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

การขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดความต้องการการใช้พลังงานที่สูงขึ้น ด้วยทั้งการใช้พลังงานในภาคการคมนาคม 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]

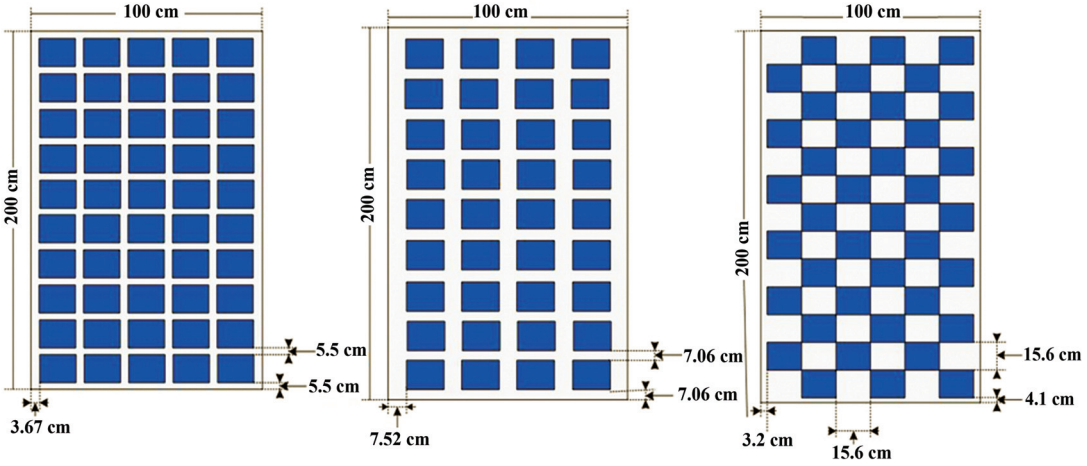
จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสไปประยุกต์ใช้งานในโรงเรือนปลูกพืชน้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย อีกทั้งพืชแต่ละชนิดที่ปลูกในโรงเรือนปลูกพืชก็มีความต้องการปริมาณแสงที่ไม่เท่ากัน สตรอว์เบอร์รี่เป็นพืชผลไม้อีกชนิดที่นิยมปลูกในโรงเรือนปลูกพืชและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการควบคุมอุณหภูมิอากาศค่อนข้างสูง 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

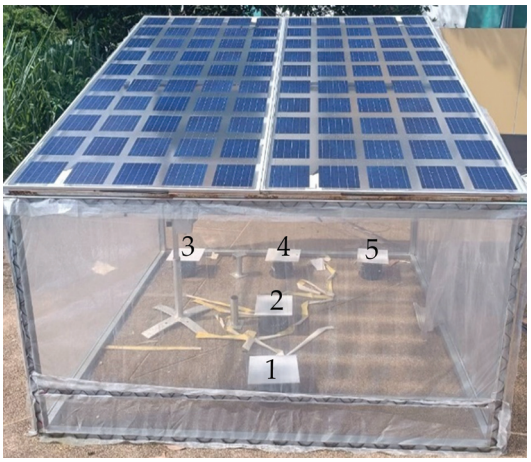
ISSN 2672-9369 (Online)

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

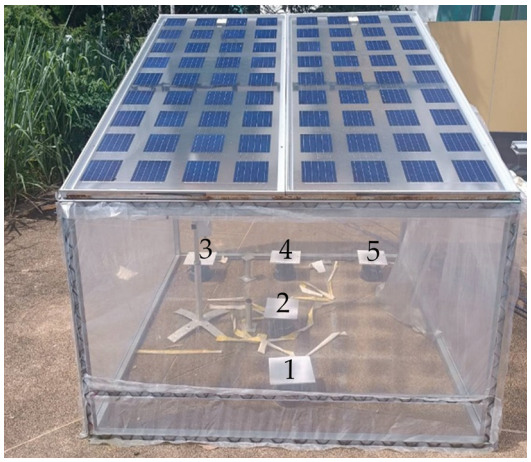
เมื่อ

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

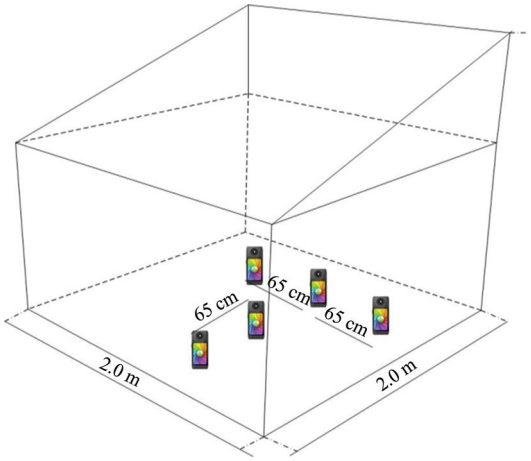


(ก) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1



(ข) แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2

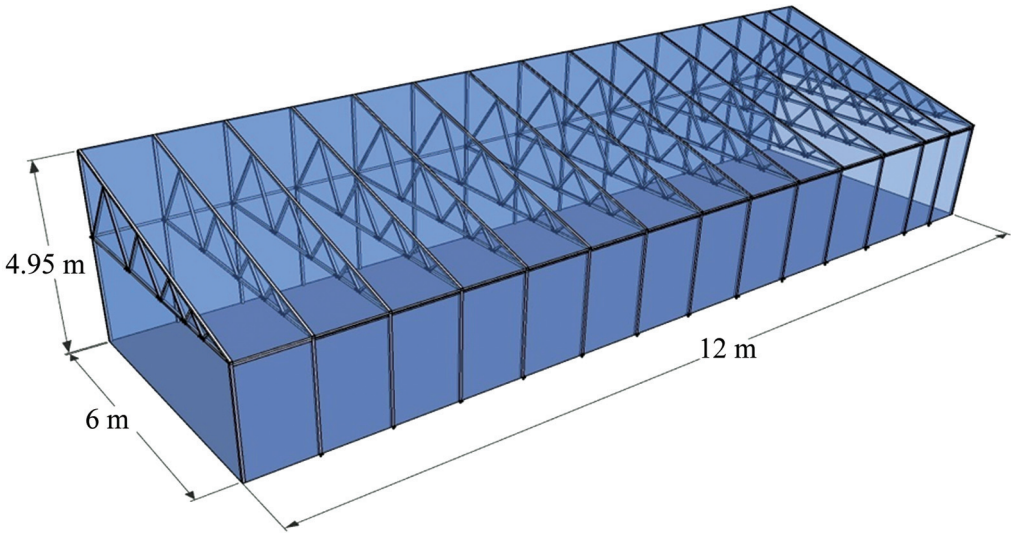
(ค) แบบกระดานหมากรุก



(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)

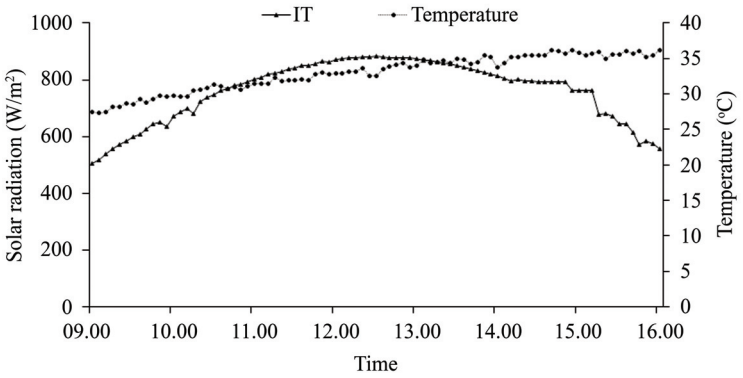
อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คือ อัตราผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมดมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน

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

ISSN 2672-9369 (Online)

ผลการวิจัย

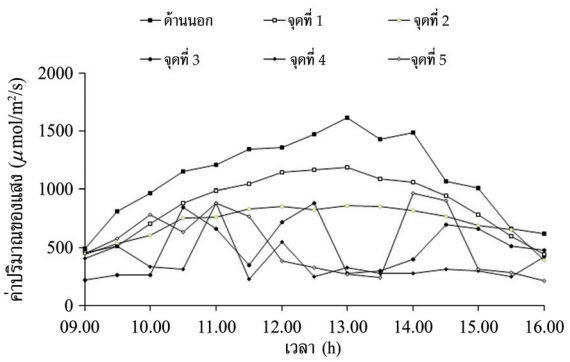
การทดสอบในส่วนที่ 1 ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์และเก็บข้อมูล ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2565 ซึ่งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสทั้ง 3 รูปแบบ จากรูปที่ 4 แสดงค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในวันทดสอบซึ่งพบว่า ในวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งวันประมาณ 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



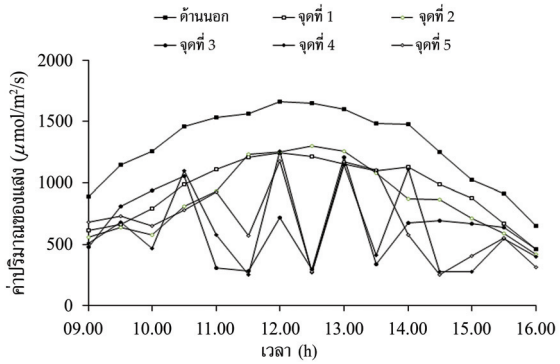
รูปที่ 4 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในวันทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส

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

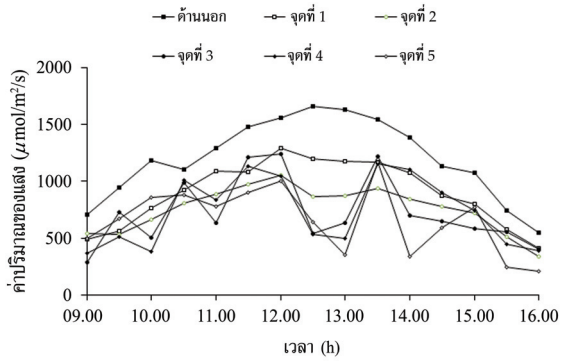
737.07 และ 619.32 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจุดที่ 5 ตลอดทั้งวันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 531.12 660.2 และ 677.82 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยจากผลทั้งหมดสรุปได้ว่า ค่า PPFD ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสที่มีการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 1 ที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างแบบที่ 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

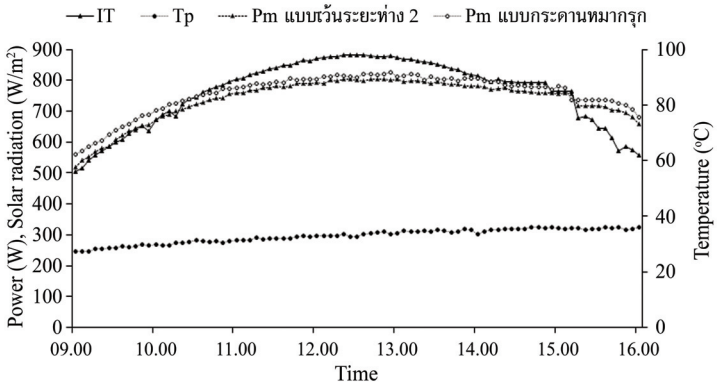
รายละเอียด	เว้นระยะห่างแบบที่ 1	เว้นระยะห่างแบบที่ 2	แบบกระดานหมากรุก
ค่าปริมาณแสงนอกโรงเรือน (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)	1,112.99	1,200.73	1,303.42
ค่าปริมาณแสงด้านในโรงเรือน (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)	595.95	755.47	751.17

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

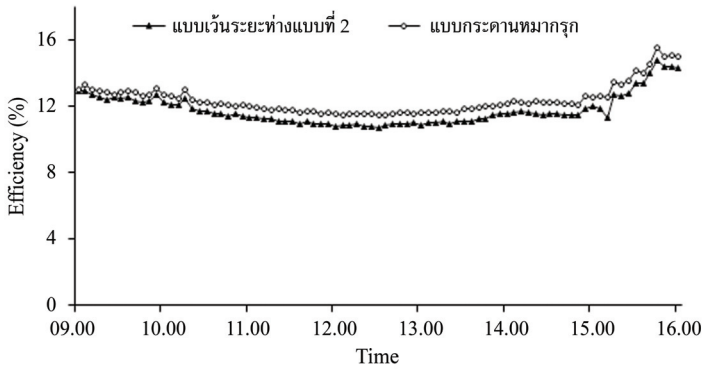
ISSN 2672-9369 (Online)

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

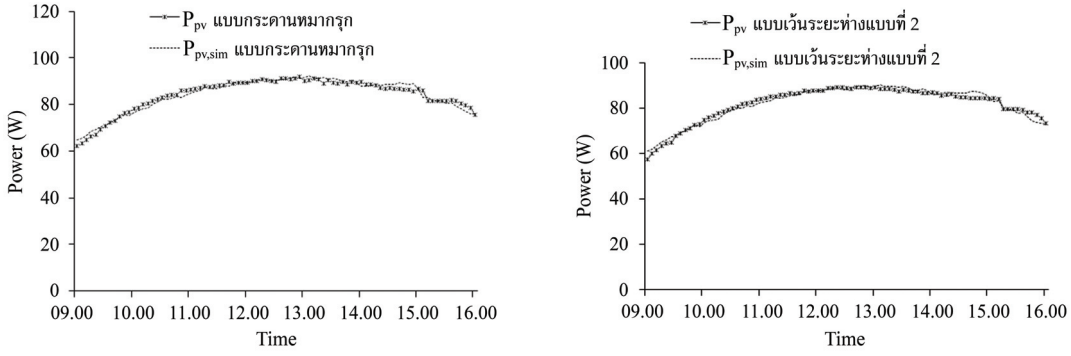
$$P_{pv/sim,36cell} = 1.2526 \times \left(I_T^{0.26362}\right) \times \left(T_a^{0.22848}\right) \times \left(T_P^{0.39954}\right) \quad (5)$$

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



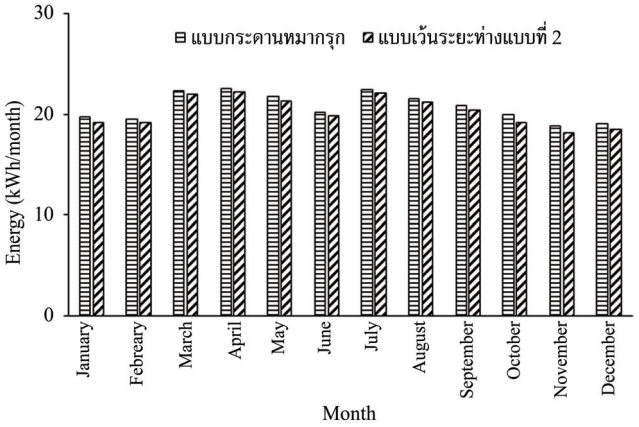
(ก) รูปแบบกระดานหมากรุก (ข) รูปแบบเว้นระยะห่างแบบที่ 2

รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากสมการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

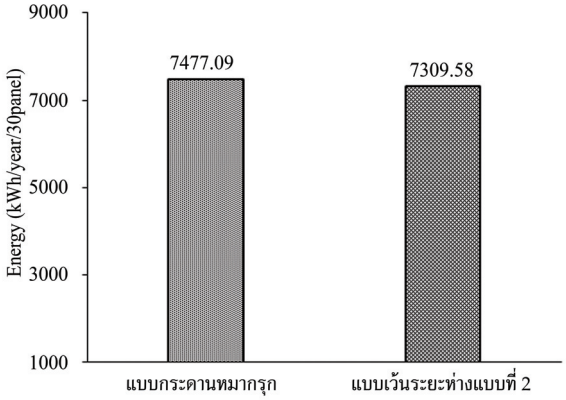
เมื่อพิจารณาการจำลองการนำแผงที่มีรูปแบบการจัดวางเซลล์ทั้ง 2 รูปแบบไปติดตั้งกับโรงเรือนปลูกพืชแบบ Lean to ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 12 เมตร สูง 4.95 เมตร โดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์และค่าอุณหภูมิแวดล้อมจังหวัดเชียงใหม่ตั้งแต่เวลา 07.00 - 17.00 น. พบว่าในเดือนเมษายนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการจัดวางเซลล์แบบเว้นระยะห่างที่ 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)