



การวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลังงานและแสงสว่างของบานเกล็ด เซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งแสงที่ติดตั้งร่วมกับอาคาร

The Analysis of Energy and Luminance Properties of Semi-transparent Building integrated Photovoltaic Window Louvers

Phetdavanh Ladthavong, สราวุธ พลวงษ์ศรี สุลักษณา มงคล และ อัครินทร์ อินทนิเวศน์*

Phetdavanh Ladthavong, Sarawut Polvongsri, Sulaksana Mongkon and Akarin Intaniwet*

หน่วยงานวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Smart Energy and Environmental Research Unit, School of Renewable Energy,

Maejo University, 50290, Thailand

*E-mail: a.intaniwet@hotmail.co.th, Tel.: 088-2687904

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสร้างและใช้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารทดลอง หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ 2-4 เซลล์ต่อหนึ่งบานเกล็ด ซึ่งจำนวนเซลล์ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้พื้นที่รับแสงและพื้นที่โปร่งแสงของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกัน การทดสอบจะทำการปรับมุมบานเกล็ด (วัดเทียบกับพื้นราบ) ที่ 0° (เปิดบานเกล็ดทั้งหมด) 18° (เปิดบานเกล็ดบางส่วน) และ 90° (ปิดบานเกล็ดทั้งหมด) จากนั้นทำการศึกษาคูสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้า และความสามารถในการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งศึกษาปริมาณความสว่างภายในห้องทดสอบ จากการศึกษาพบว่าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 5-7% โดยบานเกล็ดที่ 3 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมในหนึ่งวันได้สูงสุดเท่ากับ 0.3-0.356 kWh โดยมุมของบานเกล็ดที่ 90° เป็นมุมที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุด เมื่อพิจารณาความร้อนจากการระบายอากาศของห้องทดสอบ (Q_{vent}) พบว่าที่มุม 0° สามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุด โดยที่มุม 90° มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร (Q_{cover}) และค่าความร้อนภายในห้อง ($Q_{i,room}$) ต่ำสุด เมื่อพิจารณาผลการส่องสว่างภายในอาคารพบว่ามุมบานเกล็ดทั้งสามมุมจะให้ค่าการส่องสว่างภายในที่สูงกว่าค่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่ 500 Lux

คำสำคัญ: บานเกล็ด; เซลล์แสงอาทิตย์; ประสิทธิภาพ; การระบายอากาศ; การระบายความร้อน

ABSTRACT

This work studied the production and utilization of PV window louvers which were integrated on to a building. Each louver contains 2 3 and 4 solar cells where a different cell number resulted in a different transparent and opaque area. The angle of the louver was adjusted to be 0° (fully open) 18° (partially open) and 90° (fully closed) from horizontal plane. The comparison was made for each louver performance in terms of the electrical properties, the ability to ventilate air as well as the luminance level inside the building. It was found that the PV window louver conversion efficiency was varied between 5-7%. The maximum electrical energy production of 0.3-0.356 kWh was obtained when each louver contains 4 solar cells. The optimum louver angle for the electrical energy production was found to be at 90°. It was seen that at the angle of 0° the heat from the room can be ventilated at a maximum rate. It was demonstrated that the heat passing through (Q_{cover}) and the heat inside the building ($Q_{i,room}$) was lowest when the louver was positioned at 90°. The internal luminance level was measured to be higher than 500 Lux, which was the standard luminance requirement for office building, for all louver angles.

Keywords: Louvers; solar cells; Efficiency; Air ventilation; Heat transfer

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อพิจารณาจากสถิติการใช้พลังงานจากสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ International Energy Agency (IEA) พบว่า การใช้พลังงานของโลกจากปี 1990 ถึง 2007 เพิ่มขึ้นเกือบ 40% และจะยังคงเพิ่มขึ้นอีก 8-10% ในทุก ๆ 5 ปีจนถึงปี 2035 [1] ซึ่งในทั่วโลกอาคารที่ใช้พลังงานเกือบ 40% เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และพลังงานที่ใช้ในด้านอื่น ๆ เพิ่มขึ้นมากกว่า 50% [2, 3] วิธีหนึ่งในลดการใช้พลังงานในอาคารคือ การใช้วัสดุสร้างอาคารที่ช่วยให้อาคารมีความต้องการใช้การใช้พลังงานลดลง (อาคารประหยัดพลังงาน) และการปรับปรุงอาคารให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ในอาคารสมัยใหม่หน้าต่างมีบทบาทสำคัญในการประหยัดพลังงานโดยคำนึงถึงภาระความร้อน ความเย็น และแสงสว่างภายในอาคาร โดยในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าและทำวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบหน้าต่างให้มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในอาคารอย่างแพร่หลาย [4-8]

หน้าต่างเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอาคารที่เป็นช่องเปิดสามารถระบายความร้อน ซึ่งเป็นการถ่ายเทอากาศแบบธรรมชาติช่วยให้ผู้อยู่อาศัยหายใจได้สะดวกสบาย

ซึ่งค่าใช้จ่ายพลังงานของอาคารที่มีการระบายอากาศตามธรรมชาติมักจะต่ำกว่าอาคารปรับอากาศถึง 40% [9] นอกจากนั้นอาคารที่มีหน้าต่างยังสามารถให้แสงสว่างจากธรรมชาติส่องเข้ามาสู่ตัวอาคาร และสามารถลดการใช้แสงจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้แสงสว่างได้ [6] หน้าต่างที่ใช้ติดตั้งกับอาคารประกอบมีหลายประเภทเช่น หน้าต่างช่องเปิดทั่วไป และหน้าต่างบานเกล็ด ซึ่งในปัจจุบันหน้าต่างบานเกล็ดได้รับความนิยมติดตั้งในบ้านพักที่อยู่อาศัย และอาคารสำนักงานอย่างแพร่หลาย เป็นหน้าต่างที่มีความสวยงามและยังมีกลไกในการปรับมุมเพื่อรับอากาศได้ตามความต้องการ ทำให้หน้าต่างบานเกล็ดมีความเหมาะสมในการทำงานสำหรับอาคารที่ต้องการให้มีการระบายอากาศพร้อมๆ กับการรับแสงตามธรรมชาติ

อาคารส่วนมากในปัจจุบันใช้พลังงานหลักคือพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะที่ใช้กับอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ทำให้มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพลังงานที่สูง [3] ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการใช้พลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยเพื่อที่จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยตรงโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นแล้วกระบวนการผลิตไฟฟ้ายังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้

ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งเป็นจำนวนมาก โดยอาจจะเป็นการติดตั้งบนพื้น หรือติดตั้งบนหลังคา แต่ในอีกแนวทางหนึ่งคือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร โดยมีข้อดีคือเป็นการประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และยังเป็นการใช้พื้นที่ว่างเปล่าของอาคารให้เป็นประโยชน์สูงสุดอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนส่วนประกอบของอาคาร (Building Attached Photovoltaic : BAPV) โดยจะเป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา หรือผนังของอาคาร ลักษณะที่สองคือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร (Building Integrated Photovoltaic : BIPV) [10] โดยจะเป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทนที่ส่วนประกอบของอาคารเช่น หลังคา หรือหน้าต่าง โดยการติดตั้งทั้งสองแบบนี้จะสามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร แต่การติดตั้งในรูปแบบที่สองนั้นยังสามารถที่จะใช้ประโยชน์จากแสงสว่างตามธรรมชาติบางส่วนที่เข้ามาสู่อาคารได้

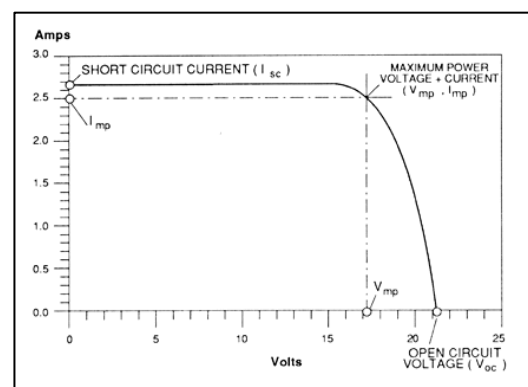
นอกจากนั้นแล้วอาคารบางแห่งยังมีความต้องการที่จะใช้การระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยหน้าต่างของอาคาร ทำให้ต้องมีารติดตั้งบานเกล็ดระบายอากาศแทนที่กระจกแบบปิดถาวร โดยมุมของบานเกล็ดสามารถปรับได้ตามความต้องการในการระบายอากาศของอาคารนั้น ๆ การทดสอบการใช้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคเหนือยังไม่ปรากฏแพร่หลาย นอกจากนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของการปรับมุมบานเกล็ดที่มีต่อผลด้านพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ การระบายอากาศและความสว่างภายในอาคารทดลองก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการที่จะสร้าง และติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาจะมีระยะห่างระหว่างเซลล์ที่แตกต่างกันไปโดยมีจำนวนเซลล์ระหว่าง 2-4 เซลล์ต่อหนึ่งบานเกล็ด จากนั้นทำการทดสอบการปรับมุมบานเกล็ด 3 มุม คือมุม 0°, 18° และ 90° โดยมุมบานเกล็ดจะเป็นมุมที่

วัดเทียบกับพื้นโลก เพื่อศึกษาผลของการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การระบายอากาศภายในอาคารจากการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ด และปริมาณแสงสว่างจากธรรมชาติที่ส่องผ่านเข้ามาสู่อาคาร เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารที่จะสามารถช่วยลดการใช้ไฟฟ้าให้กับอาคารลดการระบายอากาศแบบทางกล ลดการใช้แสงสว่างจากหลอดไฟฟ้า และช่วยให้อาคารลดค่าใช้จ่ายจากพลังงานในรูปแบบเดิม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเก็บข้อมูล เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ ซึ่งได้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นสามส่วน คือ การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า การระบายอากาศ และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติ

การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถทำได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Current-voltage characteristic) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 1 ทำการวัดในช่วงที่มีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ จากกราฟจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด (V_{oc}) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_m) ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นมาได้ จากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ได้โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

$$P_m = I_m \times V_m \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_m}{I_G \times A} \quad (2)$$

โดยค่า I_G คือค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบ (W/m^2) และ A คือพื้นที่รับแสง (m^2)

การระบายอากาศในอาคารเป็นสิ่งสำคัญไม่ว่าจะเป็นการระบายอากาศทางกลหรือแบบธรรมชาติ ซึ่งอาคารแต่ละประเภทจำเป็นต้องมีการระบายอากาศเพื่อทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในห้อง ทำให้อากาศไหลออกไปแล้วอากาศบริสุทธิ์ไหลเข้ามาแทน [12, 13] การระบายอากาศแบบธรรมชาติจำเป็นต้องอาศัยลมเพื่อเป็นตัวเคลื่อนย้ายอากาศ การระบายอากาศในอาคารสามารถเกิดขึ้นได้โดย 2 ปัจจัย ได้แก่ การระบายอากาศโดยอาศัยความเร็วลมที่พัดเข้าสู่อาคาร และการระบายอากาศโดยอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ ซึ่งมีผลมาจากผลต่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในอาคาร อาจเป็นเพราะการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างลมและอาคาร สำหรับอาคารที่มีช่องเปิดด้านข้างสองด้าน สามารถหาอัตราการระบายอากาศได้ดังนี้ [14-16]

$$G = \frac{S}{2} C_d \left[2g \left(\frac{\Delta T}{T_{amb}} \right) \left(\frac{H}{2} \right) + C_w v^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

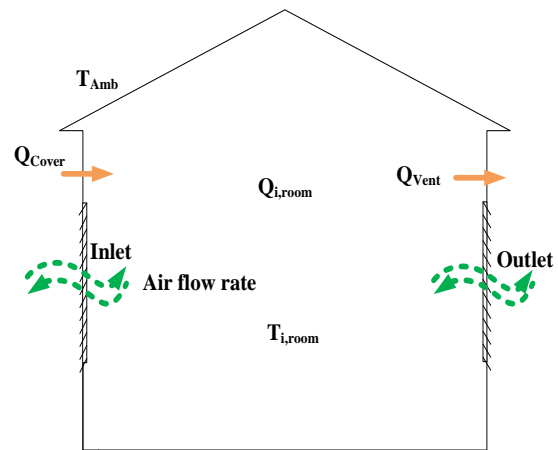
เมื่อ G คืออัตราการระบายอากาศ (m^3/s) S คือพื้นที่ช่องเปิดของการระบายอากาศ (m^2) C_d คือ Discharge Coefficient (ค่าคงที่ = 0.75) g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ($9.81 m/s^2$) ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิด้านในและด้านนอกห้องทดสอบ ($^{\circ}C$) T_{amb} คืออุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$) H คือ ระยะความสูงระหว่างช่องอากาศเข้าและออก (m) C_w คือ Wind Effect Coefficient (0.023) และ v คือ อัตราเร็วลมที่เข้ามาภายในอาคาร (m/s)

การระบายอากาศแบบธรรมชาติพื้นที่ช่องเปิดเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้ลมเข้า-ออกได้สะดวก ในการออกแบบช่องเปิดควรคำนึงถึงทิศที่จะติดตั้งช่องเปิดซึ่งจะมีผลต่อการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และทิศทางลม

เพื่อให้เกิดการระบายอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งพื้นที่ช่องเปิดจะคำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (Window to Wall Ratio : WWR) โดยอาคารทั่วไปจะมีอัตราส่วนที่เหมาะสมในช่วงประมาณ 20-30% [17] ดังแสดงในสมการที่ 4

$$WWR = \frac{\text{Window area}}{\text{Wall area}} \times 100 \quad (4)$$

การระบายอากาศแบบธรรมชาติเป็นวิธีหนึ่งที่น่าิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถช่วยให้อากาศภายในห้องถ่ายเทออกไปยังภายนอกห้องได้ ซึ่งเมื่อมีการถ่ายเทอากาศ ก็จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นไปพร้อมกัน โดยความร้อนภายในห้อง ($Q_{i,room}$, W) สามารถหาได้จากสมดุลพลังงานของห้องตามรูปที่ 2 [18] ซึ่งจะเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร (Q_{co} , W) ความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศ (Q_{vent} , W) และความร้อนเนื่องจากการรั่วของอากาศ ($Q_{infiltration}$, W) แต่เนื่องจากการรั่วของอากาศมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการไหลของอากาศผ่านช่องเปิด จึงตัดเทอมความร้อนเนื่องจากการรั่วของอากาศทิ้ง



รูปที่ 2 สมดุลพลังงานความร้อนของห้องทดลอง

ดังนั้นสมดุลพลังงานความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 5 [19]

$$Q_{i,room} = Q_{co} - Q_{vent} \quad (5)$$

ความร้อนที่ผ่านกรอบของห้องทดสอบเป็นความร้อนที่ผ่านเข้าทางผนังและหลังคาในทิศทางต่าง ๆ หาได้จากสมการ

$$Q_{co} = UA(TD_{eq}) \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{\Sigma R} \quad (7)$$

$$\Sigma R = R_0 + \frac{\Delta x}{k} + R_i \quad (8)$$

$$TD_{eq} = T_{sol} - T_{i,room} \quad (9)$$

$$T_{sol} = T_{amb} + \left(\frac{\alpha I_T}{h_{out}} \right) - \left(\frac{\epsilon I_r}{h_{out}} \right) \quad (10)$$

เมื่อ U คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ($W/m^2 K$) A คือพื้นที่ของผนัง (m^2) R_0 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านนอก R_i สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านใน Δx คือค่าความหนาของผนัง (m) k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนัง ($W/m^2 K$) [20] TD_{eq} คือค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ($^{\circ}C$) α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของวัสดุกรอบอาคาร (0.7) ϵ คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุมีค่าเท่ากับ 1 I_T คือค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นรับรังสี (W/m^2) I_r คือค่าความแตกต่างระหว่างรังสีคลื่นยาวที่ตกกระทบบนผิวจากท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อมเท่ากับ ($63 W/m^2$) h_{out} ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสำหรับพื้นผิวภายนอก ($W/m^2 K$) [21]

ความร้อนจากการระบายอากาศของห้องทดสอบหาได้จากสมการ

$$Q_{ve} = 0.5 \times V_{room} \times N (T_{i,room} - T_{amb}) \quad (11)$$

$$N = \frac{G}{V_{room}} \quad (12)$$

$$\rho = 360.77819 \times T_{i,room}^{-1.00336} \quad (13)$$

$$M = \rho \times V_{room} \quad (14)$$

$$C_p = 0.9557 + (0.000037 \times T_{i,room}) \quad (15)$$

เมื่อ M คือ มวลของอากาศแห้งภายในห้อง (kg) C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งภายในห้อง ($J/kg-K$) ρ ความหนาแน่นของอากาศภายในห้องทดสอบ (Kg/m^3) N คือ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate, s^{-1}) V_{room} คือ ปริมาตรห้องทดสอบ (m^3) T_{amb} และ $T_{i,room}$ คือ อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิภายในห้อง ($^{\circ}C$) ตามลำดับ โดยที่ถ้า อุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม อากาศภายในห้องจะระบายออกสู่ภายนอก แต่กลับกันถ้าอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิภายในห้อง ความร้อนภายนอกจะเข้ามาสู่ภายในอาคาร

แสงสว่างเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอาคารหรือบ้านพัก เป็นส่วนสำคัญในการอยู่อาศัยที่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นในการสร้างอาคาร หรือที่อยู่อาศัย จำเป็นต้องมีการออกแบบให้การส่องสว่างภายใน (Internal luminance, Lux) มีความเหมาะสมกับพื้นที่การใช้งานต่าง ๆ แสงสว่างภายในจะต้องมีค่าไม่มาก หรือน้อยจนเกินไป เนื่องจากจะทำให้เกิดความไม่สบายในการใช้งานพื้นที่เหล่านั้น การส่องสว่างของอาคารสำนักงานมีมาตรฐานระดับสากลที่ นิยมใช้อยู่ 2 มาตรฐานคือ CIE (Commission Internationale de L'eclairage) และ IES (International Commission on Illumination) [22] ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยการส่องสว่างที่เหมาะสมของแต่ละพื้นที่ โดยแสงสว่างนี้อาจจะมาจากธรรมชาติ หรือมาจากแสงประดิษฐ์ หรือมาจากทั้งสองแหล่งรวมกัน การใช้แสงสว่างจากแสงประดิษฐ์มีข้อดีคือสามารถที่จะควบคุมระดับความส่องสว่างให้มีค่าคงที่ได้จากการใช้อุปกรณ์ส่องสว่างตามที่ได้ออกแบบมา แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การใช้แสงสว่างจากธรรมชาติจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยลดการใช้แสงจากอุปกรณ์การส่องสว่างลง และทำให้เกิดการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง ตารางที่ 1 แสดงค่ามาตรฐานความส่องสว่างของแต่ละพื้นที่ใช้สอยตามมาตรฐาน CIE และ IES โดยงานวิจัยนี้จะอ้างอิงระดับการส่องสว่างของอาคารสำนักงานที่ 500 Lux

ตารางที่ 1 มาตรฐานความส่องสว่างของ CIE และ IES [22]

Area	CIE (LUX)	IES (LUX)
ห้องประชุม	500	300
ห้องทำงาน และ ห้องคอมพิวเตอร์		
ห้องเก็บของ	150	150
ห้องน้ำ	150	150
โถงทางเดิน	100	150
ทางบันได	150	150
ลิฟท์	150	150

การพิจารณาค่าความส่องสว่างภายในอาคารจะสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงจากธรรมชาติภายนอกอาคาร กับปริมาณแสงภายในอาคาร ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Daylight Factor Method (DF) เป็นวิธีที่กำหนดขึ้นจากอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างความส่องสว่างภายในอาคาร (E_i) ต่อความส่องสว่างภายนอกอาคาร (E_o) แสดงได้ดังสมการที่ 16

$$DF(\%) = \frac{E_i}{E_o} \times 100 \quad (16)$$

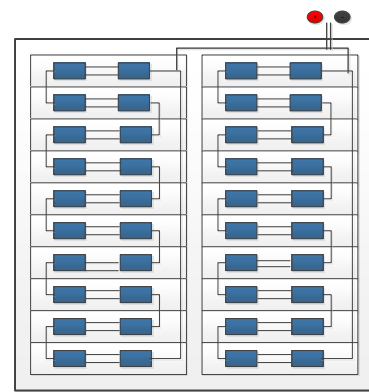
3. วิธีการศึกษา

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการสร้างห้องทดลองสร้างและประกอบแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ลักษณะต่าง ๆ จากนั้นทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

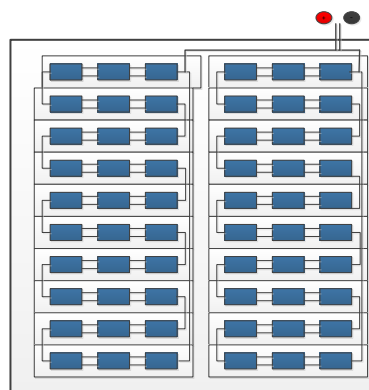
ในการสร้างห้องทดลองได้ใช้ห้องขนาดความกว้างเท่ากับ 2.28 m ยาว 3.24 m สูง 2 m และหลังคาเป็นทรงหน้าจั่วมุม 18° จั่วหลังคายาว 3.80 m ผนังและหลังคาทำด้วยแผ่นเมทัลชีทติดฉนวนกันความร้อน มีหน้าต่างสองด้านทางทิศเหนือและทิศใต้ มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังอาคาร (WWR) เท่ากับ 23.68% ลักษณะของอาคารจำลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ห้องที่ใช้ในการทดลอง



(A)



(B)

รูปที่ 4 หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ (A) 2 เซลล์ (B) 3 เซลล์ และ (C) 4 เซลล์



(C)

รูปที่ 4 (ต่อ) หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ (A) 2 เซลล์ (B) 3 เซลล์ และ (C) 4 เซลล์

สำหรับการสร้างและประกอบแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบผลึกรวม ยี่ห้อ ML solar โดย 1 เซลล์มีความกว้าง 7.62 cm ยาว 15.24 cm กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อเซลล์เท่ากับ 1.8 W โดย 1 แผงบานเกล็ดจะทำการวางเซลล์จำนวน 2, 3 และ 4 เซลล์ต่อ 1 แผงบานเกล็ด โดยทำการสร้างจำนวนทั้งหมด 3 บานเกล็ด (บานเกล็ด 1 บานเกล็ด 2 และ บานเกล็ด 3) มีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 40, 60 และ 80 เซลล์ตามลำดับ ซึ่งแต่ละเซลล์จะทำการต่อกันแบบอนุกรม จากนั้นวางชุดเซลล์เข้ากับกระจกใส แล้วนำมาประกอบเป็นแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของพื้นที่รับแสง และโปร่งแสงของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 2 ลักษณะบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง

ชนิดบานเกล็ด	จำนวนเซลล์	พื้นที่เซลล์ (m ²)	พื้นที่โปร่งแสง (m ²)
บานเกล็ด 1	40	0.464	0.615
บานเกล็ด 2	60	0.696	0.383
บานเกล็ด 3	80	0.928	0.150

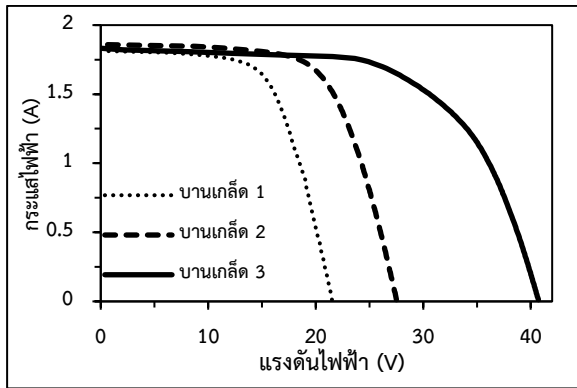
หลังจากประกอบบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์แล้วเสร็จ ก็ทำการติดตั้งตัวบานเกล็ดเข้ากับห้องทดสอบ (รูปที่ 6) โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติด้านไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์

แสงอาทิตย์ทั้งสามแผงที่มุมรับแสง 0° (เปิดบานเกล็ดทั้งหมด) 18° (เปิดบานเกล็ดบางส่วน) และ 90° (ปิดบานเกล็ดทั้งหมด) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Prova 210) ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบจะวัดจากหัววัดความเข้มแสงอาทิตย์แบบซิลิกอน (SP-421-SS SDI-12 Digital Silicon-cell Pyranometer, Apogee instruments) ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger Adam 5000/TCP) อุณหภูมิภายในห้องวัดจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger Adam 5000/TCP) การทดสอบความเร็วลมจะใช้เครื่องวัดความเร็วลม (Hot Wire Tenmars TM-4002) และสำหรับการส่องสว่างภายในอาคารจะวัดโดยใช้โมดูลวัดความส่องสว่าง (Light Sensor Module, BH1750FVI) เชื่อมต่อกับแผงวงจร Arduino สำหรับบันทึกค่า ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลของการระบายอากาศ และค่าความส่องสว่างในห้องโดยจะทำการวิเคราะห์ตลอดระยะเวลาการใช้งานทั้งวัน

4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

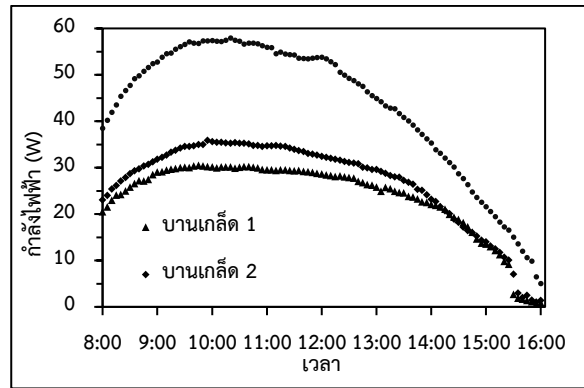
4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะทางด้านไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามรูปแบบที่ติดตั้งทำมุมต่างกัน 3 มุมคือ 0° (เปิดทั้งหมด) 18° (เปิดบางส่วน) และ 90° (ปิดหมด) นอกจากนั้นแล้วยังได้ศึกษาเรื่องของการระบายความร้อน และปริมาณแสงสว่างภายในห้องทดลอง การทดสอบทำในช่วงเดือนธันวาคม ปี 2562 เนื่องจากเป็นช่วงที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง และค่ารังสีอาทิตย์ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศ การทดสอบทำในช่วงเวลา 8.00–16.00 น. โดยผลที่ได้จากการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



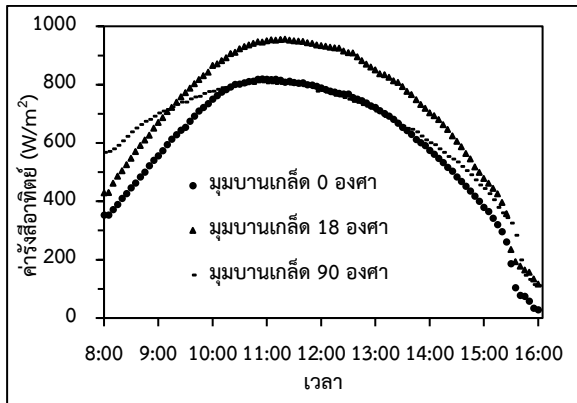
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ด เท่ากับ 2, 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1, 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90°

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° บานเกล็ด 1, 2 และ 3 มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป นอกจากนั้นยังพบว่าจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการต่อเซลล์แต่ละเซลล์แบบอนุกรม สำหรับบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° ก็ให้ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่คล้ายกัน จากกราฟจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ ซึ่งจะสามารถนำไปหาค่ากำลังไฟฟ้สูงสุดได้ต่อไป



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่เวลาต่าง ๆ ของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2, 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1, 2 และ 3) ตามลำดับ โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18°

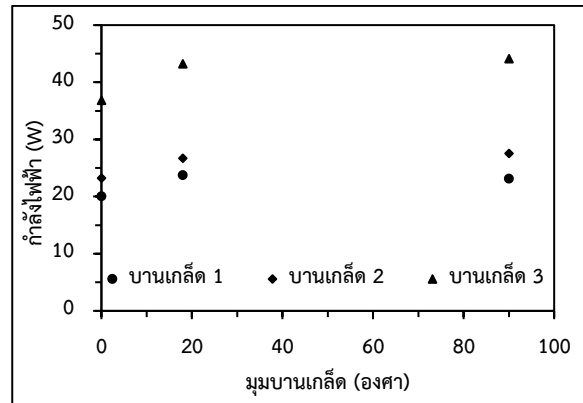
รูปที่ 6 แสดงกำลังไฟฟ้าที่บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละอันสามารถผลิตได้ตลอดเวลาทั้งวันที่ทำการทดสอบ โดยมีมุมของบานเกล็ดเท่ากับ 18° จากรูปจะพบว่าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบนั้นจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่เริ่มทดสอบจนกระทั่งมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 10.00-12.00 น. จากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบที่ลดลง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังขึ้นกับจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปบานเกล็ด 3 ซึ่งมีจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 4 เซลล์ นั้นสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 57 W ซึ่งมากกว่าของบานเกล็ดที่ใช้จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ต่อบานเกล็ด 2 เซลล์ ประมาณ 27 W จากรูปจะสังเกตเห็นว่าช่วงเวลาที่มีค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบสูงสุด (11.00 น.) จะไม่ใช่ช่วงเวลาที่บานเกล็ดผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด (10.00 น.) ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์มีค่ามากที่สุดจะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับมุมฉากกับบานเกล็ด ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดเงาเนื่องจากการเหลื่อมกันระหว่างบานเกล็ดอันบน และอันที่อยู่ด้านล่างถัดลงมา ซึ่งปัญหานี้จะเกิดขึ้นเมื่อปรับมุมบานเกล็ดให้มีค่าเท่ากับ 0° และ 18° แต่ปัญหานี้จะลดลงเมื่อปรับมุมบานเกล็ดให้มีค่าเท่ากับ 90° (ตั้งฉากกับพื้นราบ)



รูปที่ 7 ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ณ มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°, 18° และ 90° กรณี (บานเกล็ด 3)

รูปที่ 7 แสดงค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบบานเกล็ดตลอดวัน เมื่อมีการปรับมุมของบานเกล็ดเป็น 0°, 18° และ 90° จากรูปจะพบว่าค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบบานเกล็ดมีลักษณะที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับมุมของบานเกล็ด โดยในช่วงเช้า 8.00-9.00 น. บานเกล็ดที่ทำมุม 90° จะได้รับปริมาณแสงอาทิตย์สูงที่สุด แต่หลังจากนั้น บานเกล็ดที่ทำมุม 18° จะมีค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบที่มากที่สุด และค่ารังสีอาทิตย์ของการปรับมุมทั้งสามจะสูงสุดในช่วงเวลา 11.00-12.00 น. จากนั้นค่ารังสีอาทิตย์ของทั้งสามมุมก็เริ่มลดลงเรื่อยๆ โดยเมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานรังสีอาทิตย์ตกกระทบรวมใน 1 วัน พบว่ากรณีบานเกล็ดทำมุม 18° จะมีค่าสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 5.78 kWh/m² ถัดมาจะเป็นของกรณีบานเกล็ดทำมุม 90° และ 0° โดยมีค่าเท่ากับ 5.21 kWh/m² และ 4.81 kWh/m² ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันที่ผลิตได้จากบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2, 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1, 2 และ 3) และที่มีการปรับมุมบานเกล็ดเป็น 0°, 18° และ 90° จากรูปพบว่าบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ 4 เซลล์ต่อบานเกล็ดจะให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 36-44 W ขึ้นอยู่กับมุมของบานเกล็ด ขณะที่บานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ลดลงมากก็จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ลดลง



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันที่ผลิตได้จากบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2, 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1, 2 และ 3) เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเป็น 0°, 18° และ 90°

เมื่อพิจารณาผลของการปรับมุมบานเกล็ดที่มีต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าพบว่ากรณีบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2 เซลล์ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมุมบานเกล็ดมีค่าเท่ากับ 18° โดยจะมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงกว่าของมุมบานเกล็ด 90° เล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบที่มุม 18° จะมีค่ามากกว่าของมุม 90° สำหรับบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 3 และ 4 เซลล์ พบว่าที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° จะให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงกว่าของกรณีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° เล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาค่ารังสีอาทิตย์พบว่าของกรณีบานเกล็ดทำมุม 18° จะมีค่ามากกว่าของกรณีบานเกล็ดทำมุม 90° การปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° ทำให้บานเกล็ดสามารถรับพลังงานรังสีอาทิตย์ได้สูงสุด แต่ก็ทำให้เกิดปัญหาคือมีเงาเกิดขึ้นบนบานเกล็ดอันถัดมา เนื่องจากบานเกล็ดด้านบน ทำให้บานเกล็ดที่อยู่ด้านล่างถัดลงมาได้รับแสงอาทิตย์ได้น้อยลง การเกิดเงาในลักษณะนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ในหนึ่งบานเกล็ดมีค่าเพิ่มขึ้น (พื้นที่โปร่งแสงลดลง) แต่เมื่อปรับมุมบานเกล็ดไปที่ 90° (บานเกล็ดตั้งฉากกับพื้นโลก) จะไม่พบการเกิดเงาบนบานเกล็ดอันเนื่องมาจากบานเกล็ดด้านบน จึงทำให้บานเกล็ดที่มีมุมเท่ากับ 90° สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในหนึ่งวันได้มากกว่า

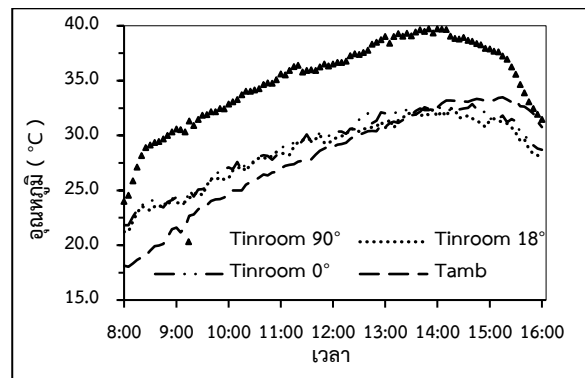
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ ทดสอบที่มุม 0°, 18° และ 90°

	ประสิทธิภาพ (%)	ฟิล แพกเตอร์ (%)	พลังงานไฟฟ้ารวม (Wh/day)
บานเกล็ด 1			
0°	7.26	0.62	161.95
18°	7.22	0.71	191.57
90°	8.12	0.61	186.56
บานเกล็ด 2			
0°	5.75	0.62	187.77
18°	5.68	0.62	215.54
90°	5.87	0.65	222.52
บานเกล็ด 3			
0°	6.06	0.61	297.53
18°	6.03	0.73	349.15
90°	6.49	0.76	356.38

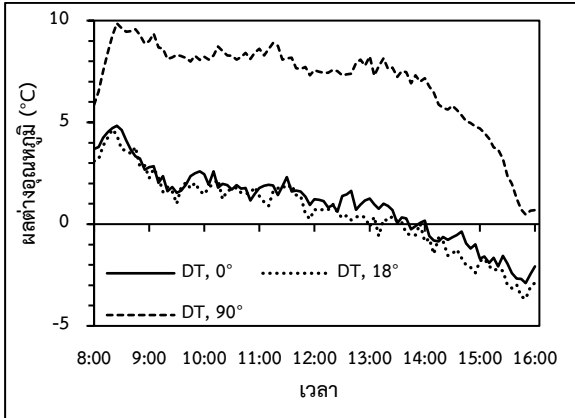
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ โดยทำการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°, 18° และ 90° ซึ่งประกอบด้วย ประสิทธิภาพ ค่าฟิลแพกเตอร์ และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดวันของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดสอบพบว่าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 5.6-8% และมีค่าฟิลแพกเตอร์อยู่ระหว่าง 0.6-0.7 ประสิทธิภาพและค่าฟิลแพกเตอร์ของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลิตรวมที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ซึ่งเป็นผลมาจากคุณภาพของกระบวนการผลิตแผง เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่าบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 3) สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อวันได้สูงสุดเท่ากับ 0.356 kWh และเมื่อพิจารณามุมของบานเกล็ดพบว่าบานเกล็ดที่ทำมุม 90° จะเป็นมุมที่ทำให้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด โดยจะมีค่าสูงกว่ากรณีมุมบานเกล็ด 18° เล็กน้อย

4.2 ผลด้านอุณหภูมิการระบายอากาศของห้องทดลอง

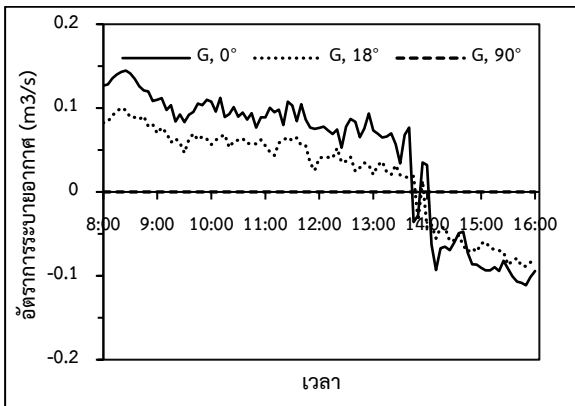
รูปที่ 9 แสดงค่าอุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิแวดล้อมตลอดทั้งวัน ที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°, 18° และ 90° จากรูปพบว่าอุณหภูมิภายในห้องเมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° และ 18° มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้งวัน เมื่อมุมบานเกล็ดมีค่า 90° จะทำให้อุณหภูมิภายในห้องมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากการปิดบานเกล็ดทั้งหมดทำให้ไม่มีการถ่ายเทอากาศ และเกิดความร้อนสะสมในปริมาณสูง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องทดลองสำหรับการปรับมุมบานเกล็ดทั้งสามมุมมีค่าเท่ากับ 29°C, 28°C และ 35°C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยในช่วงวันทดสอบประมาณ 28°C ซึ่งอุณหภูมิภายในห้องของทั้งสามมุมบานเกล็ดจะสูงสุดในช่วงเวลา 14.00-15.00 น. โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 32.9°C, 32.5°C และ 39.7°C ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าผลต่างของอุณหภูมিরะหว่างในห้องและนอกห้องจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดช่องเปิดบานเกล็ดลดลง ผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในห้องและอุณหภูมิแวดล้อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1°C, 0.5°C และ 7°C สำหรับมุมบานเกล็ดที่ 0°, 18° และ 90° ตามลำดับ



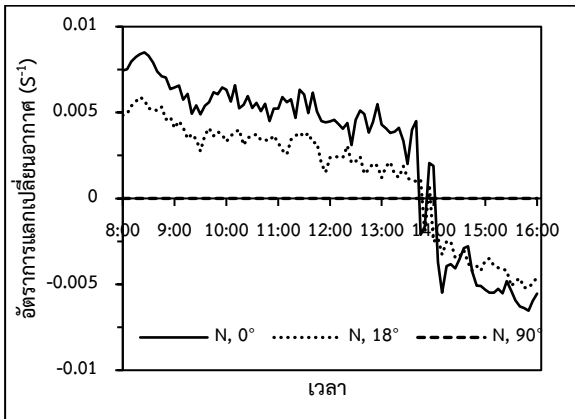
รูปที่ 9 อุณหภูมิภายในห้องทดลอง (T_{inroom}) และอุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}) สำหรับการติดตั้งบานเกล็ดที่มุม 0°, 18° และ 90°



(ก)



(ข)



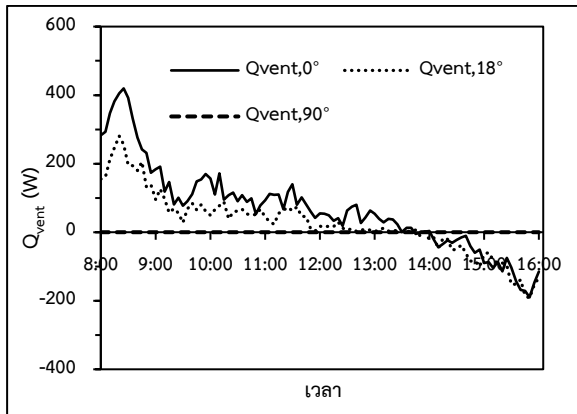
(ค)

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ผลต่างอุณหภูมิด้านใน ห้อง และด้านนอกห้อง (ข) อัตราการระบายอากาศ และ (ค) อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ สำหรับการติดตั้งบานเกล็ด ที่มุม 0°, 18° และ 90°

อุณหภูมิด้านในและนอกห้องที่แตกต่างกันเป็นผล มาจากการระบายอากาศผ่านช่องเปิดของอาคาร เมื่อผลต่าง อุณหภูมิ ($T_{inroom} - T_{amb}$) มีค่าเป็นบวก แสดงว่าอุณหภูมิ

ในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม อากาศจะไหลออกจากห้อง แต่ในทางกลับกัน เมื่อผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นลบ แสดงว่า อุณหภูมิในห้องต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อม อากาศก็จะไหลเข้า มายังห้องทดสอบ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในห้อง และแวดล้อมสำหรับการติดตั้งบานเกล็ดเป็นมุมต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 10 (ก) โดยจากรูปจะพบว่า การ ติดตั้งบานเกล็ดทำมุม 90° (ปิดหมด) จะทำให้อุณหภูมิ ภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ทำให้ผลต่างของ อุณหภูมิเป็นบวกตลอดทั้งวัน แต่เมื่อพิจารณาที่มุมบาน เกล็ด 0° และ 18° พบว่ามีลักษณะของผลต่างอุณหภูมิ ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งตั้งแต่เริ่มต้นทดสอบจนถึงเวลาประมาณ 14.00 น. จะมีผลต่างของอุณหภูมิเป็นบวก แต่หลังจากนั้น จะมีค่าเป็นลบ

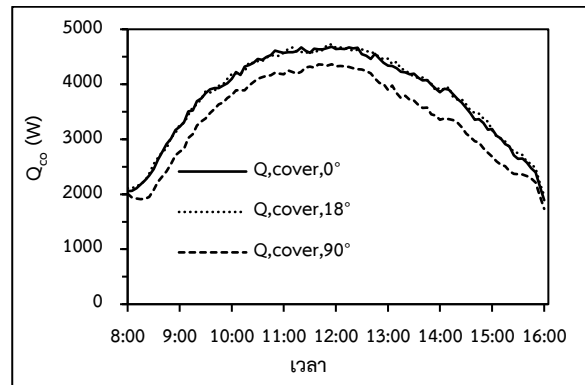
รูปที่ 10 (ข) แสดงค่าอัตราการระบายอากาศผ่านช่อง เปิดที่มุม 0°, 18° และ 90° ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2) จากกราฟจะพบว่าค่าอัตราการระบายอากาศเฉลี่ยทั้งวันมี ค่าเท่ากับ 0.271, 0.115 และ 0 m³/s สำหรับมุมบานเกล็ด 0°, 18° และ 90° ตามลำดับ จากกราฟพบว่าอัตราการ ระบายอากาศของบานเกล็ดที่ทำมุม 0° มีค่ามากกว่าของ กรณีมุม 18° ตลอดทั้งวัน การไหลของอากาศมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันกล่าวคือในช่วงเวลา 8.00-14.00 น. อากาศ ภายในห้องไหลออกสู่ภายนอก (อัตราการระบายอากาศ เป็นบวก) และหลังจากช่วงเวลา 14.00 น. เป็นต้นไป จะมี อากาศจากด้านนอกไหลเข้าสู่อาคาร (อัตราการระบาย อากาศเป็นลบ) ส่วนที่มุม 90° จะเห็นได้ว่าตลอดทั้งวันไม่ม ีการระบายอากาศ เนื่องจาก ที่มุม 90° เป็นมุมปิด พื้นที่ช่อง เปิดเท่ากับศูนย์ ($S_{90^\circ} = 0$) ความเร็วลมที่ผ่านเข้าห้อง ทดสอบจึงมีค่าเป็นศูนย์ ($U_{90^\circ} = 0$) จึงทำให้การทดสอบที่ มุม 90° ไม่มีการระบายอากาศ รูปที่ 10 (ค) แสดงผลอัตรา การแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดลองที่มีผลมาจากอัตรา การระบายอากาศและปริมาตรของห้อง จากกราฟสังเกต ได้ว่า อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของทั้งสามมูมมีค่าที่ แตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 0.005, 0.003 และ 0 S⁻¹ ตามลำดับ กราฟอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศจะมี ลักษณะที่คล้ายกับอัตราการระบายอากาศ



รูปที่ 11 ความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศของห้องทดสอบสำหรับการติดตั้งบานเกล็ดที่มุม 0°, 18° และ 90°

รูปที่ 11 แสดงปริมาณความร้อนเนื่องจากการระบายอากาศของห้องทดสอบ เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0°, 18° และ 90° โดยการระบายอากาศของห้องทดสอบนี้เป็นผลมาจากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ และการเคลื่อนที่ของอากาศภายในห้องอันเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิภายในห้องและอุณหภูมิแวดล้อมโดยคำนวณจากสมการที่ 12 ส่งผลให้การระบายความร้อนภายในห้องที่มีพื้นที่ช่องเปิดที่ต่างกันจะมีการระบายความร้อนที่แตกต่างกัน เมื่อผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าเป็นบวกความร้อนภายในห้องก็จะระบายออกสู่ภายนอก แต่เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเป็นลบความร้อนจากภายนอกก็จะไหลเข้ามาสู่อาคาร จากกราฟสังเกตได้ว่า ปริมาณความร้อนจากการระบายอากาศมีค่าเฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 108 W, 71 W และ 0 W ตามลำดับ โดยลักษณะของกราฟ ที่มุม 90° เป็นมุมปิดทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศ การระบายความร้อนเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ภายในห้องเกิดการสะสมความร้อน อุณหภูมิภายในห้องจึงสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมมาก (ประมาณ 7°C) สำหรับการระบายความร้อนที่มุม 0° และ 18° ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงเวลาประมาณ 14.00 น. เป็นช่วงที่ความร้อนภายในห้องระบายออกสู่ภายนอก เนื่องจากผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นบวก หลังจาก 14.00 น. จนถึงช่วงเวลานสิ้นสุดการทดสอบ ความร้อนด้านนอกได้ระบายเข้าสู่อาคาร เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าเป็นลบ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยการระบายความร้อนตลอดทั้งวันจะมีค่าเท่ากับ 108 W และ 71 W

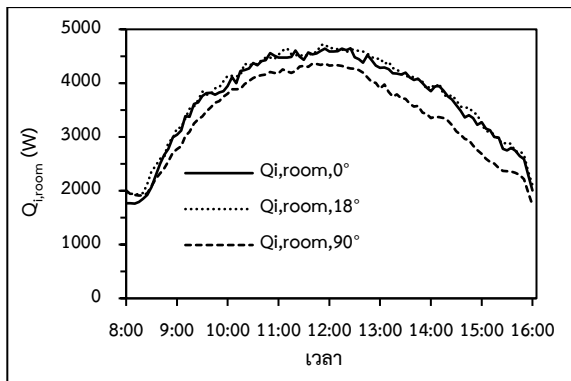
เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° และ 18° ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° จะสามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุด



รูปที่ 12 ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารสำหรับการติดตั้งบานเกล็ดที่มุม 0°, 18° และ 90°

รูปที่ 12 แสดงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารเมื่อบานเกล็ดมีค่าเท่ากับ 0°, 18° และ 90° ที่มีขนาดของช่องเปิดของทั้งสามมุมเท่ากับ 1.008, 0.1734 และ 0 m² โดยมีผลมาจากวัสดุที่นำมาสร้างของกรอบผนังและหลังคาของอาคาร ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุกรอบอาคาร U และยังรวมถึงผลของความร้อนที่มาจากผลกระทบของรังสีอาทิตย์ก่อให้เกิดความร้อนบนผิวผนังและหลังคา ส่งผลให้เกิดมีผลต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างผิวของกรอบอาคารและอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ $T_{D_{eq}}$ จากกราฟสังเกตได้ว่า ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารเฉลี่ยทั้งวันมีค่าเท่ากับ 3,764 3,784 และ 3,387 W สำหรับมุมบานเกล็ด 0°, 18° และ 90° ตามลำดับ โดยที่มุม 90° มีปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารที่น้อยกว่าการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° เนื่องจากการทดสอบที่มุมบานเกล็ด 90° เป็นมุมที่หน้าต่างบานเกล็ดปิดหมดทำให้ความร้อนที่ผ่านเข้าสู่กรอบอาคารลดลง ส่วนที่มุม 0° และ 18° ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยความร้อนที่ผ่านเข้าสู่กรอบอาคาร มีค่าที่มากกว่ามุม 90° เนื่องจากหน้าต่างบานเกล็ดเป็นช่องเปิดทำให้ความร้อนสามารถเข้ามาสวนคานผ่านช่องเปิดได้ และพื้นที่ความต้านทานความร้อนของ

กรอบอาคารยังคงลดลงอีกด้วย โดยกราฟมีลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งมีค่าความร้อนที่ผ่านกรอบอาคารสูงสุดที่ในช่วงเวลา 11.55 น. โดยมีค่าที่สูงถึง 4,683, 4,726 และ 4,364 W ตามลำดับ โดยมีลักษณะที่คล้ายกับค่ารังสีอาทิตย์ในแนวระนาบ



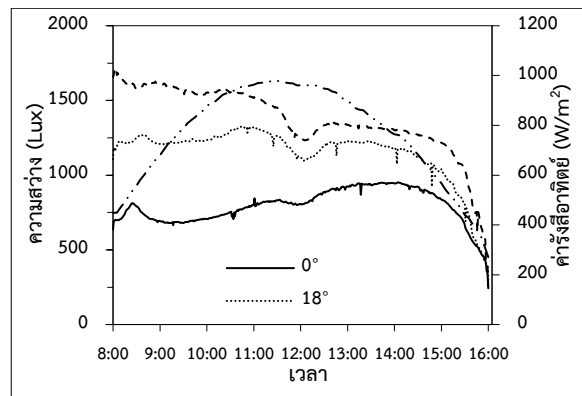
รูปที่ 13 ความร้อนภายในห้องทดสอบสำหรับการติดตั้งบานเกล็ดที่มุม 0°, 18° และ 90°

รูปที่ 13 แสดงค่าความร้อนภายในห้องทดสอบที่มุมบานเกล็ด 0°, 18° และ 90° เป็นความร้อนที่มีผลมาจากความร้อนจากการระบายอากาศ และความร้อนที่ผ่านกรอบอาคาร จากรูปสังเกตได้ว่าเมื่อบานเกล็ดทำมุม 90° (ปิดหมด) มีความร้อนภายในห้องทดสอบต่ำกว่าการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° (เปิดหมด และเปิดบางส่วน) โดยเมื่อทดสอบทั้งสามมุมมีความร้อนภายในห้องเฉลี่ยตลอดทั้งวันเท่ากับ 3,696, 3,758 และ 3,387 W ตามลำดับมุมที่ทดสอบ โดยความร้อนภายในห้องทดสอบจะสูงสุดในช่วงเวลา 12.00 น. ที่มีลักษณะคล้ายกับค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความร้อนภายในห้องทดสอบ มีผลจากการระบายความร้อนน้อยกว่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารผ่านกรอบของอาคาร ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ความร้อนในอาคารสูงมาจากวัสดุที่นำมาสร้างกรอบอาคาร ที่มีค่าความต้านทานความร้อนที่ต่ำ ทำให้ความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคารผ่านกรอบของอาคารได้มาก

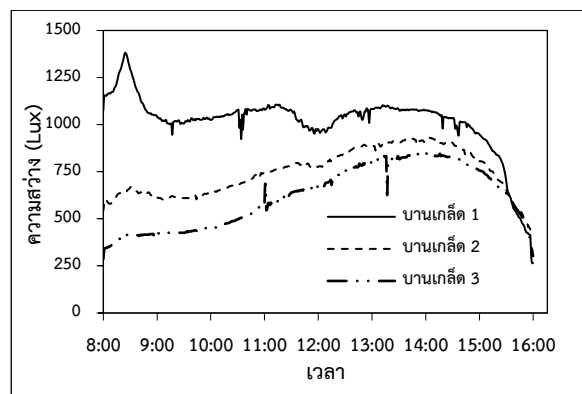
4.3 ผลด้านความส่องสว่างภายในห้อง

รูปที่ 14 แสดงค่าการส่องสว่างภายในอาคารเมื่อปรับมุมของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 0°, 18° และ 90°

โดยในวันที่ทำการทดสอบท้องฟ้าไม่มีเมฆ และมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งวันเท่ากับ 763 W/m² ซึ่งค่าการส่องสว่างภายในอาคารมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,372 Lux 1,150 Lux และ 793 Lux สำหรับมุมของบานเกล็ดที่ 0°, 18° และ 90° ตามลำดับ จากการทดสอบจะสังเกตได้ว่าตลอดระยะเวลาการทดสอบทั้งวันค่าการส่องสว่างภายในอาคารจะมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน แต่หลังจาก 16.00 น. เป็นต้นไป ค่าการส่องสว่างภายในห้องทดสอบจะมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน



รูปที่ 14 ค่าความส่องสว่างภายในอาคารสำหรับการติดตั้งบานเกล็ดที่มุม 0°, 18° และ 90° กรณี (บานเกล็ด 3)



รูปที่ 15 ค่าการส่องสว่างภายในอาคารสำหรับบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามรูปแบบ ที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 90°

รูปที่ 15 แสดงค่าการส่องสว่างภายในอาคารของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามแผงเมื่อมีมุมของบานเกล็ดเท่ากับ 90° โดยทั้งสามแผงจะมีจำนวนเซลล์ และพื้นที่ไปรับแสงที่แตกต่างกัน การส่องสว่างภายในอาคาร

จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีพื้นที่โพร่งแสงที่มาก แต่กลับกัน เมื่อมีพื้นที่โพร่งแสงที่น้อยทำให้การส่องสว่างภายในอาคารลดลงตาม โดยบานเกล็ดที่มีเซลล์แสงอาทิตย์ 2 เซลล์ต่อหนึ่งบานเกล็ดมีค่าส่องสว่างภายในอาคารสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1,015 Lux สำหรับบานเกล็ดที่มีเซลล์แสงอาทิตย์ 4 เซลล์ต่อหนึ่งบานเกล็ดจะทำให้ความส่องสว่างภายในอาคารมีค่าต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับ 619 Lux เมื่อคิดเป็นร้อยละของการส่องสว่างภายในอาคารซึ่งหาได้จากสัดส่วนระหว่างค่าการส่องสว่างภายในต่อภายนอกอาคารพบว่ามีค่าเท่ากับ 13.9%, 10.2% และ 8.5% สำหรับบานเกล็ดที่มีเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 2, 3 และ 4 เซลล์ต่อหนึ่งบานเกล็ดตามลำดับ โดยค่าการส่องสว่างภายในอาคารเมื่อติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ 2 และ 3 เซลล์ต่อบานเกล็ดจะมีค่าการส่องสว่างภายในอาคารสูงกว่ามาตรฐานทั้งสามมุม (0°, 18° และ 90°) ตลอดทั้งวัน สำหรับบานเกล็ดที่มีเซลล์แสงอาทิตย์ 4 เซลล์ต่อบานเกล็ดจะมีค่าการส่องสว่างต่ำกว่ามาตรฐานในช่วงเวลา 8.00-10.30 น. แต่หลังจากนั้นค่าการส่องสว่างภายในมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร ซึ่งได้ทำการทดสอบบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามบานเกล็ดโดยมีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2, 3 และ 4 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°, 18° และ 90° พบว่า บานเกล็ดมีประสิทธิภาพในการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าเท่ากับ

5-7% เมื่อวิเคราะห์ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่า บานเกล็ดติดตั้งที่มุม 90° จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดโดยสูงกว่าของกรณีมุมบานเกล็ด 18° เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาผลด้านการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า มุมบานเกล็ด 0° และ 18° มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิภายในห้องตลอดวันต่ำกว่าการทดสอบที่มุม 90° และมีปริมาณการระบายความร้อนของห้องทดสอบของมุม 0° และ 18° มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนความร้อนที่ผ่านกรอบอาคารพบว่าการทดสอบที่มุม 90° มีความร้อนที่ผ่านกรอบอาคารต่ำกว่าการทดสอบที่มุม 0° และ 18° เช่นเดียวกันกับความร้อนทั้งหมดภายในห้องทดสอบ การติดตั้งบานเกล็ดทั้งสามบานเกล็ดยังทำให้ค่าการส่องสว่างภายในห้องทดสอบมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานการส่องสว่างภายในอาคารสำนักงานในช่วงเดือนที่ทำการทดสอบ ดังนั้นการปรับมุมของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มุม 18° จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดเมื่อพิจารณาในด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ความสามารถในการระบายอากาศ ความร้อน และปริมาณแสงสว่างภายในห้อง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้โอกาสได้ศึกษาทำการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศัภษาพลังงานทดแทนระดับบัณฑิตศึกษาในกลุ่มประเทศอาเซียน

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. E. Agency, Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency. [Online] Available: <http://www.envedu.gr/Documents/Worldwide%20Trends%20in%20Energy%20Use%20and%20Efficiency.pdf>.
- [2] Pathways to 2050: Alternative Scenarios for Decarbonizing the U.S. Economy. [Online] Available: <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2019/05/pathways-to-2050-scenarios-for-decarbonizing-the-us-economy-final.pdf>
- [3] พลังงาน, กรุงเทพฯ: สมดุลพลังงาน เพื่อความยั่งยืนของเศรษฐกิจและสังคมไทย. บริษัท กรุงเทพธุรกิจ มีเดีย จำกัด, 2013.

- [4] Zain-Ahmeda, A., Sopian, K., Othman, M.Y.H., Sayigh, A.A.M. and Surendran, P.N. Daylighting as a Passive Solar Design Strategy in Tropical Buildings: A Case Study of Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 2002; 43(13): 1725-1736,
- [5] Stegou-Sagia, K. A. A., Angelopoulou, C. and Kotsiavelos, G. The Impact of Glazing on Energy Consumption and Comfort. *Energy Conversion and Management*, 2007; 48(11): 2844-2852.
- [6] Bodart, A. D. H. M. Global Energy Savings in Offices Buildings by the Use of Daylighting. *Energy and Buildings*, 2002; 34(5): 421-429.
- [7] Inanici, M.N. and Demirbilek, F.N. Thermal Performance Optimization of Building Aspect Ratio and South Window Size in Five Cities Having Different Climatic Characteristics of Turkey. *Building and Environment*, 2000; 35(1): 41-52.
- [8] Wong Nyuk, W. L., Chandra, A.N., Pandey, A.R. and Xiaolin, W. Effects of Double Glazed Facade on Energy Consumption, Thermal Comfort and Condensation for a Typical Office Building in Singapore. *Energy and Buildings*, 2005; 37(6): 563-572.
- [9] Alloca, Q.C.C., and Glickman, L.R. Design Analysis of Single-Sided Natural Ventilation. *Energy and Buildings*, 2003; 35: 785-795.
- [10] Changhai Peng, Y. H. and Wu, Z. Building-integrated Photovoltaics (BIPV) in Architectural Design in China. *Energy and Buildings*, 2011; 43(12): 3592–3598,
- [11] Off-Grid Solar Power Basics. Samlexsolar, 2014. [Online] Available: <https://samlexamerica.com/resources-support/faq/solarpowersystembasics/>
- [12] Benefits of an Industrial Ventilation System 2015. [Online] Available: <https://industrytoday.com/benefits-of-an-industrial-ventilation-system/>.
- [13] การคำนวณ (Air Changes) และมาตรฐาน ระบบระบายอากาศ. บริษัท เฟรช เอ็นเนอร์ยี เซฟวิ่ง จำกัด, 2012. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.freshenergysaving.com>
- [14] ภาณุวิชญ์ พุทธิรักษา และ สุลักษณ์ มงคล. การพัฒนาระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลุกสตอปเบอรีในโรงเรือนเขตร้อน. สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2018.
- [15] Majdoubi, H., Boulard, T., Hanafi, A., Bekkaoui, A., Fatnassi, H., Demrati, H., Nya, M. and Bouirden, L. Natural Ventilation Performance of a Large Greenhouse Equipped with Insect Screens. *Transactions of the ASABE*, 2007; 50(2): 641-650.
- [16] Boulard, T. and Baille, A. Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1995; 61(1): 37-47.
- [17] Helenice Sacht, M. A. L. Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. *Procedia Engineering*, 2017; 196: 972 – 979.
- [18] Air Change Rates in typical Rooms and Buildings. Engineering Toolbox, 2011.
- [19] สุรินทร์ คันใจ และ สุลักษณ์ มงคล. การศึกษาการทำความเย็นแบบระเหยโดยตรงร่วมกับการลดความชื้นด้วยฮีทปั๊มสำหรับใช้ในบ้านพักอาศัย. สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2559; 42-46.

- [20] ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร. กระทรวงพลังงาน, 2552.
- [21] Yumrutaş, R., Kaşka, Ö. and Yıldırım, E. Estimation of Total Equivalent Temperature Difference Values for Multilayer Walls and Flat Roofs by Using Periodic Solution. *Building and Environment*, 2007; 42(5): 1878-1885.
- [22] CIE. International Commission on Illumination, 1913. [Online] Available: <http://cie.co.at/>