

## การศึกษาการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับหลังคาเขียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

อรันย์ ศรีรัตนา ทานูกานอน\* กิตติญาภรณ์ เหล็กแปง และศิริรภา มิ่งส่วน

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล พุทธมณฑล นครปฐม 73170

\*E-mail: allansriratana.tab@mahidol.ac.th

รับบทความ: 8 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ: 21 สิงหาคม 2564 ยอมรับตีพิมพ์: 18 กันยายน 2564

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิบริเวณหลังคาเขียวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุน จากการศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบที่แตกต่างกันของต้นกระดุมทองเลื้อยและต้นหลิวไต้หวัน ได้แก่ LAI 1 LAI 3 และ LAI 5 โดยทดลองเป็นระยะเวลา 3 วัน ในช่วงระหว่างวันที่ 4–6 มีนาคม 2564 พบว่า ต้นกระดุมทองเลื้อย LAI 5 สามารถลดอุณหภูมิบริเวณผิวดินและอุณหภูมิเหนือผิวดินได้มากที่สุดและมีนัยสำคัญ ( $P_{ผิวดิน} = 0.000$ ,  $P_{เหนือผิวดิน} = 0.000$ ) ด้วยวิธี ANOVA คือ  $2.99^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ) และ  $2.48^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.16^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ จากนั้นศึกษาแบบจำลองการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง ได้แก่ การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นคอนกรีต (Model 1), การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียว (Model 2) และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียวร่วมกับการรดน้ำพืชระหว่างวัน (Model 3) เป็นระยะเวลา 3 วัน คือวันที่ 16 18 และ 23 มีนาคม 2564 ในการติดตั้งหลังคาเขียวเลือกใช้ต้นกระดุมทองเลื้อย LAI 5 แล้วทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์และค่าทางไฟฟ้า พบว่า Model 2 ( $P_{บนแผง} = 0.005$ ,  $P_{ใต้แผง} = 0.009$ ) และ Model 3 ( $P_{บนแผง} = 0.003$ ,  $P_{ใต้แผง} = 0.006$ ) มีอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งด้านบนและใต้แผงต่ำกว่า Model 1 อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำค่าทางไฟฟ้ามาคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า Model 2 และ Model 3 สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นร้อยละ 1.36 และ 1.12 ตามลำดับ เพราะการลดลงของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีผลให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากนั้นศึกษาระยะเวลาคืนทุน พบว่า Model 1 มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด คือ 4.7 ปี รองลงมา คือ Model 2 มีระยะเวลาคืนทุน 7.4 ปี และ Model 3 มีระยะเวลาคืนทุน 9.0 ปี ตามลำดับ เนื่องจาก Model 1 มีต้นทุนในการติดตั้งน้อยและมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ใกล้เคียงกับอีก 2 กรณี อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้วิเคราะห์เพียงผลตอบแทนจากการลดการใช้ไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยเชื่อว่าหากวิเคราะห์ร่วมกับการลดอุณหภูมิภายในอาคารของหลังคาเขียวซึ่งช่วยลดค่าไฟฟ้าด้านระบบปรับอากาศและระบายอากาศ จะสามารถลดระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับหลังคาเขียวให้สั้นลงได้

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ หลังคาเขียว การลดอุณหภูมิ ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

## The Study on Synergy of Solar Panel and Green Roof for Improving Power Generation

Allan Sriratana Tabucanon<sup>\*</sup>, Kittiyaphon Lekpaeng and Sirinapa Mingsuan

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University Program,  
Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand

<sup>\*</sup>E-mail: allansriratana.tab@mahidol.ac.th

Received: 8 June 2021 Revised: 21 August 2021 Accepted: 18 September 2021

### Abstract

This research studied the effect of Leaf Area Index (LAI) on cell temperature for improving power generation efficiency and the payback period. The experiment was conducted between March 4 and 6, 2021. A study of different LAI of Climbing Wedelia and False Heather (Weave), including LAI 1, LAI 3 and LAI 5, showed that the maximum reduction on and above the ground was Climbing Wedelia LAI 5 that could reduce by 2.99°C ( $\pm 0.18^\circ\text{C}$ ) and 2.48°C ( $\pm 0.16^\circ\text{C}$ ) ( $P_{\text{On the ground}}=0.000$ ,  $P_{\text{Above ground}}=0.000$ ) respectively when compared with LAI 0 (control), based on ANOVA analysis. Then, the study on synergy of solar panel and green roof with 3 proposed models: Solar panel on concrete as a control (Model 1), Solar panel on green roof with Climbing Wedelia LAI 5 (Model 2) and Solar panel on the green roof with watering plant during the daytime (Model 3) on March 16th, 18th and 23rd ,2021. The result showed that cell temperatures of Model 2 ( $P_{\text{Above}} = 0.005$ ,  $P_{\text{Below}} = 0.009$ ) and Model 3 ( $P_{\text{Above}} = 0.003$ ,  $P_{\text{Below}} = 0.006$ ) were significantly lower than Model 1. On the study of power generation indicated that the power generation of Model 2 and Model 3 increased 1.36% and 1.12% respectively because the reduction of cell temperature effect to increasing output voltage. After calculating the payback period, Model 1 had the shortest payback period with 4.7 years, While Model 2 and Model 3 had 7.4 and 9.0 years, respectively. The reason of the lowest payback period of Model 1 is due to low installation costs and the electricity produced has no different from other 2 scenarios. However, this study, only emphasized on benefit of reducing energy consumption. The study hypothesizes that a better payback period of green roof by incorporating with reducing the energy consumption of indoor HVAC system will be able to greatly shorten the payback period for installation of solar panels on green roof.

**Keywords:** Solar panels, Green roof, Temperature reduction, Solar panel efficiency

## บทนำ

พลังงานทดแทนเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศอาศัยเชื้อเพลิงประเภทแก๊สธรรมชาติและถ่านหินรวมร้อยละ 83.26 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2020) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต อีกทั้งยังปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิต จึงทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนมากขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากพลังงานทดแทนเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการผลิตพลังงานอย่างยั่งยืน โดยพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่น่าสนใจกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย คือ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากสามารถติดตั้งได้ง่ายในทุกพื้นที่ที่ได้รับแสงอาทิตย์ มีอายุการใช้งานยาวนาน ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า และเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในระหว่างการผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปนิยมติดตั้งบนหลังคาอาคาร บ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม (solar roof) อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดในด้านอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิธีการและการนำเทคโนโลยีมาใช้ร่วมกับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

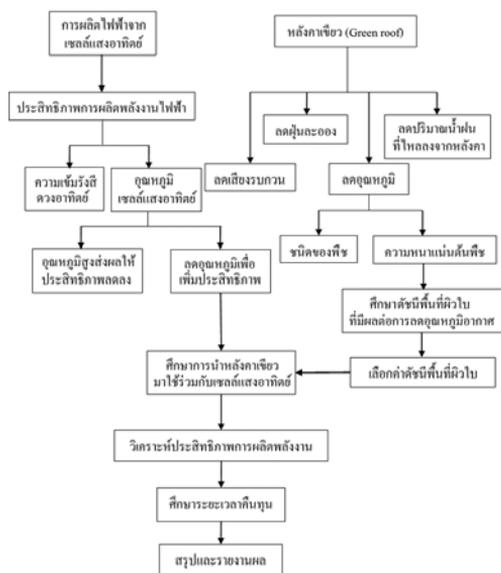
หลังคาเขียว (green roof) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดความร้อนจากการสัมผัสของรังสีดวงอาทิตย์กับหลังคาโดยตรง จึงลดการถ่ายเทความ

ร้อนเข้าสู่ตัวอาคารทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลง ในขณะที่ตัวหลังคาเขียวยังช่วยลดรังสีสะท้อนจากหลังคาคอนกรีตหรือกระเบื้องสุบรยากาศ ทำให้อุณหภูมิภายนอกลดลงและช่วยลดปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง (urban heat island) (Yeonyup and Pajjaruang, 2012) จากคุณสมบัติดังกล่าวหลังคาเขียวจึงมีความเหมาะสมที่จะติดตั้งร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดข้อจำกัดด้านอุณหภูมิ ดังแสดงกรอบแนวคิดของงานวิจัยในภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) และการลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นคอนกรีต (solar panel on concrete) การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียว (solar panel on green roof) และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียวร่วมกับการรดน้ำพืชระหว่างวัน (solar panel on green roof with watering) โดยคาดว่า การรดน้ำระหว่างวันจะสามารถช่วยลดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ลงได้ และเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจต่อไป

## วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ซึ่งศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบของพืชที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในแบบจำลอง โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลัง



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

การติดตั้ง 10 Wp บนพื้นคอนกรีต บนหลังคาเขียว และบนหลังคาเขียวร่วมกับการรดน้ำ ศึกษาบนดาดฟ้าอาคารพัฒนาผล คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม พ.ศ. 2564 โดยนำข้อมูลสภาพอากาศซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และบันทึกข้อมูลจากแบบจำลองทุก ๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 08.00–16.00 น. เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงคำนวณระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบบนพื้นที่ศึกษา (field study) ทั้งนี้ เครื่อง-

มือที่ใช้ประกอบด้วย Infrared thermometer รุ่น FT3700–20 Hioki, Thermometer และ Digital multi-meter เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า

การศึกษาดังกล่าวพื้นที่ผิวใบในพื้นที่หลังคาเขียวที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิอากาศบริเวณแปลงทดลอง เริ่มต้นจากการคัดเลือกพืชที่ใช้ในการศึกษา โดยพืชที่นำมาใช้ปลูกบนหลังคาเขียวคือ ต้นกระดุมทองเลื้อยและต้นหลิวไต้หวัน (Khiewichai and Pagamas, 2014; Tokeeree, 2011) ซึ่งใช้เกณฑ์การคัดเลือกพืช คือ เป็นไม้พุ่มหรือพืชคลุมดิน มีความสูงไม่บังแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังเซลล์แสงอาทิตย์ โดยความสูงไม่เกิน 40 เซนติเมตร (ไม่เกินความสูงของแบบจำลองตามที่ตั้งออกแบบ) ทนทานต่อสภาพอากาศร้อนและแดดจัด ต้องการการดูแลรักษาน้อย และมีราคาถูกต่อมาออกแบบการทดลองเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ 1 ใช้ต้นกระดุมทองเลื้อยและชุดการทดลองที่ 2 ใช้ต้นหลิวไต้หวัน เพื่อศึกษาความหนาแน่นใบของต้นพืชแต่ละชนิดด้วยการกำหนดให้มีความแตกต่างของค่า LAI แบ่งเป็น 3 กลุ่มทดลอง โดยกำหนดค่า LAI ประมาณ 1.0 3.0 และ 5.0 ตามลำดับ เนื่องจากค่า LAI ในช่วง 0.1 – 5.0 แสดงถึงช่วงที่มีศักยภาพที่เหมาะสมสำหรับหลังคาเขียว (Vera et al., 2017) โดยคำนวณจำนวนต้นพืชที่ต้องการปลูกในกระบะปลูกขนาด 35×50 เซนติเมตร จากสมการค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ดังสมการที่ (1)

$$\text{ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI)} = \frac{\text{พื้นที่ใบเฉลี่ย (ตารางเซนติเมตร)} \times \text{จำนวนใบเฉลี่ยต่อต้น} \times \text{จำนวนต้น}}{\text{พื้นที่ปลูก (ตารางเซนติเมตร)}} \quad \text{---(1)}$$

โดยต้นกระดุมทองเลื้อยจำนวน 200 ต้น มีจำนวนใบเฉลี่ยต้นละ 18 ใบและมีพื้นที่ใบเฉลี่ย 13.01 ตารางเซนติเมตร ส่วนต้นหลิวไต้หวันจำนวน 60

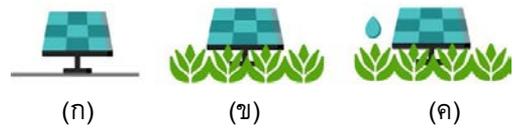
ต้น มีจำนวนใบเฉลี่ยต้นละ 698 ใบและมีพื้นที่ใบเฉลี่ย 1.22 ตารางเซนติเมตร

ในงานวิจัยนี้ศึกษาค่าความแตกต่างใน

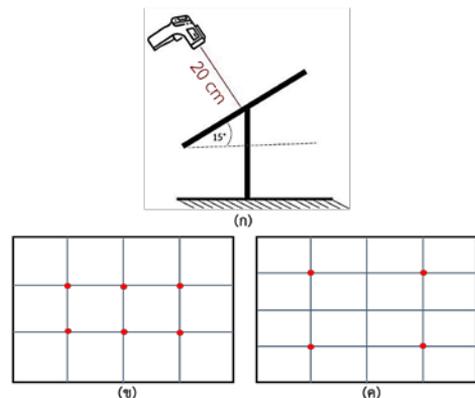
ทางสถิติอ้างอิงการวิเคราะห์ด้วย ANOVA (*post hoc* วิธี Tukey's HSD) เพื่อเลือกกลุ่มทดลองที่มีความสามารถในการลดอุณหภูมิอากาศบริเวณแปลงทดลองได้มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญเพื่อดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

หลังจากที่ได้ LAI และชนิดของพืชที่มีประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญแล้ว ผู้วิจัยออกแบบแบบจำลองโดยติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์กำลังการติดตั้ง 10 Wp ขนาด 26×36 เซนติเมตร แบ่งออกเป็น 3 แบบจำลองดังในภาพที่ 2 กำหนดหลังคาเขียวขนาด 1.58 ตารางเมตร โดยปลูกต้นพืชให้มีค่า LAI ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดอุณหภูมิและทำการรดน้ำ 2 ช่วงเวลา ในช่วงเวลา 08.00–16.00 น. (09.00 น. และ 14.00 น.) โดยการรดน้ำแต่ละครั้งจะใช้น้ำในการรด 4 ลิตรต่อหนึ่งพื้นที่ทดลอง (Nirutterug and Sreshthaputra, 2014) ทั้งนี้ การตรวจวัด อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่องมือ Infrared thermometer บริเวณบนและใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยถือเครื่องมือห่างจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะประมาณ 20 เซนติเมตร วัดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ด้านหน้าจำนวน 6 จุด และด้านหลังจำนวน 4 จุด แล้วนำมาเฉลี่ยเป็นค่าตัวแทนสำหรับอุณหภูมิมบนและใต้แผงในทุก ๆ แบบจำลอง ดังในภาพที่ 3 พร้อมทั้งตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือ Digital multimeter ต่อวงจรอนุกรมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ทุก ๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 08.00–16.00 น. ในช่วงระหว่างวันที่ 16 18 และ 23 มีนาคม 2564 เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำค่าที่ตรวจวัดได้มาคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ มาเปรียบเทียบระยะเวลาคืน

ทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัตราส่วนเงินลงทุนในการดำเนินงานต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีคูณกับค่าไฟฟ้า



ภาพที่ 2 แบบจำลองของการทดลอง (ก) แบบจำลองที่ 1 ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นคอนกรีต หรือ solar (control) (ข) แบบจำลองที่ 2 ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียว หรือ Solar+GR และ (ค) แบบจำลองที่ 3 ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียวร่วมกับการรดน้ำ หรือ Solar+GR+Watering



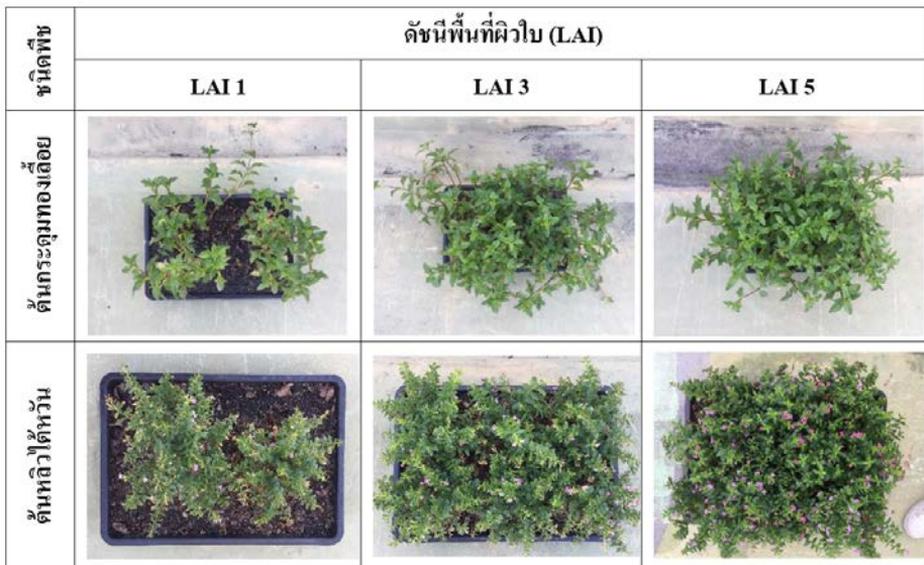
ภาพที่ 3 การวัดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่องมือ Infrared thermometer (ก) ระยะห่างการวัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ (ค) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

### ผลการทดลอง

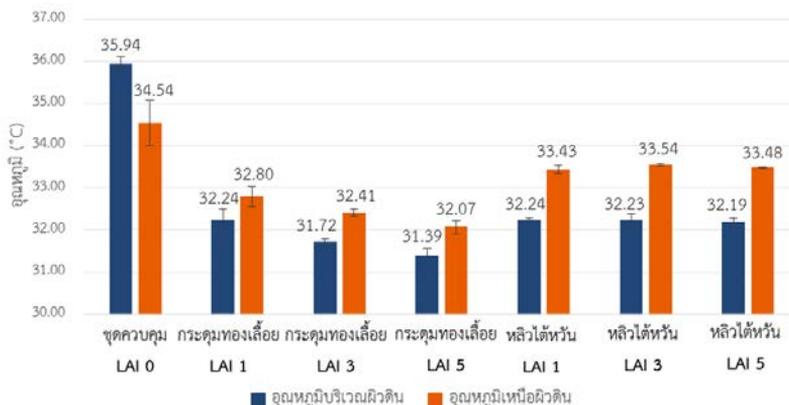
จากการทดลองศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิบริเวณแปลงทดลอง โดยแบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุดตามชนิดพืช ได้แก่

ต้นกระดุมทองเลื้อยและต้นหลิวใต้หวัน ตามลำดับ จากนั้นปลูกพืชแต่ละชนิดตามค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) แบ่งเป็น 3 กลุ่มทดลอง คือ 1.0 3.0 และ 5.0 ดังในภาพที่ 4 ผลการทดลองอุณหภูมิผิวดิน และเหนือผิวดินในภาพที่ 5 โดยทุกกลุ่มทดลองมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบริเวณผิวดินแตกต่างกันกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.000$ ) โดยในชุดทดลองของต้นกระดุมทองเลื้อย พบว่า กลุ่มทดลอง LAI 1 LAI 3 และ LAI 5 มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบริเวณผิวดินแตกต่างกัน ( $p \leq 0.015$ ) และ

กลุ่มทดลองกระดุมทองเลื้อย LAI 5 มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบริเวณผิวดินแตกต่างจากชุดควบคุมมากที่สุดเท่ากับ 2.99 องศาเซลเซียส อีกทั้งจากผลการทดลองวัดอุณหภูมิเหนือผิวดิน 15 เซนติเมตร พบว่า ทุกกลุ่มทดลองมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเหนือผิวดินแตกต่างกับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศ (ชุดควบคุม) ( $p \leq 0.002$ ) โดยกลุ่มทดลองของกระดุมทองเลื้อย LAI 5 มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเหนือผิวดินแตกต่างจากชุดควบคุมมากที่สุดเท่ากับ 2.48 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4 กลุ่มทดลองการศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบ



ภาพที่ 5 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบริเวณผิวดินและอุณหภูมิเหนือผิวดิน

การพิจารณากลุ่มทดลองที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลมาจากการลดอุณหภูมิด้วยหลังคาเขียวพบว่า กลุ่มทดลองกระดุมทองเลื้อย LAI 5 เป็นกลุ่มทดลองที่มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิทั้งสองบริเวณแตกต่างกันชุดควบคุมมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ชุดต้นกระดุมทองเลื้อยที่มีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) เท่ากับ 5.0 ในการศึกษาต่อไป ดังในภาพที่ 6 ทั้งนี้ จากการทดลองตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ตาราง 1) พบว่า แบบจำลองที่มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ Model 1 (Control) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ Model 2 ( $P_{\text{บนแผง}}=0.005$ ,  $P_{\text{ใต้แผง}}=0.009$ ) และ Model 3 ( $P_{\text{บนแผง}}=0.003$ ,  $P_{\text{ใต้แผง}}=0.006$ ) แต่เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของ Model 2 และ Model 3 พบว่า ไม่มีความแตกต่างกัน ( $P_{\text{บนแผง}}=0.838$ ,  $P_{\text{ใต้แผง}}=0.897$ ) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างอุณหภูมิ พบว่า Model 2 และ Model 3 สามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวด้านบนแผงเท่ากับ 9.03 และ 10.05 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และสามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวด้านใต้แผงเท่ากับ 4.63 และ 5.08 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model 1 (Control) อย่างไรก็ตาม Model 3 ที่มีการติดตั้งหลังคาเขียวเช่นเดียวกันมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันตลอดทั้งวัน โดยส่วนใหญ่อุณหภูมิของ Model 3 ต่ำกว่า เนื่องจากมีการรดน้ำหลังคาเขียวในระหว่างวัน ยกเว้นเวลา 11.00 น. ซึ่ง Model 3 มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (ตารางข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในข้อมูลเสริม (supplementary data))

เมื่อเริ่มต้นทดลองได้มีการทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง



ภาพที่ 6 แบบจำลองการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ตาราง 1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Model	อุณหภูมิบนแผง (°C)	อุณหภูมิใต้แผง (°C)
Model 1 Solar (Control)	43.40 (±1.98)	46.66 (±1.64)
Model 2 Solar + GR	34.37 (±2.42)	42.03 (±0.84)
Model 3 Solar + GR + Watering	33.35 (±2.03)	41.58 (±1.11)

GR หมายถึง Green Roof (หลังคาเขียว)

3 แผงที่ติดตั้งในสภาพอากาศเดียวกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพหลังการทดลอง ในการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยการตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากผลการทดลอง (ตาราง 2) พบว่า Model 2 และ Model 3 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นคอนกรีต (Model 1) คิดเป็นร้อยละ 1.36 และ 1.12 ตามลำดับ และเมื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ หลังการเปรียบเทียบกับข้อมูลประสิทธิภาพเริ่มต้น พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ของ Model 1 Model 2 และ Model 3 มีประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 15.91 16.14 และ 16.05 ตามลำดับ

**ตาราง 2** ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ต่อวัน

Model	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Wh)	ร้อยละประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์
Model 1 Solar (Control)	66.03 (±6.23)	15.91
Model 2 Solar + GR	66.93 (±6.41)	16.14
Model 3 Solar + GR + Watering	66.77 (±5.99)	16.05

GR หมายถึง Green Roof (หลังคาเขียว)

สำหรับการศึกษาระยะเวลาดำเนินทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จะเลือกใช้ดาดฟ้าอาคารของศูนย์การแพทย์กาญจนาภิเษก สังกัดคณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล เป็นสถานที่สำหรับการบริการรักษาผู้ป่วย ตรวจสุขภาพ การเรียนการสอนเชิงปฏิบัติการ และกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เลือกใช้เป็นพื้นที่ศึกษาเนื่องจากเป็นอาคารที่มีพื้นที่หลังคาเป็นดาดฟ้า สามารถรองรับน้ำหนักในการติดตั้งหลังคาเขียว และ

สามารถเข้าถึงข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าย้อนหลังได้ โดยมีรายละเอียดการติดตั้ง ดังนี้ 1) โครงการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาดฟ้า ขนาดกำลังติดตั้งสูงสุด 216 kWp โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด poly-crystalline silicon มีอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อนำไปใช้ในอาคาร รวมถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ภายในระบบ ระบบมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 25 ปี อ้างอิงข้อมูลราคาการติดตั้งจากผู้ติดตั้งระบบ คิตราคาประมาณการ 32,000 บาทต่อกิโลวัตต์ (กรณีติดตั้ง 200-499 กิโลวัตต์) และ 2) โครงการติดตั้งหลังคาเขียวขนาด 1,600 ตารางเมตร ชนิด extensive green roof ติดตั้งพร้อมระบบกันซึม ระบบระบายน้ำ และระบบน้ำ (sprinklers) โดยพืชที่ใช้ในการปลูกบนหลังคาเขียว คือ ต้นกระดุมทองเหลือง ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตให้คลุมเต็มพื้นที่ 6 เดือนขึ้นไป มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 40 ปี โดยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลการประเมินราคาการติดตั้งระบบหลังคาเขียวจากบริษัท ดีวันซิสเต็ม จำกัด

**ตาราง 3** ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

รายการ		รูปแบบการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์		
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
(A)	เงินลงทุน (บาท)	7,412,000.00	11,800,918.40	14,381,746.00
(B)	ค่าประมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อปี (kWh)	304,000.00	308,134.40	307,404.80
(C)	ค่าประมาณความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าที่ลดได้ต่อเดือน (kW)	195.00	197.65	197.18
(D)	อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/kWh)	4.1839	4.1839	4.1839
(E)	อัตราค่าความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (บาท/kW)	132.93	132.93	132.93
(F)	ค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ต่อปี (บาท) = (B×D)+[(C×E)*12]	1,582,961.80	1,604,486.89	1,600,684.59
ระยะเวลาคืนทุน = A/D		4.7 ปี	7.4 ปี	9.0 ปี

อ้างอิงอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ใช้ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ คิดอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (time of use rate : TOU) ในช่วง peak ที่มีแรงดัน 22-33 กิโลโวลต์

การศึกษาระยะเวลาดำเนินการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละกรณีสามารถแสดงผลการคำนวณดังในตาราง 3 ซึ่งไม่คำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าน้ำประปาและค่าไฟฟ้าในอนาคตพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีคำนวณโดยกรณีที่ 1 นำมาจากการคำนวณปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบจากโปรแกรม PVsyst และนำร้อยละที่เพิ่มขึ้นจากการผลิตไฟฟ้าของผลการทดลองก่อนหน้ามาคำนวณกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ซึ่งไม่คำนวณประสิทธิภาพที่ลดลงของเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วคำนวณระยะเวลาคืนทุน พบว่ากรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนตาดฟ้ามีระยะเวลาคืนทุน 4.7 ปี กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนตาดฟ้าร่วมกับหลังคาเขียวมีระยะเวลาคืนทุน 7.4 ปี และกรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนตาดฟ้าร่วมกับหลังคาเขียว (รดน้ำพืชระหว่างวัน) มีระยะเวลาคืนทุน 9.0 ปี

### อภิปรายผล

จากผลการศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบในพื้นที่หลังคาเขียวที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิบริเวณแปลงทดลอง สามารถอภิปรายได้ว่า กลุ่มทดลองที่มีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบสูงจะทำให้แปลงทดลองมีอุณหภูมิลดลงได้มากทั้งอุณหภูมิบริเวณผิวดินและอุณหภูมิเหนือผิวดิน เนื่องจากใบพืชมีส่วนช่วยป้องกันรังสีอาทิตย์ที่จะส่องลงมายังผิวดินเมื่อแปลงทดลองมีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบสูง ทำให้บริเวณดังกล่าวได้รับการปกคลุมของร่มเงาจากพุ่มใบมากและส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าลดลง โดยสามารถสังเกตได้จากพื้นดินเปล่า LAI 0 (ชุดควบคุม) ที่มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบริเวณผิวดิน เท่ากับ 34.74 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากกว่าทุกกลุ่มทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu (2006)

และ Kumar and Kaushik (2005) พบว่า ในเวลา กลางวันโดยเฉพาะช่วงที่มีรังสีอาทิตย์สูงสุด พื้นที่ ที่มีดัชนีพื้นที่ผิวใบมากจะสามารถให้ร่มเงา ช่วยลดอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ He *et al.* (2017) ศึกษาเกี่ยวกับ อิทธิพลของพืชที่มีผลต่ออุณหภูมิของหลังคาเขียว พบว่า พืชที่มีดัชนีพื้นที่ผิวใบสูงจะช่วยลดรังสีอาทิตย์ที่จะส่องลงไปยังผิวดิน และทำให้ ความผันผวนของช่วงและค่า heat flux ลดลง อีกทั้งลักษณะต้นพืชก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้อุณหภูมิเหนือผิวดินมีความแตกต่างกัน โดยพืชที่มีลำต้นสูงและความหนาแน่นพุ่มใบมาก จะทำให้มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเหนือผิวดินกับ อุณหภูมิอากาศมากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hardwick *et al.* (2015) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของดัชนีพื้นที่ผิวใบต่ออุณหภูมิผิวดินและอุณหภูมิอากาศ พบว่า อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิคือความสูงของพืช ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ คือ เมื่อค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบมาก จะมีการปกคลุมของพุ่มใบมาก ความร้อน จึงผ่านเข้าไปได้น้อยลง และยิ่งต้นพืชสูงจะเกิดการผสมอากาศในแนวตั้ง (vertical mixing) น้อย ส่งผลให้อากาศใกล้ผิวดินสามารถรักษาอุณหภูมียืนไว้ได้ ในขณะที่เดียวกันพื้นที่ที่มีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบต่ำและต้นพืชเตี้ย ความร้อนผ่านเข้าไปได้มากกว่า จึงมีการแปรปรวนของอากาศใกล้ผิวดิน และเกิดการผสมของอากาศในแนวตั้งมากกว่า ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิเหนือผิวดินสูงขึ้น

จากผลการศึกษาอุณหภูมิพื้นที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งร่วมกับหลังคาเขียวจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าและด้านใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าการติดตั้ง

บนพื้นคอนกรีต เนื่องจากพืชในหลังคาเขียวมีส่วนช่วยในการลดอุณหภูมิอากาศด้านใต้แผงจากการสร้างร่มเงา (shading) และการคายระเหย (evapotranspiration) สามารถอธิบายได้ว่า รังสีอาทิตย์บางส่วนถูกพืชดูดซับเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และส่วนที่เหลือสะท้อนออกสู่อากาศ โดยการดูดซับรังสีอาทิตย์ของพืชทำให้รังสีสะท้อนออกสู่อากาศลดน้อยลง อากาศด้านใต้แผงเย็นลง และเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับอากาศใต้ดิน อีกทั้งยังมีกลไกการคายระเหยของหลังคาเขียวซึ่งได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ความชื้นต่ำและลมที่พัดผ่านจึงเกิดการคายน้ำออกสู่อากาศเป็นผลให้อุณหภูมิอากาศบริเวณโดยรอบเย็นลงและส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำลง ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นคอนกรีตจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากได้รับรังสีอาทิตย์ทั้งจากดวงอาทิตย์โดยตรงเข้าสู่ด้านบนแผง และรังสีสะท้อนจากพื้นคอนกรีตเข้าสู่ด้านใต้แผง ทำให้ได้รับและสะสมความร้อนภายในแผงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tan and Sia (2005) พบว่า เมื่อมีการติดตั้งหลังคาเขียวช่วยลดการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ได้ร้อยละ 32–50 และลดระดับความสว่างได้ร้อยละ 12–56 ซึ่งช่วยลดปัญหาแสงสะท้อนจากดาวฟ้าสู่อาคารโดยรอบ และนอกจากนั้นยังช่วยลดอุณหภูมิอากาศบริเวณดาวฟ้าได้ 1.7–3.0 องศาเซลเซียส และงานวิจัยของ Takebayashi and Moriyama (2007) ศึกษาเกี่ยวกับการลดปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง พบว่า หลังคาเขียวมีค่าการสะท้อนน้อยกว่าพื้นคอนกรีต แม้ว่าจะมีค่ารังสีอาทิตย์สุทธิ (net radiation) มากที่สุด เนื่องจากความร้อนส่วนใหญ่ที่พืชดูดซับถูกนำไปใช้ในการ

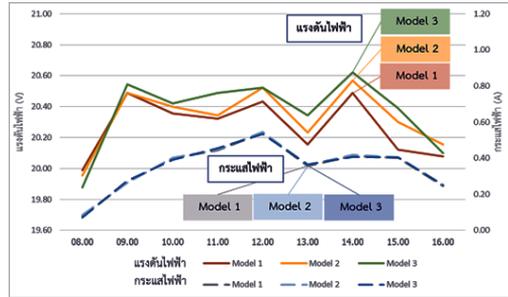
ระเหย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhu *et al.* (2008) ซึ่งอธิบายว่า รังสีอาทิตย์จะถูกพืชดูดซับเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และบางส่วนสะท้อนกลับสู่อากาศ ซึ่งส่วนที่พืชดูดซับไว้ได้จะถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและสูญเสียระหว่างการดำรงชีวิตของพืช

จากการทดลองตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ตลอดช่วงเวลาการทดลองของ Model 3 ซึ่งมีการรดน้ำหลังคาเขียวระหว่างวัน (09.00 น. และ 14.00 น.) หลังจากการรดน้ำช่วงเช้าในช่วงเวลา 11.00 น. Model 3 มีอุณหภูมิสูงกว่า Model 2 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อรดน้ำพืชน้ำที่เกาะบริเวณลำต้นและผิวใบจะเกิดการระเหยโดยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้แก่ ความร้อนจากบรรยากาศ พื้นผิว และพลังงานหลักสำหรับการระเหย คือ การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ นอกจากนั้นการเคลื่อนที่ของอากาศหรือลมยังเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำที่ระเหย ทำให้กระบวนการระเหยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Kositsakulchai, 2009) ซึ่งจากการทดลองช่วงเช้าจะมีค่ารังสีอาทิตย์สูง ทำให้น้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านใต้แผง อีกทั้งในช่วงเช้ามืดมีความเร็วลมต่ำเกิดการถ่ายเทอากาศใต้แผงได้น้อย ส่งผลให้บริเวณใต้แผงมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าหลังคาเขียวที่ไม่มีการรดน้ำระหว่างวัน ในทางกลับกันในช่วงบ่ายมีค่ารังสีอาทิตย์ต่ำกว่า มีความเร็วลมสูงและมีลมพัดสม่ำเสมอทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศบริเวณใต้แผงจึงไม่ส่งผลให้อุณหภูมิใต้แผงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับช่วงเช้า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kazem and Chaichan (2005) และ Mekhilef *et al.* (2012) พบว่า ความเร็วลมมีอิทธิพลให้อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลง โดยการ

บังคับให้เกิดการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นและส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น

การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลอง พบว่าการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นคอนกรีตและการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเขียวทำให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างเห็นได้ชัด จากภาพที่ 7 อุณหภูมิที่แตกต่างกันของเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาเขียว (Model 2 และ 3) มีค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นคอนกรีต (Model 1) ในขณะที่ค่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดย Tur *et al.* (2018) ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าอุณหภูมิแปรผกผันกับกำลังการผลิต เมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟาลดลง และงานวิจัยของ Cuce *et al.* (2013) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลง เนื่องจากความต้านทานอนุกรมลดลง นอกจากนั้น Fesharaki *et al.* (2011) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ รังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ พบว่า ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิแผงเพิ่มสูงขึ้น

แม้ว่า Model 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำที่สุด แต่เมื่อคำนวณพลังงานที่ผลิตได้ พบว่า มีค่าน้อยกว่า Model 2 ซึ่งมีข้อ



ภาพที่ 7 ค่าเฉลี่ยทางไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ระหว่างการทดลอง

สันนิษฐานว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วระหว่างวัน อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการศึกษาระยะเวลาดำเนินการของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นที่ศึกษาจาก 3 กรณี พบว่า แม้ว่าการติดตั้งร่วมกับหลังคาเขียวมีระยะเวลาคืนทุนนานกว่า แต่หลังคาเขียวมีการใช้งานยาวนานถึง 40–55 ปี (Shafique *et al.*, 2018) อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารให้เย็นลงและลดภาระค่าใช้จ่ายด้านระบบปรับและระบายอากาศ (HVAC system) ได้ร้อยละ 23–35 จากงานวิจัยของ Mahmoud *et al.* (2017) และ Ebadati and Ehyaei (2020) ศึกษาในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้น พบว่า การติดตั้งหลังคาเขียวสามารถลดการใช้พลังงานของระบบทำความเย็นได้ร้อยละ 35 และ 23 ตามลำดับ อีกทั้งในงานวิจัยของ Ran and Tang (2017) พบว่า หลังคาเขียวสามารถลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 26.7 หากพิจารณาภาระค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้จากระบบปรับและระบายอากาศร่วมกับการคำนวณระยะเวลาคืนทุนข้างต้น ช่วยลดระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับหลังคาเขียวได้เร็วขึ้น นอกจากนี้หลังคาเขียวยังให้ประโยชน์ในด้าน

อื่น ๆ เช่น ลดการไหลบ่าของน้ำฝนจากหลังคา ลดเสียงรบกวนจากภายนอกอาคาร ดูดซับมลพิษทางอากาศ สร้างระบบนิเวศขนาดเล็ก ลดเกาะความร้อนเมือง และเพิ่มพื้นที่สีเขียว ซึ่งเป็นการเพิ่มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเป็นแหล่งผลิตแก๊สออกซิเจนให้แก่เมือง (Shafique *et al.*, 2018)

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป ดังนี้ 1) ควรศึกษาร่วมกับความสามารถของหลังคาเขียวในการลดอุณหภูมิภายในอาคารและการประหยัดค่าไฟฟ้าจากระบบทำความเย็น จะช่วยลดระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับหลังคาเขียวได้เร็วขึ้น 2) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความถี่ในการรดน้ำระหว่างวันที่มีผลต่อแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์และศึกษาร่วมกับประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 3) ควรศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับความผันผวนของอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และ 4) เพิ่มขนาดแบบจำลองเพื่อให้เห็นความแตกต่างของแต่ละกลุ่มทดลองได้อย่างชัดเจน ทั้งการลดอุณหภูมิของหลังคาเขียว และการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

#### เอกสารอ้างอิง

Cuce, E., Cuce, P. M., and Bali, T. (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. **Applied Energy** 111: 374–382.

Ebadati, M., and Ehyaei, M. A. (2020). Reduction of energy consumption in residential

buildings with green roofs in three different climates of Iran. **Advances in Building Energy Research** 14(1): 66–93.

Electricity Generating Authority of Thailand. Proportion of fuel consumption for electricity generation in the EGAT system in 2020. Retrieved from [https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=arTicle&id=2455&Itemid=116&fbclid=IwAR0p92xUWL3DueVil2NMSTMdA24Occl1a7vesjAwOvBFT82d0d3f3ghXVHM](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=arTicle&id=2455&Itemid=116&fbclid=IwAR0p92xUWL3DueVil2NMSTMdA24Occl1a7vesjAwOvBFT82d0d3f3ghXVHM), September 4, 2020. (in Thai)

Fesharaki, V. J., Dehghani, M., Fesharaki, J. J., and Tavasoli, H. (2011). The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency. **Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation–ETEC** (pp. 20–21). Tehran, Iran.

Hardwick, S. R., Toumi, R., Pfeifer, M., Turner, E. C., Nilus, R., and Ewers, R. M. (2015). The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. **Agricultural and Forest Meteorology** 201: 187–195.

He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., and Zheng, S. (2017). Influence of plant and soil layer on energy balance and thermal performance of green roof system. **Energy** 141: 1285–1299.

Kazem, H. A., and Chaichan, M. T. (2015). Effect of humidity on photovoltaic perfor-

- mance based on experimental study. **International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)** 10(23): 43572–43577.
- Khieowichai, C., and Pagamas, P. (2014). Selection of plant species and substrates for green roof planting. **KHON KAEN AGR** 42(3): 462–467.
- Kositsakulchai, E. (2009). **Crop Evapotranspiration Theory and Applications**. Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom: Kasetsart University. (in Thai)
- Kumar, R., and Kaushik, S. C. (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. **Building and environment** 40(11): 1505–1511.
- Mahmoud, A. S., Asif, M., Hassanain, M. A., Babsail, M. O., and Sanni-Anibire, M. O. (2017). Energy and economic evaluation of green roofs for residential buildings in hot-humid climates. **Buildings** 7(2): 30.
- Mekhilef, S., Saidur, R., and Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 16(5): 2920–2925.
- Nirutterug, S., and Sreshthaputra, A. (2014). Efficiency of evaporative cooling system: the case study of green roof. **Built Environment Inquiry** 13(1): 76–83.
- Ran, J., and Tang, M. (2017). Effect of green roofs combined with ventilation on indoor cooling and energy consumption. **Energy Procedia** 141: 260–266.
- Shafique, M., Kim, R., and Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 90: 757–773.
- Takebayashi, H., and Moriyama, M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. **Building and Environment** 42(8): 2971–2979.
- Tan, P. Y., and Sia, A. (2005). A pilot green roof research project in Singapore. **Proceedings of Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show**. Washington, DC.
- Tokeeree, Y. (2011). **The Suitable Local Plant Species to Develop Green Roof Technology for Environmental Conservation**. Surin: Faculty of Science and Technology Surindra Rajabhat University. (in Thai)
- Tur, M.R., Colak, I., and Bayindir, R. (2018). Effect of faults in solar panels on production rate and efficiency. **2018 International Conference on Smart Grid (ic SmartGrid)** (pp. 287–293). Nagasaki: IEEE.
- Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C.,

Bustamante, W., Victorero, F., Gironás, J., and Bonilla, C.A. (2017). Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. **Energy and Buildings** 146: 312–321.

Yeonyup, S. and Pajjaruang, S. (2012). **Attitudes toward green roof building and construction in Chiang Mai**. Faculty of Engineering, Chiang Mai University.

Yu, C. (2006). **The Intervention of Plants in the Conflicts between Buildings and Climate – A Case Study in Singapore**. Retrieved from <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/15511>, September 4, 2020.

Zhu, X. G., Long, S. P., and Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? **Current Opinion in Biotechnology** 19(2): 153–159.

บทความนี้มีข้อมูลเสริม (supplementary data)  
อยู่บนเว็บไซต์ของวารสาร ได้แก่ การวิเคราะห์  
ข้อมูลทางสถิติของงานวิจัยนี้