังเตรียมส่วนผสม และต่อระบบน้ำเข้ากับเครื่อง

6) กดปุ่มเริ่มใช้งานของเครื่อง เพื่อเริ่มการทดสอบ

7) บันทึกเวลา และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติต้นแบบ

8) คัดแยกถ่านเต็มก้อนและไม่เต็มก้อน เพื่อบันทึกจำนวนถ่านที่ผลิตได้ทั้งหมดต่อการทดสอบ

9) สุ่มแท่งถ่านที่ได้จากการทดสอบจากความเร็วรอบของเกลียวผสมระดับที่ให้แท่งถ่านที่สมบูรณ์มากที่สุด จำนวน 2 ชุด ชุดละ 5 ตัวอย่าง ไปทดสอบค่าทนแรงกดของแท่งถ่านตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XT Plus, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA) ที่ระดับความคลาดเคลื่อน ±5% เพื่อหาค่าของแรงสูงสุดที่แท่งถ่านตัวอย่างจะรับได้ในแนวนอน

10) สุ่มแท่งถ่านที่ได้จากการทดสอบจากความเร็วรอบของใบกวนผสมระดับที่ให้แท่งถ่านที่สมบูรณ์มากที่สุด จำนวน 5 ตัวอย่าง ไปชั่งน้ำหนักของถ่านตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้นนำไปแทนที่ในสารละลายเฮกเซนที่เตรียมไว้ แล้วอ่านค่าปริมาตรที่เปลี่ยนไปของสารละลาย เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่น

11) วิเคราะห์ผล เพื่อหาความสามารถและประสิทธิภาพในการทำงาน และกำลังการผลิตของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติ

3.4 **การวิเคราะห์ระยะเวลาในการคืนทุน**

เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบอย่างง่าย โดยไม่คิดการเปลี่ยนมูลค่าเงินตามเวลา ซึ่งวิเคราะห์จากสมการที่ (8)

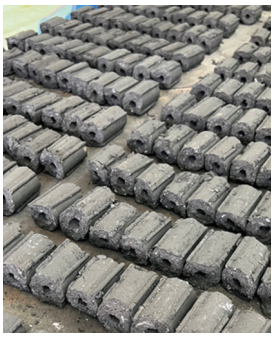
$$PBP = \frac{P}{R} \tag{8}$$

เมื่อ

PBP	คือ	ระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่องจักร (ปี)
P	คือ	ราคาแรกซื้อของเครื่องจักร (บาท)
R	คือ	กำไรสุทธิเฉลี่ย(บาท)

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

ผลจากการทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์นั้นสามารถอัดถ่านให้เป็นแท่งได้ดังรูปที่ 4(ก) โดยเศษถ่าน แป้ง และน้ำที่ผ่านกระบวนการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์จนสามารถออกมาเป็นแท่งถ่านอีกครั้งนั้นจะมีทั้งแท่งถ่านที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 4(ข) ซึ่งแท่งถ่านที่สมบูรณ์ในความหมายของผู้วิจัย คือ แท่งถ่านที่ไม่มีการแตกหักหรือแหว่ง มีขนาดความยาวของแท่งตามที่กำหนดไว้ และแท่งถ่านที่ไม่สมบูรณ์ดังรูปที่ 4(ค) ซึ่งแท่งถ่านที่ไม่สมบูรณ์ในความหมายของผู้วิจัย คือ แท่งถ่านที่อาจจะมีการแตกหักหรือแหว่ง มีขนาดความยาวของแท่งสั้นกว่าที่กำหนดไว้



(ก) ตัวอย่างแท่งถ่าน

(ข) ตัวอย่างแท่งถ่านที่สมบูรณ์

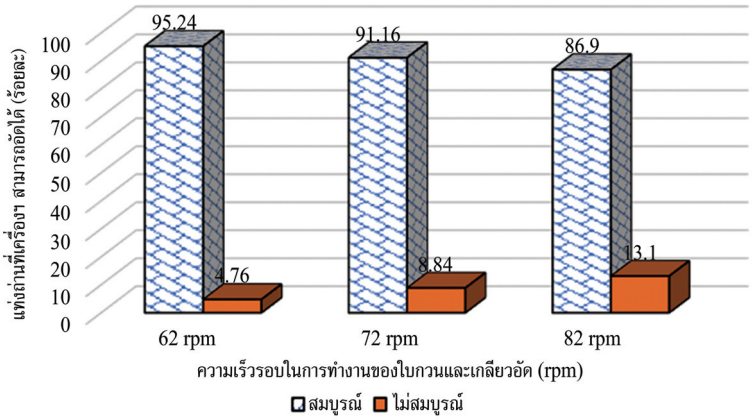
(ค) ตัวอย่างแท่งถ่านที่ไม่สมบูรณ์

รูปที่ 4 ถ่านจากเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์

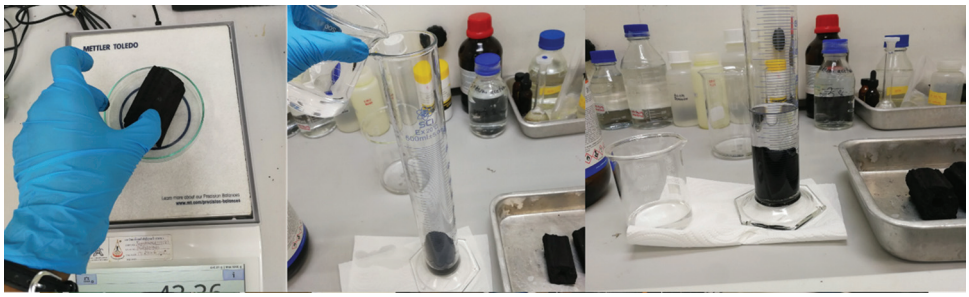
โดยรูปที่ 5 แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ เมื่อทำการบรรจุผงถ่านและแป้งมันอย่างละ 1 ถัง ต่อ 1 ความเร็วรอบของใบกวนผสมถ่าน 1 ระดับ ต่อ 1 การทดสอบ ซึ่งทำการทดสอบที่ความเร็วรอบของใบกวนผสม 3 ระดับ ระดับละ 5 ซ้ำ พบว่า ที่ความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 1

ISSN 2672-9369 (Online)

(ร้อยละ 95.24, 140 แท่ง) สามารถทำการอัดถ่านได้แท่งถ่านที่สมบูรณ์มากกว่าความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 2 (ร้อยละ 91.16, 134 แท่ง) และ 3 (ร้อยละ 86.90, 126 แท่ง) ตามลำดับ และที่ความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 1 (ร้อยละ 4.76, 7 แท่ง) สามารถทำการอัดถ่านได้แท่งถ่านที่ไม่สมบูรณ์น้อยกว่าความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 2 (ร้อยละ 8.84, 13 แท่ง) และ 3 (ร้อยละ 13.10, 19 แท่ง) ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยดังกล่าวมาจากการบรรจุผงถ่าน 1 ถัง และมีอัตราคุณภาพงาน (คิดจากสิ่งที่ผลิต) พบว่า ที่ความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 1 (ร้อยละ 95) มีอัตราคุณภาพงานสูงกว่าที่ความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 2 (ร้อยละ 91) และ 3 (ร้อยละ 87) ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ความเร็วรอบของใบกวนผสมระดับที่ 1 ให้แท่งถ่านที่สมบูรณ์มากกว่าที่ความเร็วรอบของใบกวนผสมระดับที่ 2 และ 3 นั้น เพราะความเร็วของใบกวนผสมในระดับที่ 1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบที่ต่ำกว่าในระดับที่ 2 และ 3 จึงมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่น้อยกว่าในระดับที่ 2 และ 3 จึงทำให้วัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมสามารถล่วงลงมาคลุกเคล้ากันได้มากกว่าเพราะว่าเมื่อใบกวนผสมหมุนผลักดันครีบของใบกวนผสมให้กวาดวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมที่อยู่รอบ ๆ ทำให้เกิดการไหลในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเป็นผลให้มีการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมจากจุดศูนย์กลางของใบกวนผสมออกไปสู่แนวเส้นรอบวงทุกทิศทาง โดยเป็นไปตามหลักการทางชลศาสตร์ที่เมื่อของไหลถูกหมุนให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ความกดดันของของไหลจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออยู่ห่างจุดศูนย์กลางของใบพัดมากขึ้น [15] และด้วยความเร็วรอบของใบกวนผสมในระดับที่ 2 และ 3 ที่สูงกว่าในระดับที่ 1 จึงทำให้มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากกว่าทำให้วัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมยังมีการแยกชั้นระหว่างผงถ่านกับแป้งมัน ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการอัดแท่งจึงได้แท่งที่ไม่สมบูรณ์มากกว่า

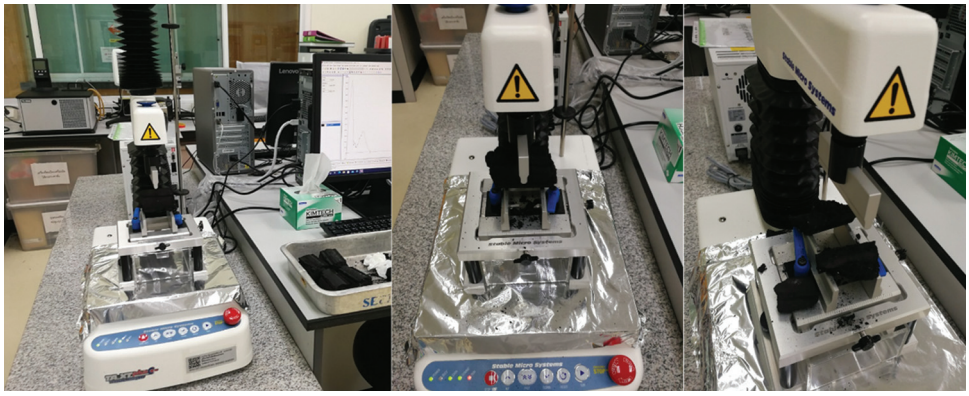


รูปที่ 5 ความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์



(ก) การทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของแท่งถ่าน

รูปที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของถ่านที่ได้จากการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์



(ข) การทดสอบความแข็งของแท่งถ่าน

รูปที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของถ่านที่ได้จากการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ (ต่อ)

จากอัตราคุณภาพงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์นี้พบว่า ที่ความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 1 (62 *rpm*) เป็นระดับของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น เพราะสามารถอัดแท่งถ่านให้มีความสมบูรณ์และมีอัตราคุณภาพงานสูงที่สุด คือ ร้อยละ 95 และมีประสิทธิภาพในการทำงาน (คิดจากเวลา) คือ ร้อยละ 87 จากนั้นผู้วิจัยได้นำถ่านที่ได้จากการอัดแท่งของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ที่ความเร็วรอบในการทำงานของใบกวนผสมระดับที่ 1 (62 *rpm*) นั้นไปทดสอบคุณสมบัติทางกลของแท่งถ่านที่ได้เพื่อหาความหนาแน่นและค่าความแข็งดังรูปที่ 6 พบว่ามีความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งถ่านที่ 1.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่ได้จากเครื่องอัดถ่านแบบสกรูเกลียว เนื่องจากมีส่วนผสมของแป้งมันที่มากกว่า โดยสอดคล้องกับรายงานวิจัยในปี 2554 ที่กล่าวว่า เมื่อมีปริมาณของแป้งที่ผสมมากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นและความแข็งแรงของถ่านอัดแท่งเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน [16] ซึ่งจากความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะส่งผลให้แท่งถ่านมีระยะเวลาในการเผาไหม้มากขึ้น ดังรายงานการวิจัยของ [13] และแท่งถ่านที่ได้จากกระบวนการอัดของเครื่องมีความสามารถในการทนแรงกดอัดเฉลี่ยที่ 204.86 นิวตัน ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของแท่งถ่านที่จะไม่เกิดการแตกร่วนเนื่องจากการรับน้ำหนักไม่เกิดค่าการทนต่อแรงกดอัดนี้หากมีการบรรจุใส่ถุงเพื่อการขนส่งไปจำหน่าย

โดยเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้นนั้น มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ 2.55 วัตต์ต่อชั่วโมง หรือเป็นเงิน 8.28 บาทต่อชั่วโมง และสามารถคำนวณหาจุดคุ้มทุนของเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ โดยเริ่มจากการกำหนดราคาขายต่อหน่วยของเครื่องต้นแบบซึ่งผู้วิจัยคำนวณจากราคารวมของค่าวัสดุ อุปกรณ์สิ้นเปลือง และค่าแรงงานในการประกอบเครื่อง ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้สามารถขายได้ในราคาเริ่มต้นที่ 55,566.5 บาทต่อเครื่อง ซึ่งเกษตรกรที่ใช้เครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ทำงานแทนแรงงานคนเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน ผลิตถ่านอัดแท่งสมบูรณ์ได้ 12,720 แท่งต่อวัน (เท่ากับมีกำลังการผลิตที่ 1,590 แท่งต่อชั่วโมง) หรือ 595.454 kg ต่อวัน (เท่ากับ 74.43 kg ต่อวัน) โดยราคาขายถ่าน 10 บาทต่อกิโลกรัม เพราะฉะนั้นเกษตรกรจะสามารถคืนทุนได้ในเวลา 16 วัน

ISSN 2672-9369 (Online)

สรุปผล

ผลจากการออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์ตัวเครื่องมีขนาดกว้าง 1.7 ม. ยาว 1.5 ม. สูง 1.2 ม. มีถังสำหรับบรรจุผงถ่าน แป้งมัน และท่อจ่ายน้ำที่อยู่ด้านบนของถังผสมส่วนผสมที่ต่อกับชุดเกลียวอัดแท่งที่ด้านข้างของตัวเครื่อง และมีตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องที่สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ และกำหนดความยาวของแท่งถ่านได้ ผลจากการทดสอบพบว่า ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติของเครื่องสามารถควบคุมการทำงานให้เริ่มและหยุดการทำงานได้ตรงตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้งานกำหนด มีอัตราคุณภาพงานสูงสุดที่ร้อยละ 95 มีประสิทธิภาพในการทำงาน (คิดจากเวลา) ร้อยละ 87 มีความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งถ่านที่ 1.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าทนแรงกดของแท่งถ่านเฉลี่ยที่ 204.86 นิวตัน มีกำลังการผลิตที่ 1,590 แท่งต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ 2.55 วัตต์ต่อชั่วโมง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยและคณะขอขอบคุณ นักศึกษา เจ้าหน้าที่ และอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำและจัดหาข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก งบประมาณกองทุนสนับสนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 สัญญาเลขที่ RMUTI/RF/10

References

[1] Dictionary, Royal Institute Edition 2011. (2011). **Charcoal**. Access (22 October 2022). Available (https://dictionary.orst.go.th/)

[2] Nachampa, U., SengPrakhon, J., NuanSai, W., and Cherdsuk, S. (2020). **Charcoal Briquette Machine**. Bachelor's degree Department of Physics, Faculty of Education, Buriram Rajabhat University

[3] Bhattacharya, S. C. and Shreatha, R. M. (1990). **Biocoal Technology and Economics**. RERIC. Bangkok: Asian Institute of Technology

[4] Yuman, P. (2016). Development of a Cold Production Biomass Charcoal Briquette Machine to use Waste from Coffee Bean Processing. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 34-48 (in Thai)

[5] Khosri, U. (2011). **Charcoal Briquettes**. Technology Clinic, Rajamangala University of Technology Isan Sakon Nakhon Campus. Access (4 May 2011). Available (http://www.clinictech.ops.go.th/online/pages/techlist_display.asp?tid=384)

[6] Chin, O. C. and Siddiqui, K. M. (2000). Characteristics of Some Biomass Briquettes Prepared Under Modest Die Pressures. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 18, Issue 3, pp. 223-228. DOI: 10.1016/S0961-9534(99)00084-7

[7] Laloon, K., Sudajan, S., and Jansiri, C. (2012). Effects of Charcoal Type and Screw Pressing Speed on the Performance of Screw Press Unit and Quality of Charcoal Block. In **Proceeding of the 22nd TSAE National Conference (TSAE 2021)**. Chiang Mai. pp. 284-290

[8] Department of Industrial Works. (2012). **Guidelines and Qualification of Wastes for Processing Into Fuel Ingots and Interlocking Blocks**. Bangkok

[9] The National Energy Policy Council. (2000). Fuel of The Future. **NEPO Journal**. No. 50, pp. 13-20

[10] Poonkasemm, T. (1999). **A Study of Fuel Briquettes from Durian Peel Substitute for Firewood and Charcoal in Household Used**. Graduate School Mahidol University

[11] Omron Electronics Co., Ltd., (2009). **Implementation PLC Level 1**. Bangkok

[12] Hitawattanakul, C. and Yoksila, P. (2013). **Development of a Hydraulic Briquette Press from Coconut Shells and Corn Cobs**. B. Eng. Chemical Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[13] Dangphonthong, D., Pinate, W., and Rucha, A. (2016). A Comparison of the Heating Value and Density of Charcoal Briquettes Manufactured by Electric Motor and Bicycle-Powered Compressors. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 1-13

[14] Ungphakorn, V. and Tanadngan, C. (1998). **Machine Design 1**. Bangkok: Se-ed ucation

[15] Boonyatharokul, W. (1986). **Pumps and Pumping Systems**. Bangkok: Kasetsart University

[16] Lalun, K. (2011). **Study and Development of Charcoal Briquette Machine from Cassava Rhizomes**. Master of Engineering Thesis (Agricultural and Food Engineering). Graduate School Khon Kaen University

ISSN 2672-9369 (Online)

การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านบนหลังคาอาคารศูนย์กีฬากาญจนาภิเษกรัชกาลที่ 9 มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Performance and Economics Evaluation of Bifacial Solar Panel Installation on the Roof of Kanchanaphisek King Rama 9th Sports Center Building, Maejo University

นเรนทร์ฤทธิ์ กันทะ[1] สุลักษณา มงคล[1] และสราวุธ พลวงษ์ศรี[1*]

Narenrit Kantha[1] Sulaksana Mongkon[1] and Sarawut Polvongsri[1*]

Received: *November 26, 2022;* ***Revised:*** *March 27, 2023;* ***Accepted:*** *March 28, 2023*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์กรณีเมื่อนำไปติดตั้งบนหลังคาของอาคารตัวอย่าง โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบผลึกเดี่ยว ชนิด Half Cut Cell มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 430 W ต่อแผง ในการทดสอบทำการติดตั้งบนพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว และทำการปรับความสูงของแผงจากพื้นราบที่ระดับ 0.50 1.00 และ 1.50 m และปรับมุมในการติดตั้ง 15 18 และ 21 ^{o} ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ที่ความสูงของแผง 1.50 m และมุมเอียง 15 ^{o} แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 424.88 W มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 21.82 % และสามารถหาสมการสหสัมพันธ์ทำนายกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จากการทดลอง เมื่อใช้สมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งปี กรณีนำระบบไปติดตั้งบนหลังคาโซนเอของอาคารศูนย์กีฬากาญจนาภิเษกรัชกาลที่ 9 มหาวิทยาลัยแม่โจ้พบว่า สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ได้จำนวน 124 แผง และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 130,479.36 kWh/year มีเฉลี่ยของสมรรถนะของระบบ (Performance Ratio) เท่ากับ 1.15 โดยใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 1,890,699.50 บาท มีระยะคืนทุน 3.95 ปี คิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

[1] *วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่*

[1] *School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 1162 5645, E - mail: sarawut-energy@hotmail.com*

(Net Present Value) เท่ากับ 1,601,144.48 บาท และมีค่าอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return) เท่ากับ 16.26 %

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน; ความสูงของแผง; มุมเอียง; สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์; ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

Abstract

The research aimed to investigate the performance and economics of using bifacial PV modules on a model building's roof. The bifacial PV modules used in the study were monocrystalline, half-cut cell type, with a power rating of 430 W per panel. The study was conducted on a white painted concrete surface, and the panel's height was adjusted to 0.50, 1.00, and 1.50 m, while the installation angle was adjusted to 15, 18, and 21°, respectively. The study found that at a panel height of 1.50 m and an installation angle of 15°, a bifacial PV module produced a maximum power of 424.88 W with a power generation efficiency of 21.82 %. Additionally, the study derived a predictive power correlation equation to forecast the electric power production throughout the year based on experimental data. The study further investigated the case of installing 124 bifacial PV panels on the roof of Zone A of Kanchanaphisek King Rama 9th Sports Center Building Center, Maejo University, using the correlation equation to predict the electricity production. The system was found to produce 130,479.36 kWh/year of electricity with an average system performance (performance ratio) of 1.15. The total investment required for the installation was 1,890,699.50 baht, and the payback period was 3.95 years, with a net present value of 1,601,144.48 baht and an internal rate of return of 16.26 %.

Keywords: Bifacial Solar Panel; Height of Solar Panel; Tilt Angle; Performance Ratio; Economics Value

บทนำ

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อลดข้อจำกัดต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นเก่าทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าต่อแผงสูงมากยิ่งขึ้นในขณะที่ราคาถูกลง รวมถึงอุปกรณ์ประกอบของระบบต่าง ๆ ที่ปัจจุบันมีให้เลือกมากมายแตกต่างกันไป โดยส่วนใหญ่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อยู่เป็นแบบรับแสงด้านหน้าเพียงด้านเดียว นำมาติดตั้งในพื้นที่แตกต่างกันไป ตั้งแต่ผลิตใช้เองในบ้านอยู่อาศัย ติดตั้งบนหลังคา รวมถึงการผลิตในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่เรียกว่า โซล่าร์ฟาร์ม (Solar Farm) หรือนำไปติดตั้งลอยบนพื้นผิวน้ำที่เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบลอยน้ำ (Solar Floating) ซึ่งนอกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่รับแสงด้านเดียวแล้วปัจจุบันได้มีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นอกจากจะผลิตไฟฟ้าได้จากด้านหน้าแล้ว ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังอาศัยการสะท้อนแสงของพื้นผิวเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ โดยมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Bifacial PV เช่น ระดับความสูงของแผง มุมเอียงแผง สถานที่ติดตั้ง ค่าอัตราส่วนสะท้อน (Albedo) ซึ่งคำนวณได้จาก [1] อัตราส่วนระหว่างรังสี

ISSN 2672-9369 (Online)

ดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงมากับรังสีสะท้อนกลับออกไป เป็นต้น โดยในต่างประเทศได้มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น [2] ได้ศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์และทดสอบในพื้นที่โล่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้า (Y_B) โดยนำไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าของแผง Monofacial (Y_M) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ $(Y_B - Y_M)/Y_M$ โดยสมการแบบจำลองนี้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวเลือกในการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่เกี่ยวข้องได้ ได้แก่ ค่า Albedo ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ระดับความสูง มุมเอียงของแผง และค่าการฉายรังสีกระจาย ซึ่งจะถูกนำไปใช้กำหนดวิธีการติดตั้งที่เหมาะสม สำหรับขนาดที่ต้องการ จากการศึกษาพบว่า ค่า Albedo เท่ากับ 0.50 ระดับความสูง 1.50 m การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ให้ผลผลิตทางพลังงานเท่ากับ 33.85 % ที่มุมเอียงของแผง 25° [3] ได้ศึกษาการผลิตพลังงานด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) โดยศึกษาในประเทศ Norway และ Egypt ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) 60 เซลล์ต่อแผง ติดตั้งหันไปทางทิศใต้ ระดับความสูงตั้งแต่ 0.00 0.05 1.00 1.50 และ 2.00 m ปรับมุมเอียงและใช้ค่า Albedo ที่ 0.20 0.35 และ 0.50 จากการศึกษาพบว่าความสูงที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ที่สามารถให้พลังงานสูงสุดคือตั้งแต่ 1.00 m ขึ้นไป สำหรับค่า Albedo ที่ให้พลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.50 ในขณะที่มุมเอียงในการติดตั้งแผงที่เหมาะสมในภูมิประเทศ Norway คือ 54° ที่ค่า Albedo 0.20 และ 56° ที่ค่า Albedo 0.50 และในภูมิประเทศ Egypt คือ 31° ที่ค่า Albedo 0.20 และ 32° ที่ค่า Albedo 0.50 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า มุมเอียงของแผง ระดับความสูง และค่า Albedo มากกว่า 0.50 ที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial สามารถให้ผลผลิตทางพลังงานมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Monofacial ถึง 30 % ซึ่งจากบทความจะสังเกตเห็นได้ว่า ในแต่ละประเทศจะมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันไปส่งผลให้ ไม่ว่าจะเป็นมุมในการติดตั้ง ทิศทาง ก็จะแตกต่างกันไปตามภูมิประเทศนั้น ๆ [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ทดสอบที่ภาคตะวันตกของซาอุดิอาระเบีย โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ขนาด 245 W นำไปเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทั่วไป (Monofacial) ขนาด 240 W ในการทดสอบหันหน้าแผงไปทางทิศใต้ ระดับความสูงจากพื้นผิว 20 cm พื้นผิวเป็นกรวดสีเทาที่มุมเอียง 25° และ 45° จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial มีค่าเพิ่มขึ้น 10 % ที่มุมเอียง 25° และ 15 % ที่มุมเอียง 45° เมื่อเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์แบบทั่วไป (Monofacial) [5] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) โดยใช้สมการสหสัมพันธ์ ซึ่งมีตัวแปรคือ ความสูง (E) มุมอาซิมุธ (ψ) และมุมเอียง (β) ในการวิเคราะห์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Bifacial Gain แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นดินทั่วโลกนั้นรับแสงได้น้อยกว่า 10 % ที่ค่า Albedo 0.25 แต่หากเพิ่มค่า Albedo เป็น 0.50 และยกระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น 1.00 m จากพื้นสามารถรับแสงเพิ่มขึ้นถึง 30 % และสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ที่ติดตั้งบนพื้นดินในแนวตั้ง การติดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันออก - ตะวันตก จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าหันหน้าไปทางทิศใต้และทิศเหนือ สำหรับมุมเอียงที่เหมาะสมของพื้นที่ที่ต่ำกว่า Latitude 30° อยู่ที่ 15 % จากเส้น Latitude โดยค่า Albedo ที่เหมาะสม คือ 0.50 ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางพื้นฐานสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ทั่วโลก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยในการติดตั้ง เช่น พื้นผิวสะท้อน ความสูงของแผง ค่าอัตราส่วนสะท้อน (Albedo) มุมในการติดตั้ง ที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งละติจูดและสถานที่ตั้งล้วนมีผลต่อสมรรถนะของแผงในการผลิตไฟฟ้า ในประเทศไทยนั้น การศึกษาปัจจัยดังกล่าวยังมีค่อนข้างน้อย ทำให้ข้อมูลที่จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมาใช้งานจริงยังมีข้อมูลไม่เพียงพอรวมทั้งข้อมูลความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองและประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการนำแผง Bifacial PV ไปติดตั้งด้านบนหลังคาของอาคารในพื้นที่ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) และสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยในการทดสอบใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ชนิด Monocrystalline Silicon แบบ Haft Cut Cell ยี่ห้อ LONGi พิกัดกำลังไฟฟ้า 430 W ขนาด 2.094 x 1.038 x 0.035 m น้ำหนักแผง 27.5 kg ติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กแบบปรับระดับได้ ดังรูปที่ 1 บนพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว โดยความสูงของขอบแผงด้านล่างสูงจากพื้นผิว 0.50 1.00 และ 1.50 m มุมเอียงในการติดตั้งอยู่ที่ 15 18 และ 21° ตามลำดับ โดยทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม - กุมภาพันธ์ 2565 เวลา 09.00 - 16.00 น. ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ($18^{o}55'30''N \quad 99^{o}01'28''E$) ตำบลป่าไผ่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ โดยเริ่มต้นความสูงจากพื้นผิว 0.50 m ที่มุม 15° และเปลี่ยนเป็นมุม 18° และ 21° ทำการเปลี่ยนระดับความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงด้านล่างเป็น 1.00 และ 1.50 m

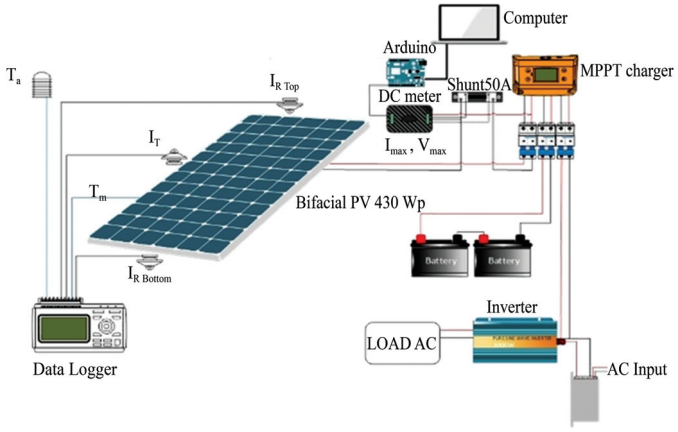
(ก) การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านหน้า (ข) การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านหลัง

รูปที่ 1 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV)

จากรูปที่ 2 แสดงจุดติดตั้งเพื่อเก็บค่าตัวแปรที่เก็บข้อมูล ได้แก่ ค่ารังสีอาทิตย์ อัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิว อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง ซึ่งการวัดค่ารังสีอาทิตย์ และรังสีสะท้อนของพื้นผิวใช้เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์รวม ยี่ห้อ Apogee จำนวน 3 ตัว ในการตรวจวัด โดยตัวที่ 1 ติดตั้งบริเวณตรงกลางด้านข้างแผงขนานในระนาบเดียวกับองศาของแผง เพื่อตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) ตัวที่ 2 ติดด้านหลังแผงบริเวณด้านล่างกึ่งกลางแผง ($I_{R\ Bottom}$) และตัวที่ 3 ติดตั้งด้านหลังแผงบริเวณด้านบนกึ่งกลางแผง ($I_{R\ Top}$) เพื่อตรวจวัดค่ารังสีสะท้อนของพื้นผิว พร้อมทั้งตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิแผง (T_m) โดยใช้สาย Thermocouple Type k ติดบริเวณด้านหลังตรงกลางแผงในส่วนที่ไม่มีเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิแผง ผ่าน Data Logger ยี่ห้อ Graphtech

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้แผงวงจร Arduido รุ่น D1 ร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าตรง รุ่น Pzem-017 RS485 ทำการตรวจวัด กระแสไฟฟ้า (I_{max}) และแรงดันไฟฟ้า (V_{max}) ส่งผ่านข้อมูลการตรวจวัดไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งการใช้โหลดจะเชื่อมต่อระบบ MPPT Charger ยี่ห้อ SUOER ขนาด 30A และใช้ Inverter ยี่ห้อ SUOER ขนาด 1,000 W โดย Inverter เชื่อมต่อกับระบบ Switching Power Supply ที่ใช้ในการแปลงกระแสไฟฟ้า AC เป็น DC เพื่อให้สามารถใช้โหลดคงที่ได้ต่อเนื่อง กรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการใช้โหลด และมีระบบแบตเตอรี่แบบ Deep Cycle ชนิดน้ำ ขนาด 123 A 12 V ขนานกันจำนวน 2 ลูก เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งโหลดที่ใช้งานเป็นปั๊มน้ำ AC พิกัดกำลัง 0.5 HP (370 Wp) และพัดลมตั้งพื้น 22 นิ้ว ขนาด 550 mm พิกัดกำลัง 195 W การต่ออุปกรณ์ตรวจวัดและระบบการใช้งานโหลด

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 2 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการเชื่อมต่อระบบโหลด

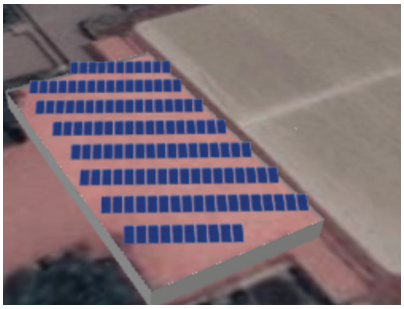
เมื่อทำการทดสอบแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) จากสมการที่ (1) และทำการสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

$$\eta_{bPV} = \frac{P_{max,bPV}}{A_{bPV} I_T} \tag{1}$$

เมื่อ

$P_{max,bPV}$ = กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (W)
A_{bPV} = พื้นที่รับแสง (m^2)
I_T = ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2)

ส่วนที่ 2 เป็นการใช้สมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากส่วนที่ 1 มาใช้ในการทำแบบจำลองกรณีนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ไปติดตั้งบนหลังคาอาคารศูนย์กีฬากาญจนาภิเษกรัชกาลที่ 9 โซน A มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พื้นที่หลังคาทั้งสิ้น 534 m^2 โดยทาพื้นด้วยสีขาว และใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ขนาด 430 W/panel ติดตั้งด้วยระยะห่างระหว่างแถว 2 m [6] สามารถติดตั้งได้ทั้งสิ้น 124 แผง รวมทั้งสิ้น 53,320 W (53.32 kW) ตามรูปที่ 3 และใช้สมการที่ (2) - (4) เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบ [7] และทำการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปี รวมทั้งการหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (PB) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และผลตอบแทนภายใน (IRR) ตามสมการที่ (5) - (7)



รูปที่ 3 การจำลองการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) บนหลังคาอาคารศูนย์กีฬากาญจนาภิเษกรัชกาลที่ 9 โซน A มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สมรรถนะของระบบ (Performance Ratio: PR) (สมการที่ (2))

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100 \tag{2}$$

เมื่อ

Y_F คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Final Yield (kWh)

Y_R คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางทฤษฎี Reference Yield (kWh)

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield) (สมการที่ (3))

$$Y_F = \frac{E_{Ac}}{P_O} \tag{3}$$

เมื่อ

Y_F คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh)

E_{AC} คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกใช้โดยทางภาระโหลด (kWh)

P_O คือ กำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Reference Yield) (สมการที่ (4))

$$Y_R = \frac{H_i}{G_{STC}} \tag{4}$$

เมื่อ

Y_R คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh)

H_i คือ พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m^2)

G_{STC} คือ ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ STC = 1 kW/m^2

และคำนวณค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ (สมการที่ (5))

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{เงินลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิรายปี}} \tag{5}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

$$NPV = \sum_{n=1}^{N} \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \tag{6}$$

โดยที่

R_n = รายรับในปีที่ n (Baht)

C_n = รายจ่ายในปีที่ n (Baht)

TIC = ค่าลงทุนในปีปัจจุบันหรือต้นทุนเริ่มแรก (Baht)

ISSN 2672-9369 (Online)

i = อัตราดอกเบี้ย (หรืออัตราส่วนลด) (%)

n = ปีของอายุโครงการ (y)

N = อายุของโครงการ (y)

อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คืออัตราผลตอบแทนการลงทุนซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount Rate) ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{R_n - C_n}{(1+IRR)^n} - TIC = 0 \tag{7}$$

ผลการทดลอง

จากตารางที่ 1 แสดงค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิแผงที่ติดตั้งบนพื้นคอนกรีตสีขาว (Albedo = 0.53) [8] มุมเอียงติดตั้ง 15 18 และ 21° หันหน้าไปทางทิศใต้ที่มีความสูงแตกต่างกันคือ 0.50 1.00 และ 1.50 m ซึ่งทั้ง 3 การทดสอบทั้งค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิแผง (T_m) มีค่าใกล้เคียงกัน ค่ารังสีอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 723.79 - 831.05 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 26.97 - 29.1 °C และอุณหภูมิแผงมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 47.00 - 50.35 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้นตาม และอุณหภูมิแวดล้อมก็มีผลต่ออุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 1 ค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า อุณหภูมิแผง อุณหภูมิแวดล้อม

มุมเอียง	ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m			ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m			ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m		
	I_T (W/m²)	T_a (°C)	T_m (°C)	I_T (W/m²)	T_a (°C)	T_m (°C)	I_T (W/m²)	T_a (°C)	T_m (°C)
15°	723.79	29.15	48.74	767.20	28.49	48.17	761.78	29.74	47.00
18°	757.57	28.74	47.68	772.48	26.97	47.51	785.18	28.47	48.08
21°	794.40	28.97	49.08	810.61	28.20	48.79	831.05	28.42	50.35

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่ารังสีสะท้อน (I_R) และค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ($P_{max,bPV}$) เมื่อความสูงเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ความสูง 0.50 m มีค่ารังสีสะท้อนต่ำกว่าค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า (I_T) โดยมุม 15° มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 388.28 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 329.16 W มุม 18° ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 383.74 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 327.10 W มุม 21° ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 387.71 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 335.20 W ความสูง 1.00 m โดยมุม 15° มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 452.39 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 354.00 W มุม 18° ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 424.89 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 350.11 W มุม 21° ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 438.59 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 354.00 W ความสูง 1.50 m โดยมุม 15° มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 498.65 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 361.29 W มุม 18° ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 488.02 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 365.19 W มุม 21° ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 492.00 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 376.92 W ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วความสูงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ารังสีสะท้อน I_R สูงขึ้นตาม และทำให้ผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากมีรังสีตกระทบพื้นผิวคอนกรีตสีขาวใต้แผง สะท้อนเข้าบริเวณด้านหลังแผงได้มากขึ้นทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับ

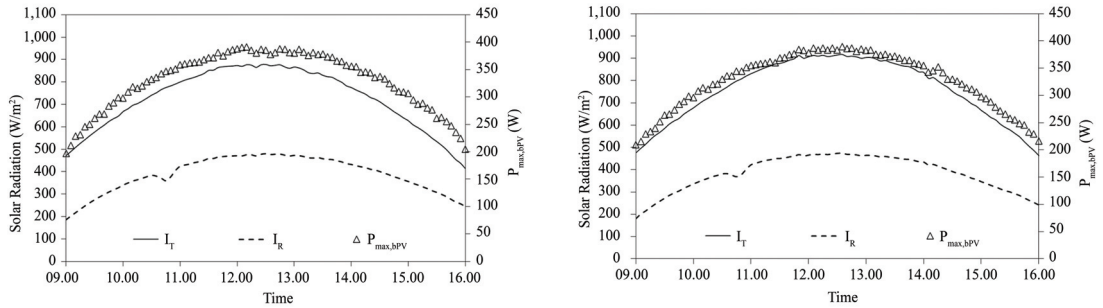
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดเงาภายใต้แผงทำให้อัตราการสะท้อนแสงลดลง ซึ่งส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าด้วย ทำให้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และที่มุม 21° มีค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) ค่ารังสีสะท้อน (I_R) และค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ($P_{max,bPV}$) สูง แต่เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนแล้วน้อยกว่ามุม 15° แสดงให้เห็นว่าที่มุม 15° สามารถสะท้อนค่ารังสีเข้าด้านหลังได้มากกว่า ซึ่งเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าตามสมการที่ (1) ที่มุม 15° ความสูง 1.50 m ได้ประสิทธิภาพที่ 21.40 % รองลงมาเป็นที่ความสูง 1.00 และ 0.50 m โดยมีค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่ 20.85 และ 19.86 %

ตารางที่ 2 ค่ารังสีสะท้อนและกำลังไฟฟ้า

มุมเอียง	ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m		ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m		ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m	
	I_R (W/m²)	$P_{max,bPV}$ (W)	I_R (W/m²)	$P_{max,bPV}$ (W)	I_R (W/m²)	$P_{max,bPV}$ (W)
15°	388.28	329.16	452.39	354.00	498.65	361.29
18°	383.74	327.10	424.89	350.11	488.02	365.19
21°	387.71	335.20	438.59	354.00	492.00	376.92

จากรูปที่ 4 กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 0.50 m ที่มุมเอียง 15 ° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 197.14 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 30.20 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 391.18 W ในช่วงเวลา 12.10 น. ที่อุณหภูมิแผง 52.60 °C มุมเอียง 18° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 209.55 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 29.60 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 389.80 W ในช่วงเวลา 12.35 น. ที่อุณหภูมิแผง 51.70 °C มุมเอียง 21° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 213.30 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 30.30 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 394.57 Wp ในช่วงเวลา 12.45 น. ที่อุณหภูมิแผง 54.80 °C โดยอุณหภูมิของแผง ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ระหว่าง 51 - 54 °C

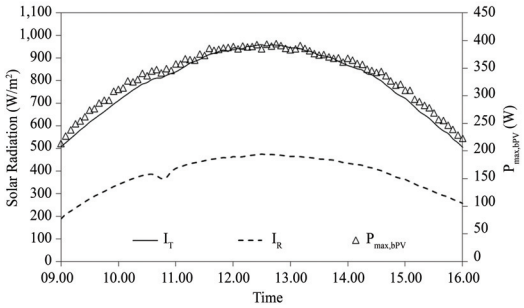
ในช่วงเวลา 12.10 - 12.45 น. โดยจะสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ยังไม่มุมตั้งฉากกับแผงจะทำให้เกิดเงาในบริเวณใกล้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ประกอบกับความสูงจากพื้นที่ต่ำ (บริเวณขอบด้านล่างของแผง) ทำให้การสะท้อนแสงเข้าบริเวณด้านหลังแผงจึงทำได้น้อย



(ก) มุมเอียง 15° (ข) มุมเอียง 18°

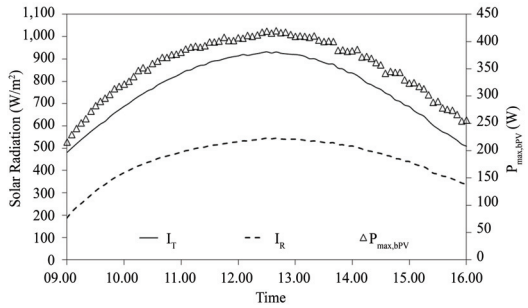
รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m

ISSN 2672-9369 (Online)

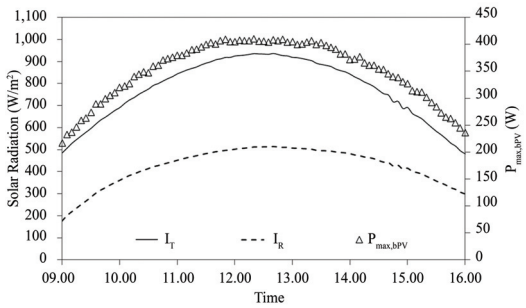


(ค) มุมเอียง 21°

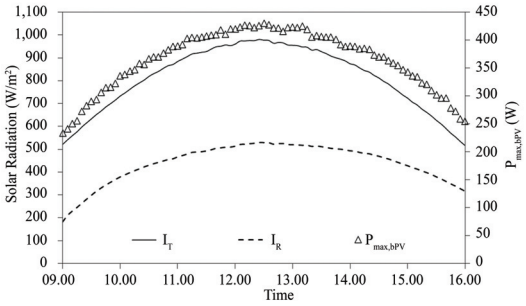
รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m (ต่อ)



(ก) มุมเอียง 15°



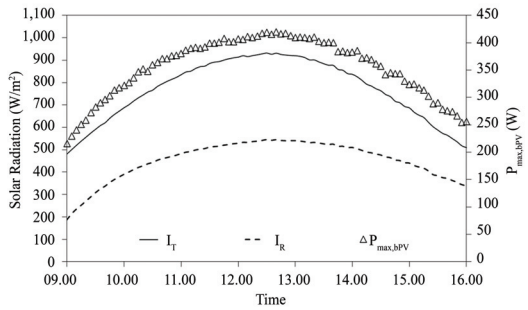
(ข) มุมเอียง 18°



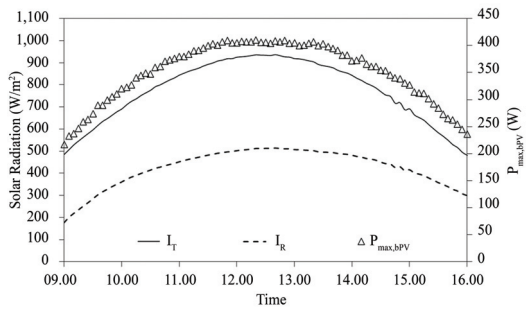
(ค) มุมเอียง 21°

รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m

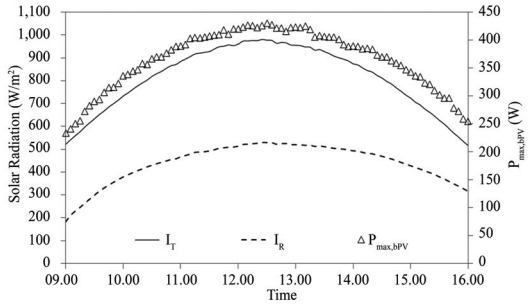
จากรูปที่ 5 กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1.00 m ที่มุมเอียง 15° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 216.21 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 24.60 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 419.85 W ในช่วงเวลา 12.40 น. ที่อุณหภูมิแผง 53 °C มุมเอียง 18° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 216.52 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 24 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 410.32 W ในช่วงเวลา 12.20 น. ที่อุณหภูมิแผง 53.90 °C มุมเอียง 21° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 233.85 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 26.60 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 430.30 W ในช่วงเวลา 12.30 น. ที่อุณหภูมิแผง 52.50 °C โดยอุณหภูมิของแผง ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ระหว่าง 52 - 53 °C ในช่วงเวลา 12.20 - 12.40 น. สังเกตได้ว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 m แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงได้ดีขึ้นเนื่องจากความสูงเพิ่มมากขึ้นทำให้การสะท้อนของรังสีอาทิตย์เขาสู่บริเวณด้านหลังแผงในปริมาณที่มากขึ้น



(ก) มุมเอียง 15°



(ข) มุมเอียง 18°



(ค) มุมเอียง 21°

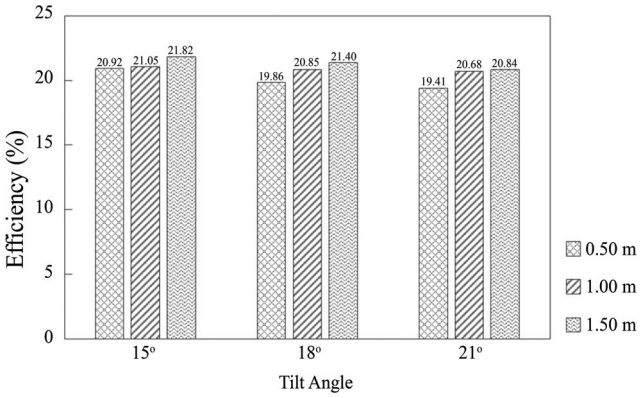
รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m

จากรูปที่ 6 กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1.50 m ที่มุมเอียง 15° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 208.01 Wp ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 25.70 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 424.88 W ในช่วงเวลา 12.45 น. ที่อุณหภูมิแผง 51.70 °C มุมเอียง 18° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 229.96 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 28.70 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 433.19 W ในช่วงเวลา 12.15 น. ที่อุณหภูมิแผง 52.4 °C มุมเอียง 21° มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 249.43 W ในช่วงเวลา 09.00 น. ที่อุณหภูมิแผง 27.50 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 434.75 W ในช่วงเวลา 13.05 น. ที่อุณหภูมิแผง 56.70 °C โดยอุณหภูมิของแผง ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ระหว่าง 51 - 56 °C ในช่วงเวลา 12.15 - 13.05 น. จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากความสูง 1.00 m ไม่มาก ซึ่งแสดงว่าหากเพิ่มความสูงมากเกินไป การกระจายรังสีจะมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณรังสีที่สะท้อนเข้าบริเวณด้านหลังแผงน้อยลง

ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) จากผลการทดลองข้างต้นและสรุปได้ตามรูปที่ 7 พบว่าความสูงและมุมที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m ที่มุมเอียง 15° โดยมีค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง 21.82 %

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามตารางที่ 3 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับลักษณะที่ตั้งของแต่ละประเทศ latitude และภูมิอากาศ ซึ่งจะมีปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละพื้นที่ มุมเอียงและความสูง ขึ้นอยู่กับพิกัดของแต่ละพื้นที่นั้น และค่า Albedo ที่เป็นอัตราส่วนการสะท้อนแสงของพื้นผิวเข้าสู่บริเวณด้านหลังแผง ซึ่งยิ่งมีค่าสูงก็จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Bifacial PV ในแต่ละความสูงจากพื้นผิวและแต่ละมุมเอียง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	Latitude	Surface	Albedo	Tilt Angle	Height	Efficiency
งานวิจัยนี้	*18°55′30″N*	Concrete white paint	0.53	15°	1.50 m	21.82 %
		Concrete white paint	0.53	18°	1.50 m	21.40 %
		Concrete white paint	0.53	21°	1.50 m	20.84 %
		Concrete white paint	0.53	15°	0.50 m	20.92 %
		Concrete white paint	0.53	18°	0.50 m	19.86 %
		Concrete white paint	0.53	21°	0.50 m	19.41 %
		Concrete	0.22	18°	1.00 m	18.12 %
		Soil	0.26	18°	1.00 m	18.35 %
		Grass	0.30	18°	1.00 m	18.75 %
[2]	*51°03′53″N*	-	0.50	25°	1.50 m	33.85 %
[3]	Norway	-	0.50	54°	1.00 m	30 %
	Egypt	-	0.50	31°	1.00 m	30 %
[4]	*22°30′N*	Gray gravel	0.20	25°	0.20 m	10 %
			0.20	45°	0.20 m	15 %

ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) จึงนำผลการทดสอบมาพิจารณาความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทำการสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปี โดยพิจารณาความสัมพันธ์จากรูปที่ 8

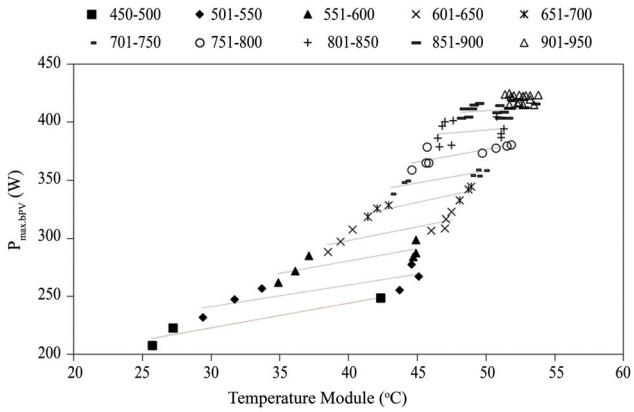
เมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น แต่เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) อาศัยการสะท้อนของรังสีอาทิตย์จากพื้นผิวเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากด้านหลังของแผง ปริมาณที่สะท้อนก็มีผลทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณที่สะท้อนเข้าสู่ด้านหลังแผงและเงาที่อยู่ใต้แผง แม้ว่าค่ารังสีอาทิตย์ที่มีค่าใกล้เคียงกันแต่อาจผลิตไฟฟ้าได้ต่างกัน อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้านั่นคือ อุณหภูมิแผง โดยสามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์ทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่ความสูง 1.50 m มุม 15° พื้นผิวเป็นคอนกรีตทาสีขาว (Albedo = 0.53) ได้ดังสมการที่ (8) - (9)

$$P_{PV,Sim} = 1.0152 \times \left(I_T^{0.7781}\right) \times \left(T_a^{0.0333}\right) \times \left(T_m^{0.1559}\right) \tag{8}$$

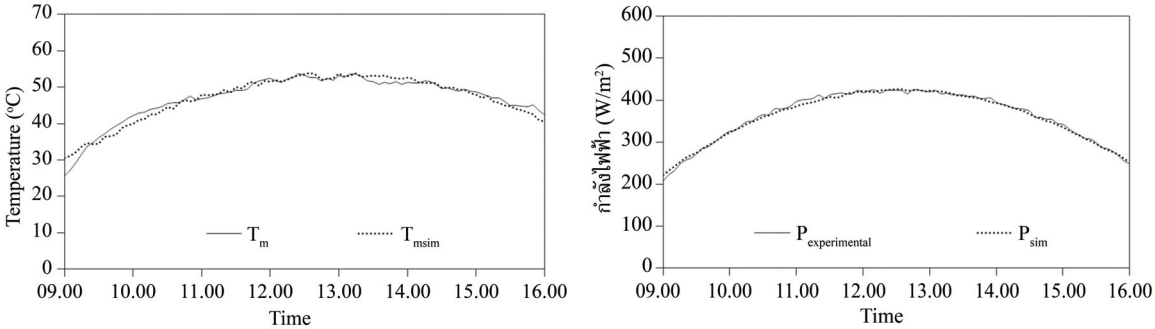
เมื่อ

$$T_{m,Sim} = 0.2122 \times \left(I_T^{0.5132}\right) \times \left(T_a^{0.5996}\right) \tag{9}$$

เมื่อนำสมการที่ (8) - (9) มาคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า เป็นไปทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 9(ก) การทำนายอุณหภูมิแผงตามสมการที่ (9) มีความเคลื่อน 2.49 % และจากรูปที่ 9(ข) ผลการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ตามสมการที่ (8) มีความคลาดเคลื่อน 1.12 %



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับอุณหภูมิแผงในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m ที่มุม 15° ค่า Albedo 0.53



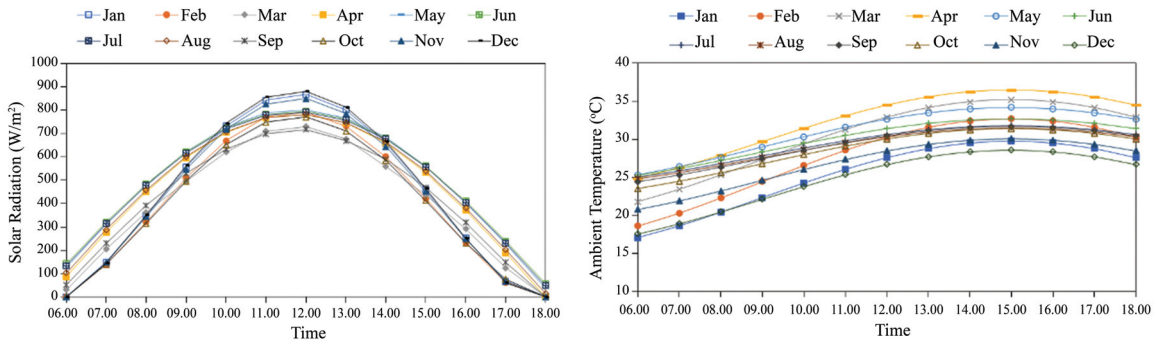
(ก) อุณหภูมิแผงจากการทดสอบและจากสมการทำนาย

(ข) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการทดสอบและจากสมการทำนาย

รูปที่ 9 อุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ที่ความสูง 1.50 m มุมเอียง 15°

ในส่วนที่ 2 เป็นการใช้สมการทำนายกำลังไฟฟ้าจากส่วนที่ 1 มาประเมินผลผลิตที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) บนหลังคาอาคารศูนย์กีฬากาญจนาภิเษกรัชกาลที่ 9 โซน A โดยใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 10

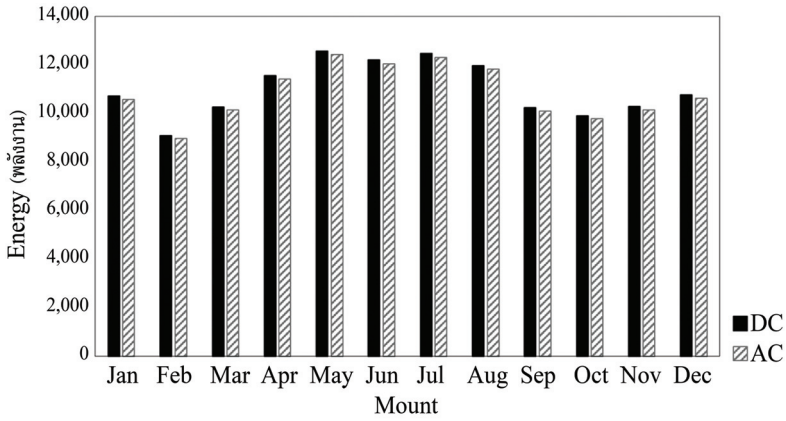
ISSN 2672-9369 (Online)



(ก) ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ (ข) ค่าอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่

รูปที่ 10 ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ [9] และอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่ [10] - [11]

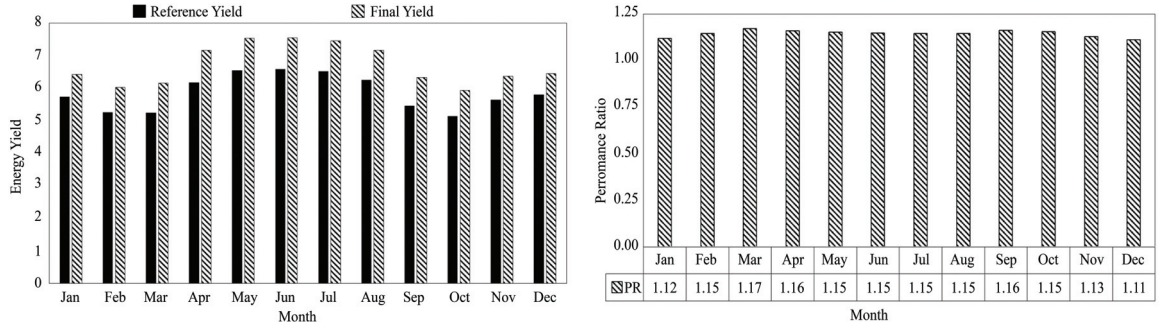
เมื่อใช้สมการสหสัมพันธ์คำนวณได้ค่ากำลังไฟฟ้าด้าน DC มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ 11,016.49 kWh คิดเป็น 132,197.90 kWh/year และค่ากำลังไฟฟ้าด้าน AC มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ 10,895.31 kWh คิดเป็น 130,743.80 kWh/year ที่ประสิทธิภาพ Inverter 98.8 % [12] ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การทำนายค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นตลอดทั้งปี

จากการประเมินด้วยสมการสหสัมพันธ์พบว่า ค่า Y_R คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎีนั้น กำลังไฟฟ้าติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ที่ระบุตาม nameplate ไม่ได้รวมกำลังไฟฟ้าที่ได้จากด้านหลังของแผงทำให้ค่า Y_R มีค่าต่ำกว่า Y_F ดังรูปที่ 12(ก) ซึ่งทำให้ค่าสมรรถนะของระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 1.11 - 1.17 คิดเป็นค่าเฉลี่ยรายปี 1.15 ดังรูปที่ 12(ข)

จากการประเมินเบื้องต้นจะใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 1,890,699.50 บาท และสามารถคิดผลประหยัดจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า 477,554.45 บาท/ปี ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3.95 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,601,144.48 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อยู่ที่ 16.26 % ดังตารางที่ 4



(ก) Energy Yield (ข) Performance Ratio

รูปที่ 12 Energy Yield (Reference Yield (Y_R), Final Yield (Y_F)) และสมรรถนะของระบบ Performance Ratio (PR)

ตารางที่ 4 รายละเอียดการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

รายละเอียด		หน่วย	ราคา	
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	130,479.36	kWh/year		
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	3.66	Baht/kWh		
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัด	477,554.45	Baht/kWh		
เงินลงทุน รวม	1,890,699.50	Baht		
งานโครงสร้างรับแผงโซล่าเซลล์	56,935	Baht		
งานติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์	1,792,112.50	Baht		
- Bifacial PV	124	แผง	494,760	
- Inverter 36 kW 3 phase	2	เครื่อง	354,200	
- งานเดินสายไฟฟ้าและระบบ ไฟฟ้า	1	งาน	943,152.50	
การทาสีพื้นผิว	1	งาน	41,652	[13]
ระยะคืนทุน	3.95	year		
NPV	1,601,144.48	Baht		
IRR	16.26	%		

หมายเหตุ ดอกเบี้ย = 6.22% [14], อายุโครงการ = 20 ปี, ค่าไฟฟ้า = 3.66 Baht/kWh [15]

สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV) ที่ความสูง 0.50 1.00 และ 1.50 m มุมติดตั้งที่ 15 18 และ 21° บนพื้นผิวคอนกรีตสีขาว (Albedo = 0.53) โดยการทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกันพบว่า ที่ความสูง 0.50 m ค่าประสิทธิภาพ 20.92 % ที่มุมเอียง 15° ที่ความสูง 1.00 m ค่าประสิทธิภาพ 21.24 % ที่มุมเอียง 15° ที่ความสูง 1.50 m ค่าประสิทธิภาพ 21.82 % ที่มุมเอียง 15° ทั้งนี้จึงใช้ข้อมูลมุมเอียง 15° และความสูงจากพื้นผิวที่ 1.50 m นำมาสร้างสมการสหสัมพันธ์ทำนายค่าพลังงานไฟฟ้า โดยค่าพลังงานไฟฟ้าคำนวณได้จาก $P_{PV,Sim} = 1.0152 \times \left(I_T^{0.7781}\right) \times \left(T_a^{0.0333}\right) \times \left(T_m^{0.1559}\right)$ และอุณหภูมิแผงคำนวณได้จาก $T_{m,Sim} = 0.2122 \times \left(I_T^{0.5132}\right) \times \left(T_a^{0.5996}\right)$ เพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่าพลังงานรายปีต่อไป

ISSN 2672-9369 (Online)

เมื่อได้สมการข้างต้นสามารถทำนายค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน DC ที่มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ 11,016.49 kWh คิดเป็น 132,197.90 kWh/year และค่ากำลังไฟฟ้าด้าน AC มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ 10,873.28 kWh คิดเป็น 130,479.36 kWh/year ที่ประสิทธิภาพ Inverter 98.8 % โดยใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 1,890,699.50 Baht และสามารถคิดผลประหยัดจาการผลิตพลังงานไฟฟ้า 477,554.45 Baht/year โดยคิดค่าไฟฟ้าที่ 3.66 Baht/kWh ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3.95 year มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,601,144.48 Baht และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อยู่ที่ 16.26 %

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2562 รวมถึงขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ สถานที่สำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโทในครั้งนี้

References

[1] Nopakun, D. (1993). **Climatolygy**. Chulalongkorn University Bangkok. (in Thai)

[2] Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E., and Jürgen, W. (2016). Modelling of Bifacial Gain for Stand-Alone and In-Field Installed Bifacial PV Modules. **Energy Procedia**. Vol. 92, pp. 600-608. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.07.025

[3] Yusufoglu, U. A., Lee, T. H., Pletzer, T. M., Halm, A., Koduvelikulathu, L. J., Comparotto, C., Kopecek, R., and Heinrich, K. (2014). Simulation of Energy Production by Bifacial Modules with Revision of Ground Reflection. **Energy Procedia**. Vol. 55, pp. 389-395. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.08.111

[4] Katsaounis, Th., Kotsovos, K., Gereige, I., Basaheeh, A., Abdullah, M., Khayat, A., Alhabshi, E., Al-Saggaf, A., and Tzavaras, A. E. (2019). Performance Assessment of Bifacial c-Si PV Modules Through Device Simulations and Outdoor Measurements. **Renewable Energy**. Vol. 143, pp. 1285-1298. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.057

[5] Sun, X., Mohammad, K., Deline, C., and Mohammad, A. (2018). Optimization and Perfomace of Bifacial Solar Modules: A Global Perspective. **Applied Energy**. Vol. 212, pp. 1601-1610. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.041

[6] LG Electronics Inc. (2017). Bifacial Design Guide. **Brochure**. Seoul. Korea: Author

[7] Wetchaka, K. (2017). P**erformance Analysis of 50 kWp Floating PV System**. M.Eng. Electrical Engineering. Faculty of Engineering. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)

[8] Kanta, N., Polvongsri, S., Intaniwet, A., and Mongkon, S. (2021). The Effect of Reflective Surface on Bifacial Photovoltaic Efficiency. In **14th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-14)**. Chiangmai: Maejo University. pp. 518-524 (in Thai)

[9] Chaiyat, N. (2019). **Themal Rewewable Energy Technology**. Renewable Energy School. Maejo University Chiangmai (in Thai)

[10] Chaichana, C., Kiatsiriroat, T., and Nuntaphan, A. (2010). Comparison of Conventional Flat-Plate Solar Collector and Solar Boosted Heat Pump Using Unglazed Collector for Hot Water Production in Small Slaughterhouse. **Heat Transfer Engineering**. Vol. 31, Issue 5, pp. 419-429. DOI: 10.1080/01457630903375475

[11] Thai Meteorological Department. (2022). **Climate**. Access (31 March 2022). Available. (https://www.tmd.go.th/province_weather_stat.php?StationNumber=48327)

[12] HUAWEI. (2019). **SUN2000-36KTL-M3**. Access (23 September 2022). Available (https://www.solar.huaweic.com)

[13] Design and Construction, Office of the Basic Education Commission. Ministry of Education. (2022). **2 Architecture, 2.10 Painting**. Construction Materials and Labor Cost for the year 2022. pp. 47-49 (in Thai)

[14] Krungthai Bank. (2021). **Loan Interest Rates**. Access (30 September 2022). Available (https://krungthai.com/th/rates/viewdetail/4)

[15] Mae Jo University's Average Electricity Cost 115 kV. (2020). **Annual Report (2020)**. Chiangmai: Maejo University (in Thai)

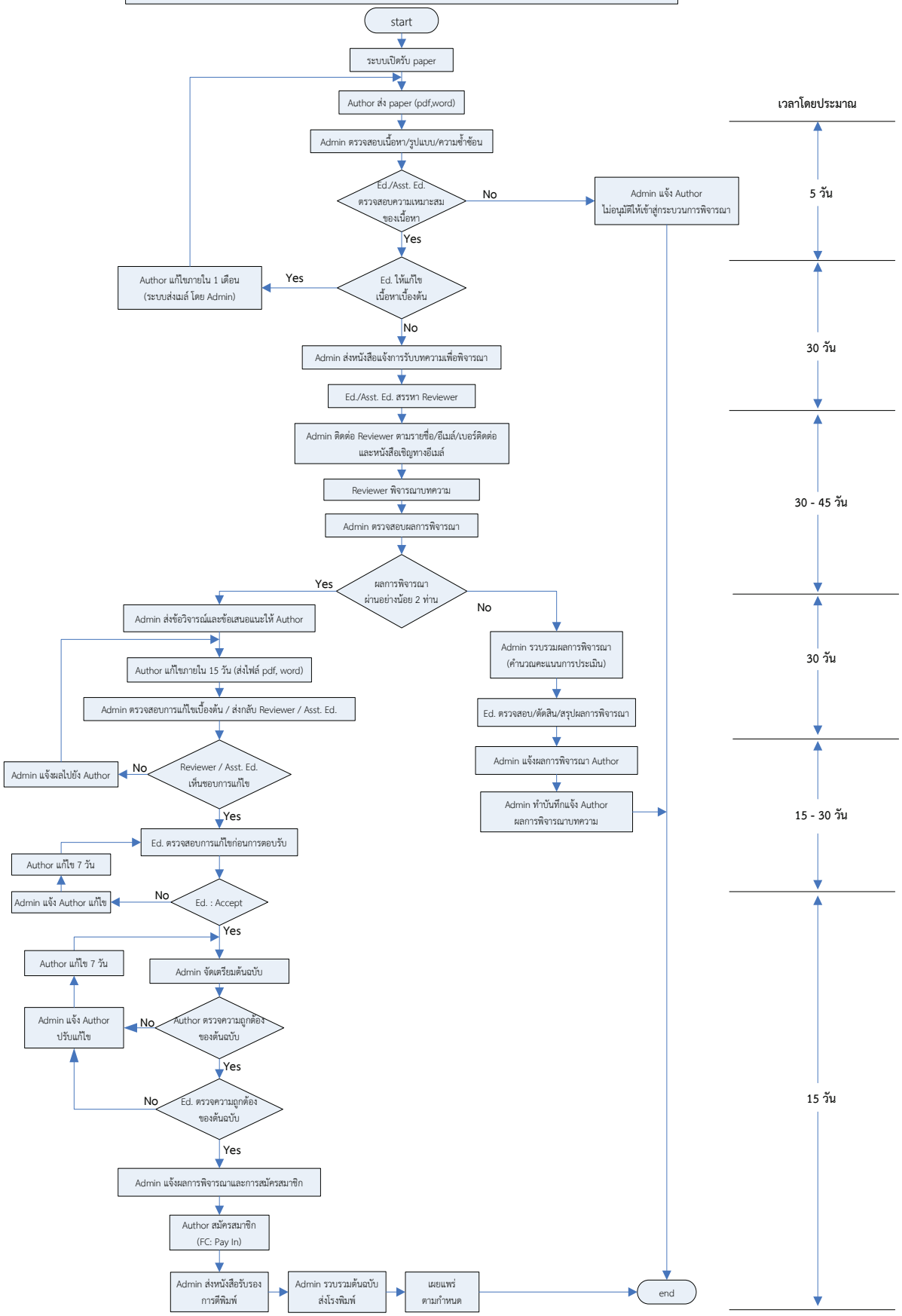
ISSN 2672-9369 (Online)

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI

ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (**Research article**) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (**Academic article**) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ
3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- **ระยะขอบ**

  ขอบบน (Top Margin) 2.5 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.5 ซม.

  ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.
- **ระยะห่างบรรทัด** 1 เท่า
- **รูปแบบตัวอักษร** บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK

  บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman
- **การย่อหน้า** 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- **จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า**
- **ชื่อบทความ** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 24 ตัวหนา

  ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
- **ชื่อผู้เขียน** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 และจัดชิดซ้าย

  ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- **ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล)** ขนาดตัวอักษร 18
- **ที่อยู่** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

  ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 10
- **ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น "บทคัดย่อ" "คำสำคัญ" "วิธีดำเนินการ" "ผลการวิจัย" "สรุปผลการวิจัย" "กิตติกรรมประกาศ" "เอกสารอ้างอิง"** จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- **ชื่อหัวเรื่องรอง** จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา
- **เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ**

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12
- **ชื่อตาราง**

  กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "**ตารางที่ x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "**Table x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- **ชื่อรูปภาพ**

กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "**รูปที่ x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "**Figure x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 **บทความวิจัย** จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระทัดรัด ไม่ยาวเกินไป บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม – นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุเบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทร์ตัวยกกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุลและตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. **บทคัดย่อ (Abstract)** ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วยเนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน <u>ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ</u>

4. **คำสำคัญ (Key Words)** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ : <u>เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น</u>**

ข. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (Introduction)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (Materials and Methods) / วิธีดำเนินการวิจัย (Research Methodology)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน

3. **ผลการวิจัย (Results)** เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทยให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. **การอภิปรายผล (Discussion)** เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. **บทสรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. **เอกสารอ้างอิง (References)** เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหาโดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 **บทความวิชาการ** จะประกอบไปด้วย

ก. **ส่วนปก**

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. **ส่วนเนื้อหา**

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. **วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (Method)** (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

3. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. **สรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE **ระบบตัวเลข (Numerical System)** เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1] - [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

1) **หนังสือ**

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อหนังสือ**. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[1] Herren, Ray V. (1994). **The Science of Animal Agriculture**. Albany, N.Y.: Delmar Publishers

2) **หนังสือแปล**

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อเรื่องของหนังสือแปล** แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม). โดย ชื่อผู้แปล. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[2] Grmek, Mirko D. (1990). **History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic**. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) **บทความหรือบทในหนังสือ**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. **ชื่อเรื่อง**. ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี). หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[3] McTaggart, J. M. E. (1993). The Unreality of Time. **Philosophy of Time**. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford: Oxford University Press

4) **บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี). **ชื่อเรื่องรายงานการประชุม**. หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[4] Beales, P. F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. **Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics**. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok: Bangkok Medical Publisher

5) **วารสาร**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. **ชื่อวารสาร**. ปีที่. , ฉบับที่. , หน้า เลขหน้า. (in Thai)/DOI:

ตัวอย่างเช่น

[5] Vitsanusat, A. and Phachirarat, S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 12-20

6) **บทความในหนังสือพิมพ์**

[X] ชื่อผู้เขียน. (ปี. วัน. เดือน). ชื่อบทความ. ใน **ชื่อหนังสือพิมพ์**. หน้า เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). **The Sale of Children as a Global Dilemma**. Bangkok Post. p. 4

7) **บทความในสารานุกรม**

[X] ชื่อผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ใน. **ชื่อสารานุกรม**. เล่มที่ : หน้า เลขหน้า-เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. **Encyclopedia of Library and Information Science**. Vol. 51, pp. 380-389

8) **วิทยานิพนธ์**

[X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อวิทยานิพนธ์**. ระดับวิทยานิพนธ์ ชื่อสาขา คณะ มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

[8] Phillips, O. C., Jr. (1962). **The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil**. Ph.D. Dissertation University of Chicago

9) **สื่ออิเล็กโทรนิกส์ (สื่ออิเล็กโทรนิกส์) : www**

[X] ผู้เขียน. ปี. **ชื่อบทความ**. ชื่อวารสารหรือนิตยสาร. ปีที่(เดือนหรือฉบับที่): เลขหน้า(ถ้ามี). เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล). เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

[9] Department of the Environment and Heritage. (1999). **Guide to Department and Agency Libraries**. Access (17 November 2000). Available (http://www.erin.gov.au/library/guide.html)

10) **ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน**

[X] ชื่อหน่วยงาน. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อหนังสือ** เล่มที่(ถ้ามี). ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[10] Prince of Songkla University. (2009). **Annual Report 2008**. Songkhla: Prince of Songkla University

11) **มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม**

[X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง. (ปีที่พิมพ์.) **ชื่อหนังสือ**. เล่มที่ (ถ้ามี) ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี) เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[11] Rueangwit Limpanat. (2000). **Local - India**. Chonburi: Department of History Faculty of Humanities And social science Burapa university

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อรูปภาพ**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภาพนั้น ๆ

3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi

5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปกราฟ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน

6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น

(ก) รูปย่อยที่ 1 (ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),… แทนการกำหนดรูปภาพย่อย

7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด

8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ

9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อตาราง**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ

3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “**ตารางที่** x ……” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “**ตารางที่** x …… (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป

4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด

6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

Table Head	**Table Column Head**	
	Subhead (unit)	**Subhead (unit)**
xxx	123	456
xxx	321	654

7. **รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ**

1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \tag{1}$$

4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ
5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

8. **การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ**

1) ทุกบทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป **บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา**โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนงสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี

หมายเลขสมาชิก
……..
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่ ……

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) ……..

ระดับการศึกษาสูงสุด …… ตำแหน่งทางวิชาการ ……..

หน่วยงาน ……..

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก……

โทรศัพท์……โทรสาร……โมบาย……

e-mail……

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ Chemistry ☐ Engineering ☐ Materials Science

☐ Environmental Science ☐ Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) ……..

……

……

(ภาษาอังกฤษ) ……..

……

……

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ)

1. ……
2. ……
3. ……
4. ……
5. ……

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุล……..…….ตำแหน่งทางวิชาการ……

คุณวุฒิ……สาขาที่เชี่ยวชาญ……..

หน่วยงานที่สังกัด……

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร……..……..

……..

หมายเลขโทรศัพท์…….Email……..…….

2. ชื่อ-สกุล……..…….ตำแหน่งทางวิชาการ……

คุณวุฒิ……สาขาที่เชี่ยวชาญ……..

หน่วยงานที่สังกัด……..……..……..

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร……..……..

……..

หมายเลขโทรศัพท์…….Email……..…….

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน "คำแนะนำผู้เขียน" ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาต้นฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า "ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน"

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ **ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง**

ลงชื่อ…….

(…….)

หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง .....
.....
โดย .....
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีสาน
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

……..

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร……

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)……

ที่อยู่ ……

……โทรศัพท์……

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ……

ที่อยู่……

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี มี 3 ฉบับ 1,000 บาท)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน …….. ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ …… ฉบับที่ ……..

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน …….. ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ …… ฉบับที่ ……..

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน…….บาท

(ตัวอักษร)…….

ซึ่งได้ชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิก มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ…….ผู้สมัคร

(……)

หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน .....

มีความประสงค์ขอถอนการพิจารณาบทความเรื่อง.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่ ..... และยินยอมรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน ..... บาท (.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัยธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี "กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน" บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงินจะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)

RMUTI

ราชมงคลอีสาน

RMUTI JOURNAL
Science and Technology

Vol. 16 No. 1
(January - April 2023)
ISSN (Online): 2672-9369

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Isan
744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com