

การวิเคราะห์พลังงานของระบบระบายอากาศบ้านเกลือเซลล์แสงอาทิตย์



Phetdavanh Ladthavong

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2563

การวิเคราะห์พลังงานของระบบระบายอากาศบ้านเกลือเซลล์แสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การวิเคราะห์ผลงานของระบบระบายอากาศบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

Phetdavanh Ladthavong

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนินเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์พลังงานของระบบระบายอากาศบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อผู้เขียน	Mr. Phetdavanh Ladthavong
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการวิเคราะห์พลังงานของระบบระบายอากาศบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารทดลองที่มีขนาด 2.28 m ยาว 3.24 m สูง 2 m ฉนวนและหลังคาใช้แผ่นเมทัลชีทที่มีการติดฉนวนกันความร้อน หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีจำนวน 3 บานเกล็ด ที่มีการจัดเรียงเซลล์เท่ากับ 2-4 เซลล์ต่อแผ่นบานเกล็ด โดยมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 40 60 และ 80 เซลล์ สำหรับบานเกล็ด 1-3 ซึ่งส่งผลให้พื้นที่รับแสงของเซลล์ และพื้นที่โปร่งแสงของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกัน การทดสอบจะทำการปรับมุมบานเกล็ด (วัดเทียบกับพื้นราบ) ที่ 0° (เปิดทั้งหมด) 18° (เปิดบางส่วน) และ 90° (ปิดทั้งหมด) จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้า และความสามารถในการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งศึกษาปริมาณความสว่างภายในห้องทดสอบ จากการศึกษาพบว่าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 5-7% โดยที่บานเกล็ด 3 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมในหนึ่งวันได้สูงสุดเท่ากับ 0.3-0.356 kWh/day โดยมุมของบานเกล็ดที่ 90° เป็นมุมที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุด การระบายอากาศของห้องทดสอบ พบว่า อุณหภูมิภายในห้องต่ำสุดที่มุม 18° โดยที่การระบายอากาศและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้องสูงสุดเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ส่วนความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร (Q_{cover}) เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° , 18° และ 90° พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 3,764, 3,784 และ 3,387 W ความร้อนภายในห้องทดสอบ ($Q_{i,room}$) ของทั้งสามมุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,696, 3,758 และ 3,387 W และ ผลการส่องสว่างในอาคารพบว่ามุมบานเกล็ดทั้งสามมุมจะให้ค่าการส่องสว่างภายในที่สูงกว่าค่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่ 500 Lux เมื่อพิจารณาผลด้านพลังงานสุทธิพบว่า ห้องทดสอบมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มเติม โดยพลังงานที่ต้องการเพิ่มเติมน้อยที่สุดในกรณี บานเกล็ด 3 ทดสอบบานเกล็ดที่ 90° ต้องการใช้พลังงานเท่ากับ 4.1317 kWh/day

คำสำคัญ : โขล่เซลล์, หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์, ระบบระบายอากาศ, อาคารพลังงาน.

Title	ENERGY ANALYSIS OF VENTILATION SYSTEM FROM USING SOLAR PHOTOVOLTAIC WINDOW LOUVER
Author	Mr. Phetdavanh Ladthavong
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Akarin Intaniwet

ABSTRACT

This research studies the energy analysis of the ventilation system integrated with the solar photovoltaic window louvers. The dimension of the building used in the experimental was $2.28 \times 3.24 \times 2 \text{ m}^3$. Metal sheets with insulation were used for walls and roof. Three different louvers were constructed with the number of solar cells in each louver of 2-4 cells. The total number of solar cells in the PV window louvers was found to be 40, 60 and 80 for louver number 1, 2 and 3, respectively. Variation of cells number results in different light-receiving area and the translucent area of the louver. Three different angles of the louver, 0° (fully open), 18° (partial open) and 90° (fully closed), were examined. The electrical properties, the air ventilation ability and the internal luminance were analyzed. It was found that the light to electricity conversion efficiency of the louvers was about 5-7%. The louver number 3 can produce the maximum amount of electrical energy of 0.3-0.356 kWh/day and the installation of louver at 90° offers the highest electrical energy generation. At the angle of 18° , however, the temperature inside the room was found to be lowest. The ventilation and air exchange rate in the room is greatest when the louver angle was adjusted to be 0° . The average values of heat passing through the building frame (Q_{cover}) were calculated to be 3,764, 3,784 and 3,387 W for the louver angle of 0° , 18° and 90° , respectively. The average heat inside the testing room ($Q_{\text{i,room}}$) was determined to be 3,696, 3,758 and 3,387 W when installed the louver at the angle of 0° , 18° and 90° , correspondingly. It was also found that the luminance

inside the room is higher than the standard requirement for the office space at 500 Lux. when considering the net energy, it was seen that the louver installed at 90° requires the least amount of additional energy of 4.1317 kWh/day.

Keywords : Solar cell. PV window louver. Ventilation System. Energy Building.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ระบบระบายอากาศบ้านเกสต์เฮลล์แสงอาทิตย์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์ ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนให้ความดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งให้ความกรุณาสำหรับคำแนะนำ การให้ความรู้ คำปรึกษา ในส่วนของปัญหาต่างๆ ของงานวิจัยเพื่อให้เกิดความสำเร็จ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถกร อาสนคำ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความสนับสนุน เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนจาก “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2561

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ Seangthong LADTHAVONG และ Vannah LADTHAVONG ที่คอยอบรมเลี้ยงดูให้กำลังใจ สนับสนุนทุกด้านเป็นอย่างดีสำหรับการต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆ ที่มีอยู่เสมอมาตลอดจนถึงการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งครอบครัวและเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำ และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

Phetdavanh Ladthavong

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญรูปภาคผนวก.....	ฒ
สารบัญตารางภาคผนวก	ณ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์.....	7
ขอบเขตการศึกษา.....	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจสอบเอกสาร	8
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	8
รังสีจากดวงอาทิตย์	8
การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์.....	9
เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell).....	14
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
ระบบการระบายอากาศ (Ventilation System).....	17

ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง และการส่องสว่างของแสง (Theory of Light).....	26
อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (Window to Wall Ratio: WWR).....	37
การตรวจสอบเอกสาร.....	38
สรุปเนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	64
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	66
การออกแบบและสร้างอาคารทดลอง.....	66
การสร้าง และประกอบแผงหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์.....	67
การบันทึกข้อมูลการทดสอบ.....	74
การบันทึกผลการผลิตไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
การบันทึกผลการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์.....	75
การบันทึกผลการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติ.....	75
อุปกรณ์ตรวจวัดในงานวิจัย.....	76
ตำแหน่งสำหรับจุดตรวจวัด.....	80
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	84
ผลการวิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์.....	84
ผลด้านการระบายอากาศของห้องทดลอง.....	92
ผลด้านความส่องสว่างภายในห้องทดลอง.....	103
ผลด้านพลังสุทธิของห้องทดลอง.....	106
รูปแบบการใช้งานบานเกล็ดที่เหมาะสม.....	107
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	109
ข้อเสนอแนะ.....	112
บรรณานุกรม.....	113
ภาคผนวก ก พลังงานไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์.....	118
ภาคผนวก ข การคำนวณการระบายอากาศ.....	121

ภาคผนวก ค การคำนวณการส่องสว่างภายในอาคาร.....	150
ภาคผนวก ง การคำนวณพลังงานสุทธิสำหรับอาคาร	156
ภาคผนวก จ เผยแพร่ผลงานวิจัย	158
ประวัติผู้วิจัย.....	171



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เป้าหมายแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ปี พ.ศ 2558-2579	2
ตารางที่ 2 ความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ	8
ตารางที่ 3 ค่าการสูญเสียของแสงสำหรับการออกแบบในการใช้แสงประดิษฐ์	35
ตารางที่ 4 ความเหมาะสมของค่า DF ต่อลักษณะการใช้งานประเภทต่าง ๆ	36
ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดที่ทำการศึกษา	43
ตารางที่ 6 ค่าพลังงานที่ใช้รวมรายปีของอาคารโดยมีการควบคุมแสงสว่าง (Dimming Light)	52
ตารางที่ 7 กรณีศึกษาโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังที่ต่างกัน	60
ตารางที่ 8 สมการค่าภาวะสบายเชิงอุณหภูมิของวัดประจำรัชกาล	63
ตารางที่ 9 วัสดุที่ใช้ในการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์	68
ตารางที่ 10 ขั้นตอนในการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์	69
ตารางที่ 11 ลักษณะของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ	71
ตารางที่ 12 ตำแหน่งและเครื่องมือในการตรวจวัดข้อมูลในงานวิจัย	82
ตารางที่ 13 สมรรถนะทางไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ ทดสอบที่มุม 0° 18° และ 90°	91
ตารางที่ 14 พลังงานสุทธิที่ต้องการเพิ่มสำหรับห้องทดลอง	106

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	3
รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร	4
รูปที่ 3 การติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ในอาคาร	5
รูปที่ 4 ตำแหน่งและทิศทางของดวงอาทิตย์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งตำแหน่งอาคารบนพื้นโลก	9
รูปที่ 5 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	14
รูปที่ 6 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด	15
รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	16
รูปที่ 8 สมดุลพลังงานของห้องทดลอง (Energy Balance)	20
รูปที่ 9 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ	22
รูปที่ 10 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกระจก	23
รูปที่ 11 แผนภาพ ASHRAE Thermal Comfort Zone	26
รูปที่ 12 องค์ประกอบของดวงอาทิตย์ที่ตกลงใส่บนพื้นผิวโลก	27
รูปที่ 13 การตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อแสงสว่าง	27
รูปที่ 14 การส่องผ่านของแสง (Transmission)	28
รูปที่ 15 การสะท้อน (Reflection) บนผิวเรียบ และผิวขรุขระ	29
รูปที่ 16 ปริมาณแสงที่ส่องสว่างเป็นรูปทรงกลม	30
รูปที่ 17 ประสิทธิภาพปริมาณแสงสว่างของแสงสว่างชนิดต่าง ๆ	32
รูปที่ 18 การจัดแบ่งประเภทของกระจกที่มีใช้ในอาคาร	33
รูปที่ 19 ขั้นตอนการสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ “บานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์”	38
รูปที่ 20 ขั้นตอนการสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ “บานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์”	39
รูปที่ 21 การทดสอบแผงตั้งมุมบานเกล็ด 90° 45° และ 16°	40

รูปที่ 22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแรงดันไฟฟ้าแผ่นบานเกล็ดที่มุมต่างๆ ด้านทิศใต้ (วันจันทร์ที่ 8 กันยายน 2557 เวลา 9.00-15.00 น.)	40
รูปที่ 23 การกำหนดค่าวงจรของโมดูล PV.....	41
รูปที่ 24 การกำหนดช่องว่างและค่าวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	42
รูปที่ 25 ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์.....	42
รูปที่ 26 พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้สุทธิของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ.....	44
รูปที่ 27 ปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม ของ PV สร้างสำหรับทั้ง 10 ประเภทหน้าต่าง และ 6 แบบของ BIPV	45
รูปที่ 28 ร้อยละเปอร์เซ็นต์ของการประหยัดเงินโดยรวมของ NEB	45
รูปที่ 29 แผนผังแบบประเมินด้านพลังงาน	46
รูปที่ 30 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารรายปีจำแนกตามทิศของการติดตั้งแผง.....	47
รูปที่ 31 ผลประหยัดด้านพลังงานไฟฟ้ารายปีจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศต่าง ๆ	48
รูปที่ 32 ขนาดห้อง WWR และอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบในแบบจำลอง... ..	49
รูปที่ 33 อุณหภูมิและประสิทธิภาพของแผงเซลล์ที่มีอัตราส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกัน.....	49
รูปที่ 34 ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อแสงสว่างเมื่อติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับ WWR ที่ต่างกัน.....	50
รูปที่ 35 อัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับความลึกของห้องและ WWR	51
รูปที่ 36 แผนภูมิแสดงค่าพลังงานที่ใช้รวมรายปีของการติดตั้งกระจกชนิดต่างกัน	52
รูปที่ 37 วัดค่าความส่องสว่างของแสงบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์	53
รูปที่ 38 ผลกำไรทางด้านพลังงานไฟฟ้าของอาคารแบบจำลอง	54
รูปที่ 39 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในการบังแสงอาทิตย์	55
รูปที่ 40 อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์ที่ 2 และ 3 ตลอดปี	56
รูปที่ 41 ประเภทของอุปกรณ์บังแดดที่ทำการเปรียบเทียบ	57
รูปที่ 42 การผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์บังแดดแต่ละประเภทตามพื้นผิวของวัสดุ PV	58

รูปที่ 43 การผลิตกระแสไฟฟ้าตามการติดตั้งแต่ละตารางเมตรของระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์	58
รูปที่ 44 แบบจำลองของห้องที่ใช้ในการทดลองจากการอ้างอิง	59
รูปที่ 45 (ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงอากาศต่อชั่วโมงในการทดลองของมুমตกกระทบ	60
รูปที่ 46 เครื่องมือและการติดตั้งในพื้นที่ศึกษา	62
รูปที่ 47 แผนผังขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	66
รูปที่ 48 ลักษณะของอาคารที่ใช้ในการทดลอง	67
รูปที่ 49 แผ่นกระจกใส และการต่อทั้ง 3 รูปแบบ คือ (ก) แผ่นกระจกใส (ข) ใช้ 2 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด, (ค) ใช้ 3 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด และ (ง) ใช้ 4 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด	70
รูปที่ 50 การติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารทั้ง 3 แผงติดตั้งทางทิศใต้	73
รูปที่ 51 การติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดในอาคารทดลองติดตั้งทางทิศเหนือ	73
รูปที่ 52 เครื่องวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Module Analyzer) รุ่น PROVA 210	77
รูปที่ 53 เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer)	77
รูปที่ 54 เทอร์โมคัปเปิล (K-type thermocouple)	78
รูปที่ 55 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger ADAM-5000/TCP)	78
รูปที่ 56 เครื่องมือวัดความเร็วลม	79
รูปที่ 57 อุปกรณ์วัดความส่องสว่างภายในอาคาร (BH1750FVI)	80
รูปที่ 58 เครื่องวัดปริมาณความส่องสว่าง (Outdoor Lux Meter)	80
รูปที่ 59 จุดต่าง ๆ ในการตรวจวัดข้อมูลทางด้านอุณหภูมิ ไฟฟ้าและความส่องสว่าง	81
รูปที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงหน้าต่างบานเกล็ด (บานเกล็ด 1 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ (ก) 0°, (ข) 18° และ (ค) 90°	85
รูปที่ 61 ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบของหน้าต่างบานเกล็ด (บานเกล็ด 1 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ (ก) 0°, (ข) 18° และ (ค) 90° ทดสอบในช่วงวันที่ 7/12/2019 - 18/12/2019	87
รูปที่ 62 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเวลาต่าง ๆ ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1-3 โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°, 18° และ 90°	89

รูปที่ 63 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันที่ผลิตได้จากบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1 2 และ 3) เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเป็น 0° 18° และ 90°	
รูปที่ 64 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในของผนัง และหลังคา (ก) ผนัง: ทิศเหนือ และทิศใต้, (ข) ผนัง: ทิศตะวันออก และ ทิศตะวันตก และ (ค) หลังคา: ทิศตะวันออก และ ทิศตะวันตก	94
รูปที่ 65 อุณหภูมิในห้องทดลองและอุณหภูมิแวดล้อมที่มุม 0° , 18° และ 90°	96
รูปที่ 66 ความเร็วลมจากภายนอกเข้าสู่ห้องทดสอบ	97
รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก).ผลต่างอุณหภูมิด้านในห้อง และด้านนอกห้อง (ข).อัตราการระบายอากาศ และ (ค).อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ	98
รูปที่ 68 การระบายความร้อนของห้องทดสอบ	99
รูปที่ 69 ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร	100
รูปที่ 70 คือความร้อนภายในห้อง	101
รูปที่ 71 การส่องสว่างภายในอาคารของแผ่นหน้าต่างบานเกล็ด (บานเกล็ด 1 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ (ก) บานเกล็ด 1, (ข) บานเกล็ด 2 และ (ค) บานเกล็ด 3	104
รูปที่ 72 ค่าเฉลี่ยความส่องสว่างภายในห้องทดลองที่ติดตั้งหน้าต่าง บานเกล็ด 1-3 เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90°	105

สารบัญรูปภาคผนวก

รูปภาคผนวกที่ 1 สมดุลพลังงานความร้อน (Energy Balance)	122
รูปภาคผนวกที่ 2 ความร้อนผ่านผนัง	124
รูปภาคผนวกที่ 3 การนำความร้อนและการพาความร้อนของวัสดุ.....	125
รูปภาคผนวกที่ 4 Load Factor ของเครื่องปรับอากาศ (รชนีวรรณ อังกรบุตร และคณะ, 2561).....	148
รูปภาคผนวกที่ 5 Arduino วัดความเข้มแสงด้วยเซ็นเซอร์ GY-302 BH1750FVI	151
รูปภาคผนวกที่ 6 ค่าเฉลี่ยการส่องสว่างภายในห้องทดสอบ.....	153



สารบัญตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 ลักษณะของทางด้านไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ทั้ง 3 แผง ทดสอบที่มุมบานเกล็ด 0° , 18° และ 90°	119
ตารางภาคผนวกที่ 2 ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ	131
ตารางภาคผนวกที่ 3 ผลต่างคุณภูมิเทียบเท่า TD_{eq} ของผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ กรณีทำมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°	135
ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลต่างคุณภูมิเทียบเท่า TD_{eq} ของผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ กรณีทำมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18°	138
ตารางภาคผนวกที่ 5 ผลต่างคุณภูมิเทียบเท่า TD_{eq} ของผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ กรณีทำมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90°	142
ตารางภาคผนวกที่ 6 รายละเอียดของเครื่องปรับอากาศ (Specification)	148
ตารางภาคผนวกที่ 3 ค่า CU ที่หาได้จากการ Interpolate	155

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ϕ	ละติจูด (Latitude)	Degree
β	มุมเอียง (Slope)	Degree
ω	มุมชั่วโมง (Hour Angle)	Degree
δ	มุมแควคลิเนชัน (Declination Angle)	Degree
α	มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar Altitude Angle)	Degree
γ	มุมอะซิมูทพื้นดิน (Surface Azimuth Angle)	Degree
γ_s	มุมอะซิมูทดวงอาทิตย์ (Solar Azimuth Angle)	Degree
θ	มุมตกกระทบ (Incidence Angle)	Degree
L_{st}	ลองจิจูดที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น	Degree
L_{local}	ลองจิจูดที่ของตำแหน่งที่ต้องการหาเวลาสุริยะ	Degree
E	สมการเวลา	min
I_0	รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระนาบเหนือบรรยากาศ	W/m ²
I_{sc}	ค่าคงที่ของรังสีอาทิตย์	W/m ²
R_b	อัตราส่วนของความเข้มรังสีตรงบนพื้นเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นราบ	-
k_T	ดัชนีการมีเมฆ (Cloudiness Index)	-
I_T	รังสีรวมที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ	W/m ²
ρ_g	การสะท้อนแสงของพื้นดิน	-
P_m	กำลังไฟฟ้าสูงสุด	W
I_{sc}	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	A
V_{oc}	แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	V
I_m	กระแสไฟฟ้าสูงสุด	A
V_m	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	V
η_{PV}	ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์	%
I_G	ความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์	W/m ²
A_m	พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์	m ²
FF	ฟิลแฟกเตอร์	%

$Q_{i,room}$	ความร้อนภายในห้องทดสอบ	W
$M_{da,i,room}$	มวลของอากาศแห้งภายในห้องทดสอบ	kg
$C_{p,da,i,room}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งภายในห้องทดสอบ	J/kg-K
$T_{i,room}^{t+\Delta t}$	อุณหภูมิภายในห้องเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป	°C
$T_{i,room}^t$	อุณหภูมิภายในห้องเมื่อเวลาเริ่มต้น	°C
Δt	เวลา (Time)	Second
Q_{cover}	อัตราความร้อนจากกรอบของห้องทดสอบ	W
Q_{vent}	อัตราความร้อนจากการระบายอากาศ	W
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกรอบอาคาร	W/m ² °C
TD_{eq}	ความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า	°C
A	พื้นที่ของผนังทึบหรือหลังคา	m ²
U_w	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ	W/m ² °C
U_f	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังโปร่งแสง	W/m ² °C
R	ความต้านทานความร้อนของวัสดุ	m ² k/W
Δx	ความหนาของวัสดุ	
T_{sol}	Sol Air-Temperature	°C
α	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของวัสดุกรอบอาคาร	-
ϵ	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุ	-
I_T	ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นรับรังสี	W/m ²
I_r	ความแตกต่างระหว่างรังสีคลื่นยาว	W/m ²
N	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate)	s ⁻¹
V_{room}	ปริมาตรของห้องทดลอง	m ³
G	อัตราการระบายอากาศภายในห้อง	m ² /s
S	พื้นที่ช่องเปิดของการระบายอากาศ	m ²
Cd	Discharge Coefficient	-
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s ²
DT	ผลต่างของอุณหภูมิด้านในและด้านนอกห้องทดสอบ	°C
H	ระยะความสูงระหว่างช่องอากาศเข้าและออก	m
C_w	Wind Effect Coefficient	-
U	อัตราเร็วลมที่เข้ามาภายในอาคาร	m/s

I	ความเข้มของการส่องสว่าง	Lux
E	ความส่องสว่าง	lm
D	ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงไปยังพื้นที่ผิว	m ²
L	ปริมาณแสง	Lm
MF	ปัจจัยในการบำรุงรักษา	-
CU	สัมประสิทธิ์การใช้งาน	-
A	พื้นที่ที่ทำการพิจารณา	m ²
DF	Daylight Factor Method	%
E _i	ความส่องสว่างภายในอาคาร	Lux
E _o	ส่องสว่างภายนอกอาคาร	Lux
WWR	Window to Wall Ratio	%
W _{o,N}	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศเหนือ	°C
W _{i,N}	อุณหภูมิผนังด้านในทิศเหนือ	°C
W _{o,S}	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศใต้	°C
W _{i,S}	อุณหภูมิผนังด้านในทิศใต้	°C
W _{o,E}	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศตะวันออก	°C
W _{i,E}	อุณหภูมิผนังด้านในทิศตะวันออก	°C
W _{o,W}	อุณหภูมิหลังคาด้านนอกทิศตะวันออก	°C
W _{i,W}	อุณหภูมิหลังคาด้านในทิศตะวันออก	°C
R _{o,E}	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศตะวันตก	°C
R _{i,E}	อุณหภูมิผนังด้านในทิศตะวันตก	°C
R _{o,W}	อุณหภูมิหลังคาด้านนอกทิศตะวันตก	°C
R _{i,W}	อุณหภูมิหลังคาด้านในทิศตะวันตก	°C

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมากตามจำนวนของประชากร ซึ่งพลังงานฟอสซิลเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณมาก และต่อเนื่องทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดภาวะโลกร้อน และมลภาวะทางอากาศ (สถาบันวิทยาการพลังงาน, 2558) จากสถิติการใช้พลังงานจากสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ International Energy Agency (IEA) พบว่าการใช้พลังงานของโลกจากปี 1990 ถึง 2007 เพิ่มขึ้นเกือบ 40% และจะยังคงเพิ่มขึ้นอีก 8-10% ทุก 5 ปีจนถึงปี 2035 โดยพลังงานได้นำไปพัฒนาตัวเมืองและด้านอุตสาหกรรม (International Energy Agency, 2008) ซึ่งในทั่วโลกอาคารที่ใช้พลังงานเกือบ 40% เป็นพลังงานจากฟอสซิล และพลังงานที่ใช้ในด้านอื่นๆ เพิ่มขึ้นมากกว่า 50% (World Business Council for Sustainable Development, 2007; ศรีัญญา และลมลพีชร, 2555.) วิธีหนึ่งในการปรับปรุงสมดุลของการใช้พลังงานในอาคารคือ การใช้วัสดุสร้างอาคารที่ช่วยให้อาคารสามารถประหยัดพลังงาน และการปรับปรุงอาคารให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ในอาคารสมัยใหม่หน้าต่างมีบทบาทสำคัญในการประหยัดพลังงานของอาคาร โดยคำนึงถึงภาวะความร้อน ความเย็นและความต้องการแสงประดิษฐ์ ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบหน้าต่างให้มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร โดยในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้า และทำวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบหน้าต่างให้มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในอาคารอย่างแพร่หลาย (Bodart และ De Herde, 2002; Inanici และ Demirbilek, 2000; Stegou-Sagia และคณะ, 2007; Wong และคณะ, 2005; Zain Ahmed และคณะ, 2002) นอกจากการออกแบบระบบอาคารแล้วยังมีความจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้เพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาค้นคว้าหาแหล่งพลังงานทดแทนอย่างต่อเนื่อง และพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง นอกจากนั้นยังเป็นพลังงานที่บริสุทธิ์ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน (กระทรวงพลังงาน, 2539) เมื่อพิจารณาตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ปี พ.ศ. 2558 -2579 ได้มีเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 7,279 MW ในปี พ.ศ. 2557 เป็น 19,635 MW ภายในปี พ.ศ. 2579 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีเป้าหมายในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ 6,000 MW

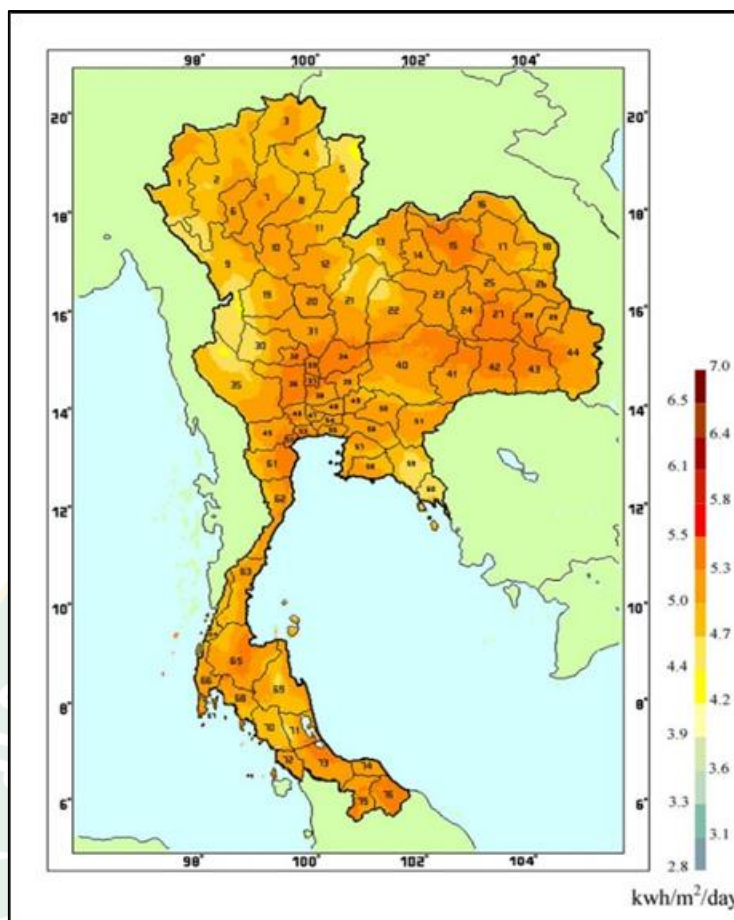
ตารางที่ 1 เป้าหมายแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ปี พ.ศ 2558-2579

ประเภทพลังงาน	ปี 2558	ผลิต ปี 2579
พลังงานจากขยะ	48	501
พลังงานชีวมวล	2,199	5,570
พลังงานจากก๊าซชีวภาพ	226	600
พืชพลังงาน	-	680
พลังงานน้ำ	3,016	3,282
พลังงานลม	220	3,002
พลังงานแสงอาทิตย์	1,570	6,000
รวม	7,279	19,635

หมายเหตุ : มีหน่วยเป็น MW

ที่มา: (กระทรวงพลังงาน, 2558)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรจึงทำให้ได้รับค่าแสงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งปี โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม มีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m²-day และเมื่อพิจารณาค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีทุกพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าประมาณ 18.2 MJ/m²-day (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2542) ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงพอสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า สำหรับทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังแสดงในรูปที่ 1

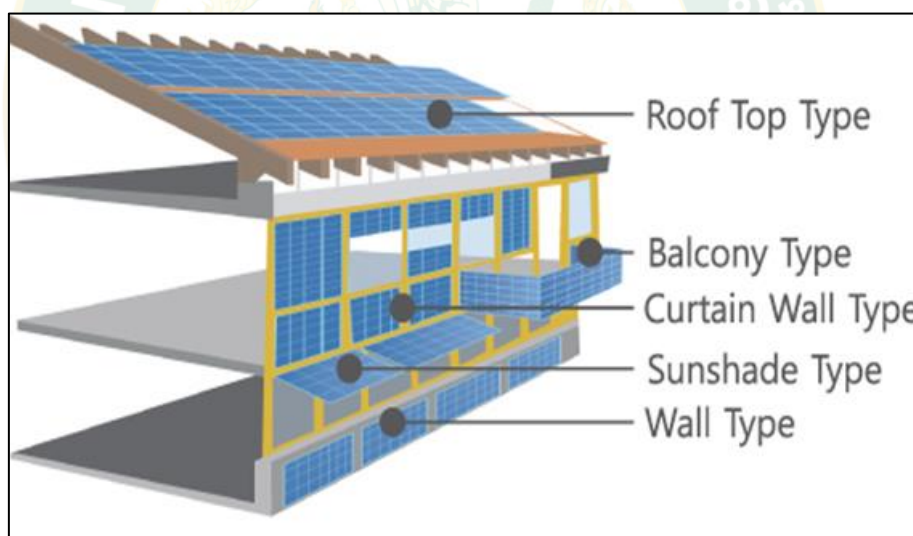


รูปที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

ที่มา: (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2542)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านแสงสว่าง ความร้อน และไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะการใช้งานในด้านการผลิตไฟฟ้าได้รับความนิยมอย่างสูงสุด เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งปัจจุบันได้มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดตั้งแต่ระดับ kW ไปจนถึง MW (กระทรวงพลังงาน, 2562) จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น และมีน้ำหนักที่ลดลง จึงทำให้มีแนวคิดในการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งร่วมกับอาคาร ซึ่งการใช้งานในรูปแบบนี้กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยมีข้อดีคือเป็นการประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเป็นการใช้พื้นที่ว่างเปล่าของอาคารให้เป็น

ประโยชน์สูงสุด นอกจากนั้นแล้วยังสามารถลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคารได้อีกด้วย การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารสามารถจำแนกออกเป็นการติดตั้งบนหลังคา บนผนังอาคาร และหน้าต่าง ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันหน้าไปทางทิศใต้จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับรังสีอาทิตย์ได้มากที่สุด โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก คือการติดตั้งบนส่วนประกอบหลักของอาคารที่เรียกว่า (Building Attached Photovoltaic : BAPV) โดยในรูปแบบนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกติดตั้งเข้ากับองค์ประกอบที่มีอยู่ของอาคาร ซึ่งสามารถติดตั้งบนผนัง หรือหลังคา ซึ่งถือเป็นส่วนหลักที่มีอยู่ของอาคาร รูปแบบที่สองคือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนส่วนประกอบของอาคารในเชิงสถาปัตยกรรมหรือเรียกว่า (Building Integrated Photovoltaic : BIPV) (Biyik และคณะ, 2017) โดยจะเป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอาคาร โดยสามารถที่จะติดตั้งเป็นลักษณะบานเกล็ด บานหน้าต่าง หรือติดตั้งแทนกระเบื้องหลังคา และกันสาด เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติมของการตกแต่งอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 2

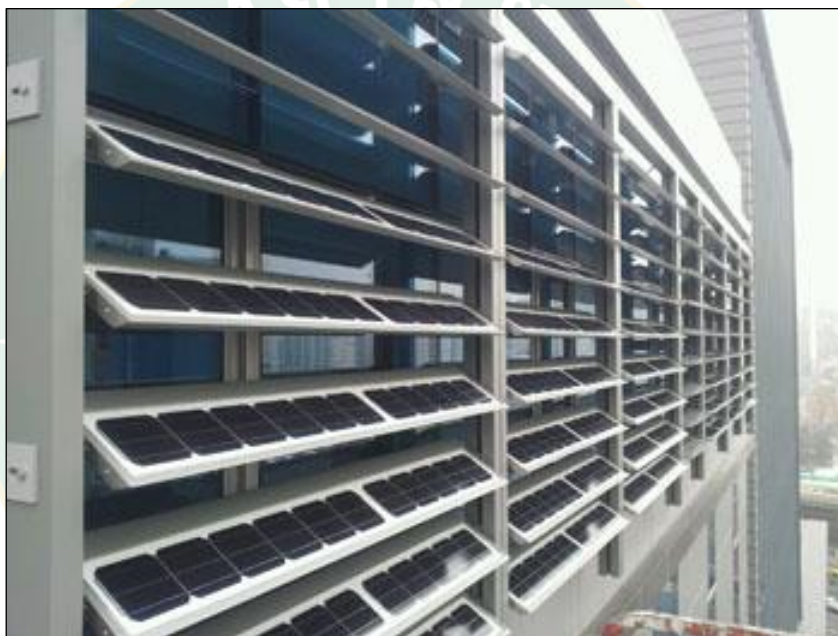


รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร

ที่มา: (S-Energy, 2014)

หน้าต่างบานเกล็ดเป็นอุปกรณ์ทางสถาปัตยกรรมที่ถือว่าเป็นหน้าต่างชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องเปิดช่วยให้อากาศภายในอาคารถ่ายเทได้สะดวก นอกจากนั้นแล้วยังสามารถที่จะควบคุมปริมาณแสงจากธรรมชาติที่เข้ามาภายในอาคารได้ตามความต้องการอีกด้วย การติดตั้งบานเกล็ดยังมี

ข้อดีคือประหยัดเนื้อที่มากกว่าเมื่อเทียบกับหน้าต่างบานเปิดหรือบานกระทุ้ง หน้าต่างบานเกล็ดที่ติดตั้งบนผนังบ้าน หรืออาคารส่วนใหญ่จะมีลักษณะเหมือนกับหน้าต่างทั่ว ๆ ไป บานเกล็ดมีอยู่ 2 รูปแบบคือ บานเกล็ดแบบติดตายกับผนังที่ไม่สามารถปรับมุมได้ ส่วนมากจะทำด้วยวัสดุไม้ หรือ อลูมิเนียม และบานเกล็ดหมุนที่สามารถปรับมุมระบายอากาศได้ โดยถือว่าเป็นบานเกล็ดสมัยใหม่ที่พัฒนามาจากบานเกล็ดแบบติดตาย วัสดุส่วนมากทำด้วยกระจกใส หรือกระจกทึบแสง (บริษัท อมรินทร์พรีนติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด มหาชน, 2019) ปัจจุบันบานเกล็ดชนิดนี้ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการติดเซลล์แสงอาทิตย์ลงบนแผ่นกระจกของบานเกล็ด



รูปที่ 3 การติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ในอาคาร

ที่มา: (ENERGIS Smart energy solutions, 2014)

จากปัญหาการใช้พลังงานในอาคารที่เพิ่มมากขึ้น การใช้หน้าต่างบานเกล็ดเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดความร้อนภายในอาคาร ให้อากาศภายในอาคารมีการถ่ายเทความร้อน ที่จะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานจากการระบายอากาศทางกล และหน้าต่างบานเกล็ดยังสามารถให้แสงจากธรรมชาติส่องผ่านเข้ามาสู่อาคารได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการลดพลังงานไฟฟ้าจากการใช้แสงประดิษฐ์ และอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดพลังงานจากการใช้พลังงานหลักของอาคารคือ การใช้พลังงานทดแทนเพื่อลด

การใช้พลังงานฟอสซิล โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูง ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการสร้างหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร โดยการใช้หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถปรับมุมได้ และใช้กระจกใสเพื่อนำมาประกอบกับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทดสอบการผลิตพลังงานไฟฟ้า การระบายอากาศของห้องทดสอบ และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติ โดยการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผง ที่มีจำนวนเซลล์ที่แตกต่างกันคือ แผงที่หนึ่งจำนวน 40 เซลล์ แผงที่สองจำนวน 60 เซลล์ และแผงที่ 3 จำนวน 80 เซลล์ ทำการทดสอบที่มุม 0° 18° และ 90° องศา ที่ใช้อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (WWR) อยู่ในช่วงระหว่าง 20-30 % เพื่อหาขนาดบานเกล็ดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระดับมุมสำหรับการระบายอากาศ และพื้นที่โปร่งแสงสำหรับการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติที่เหมาะสมของอาคาร จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาพลังงานสุทธิ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการใช้งานหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร สำหรับเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานกับอาคารขนาดใหญ่ต่อไป



วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการใช้งานร่วมกับอาคารจำลอง
- 2) เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ทางพลังงานของระบบระบายอากาศโดยใช้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

ขอบเขตการศึกษา

- 1) ใช้ห้องจำลองที่ติดตั้งระบบระบายอากาศในการติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีขนาดเท่ากับ 2.28 m ยาว 3.24 m สูง 2 m
- 2) ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว ขนาด 15 cm x 8 cm ในหน้าต่างบานเกล็ดกระจกใส
- 3) ใช้หน้าต่างบานเกล็ดที่มีค่า WWR อยู่ในช่วง 20-30% ติดตั้งในทิศเหนือ และทิศใต้
- 4) ทำการทดสอบโดยใช้จำนวนเซลล์ 2-4 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด โดย 1 บานเกล็ดจะประกอบ มี 20 แผ่นกระจกบานเกล็ด โดยทั้งหมดจะประกอบมี 3 แผงคือ บานเกล็ด 1, บานเกล็ด 2, และบานเกล็ด 3 ที่มีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 40, 60 และ 80 เซลล์ และทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° (เทียบกับพื้นโลก)
- 5) ทำการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ อัตราการระบายอากาศ ความสว่างภายในอาคาร และพลังงานสุทธิ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทราบถึงระบบระบายอากาศสำหรับการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร
- 2) ได้ทราบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคาร
- 3) ได้ทราบถึงปริมาณแสง และความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคารจากการติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจสอบเอกสาร

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์พลังงานของระบบระบายอากาศบ้านเกสต์เฮลล์ แสงอาทิตย์ที่ได้ทำการติดตั้งร่วมกับอาคาร เพื่อผลิตไฟฟ้า การระบายอากาศ และการส่องสว่างของ แสงจากธรรมชาติ ซึ่งได้ทำการศึกษาหลักการทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่จะสามารถนำมาอ้างอิง ใ้ในงานวิจัยมีความน่าเชื่อถือและถูกต้อง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

รังสีจากดวงอาทิตย์

เป็นพลังงานที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบขอบบรรยากาศ เรียกว่า รังสีที่นอกโลก (Extraterrestrial Solar Radiation) ประกอบด้วย ช่วงคลื่นสั้น ตั้งแต่ 290-300 นาโนเมตร ถึง 97% ส่วนของรังสีนอกโลกที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาถึงผิวโลกจะถูกกระจายและ ดูดกลืนโดยโมเลกุลของก๊าซต่างๆ อนุภาคฝุ่น และเมฆที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ บนพื้นโลกมีประโยชน์อย่างมากต่อดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต

ตารางที่ 2 ความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

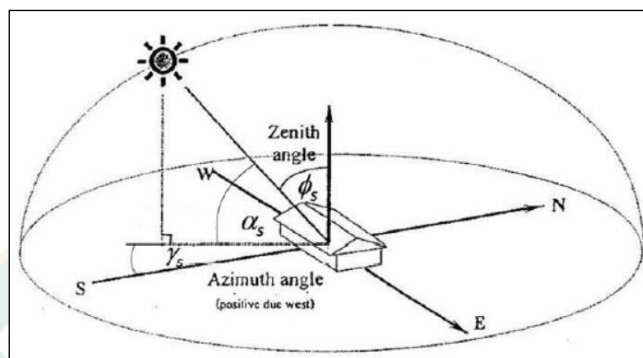
รังสีจากดวงอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น (μm)	สัดส่วนพลังงานเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่แผ่มา (%)
รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่คลื่นสั้น	0.01-0.1	3×10^{-6}
รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล	0.1-0.2	0.01
รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี	0.2-0.28	0.5
รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี	0.28-0.32	1.3
รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ	0.32-0.40	6.2
แสงสว่าง	0.40-0.78	39
รังสีอินฟราเรด	0.78-1,000	52.9

ที่มา: (เสริมจันทร์ฉาย, 2557)

การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบการหมุนของโลกที่เวลาใดๆ กับรังสีตรง หรือ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ สามารถอธิบายส่วนประกอบของมุมต่างๆ แสดงในรูปที่

4



รูปที่ 4 ตำแหน่งและทิศทางของดวงอาทิตย์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งตำแหน่งอาคารบนพื้นโลก

ที่มา: (เสริมจันทร์ฉาย, 2557)

1.) ละติจูด (Latitude, ϕ)

ละติจูด คือ ระยะห่างเชิงมุมจากศูนย์สูตรท้องฟ้า หรือมุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือกำหนดให้มีค่าบวกและเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง -90° ถึง 90°

2.) มุมเอียง (Slope, β)

มุมเอียง คือ มุมระหว่างพื้นผิวของระนาบรับแสงกับแนวระดับ มีค่าอยู่ระหว่าง 0° ถึง 180°

3.) มุมชั่วโมง (Hour Angle, ω)

มุมชั่วโมง คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมอริเดียนท้องถิ่นไปทางตะวันออกหรือทางตะวันตก มีค่าเป็นลบในช่วงก่อนเที่ยงสุริยะ (Solar Noon) และเป็นบวกหลังเที่ยงสุริยะ โดยที่มีค่า $15^{\circ}/h$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$\omega = (\text{SolarTime} - 12) \times 15$$

4.) มุมแควคลิเนชัน (Declination Angle, δ)

มุมแควคลิเนชัน คือ มุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตร กำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมแควคลิเนชันมีค่าเปลี่ยนไป ทุกวันระหว่าง -23.45° ถึง 23.45° สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta = 23.54 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ

n คือจำนวนวันในหนึ่งปี, day

5.) มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar Altitude Angle, α)

มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ คือ มุมระหว่างพื้นราบกับแนวลำแสงอาทิตย์ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\alpha = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \quad \text{สมการที่ 3}$$

6.) มุมอะซิมุมพื้นดิน (Surface Azimuth Angle, γ)

มุมอะซิมุมพื้นดิน คือ มุมระหว่างทิศใต้กับการหันหน้าของแผงรับแสงมีค่าอยู่ในช่วง -180° ถึง 180° โดยเป็นศูนย์เมื่อหันหน้าไปทางทิศใต้ เป็นบวกเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันตก และเป็นลบเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันออก

7.) มุมอะซิมุมดวงอาทิตย์ (Solar Azimuth Angle, γ_s)

มุมอะซิมุมดวงอาทิตย์ คือ มุมระหว่างระนาบแนวตั้งของดวงอาทิตย์และระนาบของเมอริเดียน ท้องถิ่น โดยกำหนดให้วัดจากทิศใต้ของระนาบแนวตั้งดวงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันตกมีค่าเป็นบวก วัดไปทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นลบ และมีค่าเป็นศูนย์ที่ทิศใต้ มุมอะซิมุมดวงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง -180° ถึง 180° สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos\delta \sin\omega}{\cos\alpha} \quad \text{สมการที่ 4}$$

8.) มุมตกกระทบ (Incidence Angle, θ)

มุมตกกระทบ คือ มุมระหว่างแนวเวลาแสงอาทิตย์บนพื้นผิวกับแนวตั้งฉากของพื้นผิว ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมอื่นๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \sin\phi \cos\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \sin\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad \text{สมการที่ 5}$$

- กรณีพื้นราบ ($\beta=0^\circ$) มุมตกกระทบ คือมุมซิมินิส

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \quad \text{สมการที่ 6}$$

- กรณีพื้นแนวตั้ง ($\beta=90^\circ$) มุมตกกระทบ คือมุมซิมินิส

$$\cos\theta = \sin\delta \cos\delta \cos\gamma + \cos\delta \sin\delta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\gamma \sin\omega \quad \text{สมการที่ 7}$$

พื้นผิวรับแสงและมุมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถนำไปหาค่ามุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ (Sunset Hour Angle, ω_s) เมื่อ $\phi_z = 90^\circ$ s

$$\cos\omega_s = -\tan\phi \tan\delta \quad \text{สมการที่ 8}$$

ค่าคงที่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Constant) คือ พลักซ์ความแน่นของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกตั้งฉากกับพื้นผิวนอกบรรยากาศของโลกเมื่ออยู่ห่างจากระยะทางหนึ่งหน่วยดาราศาสตร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.496×10^8 km มีค่าอยู่ประมาณ $1,367 \text{ W/m}^2$ หรือประมาณ $4,921 \text{ kJ/m}^2\text{-hr}$

9.) เวลาสุริยะ

เวลาสุริยะ (Solar Time) เป็นเวลาที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เวลาเที่ยงสุริยะ (Solar Noon) คือเวลาที่ดวงอาทิตย์ข้ามเส้นเมริเดียนของตำแหน่งที่ตั้งเกิด สาเหตุที่เวลาสุริยะต่างจากเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Standard Time) เนื่องจาก

- เส้นเมริเดียนของตำแหน่งที่ต้องการหาเวลาสุริยะต่างกับเส้นเมริเดียนที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น ดวงอาทิตย์ใช้เวลาประมาณ 4 min ต่อ 1 ลองจิจูด (Longitude) ที่เปลี่ยนไป
- การวัดแวงของแกนหมุนของโลก ซึ่งมีผลต่อเวลาที่ดวงอาทิตย์ข้ามเส้นเมริเดียนของตำแหน่งที่ตั้งเกิด ซึ่งการวัดแวงนี้สามารถหาได้จากสมการเวลา (Equation of Time) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสุริยะและเวลามาตรฐาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{SolarTime} = \text{StandardTime} + 4(L_{st} - L_{local}) + E$$

สมการที่ 9

$$E = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B$$

สมการที่ 10

$$B = \frac{360(n - 81)}{365}$$

สมการที่ 11

เมื่อ

L_{st} คือลองจิจูดที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น, °

L_{local} คือลองจิจูดที่ของตำแหน่งที่ต้องการหาเวลาสุริยะ, °

E คือสมการเวลา, min

10.) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระนาบเหนือบรรยากาศ (G_0)

รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระนาบเหนือบรรยากาศ ณ เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad \text{สมการที่ 12}$$

เมื่อ

G_0 คือรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระนาบเหนือบรรยากาศ, W/m^2

G_{sc} คือค่าคงที่ของรังสีอาทิตย์เท่ากับ, $1367 W/m^2$

11.) อัตราส่วนของความเข้มรังสีตรงบนพื้นเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นราบ (R_b)

เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางที่แน่นอนอยู่บนแนวลำแสง และขึ้นกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าจึงสามารถคำนวณหาค่า R_b ได้จากมุมตกกระทบของลำแสงบนพื้นผิวใดๆ ดังนี้

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

สมการที่ 13

12.) ดัชนีการมีเมฆ (Cloudiness Index, k_T)

เมฆมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดพลังงานรังสีอาทิตย์ อิทธิพลนี้เปลี่ยนแปลงไปกับชนิดของเมฆในท้องฟ้าและไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ในทางปริมาณที่แน่นอน ดังนั้นดัชนีการมีเมฆ คือค่าที่บ่งบอกถึงการลดลงของแสงเนื่องจากบรรยากาศของพื้นที่นั้นๆ ในช่วง เดือนที่กำหนดค่าดัชนีการ

มีเมฆจะเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งปีเนื่องจากการหมุนของโลกรอบดวงอาทิตย์ ดัชนีการมีเมฆหาได้จาก อัตราส่วนรังสีรวมรายชั่วโมงบนพื้นราบ (I) ต่อรังสีรวมรายชั่วโมงเหนือระนาบบรรยากาศ (I_0) ซึ่งค่า K_T นี้จะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนรังสีกระจายรายชั่วโมง (I_d) ต่อรังสีรวมรายชั่วโมง (I)

$$K_T = \frac{I}{I_0} \quad \text{สมการที่ 14}$$

$$\frac{I_d}{I} = 1 - (0.09K_T); K_T \leq 0.02 \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.0260K_T + 4.388K_T^2 - 16.638K_T^3 + 12.366K_T^4; 0.22 < K_T \leq 0.88 \quad \text{สมการที่ 16}$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.165; K_T > 0.88 \quad \text{สมการที่ 17}$$

โดยค่า I_b หาจากความสัมพันธ์

$$I_b = I - I_d \quad \text{สมการที่ 18}$$

รังสีอาทิตย์ขณะที่ตกผ่านชั้นบรรยากาศที่ผิวโลก มีบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนสะท้อนกลับสู่บรรยากาศ ทำให้รังสีที่ตกลงบนพื้นโลกน้อยลง รังสีที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวใดๆ ประกอบด้วยรังสีตรงจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้า รังสีกระจายจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้า และรังสีสะท้อนจากพื้นโลก ค่าการสะท้อนแสงของผิว (Reflectance, ρ) อาจมีลักษณะซับซ้อน เนื่องจากขึ้นอยู่กับทิศทางที่ตกกระทบ จึงเป็นการยากที่จะเลือกใช้การคำนวณ จึงหันมาเลือกใช้การเฉลี่ยของค่าสะท้อนของแสงอาทิตย์ ดังนั้น สามารถหารังสีรวมที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ ได้ดังนี้

$$I_T = T_b R_b - I_b \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \text{สมการที่ 19}$$

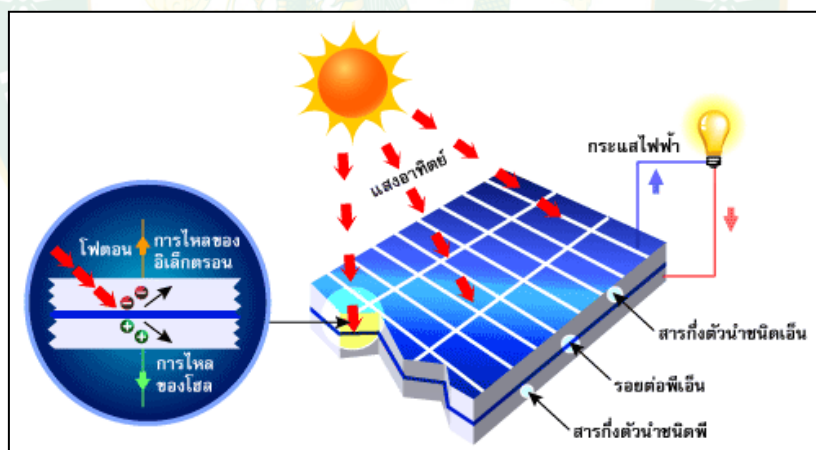
เมื่อ

I_T คือรังสีรวมที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ, W/m^2

ρ_g คือค่าการสะท้อนแสงของพื้นดิน มีค่าเท่ากับ 0.2 เมื่อพื้นดินไม่มีหิมะปกคลุม และเมื่อ มีหิมะปกคลุมมีค่าเท่ากับ, 0.7

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์คืออุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยอาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งเป็นหลักการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ ซิลิกอนในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการดูดกลืนแสงเหล่านั้น โดยพลังงานที่ดูดกลืนจะถูกนำไปกระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้นภายในชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่ในการแยกคู่อิเล็กตรอนโฮลให้เป็นอิสระออกจากกัน เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลเป็นประจุอิสระแล้วก็จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อภาระงานไฟฟ้าให้ครบวงจรก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา:(บริษัท โรงพิมพ์ตะวันออก จำกัด มหาชน, 2014)

เซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้งาน คือ

1.) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีค่าประมาณ 12-18%

2.) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง $0.5 \mu\text{m}$ น้ำหนักเบามาก แต่มีประสิทธิภาพประมาณ 5-10%

3.) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์, แคดเมียม เทลเลอไรด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไตเซลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25% ดังแสดงในรูปที่ 6

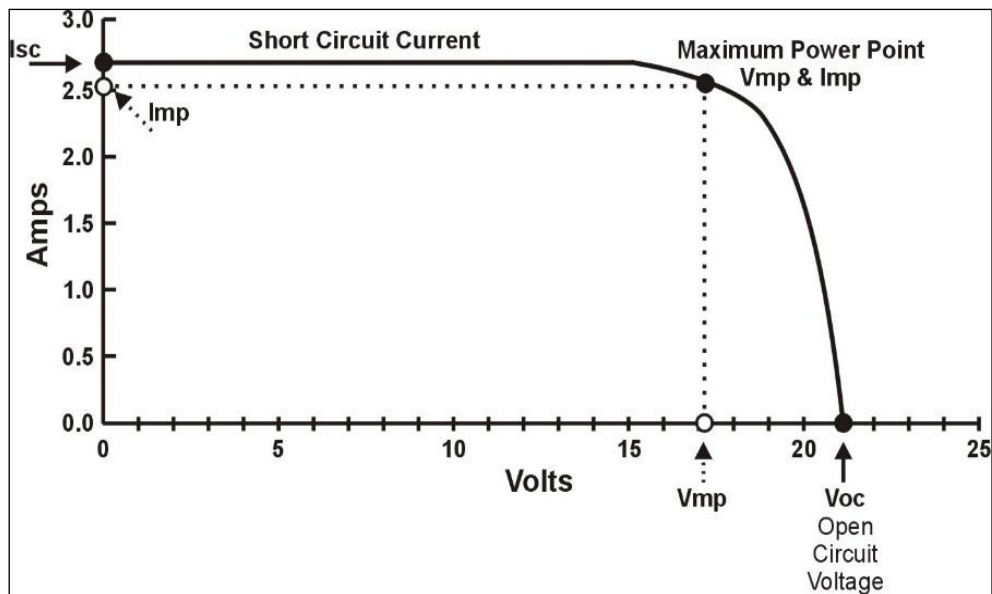


รูปที่ 6 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด

ที่มา: (บริษัท โรงพิมพ์ตะวันออก จำกัด มหาชน, 2014)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V Characteristic) ระหว่างที่มีแสงอาทิตย์มาตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดสอบจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (V_{oc}) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_m) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m) ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{pv}) และค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) สามารถหาได้จาก (I-V Characteristic) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (EMSD HK RE Net, 2019)

จากกราฟรูปที่ 7 คุณสมบัติกระแส และแรงดันสามารถหาค่าของ P_m ได้จากสมการที่ 20

$$P_m = I_m \times V_m$$

สมการที่ 20

เมื่อ

P_m กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์, (W)

I_m กระแสไฟฟ้าสูงสุด, (A)

V แรงดันไฟฟ้าสูงสุด, (V)

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ 21

$$\eta_{pv} = \frac{P_m}{I_G A_m} \times 100\%$$

สมการที่ 21

เมื่อ

 η_{pv} ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์, (%) I_G ความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์, (W/m^2) A_m พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, (m^2)

ค่าการหาค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ ฟิลแฟกเตอร์หรืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ต่อผลคูณระหว่างกระแสลัดวงจร และ แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด สามารถหาได้จากสมการที่ 22

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

สมการที่ 22

เมื่อ

FF ค่าฟิลแฟกเตอร์ %

 I_{sc} กระแสไฟฟ้ลัดวงจร, (A) V_{oc} แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด, (V)

ระบบการระบายอากาศ (Ventilation System)

การระบายอากาศหมายถึงการจัดการเคลื่อนย้ายอากาศด้วยปริมาณที่กำหนด ให้ไหลไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งด้วยความเร็วของลม ที่สามารถกำจัดมลพิษ ความร้อน ความชื้น กลิ่นรบกวนควัน และอื่นๆ ให้ออกไปจากห้องเพื่อให้อากาศบริสุทธิ์เข้ามาแทนที่ ซึ่งการระบายอากาศมีหลายรูปแบบ การระบายอากาศแบบทั่วไป (General Exhaust Ventilation) หรือเรียกว่าเป็นการระบาย

อากาศเพื่อเจือจาง (Dilution Ventilation) (บริษัท อาร์พีซี อินโนเวชั่น จำกัด, 2015) การระบายอากาศประเภทนี้แบ่งได้เป็นอีก 2 ชนิด คือ

1. การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural ventilation) เป็นวิธีการที่ใช้กันมากโดยอาศัยหลักการเคลื่อนไหวของอากาศแบบธรรมชาติ โดยอาศัยหลักความดันที่ แตกต่างในแต่ละพื้นที่ ทิศทางในการไหลของอากาศ แรงยกตัวของอากาศ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นหลักการที่วิศวกร สถาปนิกใช้ในการออกแบบอาคารสถานที่ต่างๆ พื้นฐานของการระบายอากาศด้วยวิธีนี้ เป็นการเคลื่อนย้ายถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากบริเวณต่างๆไป ในอาคาร เช่น ในห้อง โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้เกิดความสบายของผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้น โดยทั่วไปแล้วจะเป็นการระบายอากาศเพื่อควบคุม อุณหภูมิและกลิ่นภายในอาคาร หรือสำนักงาน ข้อมูลที่ใช้กันนั้นแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์

2. การระบายอากาศโดยวิธีกล (Mechanism ventilation) การระบายอากาศโดยวิธีกล เป็นวิธีการระบายอากาศที่ต้องอาศัยอุปกรณ์หรือเครื่องกล เช่น พัดลมช่วยให้อากาศเคลื่อนไหว หมุนเวียน

ประโยชน์ของการระบายอากาศ

- 1.) สามารถควบคุมความร้อน และ ความชื้น ให้อยู่ในระดับที่คนทำงานจะรู้สึกสบายได้
- 2.) สามารถควบคุมระดับสิ่งปนเปื้อนในอากาศ บริเวณคนทำงานให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย
- 3.) สามารถป้องกันไม่ให้เกิดอัคคีภัยและการระเบิด จากไอของสารเคมีบางชนิดที่สามารถลุกติดไฟได้
- 4.) สามารถดักเก็บวัสดุที่ฟุ้งกระจายกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก
- 5.) สามารถดักเก็บฝุ่นหรือสิ่งปนเปื้อนในอากาศ ก่อนที่จะปล่อยออกสู่ภายนอก

1. ภาวะความร้อน

อาคารหรือบ้านโดยทั่วไป สมดุลความร้อนในห้องทดสอบที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับค่ารังสีอาทิตย์ที่มากกระทบบนผนัง หลังคาห้องทดสอบและการระบายอากาศ ซึ่งจะอยู่ในรูปของความร้อนสะสมในห้องทดสอบและความร้อนแฝงของอากาศขึ้น การถ่ายเทความร้อนจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ ภาวะความร้อนที่มีอยู่ในห้องทดสอบแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

- ภาวะความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้อง (Internal Heat Load) ความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนผ่านห้องทดสอบ ได้แก่ ความร้อนจากภายนอกที่ถ่ายเทความร้อนมายังหลังคา ผนังห้อง และ ประตู ของห้องทดสอบ

- ภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายนอกห้อง (Outside Heat Load) คืออากาศที่สามารถถ่ายเทเข้าหรือออกห้องทดสอบ (Ventilation Air)

2. การระบายอากาศ

การระบายอากาศในอาคารเป็นสิ่งที่สำคัญไม่ว่าจะเป็นการระบายอากาศทางกลหรือแบบธรรมชาติ ซึ่งอาคารแต่ละประเภทจำเป็นต้องมีการระบายอากาศเพื่อทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในห้อง ทำให้อากาศไหลออกไปแล้วอากาศบริสุทธิ์ไหลเข้ามาแทน (บริษัท เฟรช เอ็นเนอร์ยี เซฟวิ่ง จำกัด, 2012) การระบายอากาศแบบธรรมชาติจำเป็นต้องอาศัยลมเพื่อเป็นตัวเคลื่อนย้ายอากาศ การระบายอากาศในอาคาร สามารถเกิดขึ้นได้โดย 2 ปัจจัย ได้แก่ การระบายอากาศโดยอาศัยความเร็วลมที่พัดเข้าสู่อาคาร และการระบายอากาศโดยอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ ซึ่งมีผลมาจากผลต่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในอาคาร อาจเป็นเพราะการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างลมและอาคาร สำหรับอาคารที่มีช่องเปิดด้านข้างสองด้าน สามารถหาอัตราการระบายอากาศได้ดังนี้ (Boulard และ Baille, 1995; Majdoubi และคณะ, 2007)

$$G = \frac{S}{2} Cd \left[2g \left(\frac{DT}{T_{amb}} \right) \left(\frac{H}{2} \right) + C_w U^2 \right]^{0.5}$$

สมการที่ 23

เมื่อ

G คืออัตราการระบายอากาศ, m³/s

S คือพื้นที่ช่องเปิดของการระบายอากาศ, m²

Cd คือ Discharge Coefficient, (ค่าค่าที่ = 0.75)

g คือแรงโน้มถ่วงของโลกมี, (ค่าเท่ากับ 9.81 m/s²)

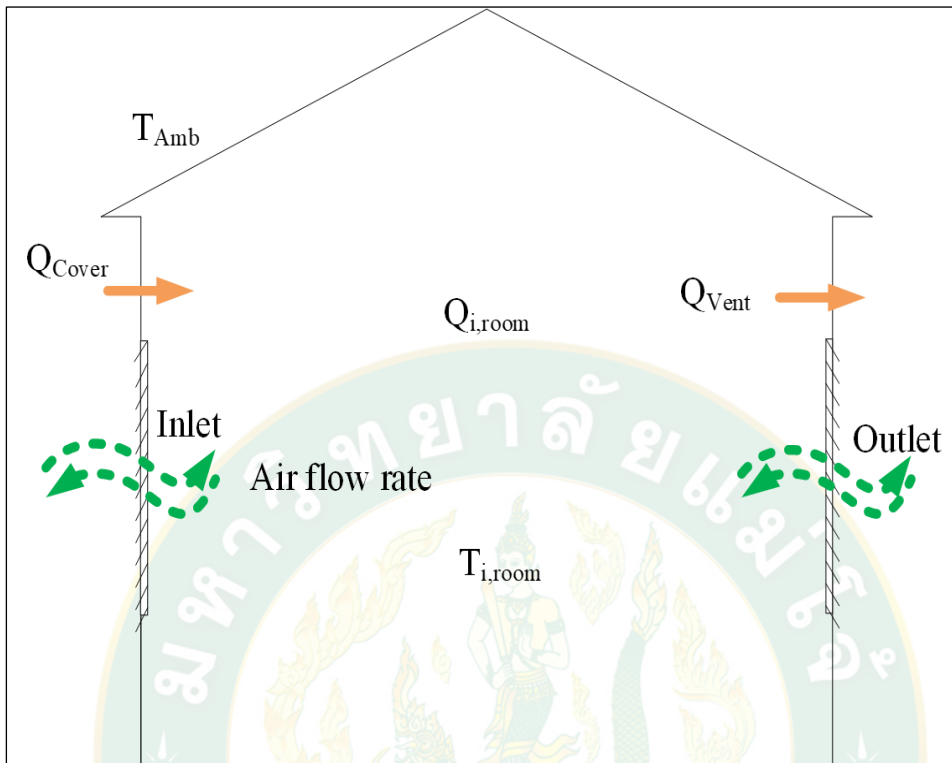
DT คือผลต่างของอุณหภูมิด้านในและด้านนอกห้องทดสอบ, °C

T_{amb} คืออุณหภูมิแวดล้อม, °C

H คือระยะความสูงระหว่างช่องอากาศเข้าและออก, m

C_w คือ Wind Effect Coefficient (ค่าค่าที่ = 0.023)

U คืออัตราเร็วลมที่เข้ามาภายในอาคาร, m/s



รูปที่ 8 สมดุลพลังงานของห้องทดลอง (Energy Balance)

3. สมดุลพลังงานความร้อน (Energy Balance)

พิจารณาสมดุลทางด้านพลังงานความร้อนในห้องทดสอบจากการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° โดยมีรายละเอียดของสมการที่ดังนี้ (สุรินทร์ และสุลักษณ์, 2560)

$$Q_{i,room} = Q_{Cover} + Q_{Vent} \quad \text{สมการที่ 24}$$

$$M_{da,i,room} C_{p,da,i,room} \frac{dT}{\Delta t} = Q_{Cover} + Q_{Vent} \quad \text{สมการที่ 25}$$

$$M_{da,i,room} C_{p,da,i,room} \frac{T_{i,room}^{t+\Delta t} - T_{i,room}^t}{\Delta t} = Q_{Cover} + Q_{Vent} \quad \text{สมการที่ 26}$$

$$M_{da,i,room} C_{p,da,i,room} \frac{T_{i,room}^{t+\Delta t} - T_{i,room}^t}{\Delta t} = Q_{Cover} + Q_{Vent} \quad \text{สมการที่ 27}$$

$$T_{i,room}^{t+\Delta t} = \frac{(Q_{Cover} + Q_{Vent})\Delta t}{M_{da,i,room} C_{p,da,i,room}} + T_{i,room}^t \quad \text{สมการที่ 28}$$

- ความหนาแน่นของอากาศภายในห้องทดสอบ ($\rho_{da,i,room}$)

$$\rho_{da,i,room} = 360.77819 \times (T_{i,room})^{-1.00336} \quad \text{สมการที่ 29}$$

- มวลอากาศภายในห้องทดสอบ ($M_{da,i,room}$)

$$M_{da,i,room} = \rho_{da,i,room} V_{room} \quad \text{สมการที่ 30}$$

- ค่าความจุความร้อนกรองอากาศภายในห้องทดสอบ ($C_{p,da,i,room}$)

$$C_{p,da,i,room} = (0.9957 + 0.000037 \times T_{i,room}) \quad \text{สมการที่ 31}$$

เมื่อ

$M_{da,i,room}$ คือมวลของอากาศแห้งภายในบ้าน, kg

$C_{p,da,i,room}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งภายในบ้าน, J/kg-K

$T_{i,room}^{t+\Delta t}$ คืออุณหภูมิภายในบ้านเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป, °C

$T_{i,room}^t$ คืออุณหภูมิภายในบ้านเมื่อเวลาเริ่มต้น, °C

Δt คือเวลา, s

Q_{cover} คืออัตราความร้อนจากกรอบของห้องทดสอบ, W

Q_{vent} คืออัตราความร้อนจากการระบายอากาศ, W

4. อัตราความร้อนจากกรอบของห้องทดสอบ (Q_{cover})

เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้ามาสู่ตัวห้องทดสอบที่ผ่านหน้าต่าง ผนัง หรือ หลังคา ซึ่งพิจารณา ค่า $UA_{rome,Avs}$ ของห้องทดสอบสามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ การคำนวณจาก อัตราการระบายอากาศ รายการคำนวณความร้อนที่ผ่านเข้าผนังของอาคาร เพื่อวิเคราะห์ความร้อนจากห้องทดสอบดังนี้

$$Q_{\text{cover}} = \sum Q_{\text{cover},i}$$

สมการที่ 32

$$Q_{\text{cover},i} = UA(TD_{\text{eq}})$$

สมการที่ 33

เมื่อ

Q_{cover} คืออัตราความร้อนจากกรอบของห้องทดสอบ, W

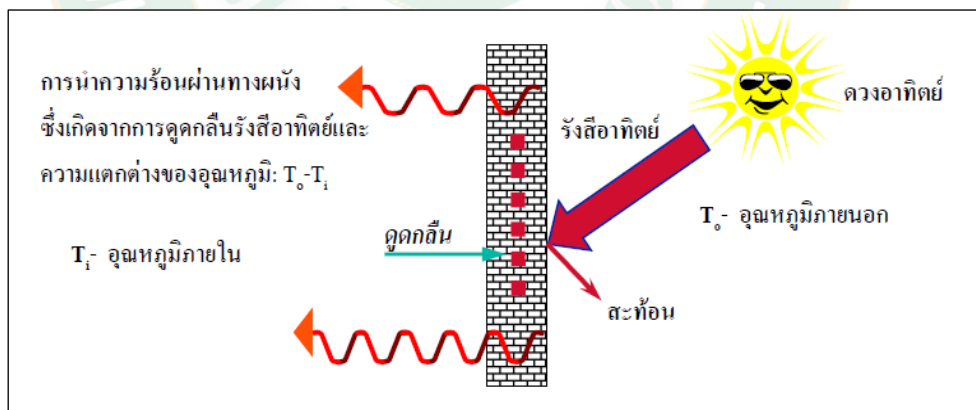
$Q_{\text{cover},i}$ คืออัตราความร้อนจากกรอบของผนังห้องทดสอบในในด้านที่พิจารณา, W

U คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกรอบอาคาร, $W/m^2\text{°C}$

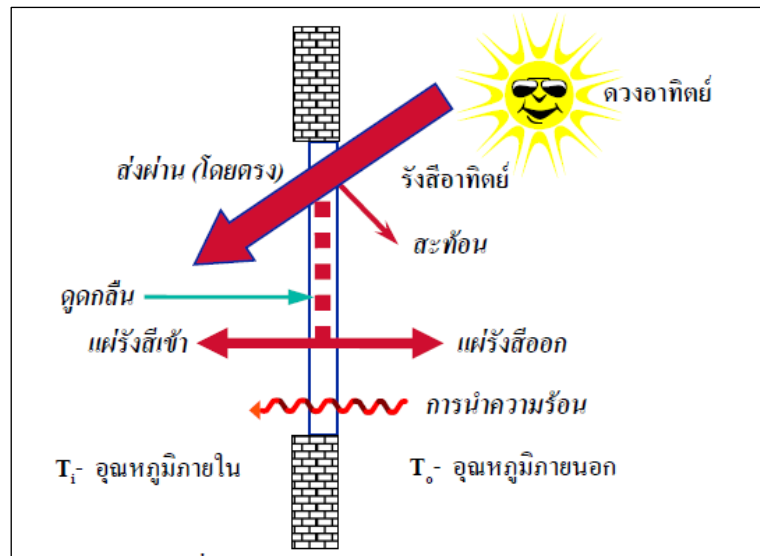
A คือพื้นที่ของผนังทึบหรือหลังคา, m^2

TD_{eq} คือค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า, °C

สามารถหาค่า U ได้จากการคำนวณความร้อนที่เข้ามาทางผนังและหลังคา โดยความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระจก จากรูปรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกไป อีกส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและสะสมไว้ และทำให้ผิวผนังด้านนอกมีอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ



รูปที่ 10 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกระจก

ที่มา: (คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน อาคาร, 2553)

$$U_w = 1 / \sum R$$

สมการที่ 34

$$U_f = 1 / \sum R$$

สมการที่ 35

$$R = \Delta x / K$$

สมการที่ 36

เมื่อ

U_w คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ, $W/m^2\text{°C}$

U_f คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังโปร่งแสง, $W/m^2\text{°C}$

R ความต้านทานความร้อน, m^2k/W ซึ่งประกอบด้วยค่าการพาความร้อนและการนำความร้อน

Δx ความหนาของวัสดุ, m

การถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคารซึ่งเป็นกรณีของการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคาร โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบสภาวะไม่คงที่ โดยมีอิทธิพลจากการแผ่

รังสีของดวงอาทิตย์ การแผ่รังสีของผนังอาคาร อุณหภูมิภายนอกอาคาร และยักรวมถึงลักษณะของโครงสร้างอาคาร โดยในการคำนวณความร้อนผ่านกรอบอาคารในสภาวะไม่คงที่มีความซับซ้อนอย่างมาก จึงได้ทำการคำนวณให้อยู่ในสภาวะคงที่ โดยการใช้ผลค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent Temperature Reference: T_{Deq}) ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า T_{Deq} สามารถหาได้จากสมการที่ 42 (Kunchornrat และคณะ, 2009)

$$T_{Deq} = T_{sol} - T_{i,room} \quad \text{สมการที่ 37}$$

$$T_{sol} = T_{amb} + \left(\frac{\alpha I_T}{h_{out}} \right) - \left(\frac{\epsilon I_r}{h_{out}} \right) \quad \text{สมการที่ 38}$$

เมื่อ

T_{Deq} คือค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า, °C

T_{amb} คืออุณหภูมิแวดล้อม, °C

α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของวัสดุกรอบอาคาร, (0.7)

ϵ คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุ

I_T คือค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นรับรังสี, W/m^2

I_r คือค่าความแตกต่างระหว่างรังสีคลื่นยาวที่ตกกระทบบนผิวจากท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อม

T_{sol} (Sol-Temperature) คืออุณหภูมิสมมติของอากาศที่ติดกับผิวของวัสดุในบริเวณที่ไม่มีอิทธิพลจากแสงแดด และการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจากท้องฟ้า สิ่งแวดล้อม และการพาความร้อนของอากาศ

สำหรับผิวของวัสดุในแนวพื้นเอียงของหลังคาจะได้รับรังสีคลื่นยาวจากท้องฟ้า ดังนั้นค่าของ $I_r = 63 \text{ (W/m}^2\text{)}$, ผนังในแนวตั้งเท่ากับ $I_r = 0 \text{ (W/m}^2\text{)}$, ดังนั้นถ้า $\epsilon = 1$ และ $h_{out} = 17 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$ (Yumrutas และคณะ, 2007)

5. ความร้อนจากการระบายอากาศ (Q_{vent})

เป็นความร้อนที่ระบายออกจากห้องทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{vent} = 0.5V_{room}N(T_{Amb} - T_{i,room})$$

สมการที่ 39

$$N = \frac{G}{V_{room}}$$

สมการที่ 40

เมื่อ

Q_{vent} คือความร้อนจากการระบายอากาศ, W

V_{room} คือปริมาตรของห้องทดลอง, m^3

N คืออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate), s^{-1}

T_{amb} คืออุณหภูมิแวดล้อม, $^{\circ}C$

$T_{i,room}$ คืออุณหภูมิภายในบ้าน, $^{\circ}C$

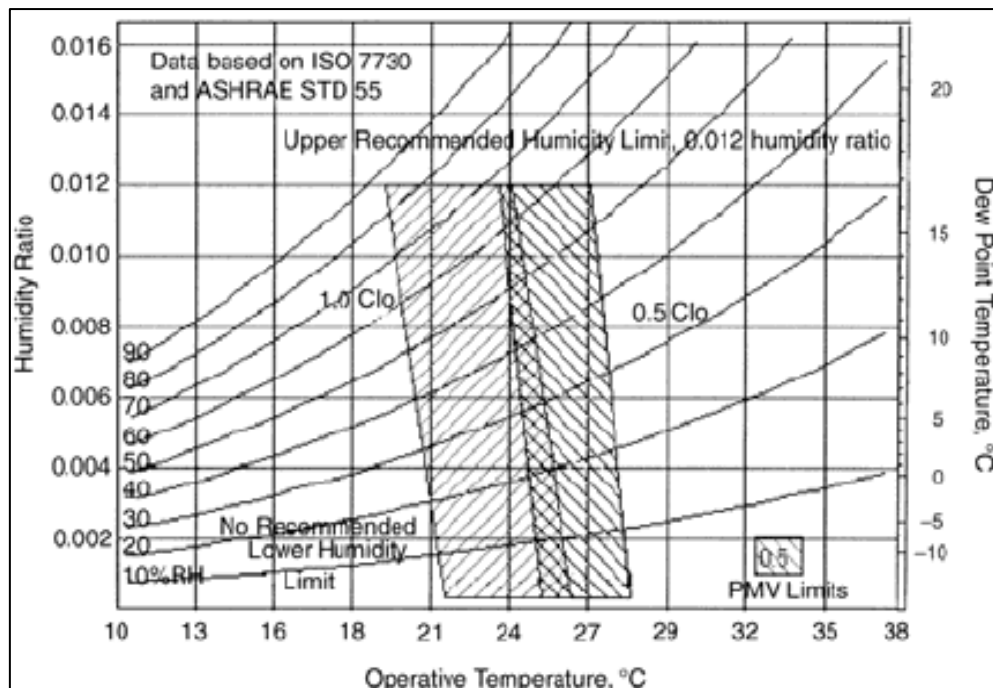
G คืออัตราการระบายอากาศภายในห้อง, m^2/s

6. สภาวะสบาย (Comfort Zone)

เป็นช่วงอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ทำให้คนส่วนใหญ่รู้สึกสบาย ซึ่งมีปัจจัยหลักดังนี้

1. อุณหภูมิ
2. ความชื้นสัมพัทธ์
3. ความเร็วลมที่มาปะทะตัวเรา
4. การแผ่ความร้อนจากสิ่งแวดล้อม

สภาวะสบายในแต่ละฤดูและแต่ละภูมิภาคก็แตกต่างกันไปในรายละเอียด โดยสภาวะสบายในประเทศไทยจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ $21 - 27 \text{ }^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ $50 - 70 \%$ และความเร็วลมที่ $0.2 - 1.0 \text{ m/s}$ และ ดังแสดงในแผนภูมิไซโครเมตริกเทียบกับสภาวะความสบาย



รูปที่ 11 แผนภาพ ASHRAE Thermal Comfort Zone

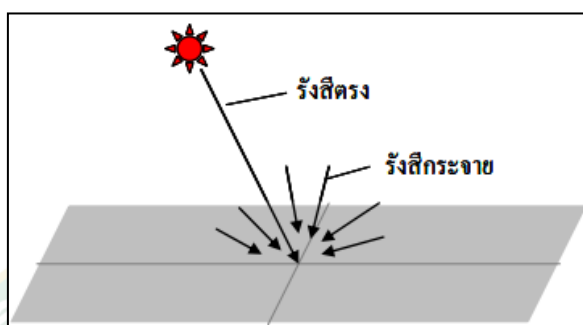
ที่มา: (ASHRAE, 2014)

ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง และการส่องสว่างของแสง (Theory of Light)

แสงจากดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศมาถึงพื้นผิวโลก ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 300-3000 nm ซึ่งความยาวคลื่นที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ประมาณ 400-700 nm ที่มนุษย์เรียกความยาวคลื่นนี้ว่า แสงสว่างจากธรรมชาติ ซึ่งแสงสว่างจากธรรมชาตินี้มีความสำคัญต่อโลกเป็นอย่างมาก เช่น ช่วยให้สิ่งมีชีวิตมีการเจริญเติบโต และช่วยให้มีพลังงานใช้ เป็นต้น แสงจากธรรมชาติยังมีความสำคัญต่อการออกแบบบ้านประหยัดพลังงาน หรืออาคารอนุรักษ์พลังงาน ที่สามารถใช้แสงสว่างจากธรรมชาติส่องผ่านเข้าไปในอาคารเพื่อให้สามารถลดการใช้แสงสว่างจากไฟฟ้าได้ พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เข้ามาสู่พื้นโลกได้ทะลุผ่านชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะเกิดมีการกระจายของแสง และการสะท้อนของแสงในชั้นบรรยากาศ แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านเข้ามาบนโลกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังรูปที่ 12

- รังสีตรง (Direct radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ตกลงบนผิวรับรังสี ที่มีทิศทางแน่นอนในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง

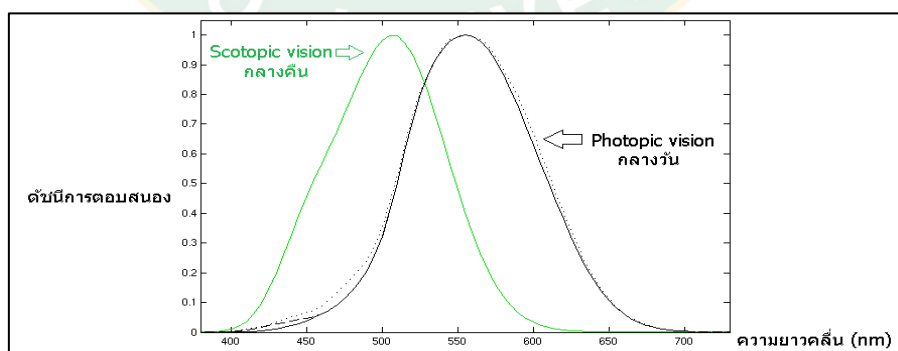
- รังสีกระจาย (Diffuse radiation) คือ รังสีที่สะท้อนจากชั้นบรรยากาศ สู่พื้นโลก และวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในทิศทางเดินของแสงก่อนจะตกกระทบผิวรับรังสี และรังสีกระจายจะกระจายไปทุกทิศทางของท้องฟ้า



รูปที่ 12 องค์ประกอบของดวงอาทิตย์ที่ตกลงใส่บนพื้นผิวโลก

ที่มา: (เสริมจันทร์ฉาย, 2557)

แสงเมื่อมีการส่องสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านมาสู่วัตถุต่างๆ แต่ละอย่างย่อมมีผลที่แตกต่างกันไป รวมถึงสายตามนุษย์ที่ตอบสนองต่อแสงสว่างที่ความยาวคลื่นไม่เข้า โดยคณะกรรมการการส่องสว่างนานาชาติ (Commission Internationals d'Eclairage, CIE) ได้กำหนดมาตรฐานการตอบสนองของสายตามนุษย์ของแสงสว่างดังแสดงในรูปที่ 13

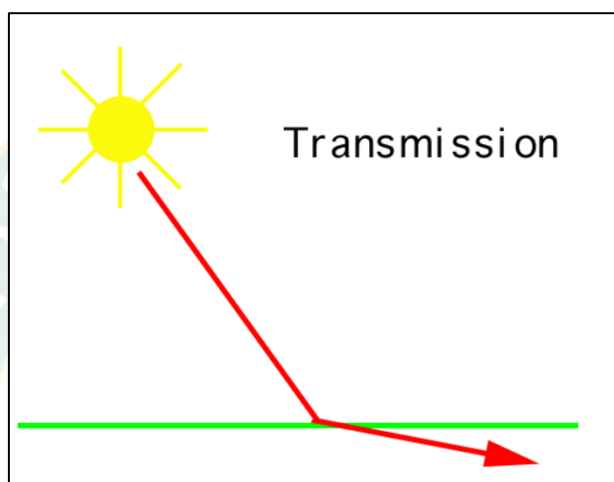


รูปที่ 13 การตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อแสงสว่าง

ที่มา:(เสริมจันทร์ฉาย, 2557)

1. พฤติกรรมของแสง

1.) การส่องผ่านของแสง (Transmission) เป็นการส่องผ่านของแสงที่ส่องผ่านตัวกลางแล้วยังสามารถทะลุผ่านไปอีกด้านของวัสดุ เช่น แสงตกกระทบใส่วัสดุโปร่งแสง เช่น การส่องผ่านกระจกใสหรือกระจกทึบแสง ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ อีกส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน และอีกส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านเข้าไปข้างใน สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 41

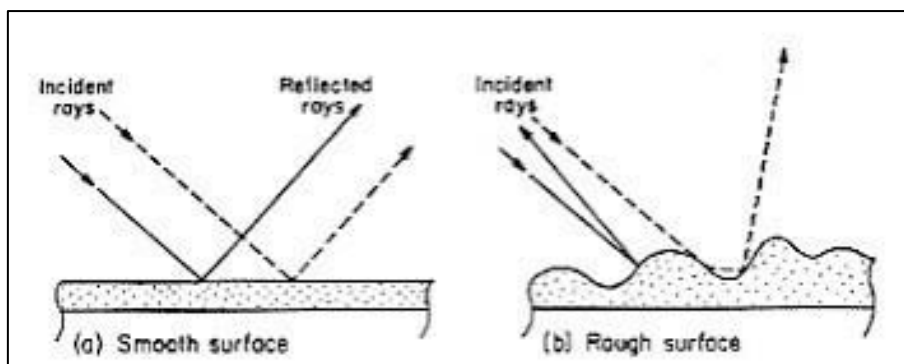


รูปที่ 14 การส่องผ่านของแสง (Transmission)

ที่มา: (เสริมจันทร์ฉาย, 2557)

ปริมาณแสงทั้งหมด = ปริมาณแสงที่สะท้อนกลับ (Reflection) + ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน (Absorption) + ปริมาณแสงที่ทะลุผ่าน (Transmission) สมการที่ 41

2.) การสะท้อนของแสง (Reflection) เป็นลักษณะของแสงที่ส่องกระทบพื้นผิวของวัตถุใดหนึ่งแล้วสะท้อนตัวออกไปด้วยความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแสงไม่มีกาเปลี่ยนแปลง ซึ่งทิศทางในการสะท้อนของแสงจะขึ้นกับพื้นผิวของวัตถุนั้นๆ การสะท้อนของแสงแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การสะท้อน (Reflection) บนผิวเรียบ และผิวขรุขระ

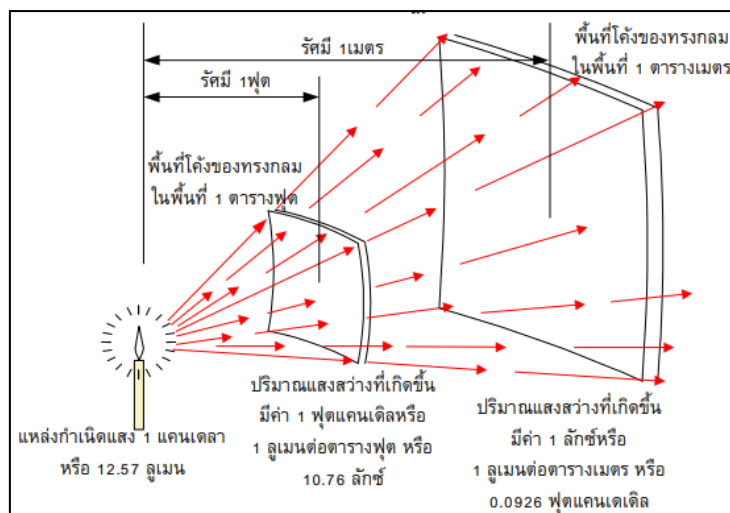
ที่มา: (Beeson และ Mayer, 2008)

3.) การดูดกลืนของแสง (Absorption) เป็นลักษณะเมื่อแสงตกกระทบวัตถุตัวกลางแล้วถูกดูดกลืนเข้าไป ซึ่งการดูดกลืนของแสงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ โดยทั่วไปเมื่อแสงถูกดูดกลืนด้วยวัสดุ ลักษณะที่ได้จากแสงพลังงานความร้อน

2. ทฤษฎีการส่องสว่างของแสง

2.1. ปริมาณแสง (Luminous Flux)

เป็นพลังงานแสงสว่างที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงต่อหน่วยเวลา หน่วยเป็น ลูเมน (Lumen ; lm) 1 ลูเมน หมายถึงปริมาณแสงที่ส่องบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตรบนผิวทรงกลมที่มีรัศมีหนึ่งเมตร เป็นการบอกค่าพลังงานหรือกำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดในรูปแบบเส้นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด โดยปริมาณแสง 680 lm ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดใดหนึ่ง ที่มีความยาวคลื่น 555 nm จะมีพลังงาน 1 W เป็นค่าที่มากที่สุดสำหรับสายตามนุษย์ในการมองเห็น เช่น เทียนไขทั่วไปจะให้แสงประมาณ 12.57 lm ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ปริมาณแสงที่ส่องสว่างเป็นรูปทรงกลม

ที่มา: (มนตรี เงามเดช, 2558)

2.2. ความเข้มของการส่องสว่าง (Illuminous Intensity ; I)

เป็น ความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างหรือพลังงานที่ส่องออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ปริมาณแสง Lm ที่ตกกระทบพื้นที่ $1 m^2$ ของพื้นผิวทรงกลมที่มีรัศมี 1 เมตร จะมีความส่องสว่างเท่ากับ 1 Lux

$$I = \frac{L}{D^2}$$

เมื่อ

I ความเข้มของการส่องสว่าง (Lux)

L ความส่องสว่าง (lm)

D^2 ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงไปยังพื้นที่ผิว (m^2)

สมการที่ 42

2.3. ความสว่าง (Luminance, L)

หมายถึงความส่องสว่างที่กระทบลงบนวัตถุ มีหน่วยเป็น cd/m^2 หากวัตถุนั้นมีพื้นผิวหรือสีที่แตกต่างกันก็จะทำให้ความสว่างบนวัตถุนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ที่เรียกว่าค่าความสว่าง (Luminance)

เช่น เมื่อเราส่องแสงกระทบพื้นผิวสีขาวก็จะทำให้ความสว่างมากกว่าวัตถุพื้นผิวสีดำ ดังแสดงในสมการที่ 43

$$L = \frac{RI}{D^2}$$

สมการที่ 43

เมื่อ

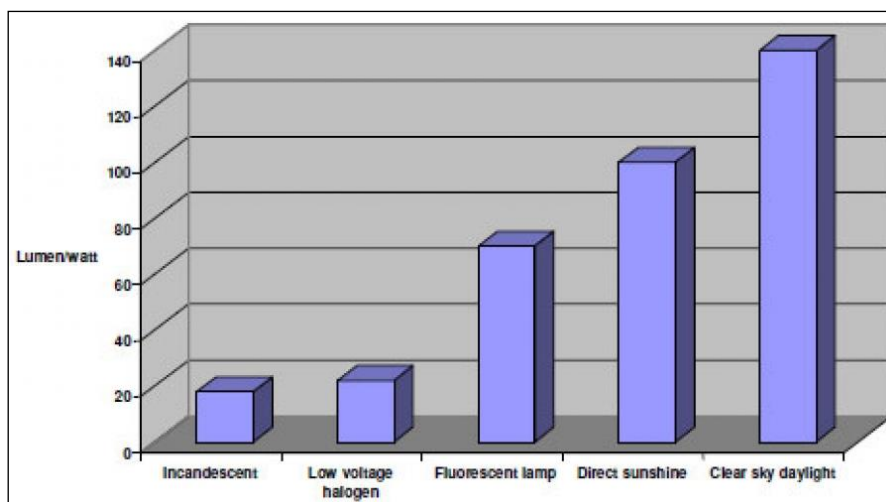
- L ความสว่าง (cd/m²)
 I ความเข้มของการส่องสว่าง (Lux)
 R สัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัตถุ
 D² ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงไปยังพื้นที่ผิว (m²)

3. ระบบการส่องสว่างภายในอาคาร

การใช้แสงสว่างเพื่อการมองเห็นเป็นสิ่งสำคัญไม่ว่าจะเป็นการทำงานกิจกรรมใดหรือการทำงานควรมีระดับแสงสว่างที่เหมาะสม ส่งผลให้ผู้ทำงานได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบการส่องสว่างแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ

- 1.) การให้แสงสว่างทั่วพื้นที่ (General Lighting) เป็นวิธีการให้แสงสว่างแบบทั่วไป ซึ่งให้ปริมาณแสงสว่างทั่วพื้นที่เท่าๆกัน
- 2.) การให้แสงสว่างทั่วพื้นที่ (Local Lighting) เป็นวิธีการเพิ่มแสงสว่างในจุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นที่ที่ต้องการใช้งานแสงสว่างมาก
- 3.) การให้แสงสว่างทั่วพื้นที่และเฉพาะที่ (General and Localized Lighting) เป็นการให้แสงสว่างแบบผสมผสาน โดยให้ปริมาณแสงสว่างตามความเหมาะสมของพื้นที่ใช้งาน

การส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งปริมาณแสงกับกำลังงานที่ทำให้เกิดปริมาณแสงมีหน่วยเป็น lm/W เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแสงสว่างของรังสีอาทิตย์โดยตรงสามารถช่วยให้ง่ายต่อการออกแบบอาคารและระบบช่องเปิดอาคารเพื่อนำแสงสว่างจากธรรมชาติมาใช้ หากเปรียบเทียบแสงสว่างจากรังสีกระจายกับหลอดไฟหลอดไฟลู่อุออเรสเซนต์จะพบว่า ปริมาณแสงสว่างจากรังสีกระจายสูงกว่าปริมาณแสงสว่างที่จำเป็นต้องใช้ในห้องประมาณ 2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ประสิทธิภาพปริมาณแสงสว่างของแสงสว่างชนิดต่าง ๆ

ที่มา: (บริษัท กรุงเทพธุรกิจ มีเดีย จำกัด, 2013)

4. ข้อพิจารณาในการนำแสงสว่างจากธรรมชาติมาใช้ในอาคาร

แสงธรรมชาติสามารถนำเข้ามาภายในอาคารได้ด้วย 2 วิธีหลักๆ คือ แสงที่เข้ามาจากทางด้านข้าง (Side lighting) และแสงที่เข้ามาจากทางด้านบน (Top lighting) หากมีความเข้มของแสงส่องสว่างสูง ส่งผลให้ความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงไม่ควรนำแสงอาทิตย์เข้ามาใช้โดยตรงแต่ให้นำแสงอาทิตย์เข้ามาในทางอ้อมหรือที่เรียกว่า Indirect sunlight กล่าวคือ ให้แสงอาทิตย์ผ่านการสะท้อนหรือการหักเหก่อนเข้าสู่อาคาร

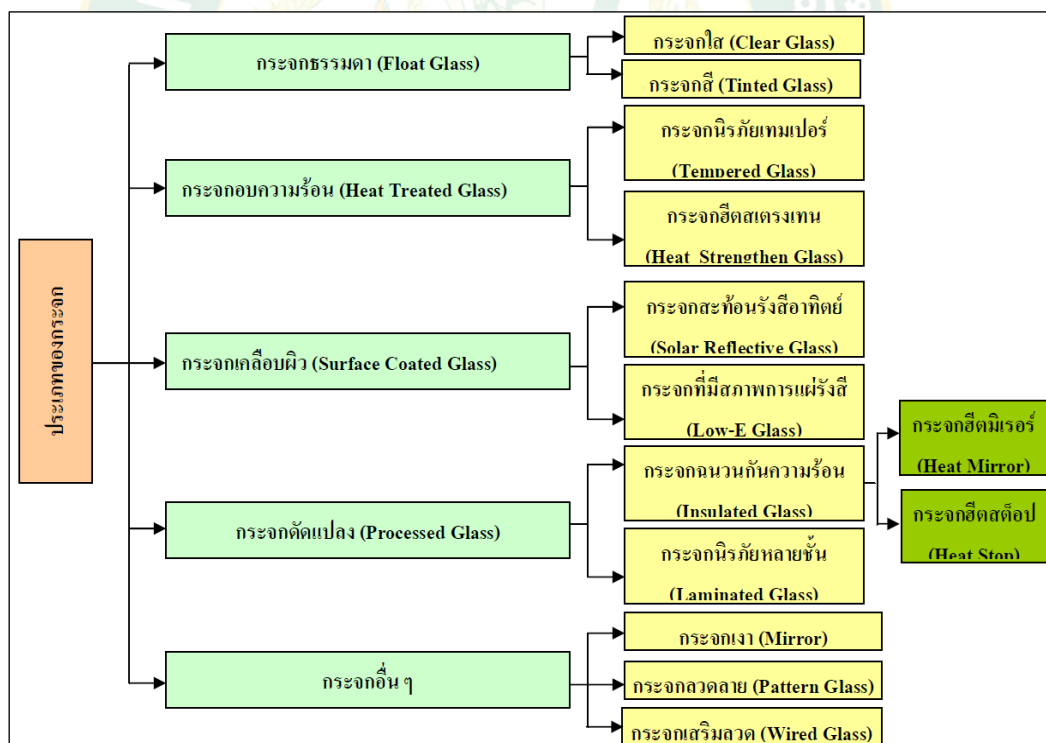
เมื่อพิจารณาถึงความต้องการพลังงานจากแสงอาทิตย์ สิ่งที่สำคัญของการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติคือการควบคุมให้แสงอาทิตย์ที่เข้ามาให้มีมากพอต่อความต้องการ ระบบแสงสว่างธรรมชาติที่ดีต้องเหมาะสมกับลักษณะของอาคาร ซึ่งมีข้อพิจารณาดังนี้

- ความสอดคล้องของผนังอาคารและระยะของแสง
- ตำแหน่ง รูปทรง และขนาดของช่องเปิดที่มีไว้สำหรับแสงธรรมชาติ
- ตำแหน่ง และคุณสมบัติของผิววัสดุผนังภายในอาคาร
- ตำแหน่ง รูปทรง และขนาดของอุปกรณ์บังแดด
- คุณลักษณะทางแสงของกระจก
- กระจกสำหรับอาคาร

กระจกมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อภาระความร้อนของอาคาร ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังกระจกอาจมีค่าสูง 5-10 เท่า เมื่อเทียบกับผนังทึบ การเลือกใช้กระจกที่มีความสามารถในการป้องกัน

ความร้อนจะสามารถลดความร้อนของอาคารลงได้อย่างมาก ยังต้องพิจารณาถึงการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติของแสงธรรมชาติ ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถผลิตกระจกที่มีความเหมาะสมมากขึ้น กล่าวคือ มีความสามารถในการป้องกันความร้อนได้ดี และในขณะเดียวกันก็สามารถนำเอาแสงธรรมชาติเข้ามาใช้งานภายในอาคารได้อย่างเหมาะสมด้วย ซึ่งกระจกที่ใช้กับอาคารแบ่งออกเป็นประเภทการผลิตดังแสดงในรูปที่ 18

การส่งเสริมการประหยัดพลังงานโดยการออกแบบจำกัดพื้นที่หน้าต่างเพื่อลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่เข้ามาในอาคาร และการนำความร้อนผ่านกระจก ขนาดของช่องเปิด โดยพิจารณาช่องเปิดหน้าต่างซึ่งเป็นปัจจัยหลักหนึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน หากช่องเปิดมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น หรือไม่มีการป้องกันรังสีอาทิตย์ตรงและรังสีกระจายอย่างเหมาะสมทำให้มีความร้อนถ่ายเทและสะสมในพื้นที่ที่อยู่ใกล้เคียงช่องเปิดนั้นได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาวะความสบายและเพิ่มภาระในการทำความเย็นในกรณีที่มีการใช้เครื่องปรับอากาศจึงต้องมีการกำหนดขนาดของช่องเปิดโดยคำนวณจากอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (Window to wall ratio: WWR)



รูปที่ 18 การจัดแบ่งประเภทของกระจกที่มีใช้ในอาคาร

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550)

5. หลักการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติ

5.1. ข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ

หลักการในการใช้แสงธรรมชาติมีข้อจำกัดหลายประการ ในบางครั้งช่วงเวลาที่ปริมาณแสงรวมถึงปริมาณความร้อนที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น จึงต้องมีหลักการในการปรับใช้แสงสว่างจากธรรมชาติให้เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการใช้แสงธรรมชาติมีดังนี้

1.) ความร้อน สภาพอากาศของประเทศไทยที่เป็นเขตร้อนชื้นมีความจำเป็นที่จะต้องป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร เมื่อมีปริมาณแสงที่มากความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคารก็จะมีมากขึ้น

2.) ความแปรปรวนของสภาพท้องฟ้า ความแปรปรวนนี้ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของ ดวงอาทิตย์และปริมาณเมฆบนท้องฟ้า ซึ่งอาจจะสามารถลดปัญหาในส่วนนี้โดยการแยกตามพื้นที่ของกิจกรรม ว่าสามารถ รับความแปรปรวนของแสงได้มากน้อยเพียงใด

3.) การควบคุมไม่ให้เกิดแสงบาดตาเป็นสิ่งที่จำเป็นทั้งในด้านความสามารถในการมองเห็นและมีผลต่อด้านจิตวิทยาการรบกวนสมาธิของผู้ใช้งานโดยสามารถปรับใช้ลักษณะของช่องแสงของอาคารให้เหมาะสมในการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติควรจะเป็นพื้นที่ ส่วนที่ยอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมให้ค่อนข้างมากถึงระดับปานกลางโดยสามารถแบ่งตามหมวดหมู่ของกิจกรรมดังนี้ (สุนทร บุญญาธิการ, 2538)

5.2. หมวดหมู่ของพื้นที่การใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ

1.) พื้นที่สวนแพสซีฟ (Passive zone) คือ บริเวณที่ยอมให้แสงภายในอาคารมีการเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างมากจึงเป็นพื้นที่ที่สามารถนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ได้มากที่สุด แต่จะต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม ทำให้ผู้ใช้อาคารสามารถรับรู้ถึงความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศภายนอกอาคารได้ เช่น บริเวณโถงทางเข้า ทางเดิน พื้นที่เก็บของ เป็นต้น

2.) พื้นที่ส่วนกึ่งแพสซีฟ (Semi passive zone) คือ บริเวณที่ยอมให้พื้นที่ในอาคารมีการเปลี่ยนแปลงของแสงจากสภาพแวดล้อมได้ในระดับปานกลาง โดยการควบคุมสภาวะในอาคารให้อยู่ในระดับปกติ และเป็นพื้นที่ที่ไม่ต้องการความละเอียดในการมองมากนัก เช่น สำนักงาน พื้นที่อ่านหนังสือ เป็นต้น

3.) พื้นที่ส่วนควบคุม (Controlled zone) คือ บริเวณที่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงของแสงได้น้อยที่สุด และไม่ต้องการอิทธิพลจากแสงภายนอก เช่น ห้องประชุม และห้องสัมมนา เป็นต้น

6. การคำนวณความส่องสว่างภายในอาคาร

การคำนวณแสงธรรมชาติด้วยวิธีลูเมน (Lumen method) เป็นการพิจารณาค่าความส่องสว่างรวมที่ตกกระทบ ณ จุดใดจุดหนึ่งในระดับที่กำหนดภายในอาคาร อันเนื่องมาจากปริมาณแสงภายนอกที่ส่องผ่านช่องเปิดหรือช่องแสงเข้ามาในขณะนั้น ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องทราบค่าความส่องสว่าง

ทุกตำแหน่งภายในอาคาร จากการให้แสงสว่างด้านข้างโดยใช้ห้องมาตรฐาน และอ้างอิงตำแหน่งจากระยะหน้าต่างไปยังจุดวัดโดยแบ่งออกเป็นจุดตามระยะห่างจากช่องเปิดซึ่งเป็นพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ

วิธีลูเมนใช้คำนวณการให้แสงสว่างในแนวตั้ง โดยหน้าต่างในแนวตั้งเป็นแหล่งกำเนิดแสงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่ ซึ่งใช้ได้กับรูปแบบช่องเปิดบางชนิดโดยมีเงื่อนไข คือ การติดตั้งช่องเปิดจะต้องอยู่ในระดับเดียวกับความสูงของพื้นที่ทำงานเท่านั้นดังแสดงในสมการที่.44

$$E = \frac{L \times MF \times CU}{A}$$

สมการที่ 44

เมื่อ

E คือความส่องสว่าง (Lux)

L คือปริมาณแสง (Lm)

MF คือปัจจัยในการบำรุงรักษา

CU คือสัมประสิทธิ์การใช้งาน

A คือพื้นที่ที่ทำการพิจารณา (m²)

ปัจจัยในการบำรุงรักษา (MF) ขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษาของดวงโคมตามระดับความสะอาดในกรณีที่มีการทำความสะอาดบ่อยครั้ง ค่าปัจจัยในการบำรุงรักษา也将มีค่ามากตาม อีกทั้งตำแหน่งของการติดตั้งดวงโคม ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการสูญเสียของแสงสำหรับการออกแบบในการใช้แสงประดิษฐ์

ระดับความสะอาด	ค่าการสูญเสียของแสง (MF)
สะอาด	0.8
ปานกลาง	0.7
สกปรก	0.6

ที่มา:(ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 2545)

➤ พิจารณาค่าความส่องสว่างภายในอาคารโดยอาศัยแสงจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงธรรมชาติภายนอกอาคาร กับปริมาณแสงภายในอาคารซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Daylight Factor Method (DF) เป็นวิธีที่กำหนดขึ้นจากอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่าง ความส่องสว่างภายในอาคาร (E_i) ต่อความส่องสว่างภายนอกอาคาร (E_e) แสดงในสมการที่ 45

$$DF (\%) = \frac{\text{ความส่องสว่างภายในอาคาร}}{\text{ความส่องสว่างภายนอกอาคาร}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 45}$$

หากค่าของ DF (%) เท่ากับ 5% หมายความว่าค่าความส่องสว่างภายในมีค่าเท่ากับ 5% เมื่อเทียบกับค่าความส่องสว่างภายนอก ค่าของ DF จะมีหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามลักษณะ ของการใช้งานในพื้นที่บริเวณต่าง ๆ ตามความเหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความเหมาะสมของค่า DF ต่อลักษณะการใช้งานประเภทต่าง ๆ

ลักษณะการใช้งาน	ค่า DF (%)
การอ่านหนังสือ ในช่วงเวลาปกติที่ไม่มีการใช้สายตาในการทำงานนานเกินไป	1.5-2.5
การอ่านหนังสือ ที่มีใช้สายตาในการทำงานนานพอสมควร แต่ไม่มีอันตรายต่อร่างกาย	2.4-4.0
การทำงานที่ต้องการความละเอียดสูง หรือ การใช้เครื่องจักรที่อาจก่อให้เกิดอันตรายได้	4.0-8.0

ที่มา: (สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย, 2016)

แสงสว่างเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอาคารหรือบ้านพัก เป็นส่วนสำคัญในการอยู่อาศัยที่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นในการสร้างอาคาร หรือที่อยู่อาศัย จำเป็นต้องมีการออกแบบให้การส่องสว่างภายใน (Internal luminance, Lux) มีความเหมาะสมกับพื้นที่การใช้งานต่าง ๆ แสงสว่างภายในจะต้องมีค่าไม่มาก หรือน้อยจนเกินไป เนื่องจากจะทำให้เกิดความไม่สบายในการทำงานพื้นที่เหล่านั้น การส่องสว่างของอาคารสำนักงานมีมาตรฐานระดับสากลที่นิยมใช้อยู่ 2 มาตรฐานคือ CIE (Commission Internationale de L'eclairage) และ IES (International Commission on Illumination) [18]

ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยการส่องสว่างที่เหมาะสมของแต่ละพื้นที่ โดยแสงสว่างนี้อาจจะมาจากธรรมชาติ หรือมาจากแสงประดิษฐ์ หรือมาจากทั้งสองแหล่งรวมกัน การใช้แสงสว่างจากแสงประดิษฐ์มีข้อดีคือ สามารถที่จะควบคุมระดับความส่องสว่างให้มีค่าคงที่ได้จากการใช้อุปกรณ์ส่องสว่างตามที่ได้ออกแบบ มา แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยลดการใช้แสงประดิษฐ์ลง และทำให้เกิดการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง ตารางที่ 1 แสดงค่ามาตรฐานความส่องสว่างของแต่ละพื้นที่ที่ใช้อยู่ตามมาตรฐาน CIE และ IES โดยงานวิจัยนี้จะอ้างอิงระดับการส่องสว่างของอาคารสำนักงานที่ 500 Lux

ตารางที่ 1 มาตรฐานความส่องสว่างของ CIE และ IES

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

ที่มา: (CIE, 1913; IES, 1906)

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (Window to Wall Ratio: WWR)

สำหรับการออกแบบอาคารที่จะช่วยให้อาคารประหยัดพลังงาน เช่น การระบายอากาศของอาคาร และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติเข้าสู่อาคาร ควรคำนึงถึงพื้นที่หน้าต่าง หรือพื้นที่กระจกที่มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อให้อาคารลดการใช้พลังงานจากพลังงานหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจำเป็นต้องมีการคำนวณอัตราส่วนระหว่างหน้าต่างกับผนัง (Window to Wall Ratio: WWR) โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในช่วงประมาณ 20 – 30 % (ConstruPM, 2017) ดังแสดงในสมการที่ 46

$$WWR = \frac{\text{Window area}}{\text{Wall area}} \times 100\%$$

สมการที่ 46

การตรวจสอบเอกสาร

จากการศึกษา และค้นคว้าสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ประพันธ์พงศ์ จงปติยัตต์ และ วิชิต คลังบุญครอง 2558 ได้ทำการออกแบบและผลิต “แผ่นบานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์” สำหรับใช้กับหน้าต่างบานเกล็ดทั่วไป ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเก็บไว้ใช้ในเวลากลางคืนได้ เพื่อการประยุกต์ใช้เป็น “แผงเซลล์แสงอาทิตย์” ติดตั้งตามเปลือกอาคาร ได้แก่ บริเวณหน้าต่าง ผนัง และหลังคา เป็นการใช้พื้นที่เปลือกอาคารให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เป็นที่นิยมและแพร่หลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งขั้นตอนในการวิจัยได้ทำการคัดเลือกวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 19



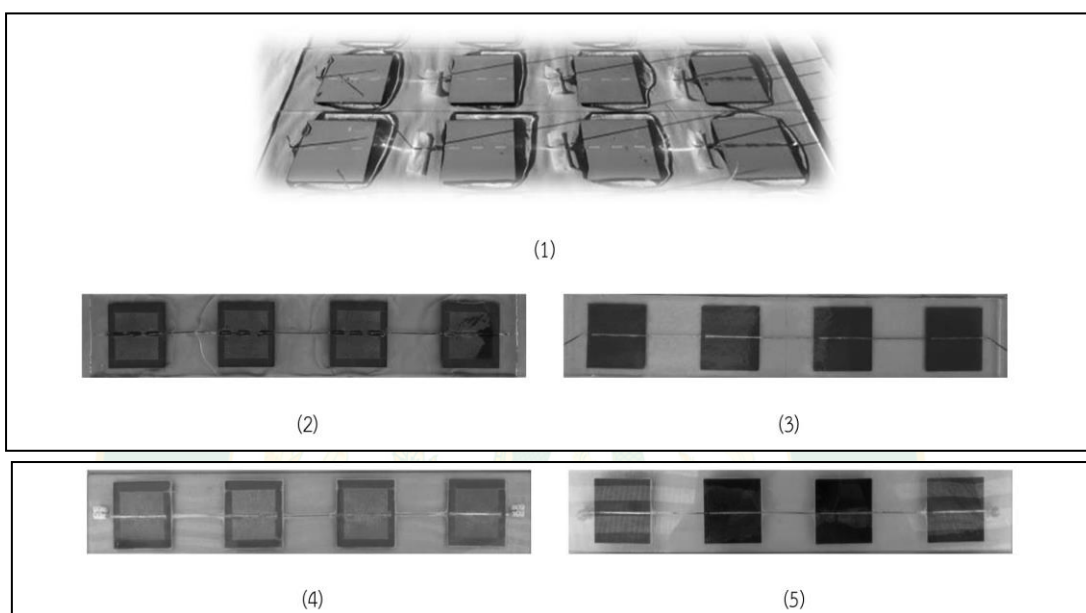
รูปที่ 19 ขั้นตอนการสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ “บานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์”

- (1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ชนิดแผ่นบางขนาด $7.6 \times 7.6 \text{ cm}^2$
- (2) วงกบบอลูมิเนียมหน้าต่างบานเกล็ดแบบสำเร็จรูป
- (3) บานเกล็ดกระจกใสขนาด $100 \text{ cm} \times 610 \text{ cm} \times 5 \text{ mm}$

ที่มา: (ประพันธ์พงศ์ และ วิชิต, 2558)

สำหรับงานวิจัยได้เลือกใช้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ชนิดแผ่นบาง ที่มีขนาด $7.6 \times 7.6 \text{ cm}^2$ วงกบหน้าต่างได้เลือกใช้ติดกับวงกบบอลูมิเนียมหน้าต่างบานเกล็ดแบบสำเร็จรูป แผ่นบานบานเกล็ดได้เลือกใช้แผ่นบานเกล็ดกระจกใสหนา 5 mm และได้ทำการประกอบแผงเซลล์

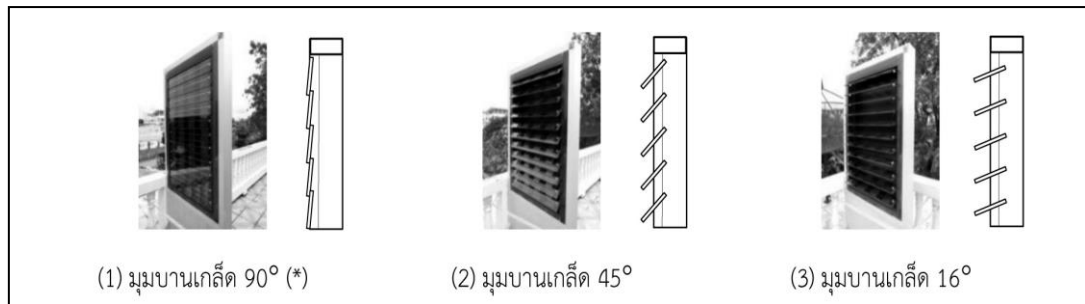
แสงอาทิตย์ร่วมกับบานเกล็ด ด้ายการต่อวงจรแบบขนาน บัดกรีด้วยแถบเชื่อมต่อวงจร (Tapping Wire) ด้านหน้าเซลล์ (ขั้วลบ) ติดด้านหน้าแผ่นเซลล์ กับกระจกใสด้วยเรซินใส ตามตำแหน่งและจำนวนที่ต้องการ ปล่อยให้แห้ง จากนั้นทำการบัดกรีแถบเชื่อมต่อวงจรด้านหลังเซลล์ (ขั้วบวก) เสร็จแล้วเคลือบด้านหลังแผ่นกระจกพร้อมทั้งแผ่นเซลล์ด้วยเรซินใสให้ทั่ว ปล่อยให้แห้ง จากนั้นติดตั้งขั้วต่อสาย (Terminal) ทั้ง 2 ข้างให้เรียบร้อย ดังแสดงในรูปที่ 20



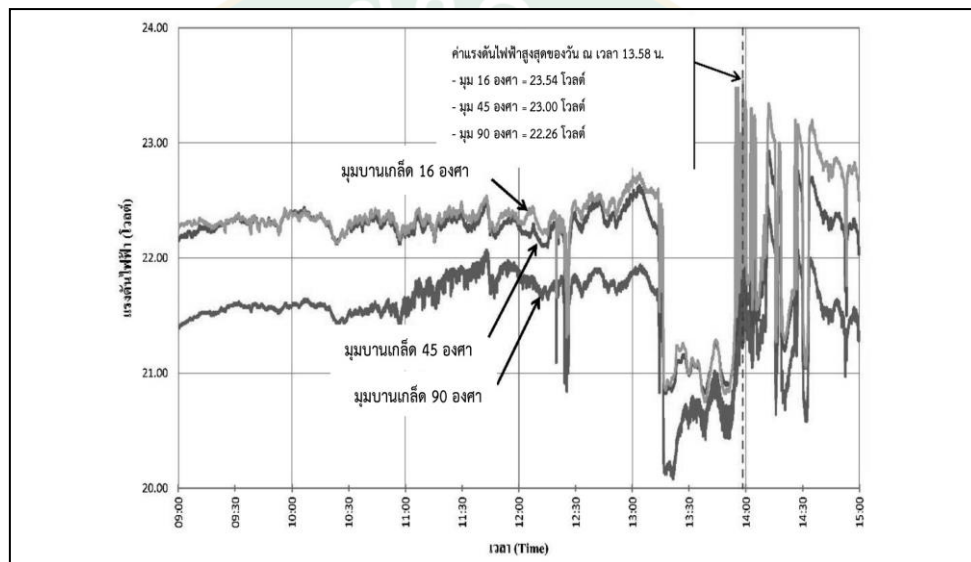
รูปที่ 20 ขั้นตอนการสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ “บานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์”

ที่มา: (ประพันธ์พงศ์ และวิจิต, 2558)

การทดสอบที่ จ ขอนแก่น ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ คือ $16^{\circ} 26' 30.65$ พิลิปดาเหนือและลองติจูด $102^{\circ} 49' 25.88$ พิลิปดาตะวันออกโดยทำมุมกับทิศเหนือไปทางทิศตะวันออกประมาณ 8° หรือมีมุมอะซิมุท (Azimuth) เท่ากับ 8° ตำแหน่งที่จำลองบนดาวฟ้า บานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทดสอบจำนวน 4 แผง โดยได้ทำการเปรียบเทียบมุมแผ่นบานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์ 90° 45° และ 16° หันไปทางทิศใต้ ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 21 และ 22



รูปที่ 21 การทดสอบแผงตั้งมุมบานเกล็ด 90° 45° และ 16°

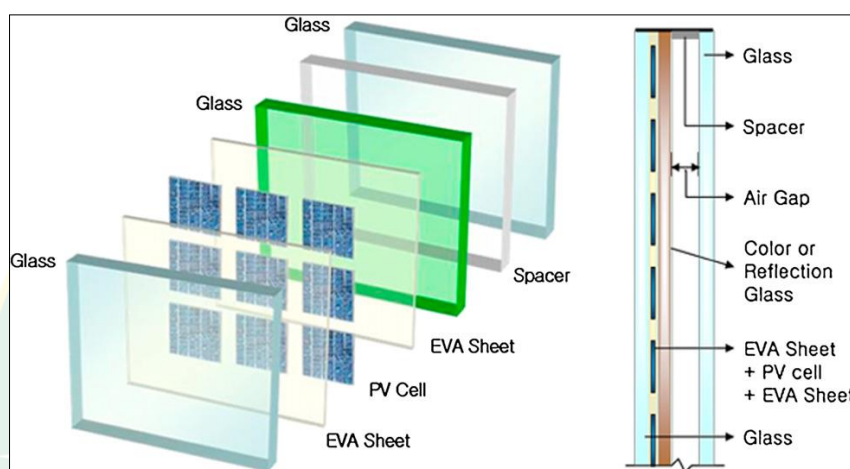


รูปที่ 22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแรงดันไฟฟ้าแผ่นบานเกล็ดที่มุมต่างๆ ด้านทิศใต้
 (วันจันทร์ที่ 8 กันยายน 2557 เวลา 9.00-15.00 น.)

ที่มา: (ประพันธ์พงศ์ และวิจิต, 2558)

สรุปว่าบานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า มุมบานเกล็ด 16° = 23.54 V มุมบานเกล็ด 45° = 23.00 V มุมบานเกล็ด 90° = 22.26 V และมีค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้า ณ ช่วงเวลา 9.00-15.00 น. ตามลำดับดังนี้ มุมบานเกล็ด 16° = 22.23 โวลต์ มุมบานเกล็ด 45° = 22.13 V มุมบานเกล็ด 90° = 21.53 V

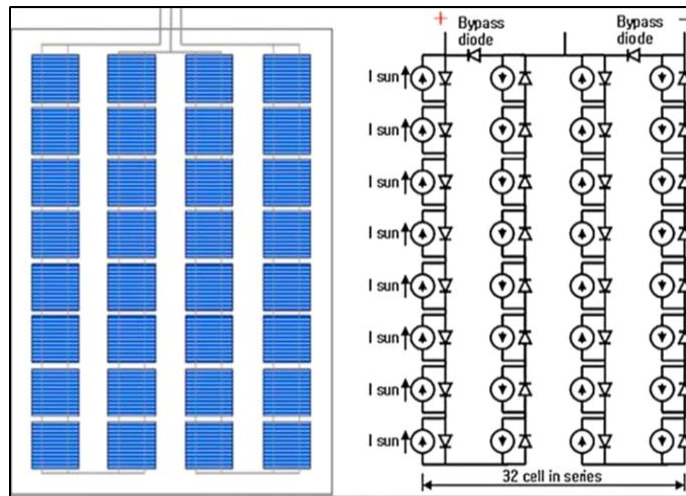
Park et al และคณะ, 2010 ได้ทำการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส (polycrystalline Silicon p-Si) ที่มีการเว้นระยะบางส่วนเพื่อให้มีช่องผ่านของแสงบนพื้นที่กระจก แผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ประกอบด้วยชั้นของวัสดุต่าง ๆ 7 ชั้นดังนี้ กระจกวัสดุเคลือบผิว (Ethylene Vinyl Acetate (EAV) Sheet) เซลล์แสงอาทิตย์ (Polycrystalline) วัสดุเคลือบผิว (EVA) กระจกช่องว่างอากาศ และกระจกอาคาร ในกรณีการนำไปติดตั้งกับอาคาร จะมีการเพิ่มกระจกอีก 1 ชั้นเพื่อสร้างช่องว่างอากาศ (Air gap) เพื่อลดอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 การกำหนดค่าวงจรของโมดูล PV

ที่มา: (Park และคณะ, 2010)

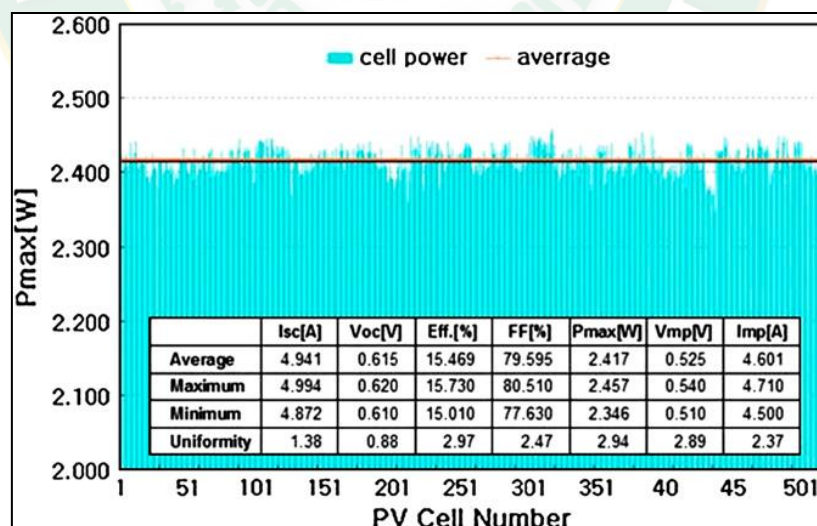
กระจกที่ใช้ 3 แผ่น แสดงในรูปด้านบน ประเภทของกระจกด้านหน้า และด้านหลังของแผง กระจกชนิด Low-iron tempered glass และด้านหลังแผงเป็นกระจกทั่วไป โดยมีการเว้นช่องว่างอากาศ (Air gap) ระหว่างกระจกด้านหลังสุดกับกระจกอาคาร โดยเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline silicon solar cells) ขนาด $12.7 \times 12.7 \text{ cm}^2$ จำนวน 32 เซลล์ เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทั้งหมด โดยมีช่องว่างให้อากาศเข้าก่อนทำการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าด้วยกัน โดยมีรูปแบบการจัดและเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 แถว ใน 1 แถว ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 เซลล์ รวมทั้งการติดตั้งบายพาสแบบไดโอดจำนวน 2 ตัว เพื่อลดปัญหาการเกิดจุดร้อนบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อันเนื่องมาจากการเกิดเงาบางส่วน โดยจะมีวงจรไฟฟ้าของแผงดังแสดงในรูป 24



รูปที่ 24 การกำหนดช่องว่างและค่าวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (Park และคณะ, 2010)

ได้มีการทดสอบและบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 500 เซลล์ พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}) เฉลี่ย 4.941 A ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) เฉลี่ย 0.615 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) เฉลี่ย 2.417 W แสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (Park และคณะ, 2010)

Poh Khai Nga, และคณะ 2013 ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใส (BIPV) ที่ติดตั้งให้กับอาคารในประเทศสิงคโปร์ และทำการศึกษอาคารที่ใช้แสงธรรมชาติจากหน้าต่าง และการผลิตไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีลักษณะแตกต่างกัน 6 ประเภทดังแสดงในตาราง 1

ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดที่ทำการศึกษา

	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4	Module 5	Module 6
Module area (m ²)	0.9×0.9	1.3 ×1.1	1.3×1.1	1.3×11. 1	9.9×9.3	9.8×9.5
Efficiency (%)	8.02	5.90	3.32	4.43	5.01	4.75
SHGC	0.289	0.413	0.298	0.387	0.154	0.123
U-value (W/m ² K)	5.08	4.80	5.08	5.10	1.67	2.14
light transmittance (%)	9.17	5.19	1.84	4.17	6.91	7.34
pv technology	a-Si	μc-Si	μc-Si	μc-Si	a-Si	a-Si

ที่มา: (Poh Khai และคณะ, 2013)

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบและประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อแสงสว่าง พลังงานไฟฟ้าเพื่อการปรับอากาศ และพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผง ประเมินผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าประหยัดพลังงานสุทธิ (Net electrical benefit : NEB) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อพื้นที่ของอาคาร โดยคำนวณได้จาก

$$NEB = L_{\text{Saving}} - C_{\text{Electricity}} + PV_{\text{Generation}}$$

สมการที่ 47

เมื่อ

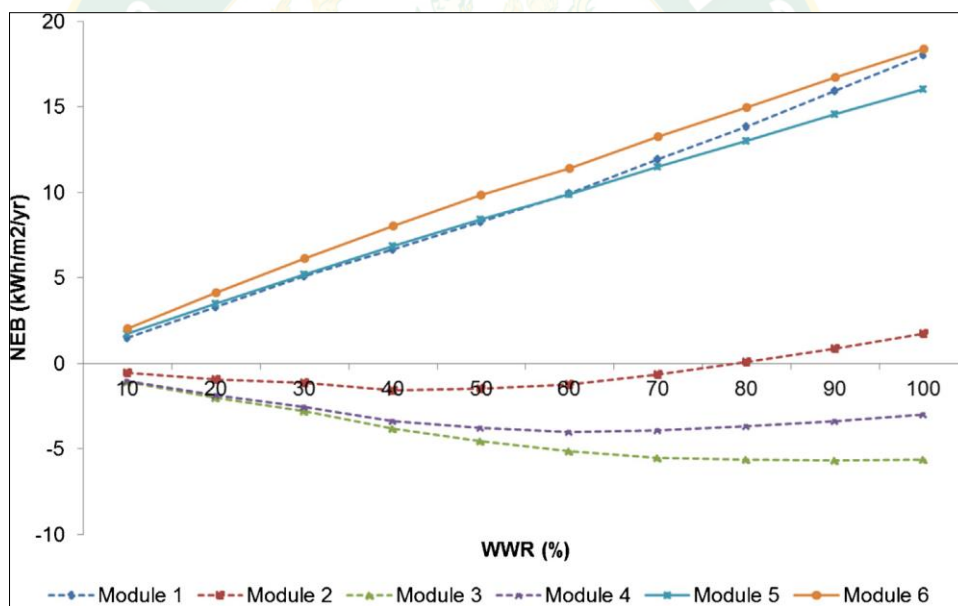
NEB คือผลประหยัดด้านพลังงานสุทธิ (kWh/m²)

L_{Saving} คือพลังงานไฟฟ้าเพื่อแสงสว่างที่ประหยัดได้ (kWh/m^2)

$C_{\text{Electricity}}$ คือพลังงานที่ต้องการใช้เพื่อปรับอากาศ (kWh/m^2)

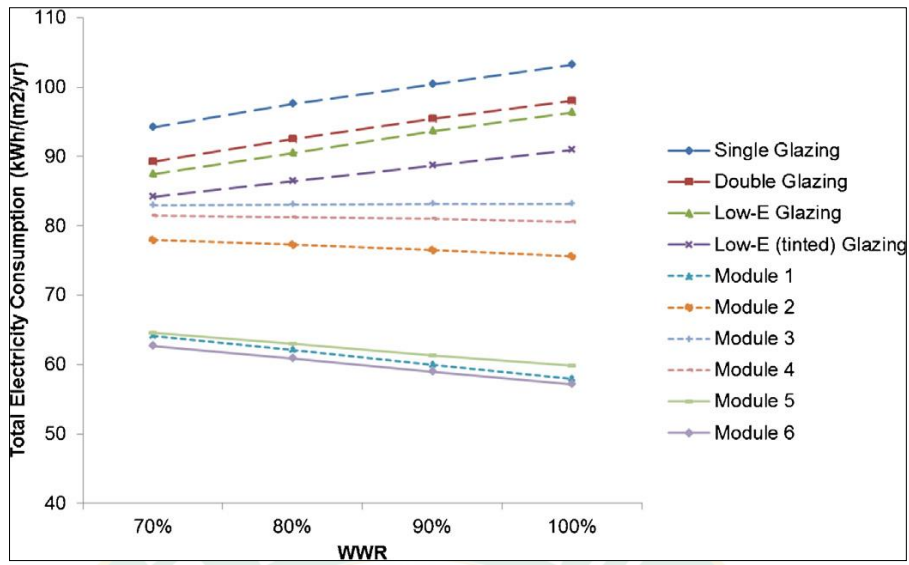
$PV_{\text{Generation}}$ คือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m^2)

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการพิจารณาถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนังอาคาร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของอาคารที่จำเป็นต้องมีพื้นที่หน้าต่างสำหรับการใช้ประโยชน์จากแสงสว่างธรรมชาติ และการปรับอากาศและพิจารณาการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทางทิศใต้ของอาคาร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 26 และ 28



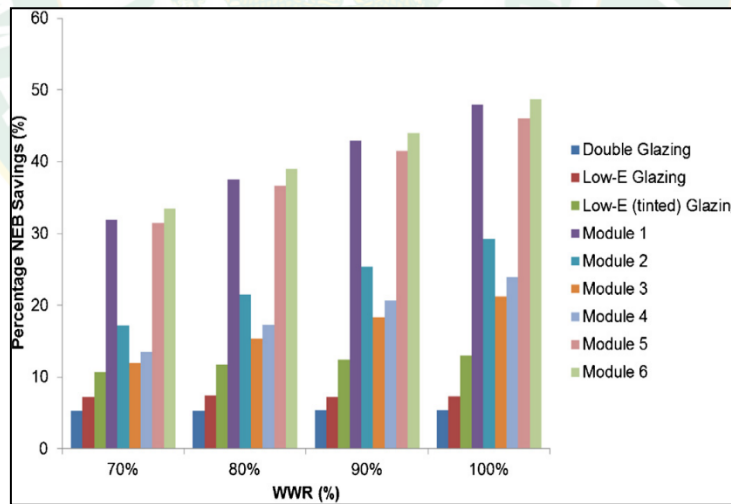
รูปที่ 26 พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้สุทธิของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

ที่มา: (Poh Khai และคณะ, 2013)



รูปที่ 27 ปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม ของ PV สำหรับทั้ง 10 ประเภทหน้าต่าง และ 6 แบบของ BIPV

ที่มา: (Poh Khai และคณะ, 2013)

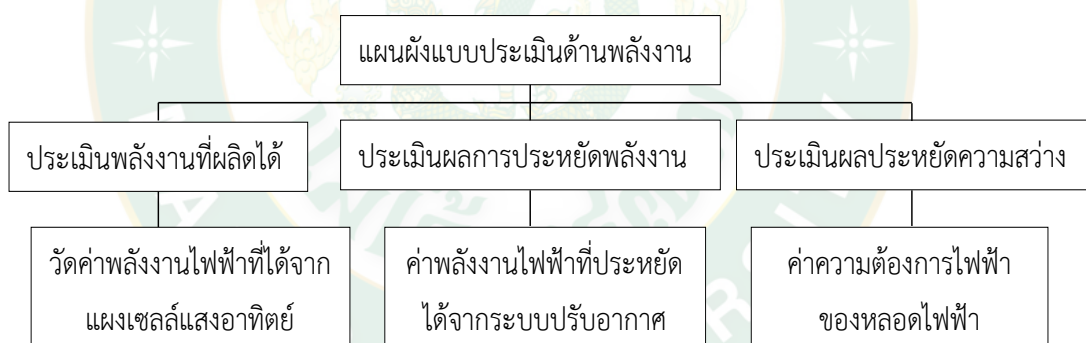


รูปที่ 28 ร้อยละเปอร์เซ็นต์ของการประหยัดเงินโดยรวมของ NEB

ที่มา: (Poh Khai และคณะ, 2013)

จากกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่าให้เซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 1, 5 และ 6 มีผลประหยัดการไฟฟ้าสุทธิรวมเป็นบวก และมีผลบวกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 6 มีค่าไฟฟ้าสูงสุดประมาณ $18 \text{ kWh/m}^2/\text{year}$ การพิจารณาดารางสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วพบว่า SHGC ของแผงเซลล์หมายเลข 6 มีค่าน้อยที่สุดจึงทำให้ได้รับความร้อนน้อยที่สุด ส่งผลทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อการปรับอากาศลดลง ส่งผลทำให้มีผลประหยัดทางด้านพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

Lin Lu และ Kin Man Law, 2013 ได้ทำการศึกษาข้อมูลทางด้านความร้อนของการผลิตพลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใสแบบกระจกชั้นเดียว (Single glazed photovoltaic) โดยการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อติดตั้งร่วมกับอาคารสำหรับการประเมินศักยภาพด้านพลังงาน โดยพิจารณาถึงปริมาณความร้อนที่ได้รับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และแสงสว่างจากธรรมชาติ โดยใช้แผนผังแบบประเมินด้านพลังงาน 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 29



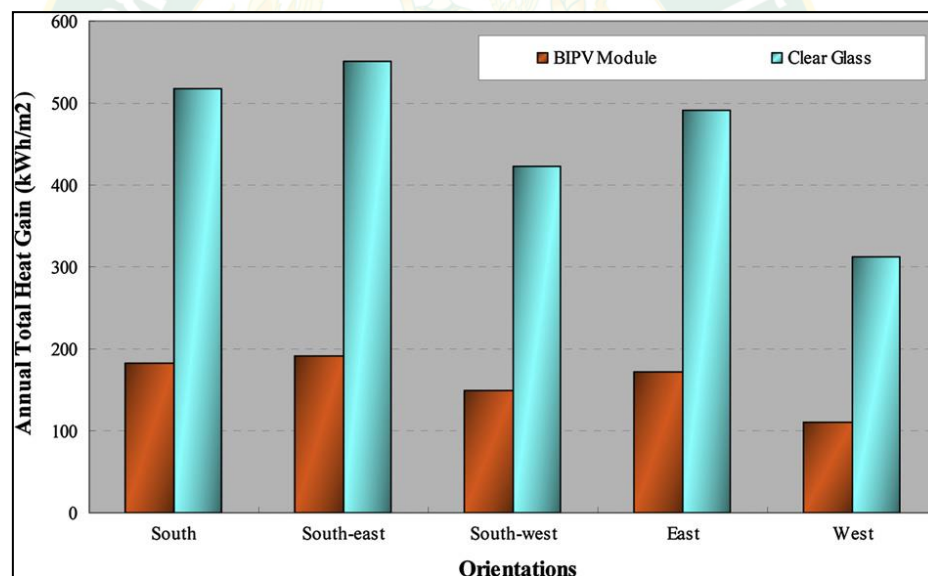
รูปที่ 29 แผนผังแบบประเมินด้านพลังงาน

ที่มา: (Lu และLaw, 2013)

ห้องที่ใช้ทำการศึกษาดังอยู่บนชั้นที่ 25 ของอาคารที่หันไปทางทิศใต้ ขนาด $4.5 \times 3.5 \text{ m}^2$ และมีความสูง 3 m และมีกระจกขนาด $3 \times 2 \text{ m}^2$ ที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใสติดตั้งอยู่จำนวน 3 แผง กำลังการผลิต 270 W แต่ละแผงขนาด $0.71 \times 1.52 \text{ m}^2$ หนา 0.009 m แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ทึบแสงและส่วนที่โปร่งแสง พลังงานความร้อนส่วนหนึ่ง

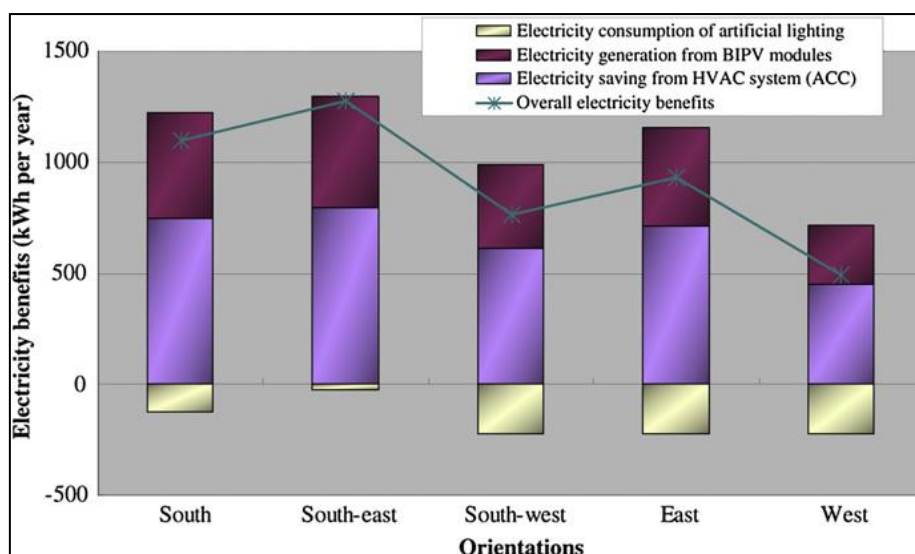
จะถูกดูดซับไว้บริเวณส่วนด้านหน้าของแผง และจะค่อยๆ ปล่อยไปทั้งในอาคารและนอกอาคาร บริเวณที่บแสงจะประกอบด้วย 3 ชั้นคือ กระจกด้านหน้าซึ่งสัมผัสกับบริเวณอากาศภายนอกชั้นเซลล์แสงอาทิตย์ และกระจกด้านหลังที่ติดกับบริเวณหน้าต่างอาคาร ปริมาณความร้อนเข้าสู่อาคารแสดงในรูปที่ 30

หลังจากการประเมินจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ติดตั้งในทิศแตกต่างกัน 5 ทิศ คือ ทิศใต้ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตกจากรูปที่ 22 ได้นำค่าความร้อนที่ได้จากการเปรียบเทียบพบว่า การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใสสามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้มากถึง 65 % แล้วจะเห็นได้ว่าที่หันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ได้รับความร้อนสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 30 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารรายปีจำแนกตามทิศของการติดตั้งแผง

ที่มา: (Lu และLaw, 2013)

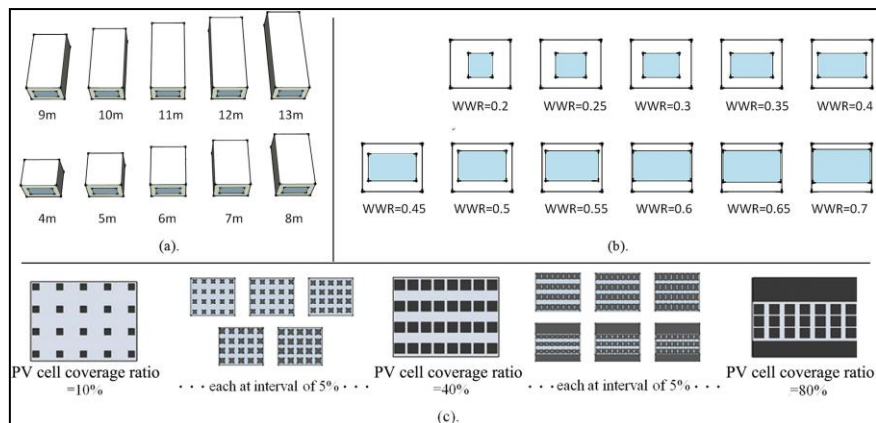


รูปที่ 31 ผลประหยัดด้านพลังงานไฟฟ้ารายปีจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศต่าง ๆ

ที่มา: (Lu และLaw, 2013)

จากรูปที่ 31 เป็นการแสดงผลประหยัดทางด้านพลังงานโดยกราฟจะแสดงปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าสำหรับการส่องสว่าง ไฟฟ้าที่ประหยัดได้จากการลดใช้การทำความเย็น และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เปรียบเทียบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ทิศ เห็นได้ว่าทิศตะวันออกเฉียงใต้ได้รับแสงมากที่สุด จะมีสัดส่วนความต้องการพลังงานเพื่อส่องสว่างน้อยที่สุด เนื่องจากได้รับแสงสว่างจากธรรมชาติเข้ามาในอาคาร แต่ในส่วนของความต้องการใช้พลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น เนื่องจากโหลดภาระทางความร้อนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลประหยัดรวมทั้งด้านพลังงานทิศตะวันออกเฉียงใต้มีค่าสูงที่สุด สรุปได้ว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอาคารสูงสุด

Shen Xu, และคณะ 2014 ได้นำเสนอผลการหาอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส โดยแบบวิธีการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการทดสอบในภาวะจริง และส่วนการทดสอบในการจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งการทดสอบจึงทำการสร้างห้องขนาด 4.65×3.4 m สูง 3.6 m แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณพบว่ามีค่าความคาดเคลื่อนน้อยกว่า 9% ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 32

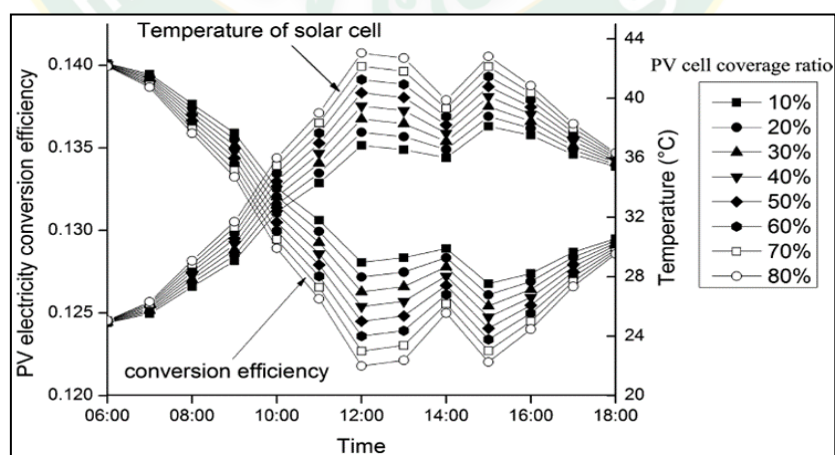


รูปที่ 32 ขนาดห้อง WWR และอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบในแบบจำลอง

ที่มา: (Xu และคณะ, 2014)

จากนั้นออกแบบห้องทดสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีขนาดความลึกของร่องที่ 4-13 m อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนัง WWR ตั้งแต่ 25-70% และอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่ 10-80% ดังแสดงในรูปที่ 32 จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือ

- 1) วิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส โดยปรับอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์

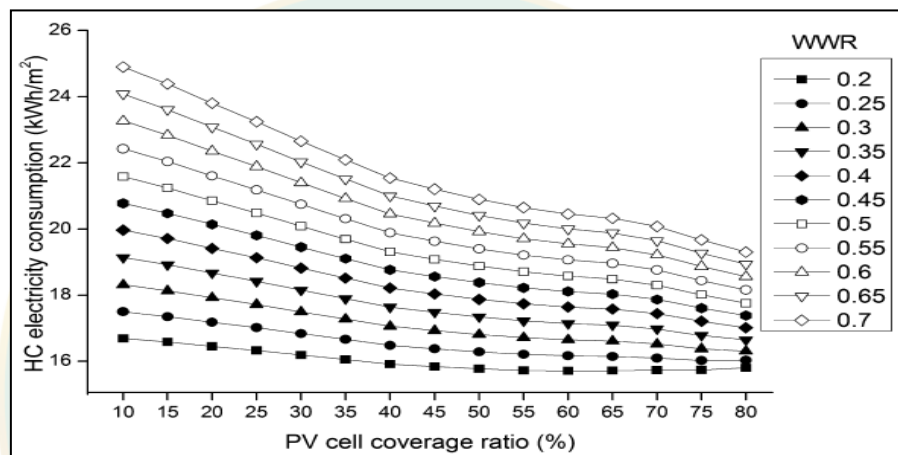


รูปที่ 33 อุณหภูมิและประสิทธิภาพของแผงเซลล์ที่มีอัตราส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกัน

ที่มา: (Xu และคณะ, 2014)

รูปที่ 32 แสดงผลการทดสอบทางด้านการผลิตไฟฟ้าเปรียบเทียบอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ 80% มีประสิทธิภาพลดลง 5.5% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ 10% ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีความสามารถในการดูดกลืนแสงอาทิตย์จึงทำให้อุณหภูมิแผงเพิ่มขึ้น

- 2) วิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้จากการลดการใช้หลอดไฟฟ้า เนื่องจากการใช้ประโยชน์จากแสงสว่างธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 34



รูปที่ 34 ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อแสงสว่างเมื่อติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับ WWR ที่ต่างกัน

ที่มา: (Xu และคณะ, 2014)

WWR	optimal PV cell coverage ratio (%)									
	room depth (m)									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.2	75	55	50	40	35	20	10	10	10	10
0.25	80	60	55	50	40	40	30	10	10	10
0.3	80	75	60	55	50	40	40	30	20	10
0.35	80	80	75	55	55	45	40	40	35	30
0.4	80	80	75	60	55	50	45	40	40	40
0.45	80	80	80	75	60	55	50	45	40	40
0.5	80	80	80	75	70	60	55	50	45	40
0.55	80	80	80	80	75	60	55	55	50	45
0.6	80	80	80	80	75	75	60	55	55	50
0.65	80	80	80	80	75	75	60	60	55	50
0.7	80	80	80	80	80	75	75	60	55	55

รูปที่ 35 อัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับความลึกของห้องและ WWR

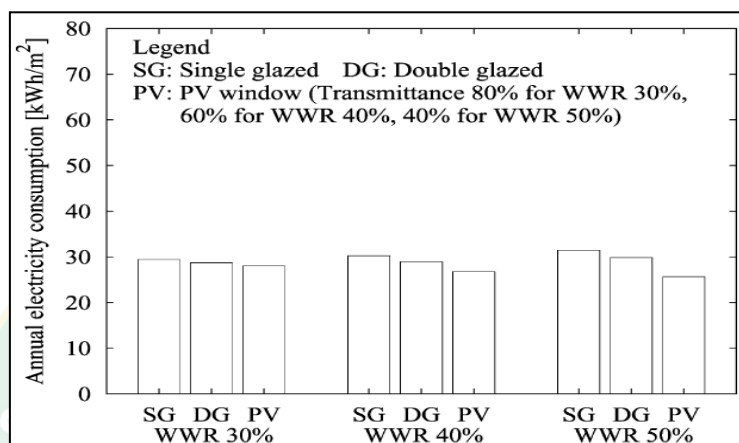
ที่มา: (Xu และคณะ, 2014)

จากรูปที่ 34 เมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนังมีค่าเพิ่มขึ้น แสงธรรมชาติก็สามารถส่องทะลุเข้ามาได้มากขึ้น และมีพื้นที่สำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเช่นกัน จะเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเมื่อแสงสว่างมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากแสงสว่างไม่สามารถทะลุเข้ามาได้มากพอ

จากรูปที่ 35 เป็นการสรุปผลจากการทดสอบอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ การประหยัดพลังงานสูงสุด ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้กับขนาดความลึกและ WWR ของห้องนั้น เพื่อนำไปประเมินราคาอัตราส่วนพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดกึ่งโปร่งใสที่เหมาะสม

T. Miyazaki, และคณะ 2014 ได้ทำการศึกษาค่าการส่องผ่าน (Transmittance) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างกับผนัง ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสชนิดฟิล์มบาง โดยเปรียบเทียบปริมาณความต้องการการใช้พลังงานรวมต่อปี ของประเภทกระจกหน้าต่างที่แตกต่างกันออกไปคือ กระจกแบบชั้นเดียว (Single glaze: SG) (กระจกใสหนา 6 mm) กระจก

แบบ 2 ชั้น (Double glaze: DG) (ประกอบด้วยกระจกใสหนา 6 mm ช่องว่างอากาศ 6 mm และกระจกใสหนา 10 mm) และกระจกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV window) ที่มีค่าการส่องผ่าน 10% โดยมีการควบคุมการหรี่แสงของหลอดไฟ (Dimming light) เมื่อมีแสงอาทิตย์เข้าสู่อาคาร ดังแสดงในรูปที่ 36



รูปที่ 36 แผนภูมิแสดงค่าพลังงานที่ใช้รวมรายปีของการติดตั้งกระจกชนิดต่างกัน

ที่มา: (Maria Mandalaki และคณะ, 2012)

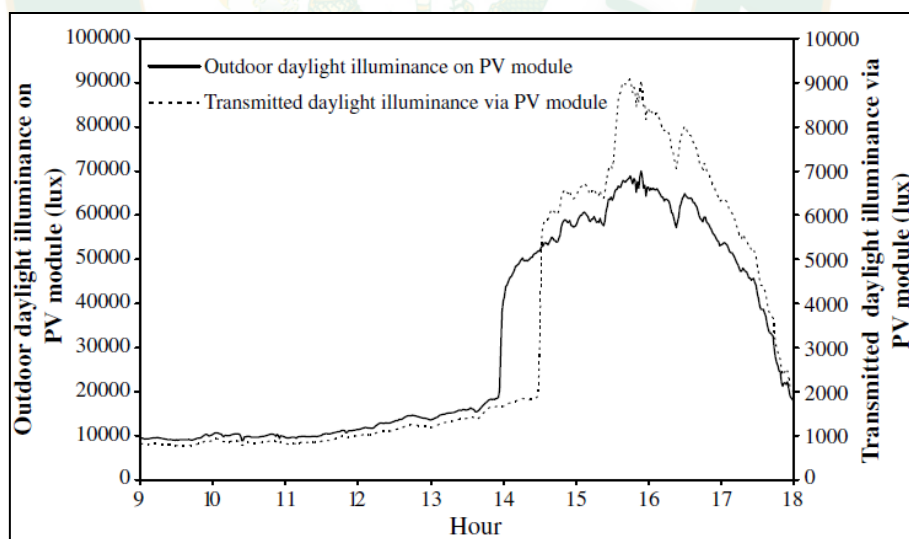
ตารางที่ 6 ค่าพลังงานที่ใช้รวมรายปีของอาคารโดยมีการควบคุมแสงสว่าง (Dimming Light)

	Units	WWR 30%			WWR 40%			WWR 50%		
		SG	DG	PV	SG	DG	PV	SG	DG	PV
Heating	kWh/m ²	7.1	5.0	5.2	7.6	4.9	5.3	8.5	5.1	5.8
Cooling	kWh/m ²	8.5	9.2	8.6	9.4	10.4	10.4	9.9	11.3	9.0
Lighting	kWh/m ²	14.9	14.5	15.6	13.3	13.6	13.6	13.1	13.4	16.6
PVoutput	kWh/m ²	0	0	1.2	0	0	3.1	0	0	5.8
Total	kWh/m ²	29.5	28.7	28.1	30.3	28.9	26.2	31.5	29.8	25.6

ที่มา: (Maria Mandalaki และคณะ, 2012)

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่ากระจกแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าความต้องการใช้พลังงาน รวมต่อปี น้อยที่สุดเนื่องจะสามารถลดภาระการทำความเย็นให้กับอาคารได้ อีกทั้งสามารถผลิตไฟฟ้าได้ เช่นกันเช่นกับการใส่กระจก 2 ชั้นที่สามารถลดความต้องการพลังงานรวมต่อปีได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่กระจกชั้นเดียว โดยมีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่าง ของผนังโดย ประเมินปริมาณความต้องการไฟฟ้าร่วมของอาคารเป็นตัวประกอบเมื่อใช้มาตราแผง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใส จะมีค่าความต้องการพลังงานน้อยที่สุด และพบว่าค่าการส่องผ่านที่ เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ WWR 40% โดยอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังเท่ากับ WWR 50%

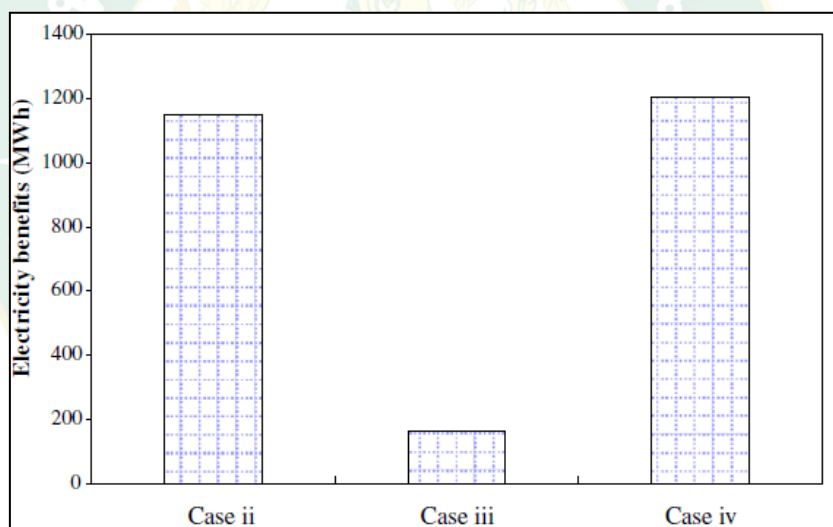
Danny H.W. Li, และคณะ 2009 ได้ทำการศึกษาทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งโปร่งใส ชนิดฟิล์มบาง ขนาด 0.84 m^2 และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 44 W ติดตั้งบริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ ห้องขนาดความยาว 2.95 m กว้าง 2.14 m หลังจากการทดสอบจริงพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีค่าการส่องผ่านของแสงเฉลี่ย 10.6% ดังแสดงในรูปที่ 37



รูปที่ 37 วัดค่าความส่องสว่างของแสงบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (Li และคณะ, 2009)

จากรูปที่ 37 พบว่ากราฟ 2 เส้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ความสว่างที่สูงที่สุดที่วัดด้านหน้าของแผงมีค่าเท่ากับ 70,000 Lux และความสว่างที่ผ่านแผงมีค่าเท่ากับ 9,050 Lux คิดเป็นปริมาณแสงที่ส่องผ่านได้เท่ากับ 12.9 % หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์การส่องสว่างภายในอาคาร รวมถึงผลประโยชน์ทางด้านพลังงานไฟฟ้าเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอาคาร โดยมีวิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยอ้างอิงจากการใช้พลังงานในอาคาร เฉลี่ยในประเทศเท่ากับ 1,000 MWh/year แบ่งออกเป็น 4 กรณีคือ กรณีที่ 1 อาคารที่ไม่มีการควบคุมแสงสว่าง และไม่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 2 อาคารที่มีการควบคุมแสงสว่างแต่ไม่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณหน้าต่าง กรณีที่ 3 อาคารที่ไม่มีการควบคุมแสงสว่างแต่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 4 อาคารที่มีทั้งการควบคุมแสงสว่างและติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ผลดังต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 38



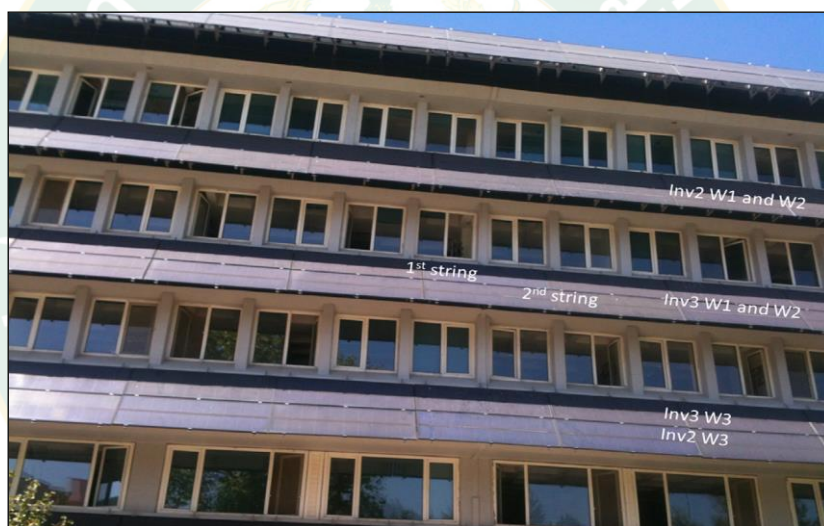
รูปที่ 38 ผลกำไรทางด้านพลังงานไฟฟ้าของอาคารแบบจำลอง

ที่มา: (Li และคณะ, 2009)

จากรูปที่ 38 พบว่ากรณีที่ 3 เป็นการใส่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสร่วมกับอาคาร แต่ไม่ได้มีการควบคุมการส่องสว่างของหลอดไฟฟ้า พบว่ามีผลกำไรทางด้านพลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 4 มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกัน แต่เพิ่มการควบคุม

แสงสว่างของหลอดไฟฟ้าเมื่อมีแสงจากธรรมชาติเข้าสู่อาคาร ส่งผลให้มีผลกำไรทางด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี (พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้) มีค่าเท่ากับ 1,203 MWh คืออาคารที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารวิธีการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติ สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 12%

Rustu Eke และ Cihan Demircan, 2015 ได้ศึกษาผลกระทบทางด้านพลังงานของระบบ PV ได้ทำการประยุกต์ใช้ระบบติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารบูรณาการ (BIPV) โดยติดตั้งบนหลังคา และ ทางด้านข้างของอาคาร

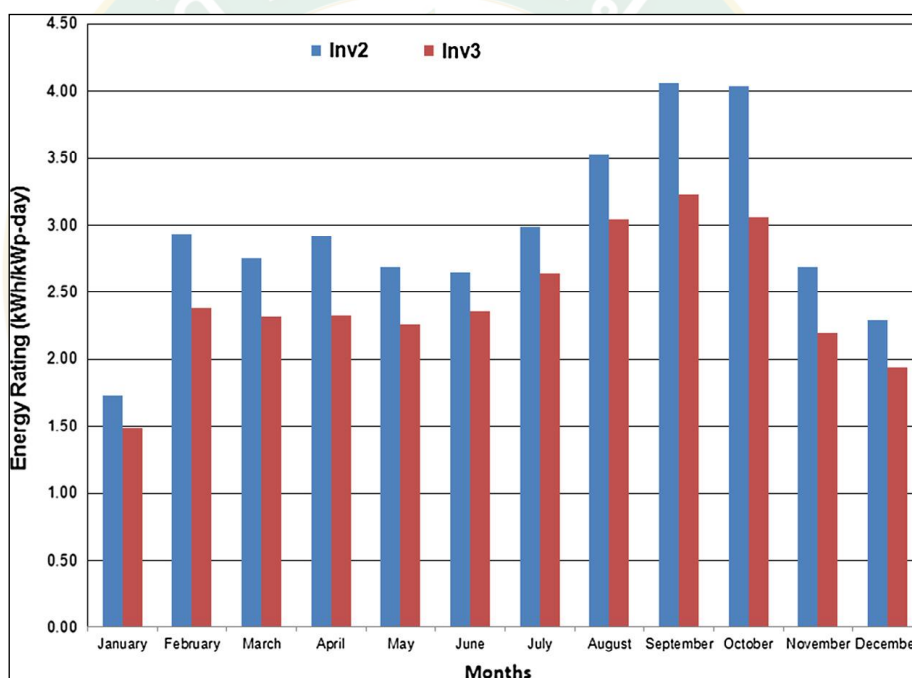


รูปที่ 39 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในการบังแสงอาทิตย์

ที่มา: (Eke และ Demircan, 2015)

โดยมีพื้นที่การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 405 m² และใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ (Amorphous silicon) ที่มีกำลังการผลิตสูงสุดของระบบเท่ากับ 40.3 kWp ในงานวิจัยนี้การประเมินผลของเงา ผลการบังแสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพการทำงานของทั้งสองระบบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอินเวอร์เตอร์ตัวที่สองนำไปใช้งานจริงเท่ากับ 1,072 kWh/kWp (เฉพาะหนึ่งแถวของการบังแสงอาทิตย์) สำหรับอินเวอร์เตอร์ตัวที่สามเท่ากับ 889 kWh/kWp (เฉพาะสองแถวของ

การบังแสงอาทิตย์) ในการเปรียบเทียบพบว่าความแตกต่างกัน 16 % สำหรับค่าเฉลี่ยประจำปีอยู่ระหว่าง 10 % และ 24 % ค่าที่ได้รับในเดือนมีนาคม และเมษายน จากการประเมินพลังงานความแตกต่างเกิน 20% สำหรับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 1,255 kWh/m² โดยมีข้อความแตกต่างเท่ากับ 245 kWh/m² นอกจากนี้ยังพบว่าผลกระทบของผนังบังแสงอาทิตย์ และต้นไม้ไม่น้อยกว่า 1 % จากการประเมินพลังงานที่ผลิตได้ในกรกฎาคมมีความแตกต่างกัน 14% ระหว่าง 2 เครื่องเนื่องจากกระแสไฟฟ้าต่ำเพราะการแผ่รังสีอาทิตย์ต่ำในเดือนธันวาคม ผลของเราก็มีอิทธิพลต่อการผลิตพลังงานอย่างมากเพราะการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเท่ากับผลอุณหภูมิโดยรอบอาคารแสดงในรูปที่ 39 และ 40

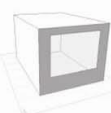


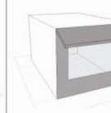
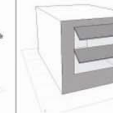
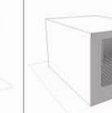
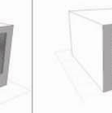

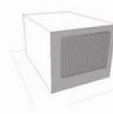
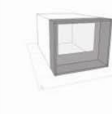
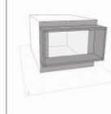


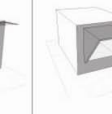


รูปที่ 40 อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์ที่ 2 และ 3 ตลอดปี

ที่มา: (Eke และDemircan, 2015)

Maria Mandalaki, และคณะ 2012 ได้ทำการการประเมินอุปกรณ์บังแดดด้วย PV แบบรวมเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความต้องการพลังงานสำหรับการทำความร้อนและ

การระบายความร้อนในเวลากลางวัน และผลิตพลังงานผ่านแผงโซลาร์เซลล์ อุปกรณ์บังแดดที่เหมาะสมสำหรับอาคารสำนักงาน ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์บังแดด แสดงในรูปที่ 41

Single window	Horizontal canopy single	Horizontal canopy double	Canopy inclined single	Canopy inclined double	Louvers horizontal	Louvers horizontal inwards inclined
						
Louvers horizontal outwards inclined	Vertical louvers	Brise-soleil full facade	Brise - soleil semi facade	Brise - soleil semi facade with louvers	Canopy with louvers	Surrounding shading
						

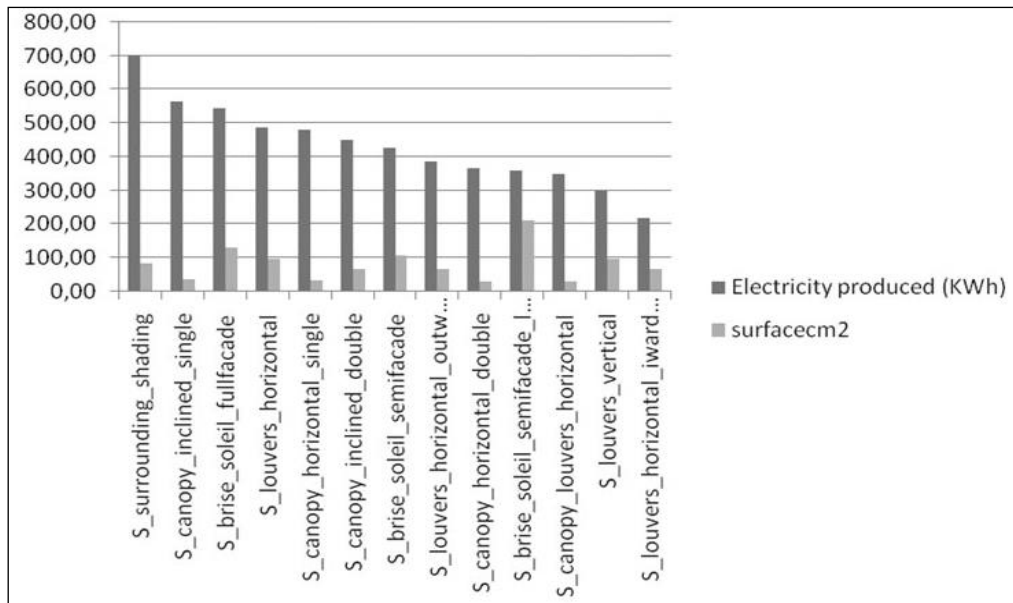
รูปที่ 41 ประเภทของอุปกรณ์บังแดดที่ทำการเปรียบเทียบ

ที่มา: (M. Mandalaki และคณะ, 2012)

สามเกณฑ์พื้นฐานสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์บังแดด:

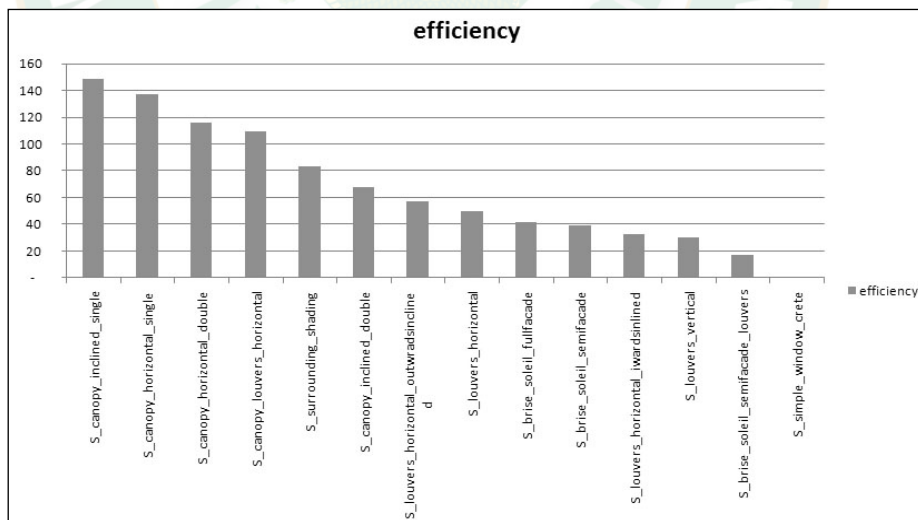
- 1) โหลดระบายความร้อนและความร้อนของพื้นที่ภายใน
- 2) แสงไฟฟ้าที่จำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าความสบายตา
- 3) การผลิตพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวม

ซึ่งได้ทำการตรวจสอบให้อุณหภูมิอยู่ที่ระหว่าง 18°C ถึง 26°C และระดับแสงมากกว่า 500 lux ในเวลาทำงาน (8:00-20:00 ม) และเป็นการลดการใช้ประโยชน์จากพลังงานโดยการใช้พลังงานทดแทนความส่องสว่างจากแสงแดด และเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า ห้องทั่วไปที่ทำการทดสอบมีขนาด 3.5 m x 5.4 m x 2.9 m (กว้าง x ลึก x สูง) ใช้เป็นการอ้างอิงพร้อมหน้าต่างหันทิศใต้ 2.4 m x 1.9 m (กว้าง x สูง) มีพื้นที่ใช้สอย 18.9 m² พื้นที่หน้าต่างทางตอนใต้อยู่ที่ 4.56 m² ดังนั้นอัตราส่วนของพื้นผิวของหน้าต่างต่อพื้นที่เป็น 24% ซึ่งจะมีผลการผลิตไฟฟ้าได้ของอุปกรณ์บังแดดแต่ละประเภท แสดงในรูปที่ 42 และ 43



รูปที่ 42 การผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์บังแดดแต่ละประเภทตามพื้นผิวของวัสดุ PV

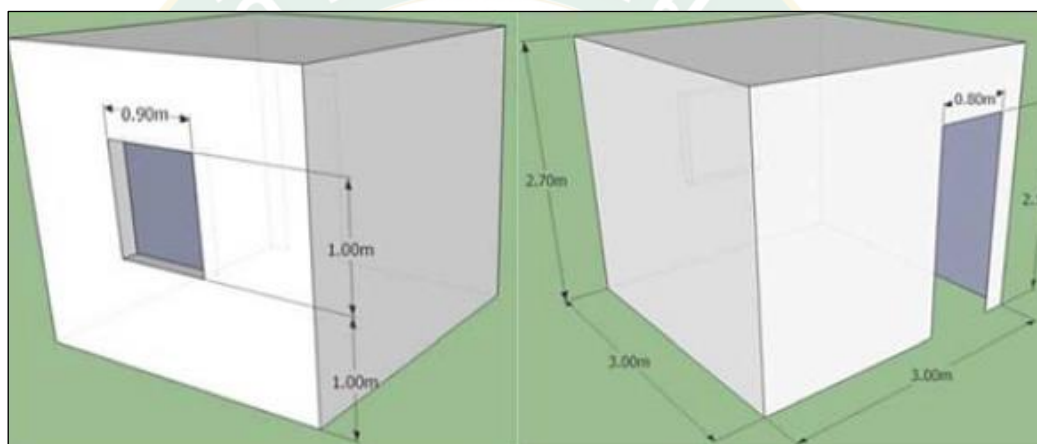
ที่มา: (M. Mandalaki และคณะ, 2012)



รูปที่ 43 การผลิตกระแสไฟฟ้าตามการติดตั้งแต่ละตารางเมตรของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา: (M. Mandalaki และคณะ, 2012)

Helenice Sacht และ Marieli Azoie 2017 ได้ทำการศึกษา ขนาดของหน้าต่าง และ ประสิทธิภาพของการระบายอากาศตามธรรมชาติ สำหรับการระบายความร้อนในอาคารเพื่อปรับปรุง คุณภาพอากาศภายในอาคาร เพื่อความสะดวกสบายของผู้อยู่อาศัย และลดการการใช้พลังงานไฟฟ้า ด้วยหน้าต่างที่มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบสภาพการระบายอากาศ ตามธรรมชาติที่แตกต่างกันด้วยพื้นที่หน้าต่างที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม โดยใช้การจำลองการ คำนวณของไหล (CFD) – Ansys CFX โดยใช้ห้องจำลองจากการอ้างอิง $3\text{m} \times 3\text{m} \times 2.7\text{m}$ รวมพื้นที่ ภายในเท่ากับ 9 m^2 และ 24.3 m^3 ในสภาพแวดล้อมที่โปร่งแจ้ง และขนาดของหน้าต่างเท่ากับ $0.90\text{m} \times 1\text{m}$ ที่มีขอบหน้าต่างเท่ากับ 1.0m และขนาดของประตูเท่ากับ $0.8\text{m} \times 2.1\text{m}$ ดังแสดงใน รูปที่ 44

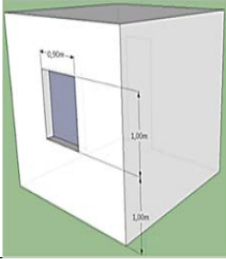
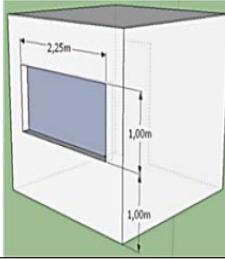


รูปที่ 44 แบบจำลองของห้องที่ใช้ในการทดลองจากการอ้างอิง

ที่มา: (Sacht และ Lukiantchuki, 2017)

ขนาดของหน้าต่างที่เป็นช่องเปิดของการระบายอากาศเพื่อประเมินผลกระทบต่อปริมาณการ ไหลเข้าและไหลออกของอากาศภายในอาคาร (การไหลตามปริมาณ) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอากาศ ต่อชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันในช่องเปิด (หน้าต่างและประตู) และการกระจายเชิงคุณภาพการไหล ของอากาศภายในอาคาร ทำการวิเคราะห์สองมิติที่แตกต่างกันด้วยพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง 10% และ 20% ดังแสดงในรูปตารางที่ 5

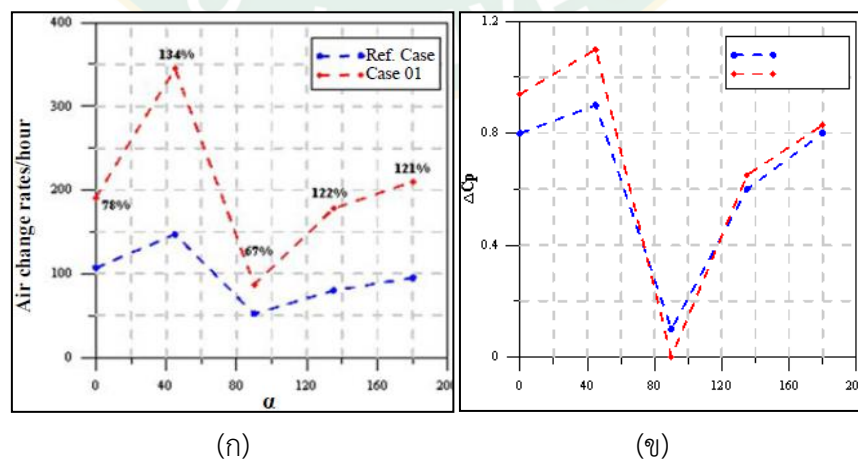
ตารางที่ 7 กรณีศึกษาโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังที่ต่างกัน

Cases	REFERENCE CASE - A = 10% of the area of the floor	CASE 01 - A = 25% of the area of the floor
Images		
Data of the Project	Width of the window = 0,90m Height of the window = 1,0m Window sill = 1,0m Area of the window = 0,90m ² (10% - area of the floor) Area of the environment = 9,00m ² High Ceiling = 2,70m	Width of the window = 2,25m Height of the window = 1,0m Window sill = 1,0m Area of the window = 2,25m ² (25% - area of the floor) Area of the environment = 9,00m ² High Ceiling = 2,70m

ที่มา: (Sacht และ Lukiantchuki, 2017)

ได้ทำการจำลองการระบายอากาศโดยใช้ซอฟต์แวร์ CFX 12.0 ที่ผลิตโดยองค์กร ANSYS จำลองแบบสามมิติใน AutoCAD

ผลได้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอากาศต่อชั่วโมง ในการทดลองของมุมที่ตกกระทบของลมภายนอกของอาคาร สำหรับการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ 1 เกี่ยวกับการอ้างอิง รูปที่ 36 (a) นำเสนอความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงดันเฉื่อย (C_p) สำหรับช่องอากาศเข้าและออก แสดงในรูปที่ 45 (ก) และ 45 (ข)



รูปที่ 45 (ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงอากาศต่อชั่วโมงในการทดลองของมุมตกกระทบ

ของลมภายนอกสำหรับเคสอ้างอิง และกรณี 01 (ข) ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงดัน (C_p)
 ในช่องเปิดฟังก์ชันของมุมตกกระทบของลมภายนอก: กรณีอ้างอิง และกรณี 01

ที่มา: (Sacht และ Lukiantchuki, 2017)

จากผลการตรวจสอบพบว่าเงื่อนไขในการระบายอากาศตามธรรมชาติได้รับอิทธิพลจากขนาดของหน้าต่างเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของมุมการเกิดลม ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ความดัน และอัตราการเปลี่ยนแปลงอากาศต่อชั่วโมง ขนาดของหน้าต่างช่องเปิดใหญ่ช่วยให้ทางเดินของอากาศหมุนเวียนได้สะดวก และช่วยก่อให้เกิด ΔC_p ที่สูงขึ้น บ่งบอกถึงความเป็นไปได้ของการเคลื่อนที่ของอากาศที่มากขึ้นในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร จากการบันทึกลมเคลื่อนที่ผ่านหน้าต่างมุมระหว่าง 0 ถึง 45 องศา พบว่าทั้งสองกรณีศึกษาอัตราการเคลื่อนที่ของลมเข้าสู่อาคารสูงที่สุด ประสิทธิภาพที่แย่ที่สุดเมื่อลมเคลื่อนที่ขนานกับช่องเปิด 90 องศา

ศศิธร ศรีเฟื่องฟุ้ง 2560 ได้ทำการศึกษา การศึกษาความสบายเชิงอุณหภูมิของคนไทยภายในสถาปัตยกรรมประเภทโบสถ์ เพื่อศึกษาหาช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในงานวิจัยคือ เพื่อศึกษาหาช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้เกิดความพึงพอใจเชิงอุณหภูมิของคนไทย และค้นหาสมการจำลองความรู้สึกลสบายเชิงอุณหภูมิของคนไทย (Thai thermal comfort model) ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรสิ่งแวดล้อม 6 ตัว คือ ค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความชื้นอากาศ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน ความเร็วลมค่าระดับกิจกรรมของคน และค่าชนิดของเสื้อผ้าที่สวมใส่ ในอาคารโบสถ์กรณีศึกษาคือโบสถ์ประจำรัชกาล 9 ว่าปัจจัยใดที่มีความสำคัญสูงสุด แต่ละปัจจัยมีลำดับความสำคัญต่อสภาวะสบายของคนไทยแตกต่างกันอย่างไร โดยวิธีการดำเนินงานศึกษาของงานวิจัยนี้คือ เป็นกรณีศึกษาเป็นโบสถ์วัดหลวงประจำรัชกาล 9 จำนวน 8 แห่ง ระเบียบวิธีที่ใช้แบบสอบถามสำรวจถึงความรู้สึกสบายเชิงอุณหภูมิของผู้ที่อยู่ในอาคารโบสถ์วัดหลวงประจำรัชกาลทั้ง 9 รัชกาล และใช้แบบสอบถามความรู้สึกต่อสภาพอากาศ และได้ประยุกต์ใช้แบบสอบถามจากมาตรฐานของ ASHRAE และสำหรับในส่วนของงานวิจัยนี้เลือกใช้เกณฑ์ ASHRAE (2004) แบบสอบถามจะถูกสำรวจควบคู่ไปกับการตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของผู้มาใช้สอยอาคารจำนวน 1,600 คน ภายในโบสถ์วัดหลวงประจำรัชกาล รัชกาลที่ 1-9 จำนวน 8 แห่ง บันทึกค่าโดยเครื่องมืออัตโนมัติ (data logger) โดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการศึกษาดังนี้



รูปที่ 46 เครื่องมือและการติดตั้งในพื้นที่ศึกษา
 ที่มา: (ศศิธร ศรีเพ็ญพึ้ง, 2560)

กำหนดรูปแบบและจัดทำแบบสอบถามตามตัวแปรและมาตรวัดค่าแต่ละตัวแปรตามการ
 ทบทวนวรรณกรรมการศึกษาที่ใช้ตามแนวคิดของ Fanger และ ASHRAE

วิเคราะห์ผลการศึกษาโดยนำข้อมูลทั้งหมดมาพิจารณาสร้างสมการค่าความรู้สึกสบายทาง
 ความร้อนที่แท้จริงของคนไทยโดยวิเคราะห์จากความเห็นในการกรอกแบบสอบถาม ร่วมกับตัวแปร
 ของความรู้สึกสบายทางความร้อน 6 ตัว โดยใช้ระเบียบวิธี การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์
 (regression and correlation analysis)

ผลการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือข้อค้นพบช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้
 คนมีความสบายเชิงคุณภาพ และส่วนที่สองคือ สมการทำนายผลความพึงพอใจเชิงคุณภาพของแต่ละ
 ละโบลต์ประจำรัชกาล

ตารางที่ 8 สมการค่าภาวะสบายเชิงอุณหภูมิของวัดประจำรัชกาล

	สมการค่าภาวะสบายเชิงอุณหภูมิของวัดประจำรัชกาล	ค่านัยสำคัญ
วัดประจำรัชกาลที่ 1	$16.414 - 0.382 \text{tempdb} - 0.008 \text{MRT} - 0.027 \text{RH} + 0.301 \text{V} + 0.376 \text{MET} + 1.396 \text{CLO}$	Sig 0.037 R Square = 30.12
วัดประจำรัชกาลที่ 2	$8.369 - 0.395 \text{tempdb} - 0.254 \text{MRT} - 2.657 \text{RH} + 0.798 \text{V} + 2.081 \text{MET} + 2.671 \text{CLO}$	Sig 0.000 R Square = 34.11
วัดประจำรัชกาลที่ 3	$3.718 - 0.061 \text{tempdb} - 0.102 \text{MRT} - 0.056 \text{RH} + 0.293 \text{V} + 1.004 \text{MET} + 0.644 \text{CLO}$	Sig 0.044 R Square = 37.13
วัดประจำรัชกาลที่ 4	$23.008 - 0.491 \text{tempdb} - 0.520 \text{MRT} - 0.799 \text{RH} + 2.163 \text{V} + 0.555 \text{MET} + 1.103 \text{CLO}$	Sig 0.002 R Square = 32.17
วัดประจำรัชกาลที่ 5 และ 7	$28.629 - 1.269 \text{tempdb} - 1.052 \text{MRT} - 2.234 \text{RH} + 0.359 \text{V} + 1.618 \text{MET} + 0.911 \text{CLO}$	Sig 0.002 R Square = 33.18
วัดประจำรัชกาลที่ 6	$11.637 - 1.559 \text{tempdb} - 0.178 \text{MRT} - 1.050 \text{RH} + 0.729 \text{V} + 1.732 \text{MET} + 1.609 \text{CLO}$	Sig 0.000 R Square = 30.16
วัดประจำรัชกาลที่ 8	$9.295 - 0.878 \text{tempdb} - 2.361 \text{MRT} - 0.234 \text{RH} + 0.870 \text{V} + 0.353 \text{MET} + 0.696 \text{CLO}$	Sig 0.050 R Square = 37.15
วัดประจำรัชกาลที่ 9	$7.142 - 0.2102 \text{tempdb} - 0.3361 \text{MRT} - 0.0248 \text{RH} + 0.5705 \text{V} + 0.2061 \text{MET} + 0.2953 \text{CLO}$	Sig 0.050 R Square = 36.12
โดยรวม	$9.416 - 0.228 \text{tempdb} - 0.041 \text{MRT} - 0.009 \text{RH} + 0.388 \text{V} + 0.107 \text{MET} + 0.781 \text{CLO}$	Sig 0.009 R Square = 37.12

ที่มา: (ศศิธร ศรีเฟื่องฟุ้ง, 2560)

จากการศึกษาทั้งหมดอภิปรายผลได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบผลของความสบายเชิงอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง เทียบกับผลของความสบายเชิงอุณหภูมิของ ASHRAE โดยค่าสภาวะสบายเชิงอุณหภูมิที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปถูกกำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers--ASHRAE) ได้กำหนดช่วงอุณหภูมิและความชื้นของสภาวะน่าสบายอยู่ที่ 22-27°C และมีช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 25-60 % ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงไม่ร้อนไม่หนาวของคนไทยจะอยู่ที่ อุณหภูมิ 30.956°C พบว่าอุณหภูมิที่อยู่ในสภาวะน่าสบายของคนไทยจะสูงกว่าความสบายเชิงอุณหภูมิของ ASHRAE คนไทยจะมีสภาวะความพึงพอใจของความรู้สึกทางอุณหภูมิ (The desired thermal sensation) ผันแปรจากค่าไม่ร้อนไม่หนาว (Neutral) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย ASHRAE

เป็น ค่อนข้างเย็น (Slightly cool) อุณหภูมิที่คนไทยมีความรู้สึกสบายเชิงอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30.956°C ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเกณฑ์อุณหภูมิความสบายเชิงอุณหภูมิที่กำหนดโดย ASHRAE สรุปได้ว่า อุณหภูมิที่คนไทยมีความรู้สึกสบายเชิงอุณหภูมิในโบสถ์ประจำรัชกาล แตกต่างและสูงกว่าเกณฑ์อุณหภูมิความสบายเชิงอุณหภูมิที่กำหนดโดย ASHRAE ถึงประมาณ 3.956-8.956°C และ การศึกษานี้พบว่า อุณหภูมิที่คนไทยรู้สึกสบายอยู่ที่ 30.95°C ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 64.12%

สรุปเนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญของเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

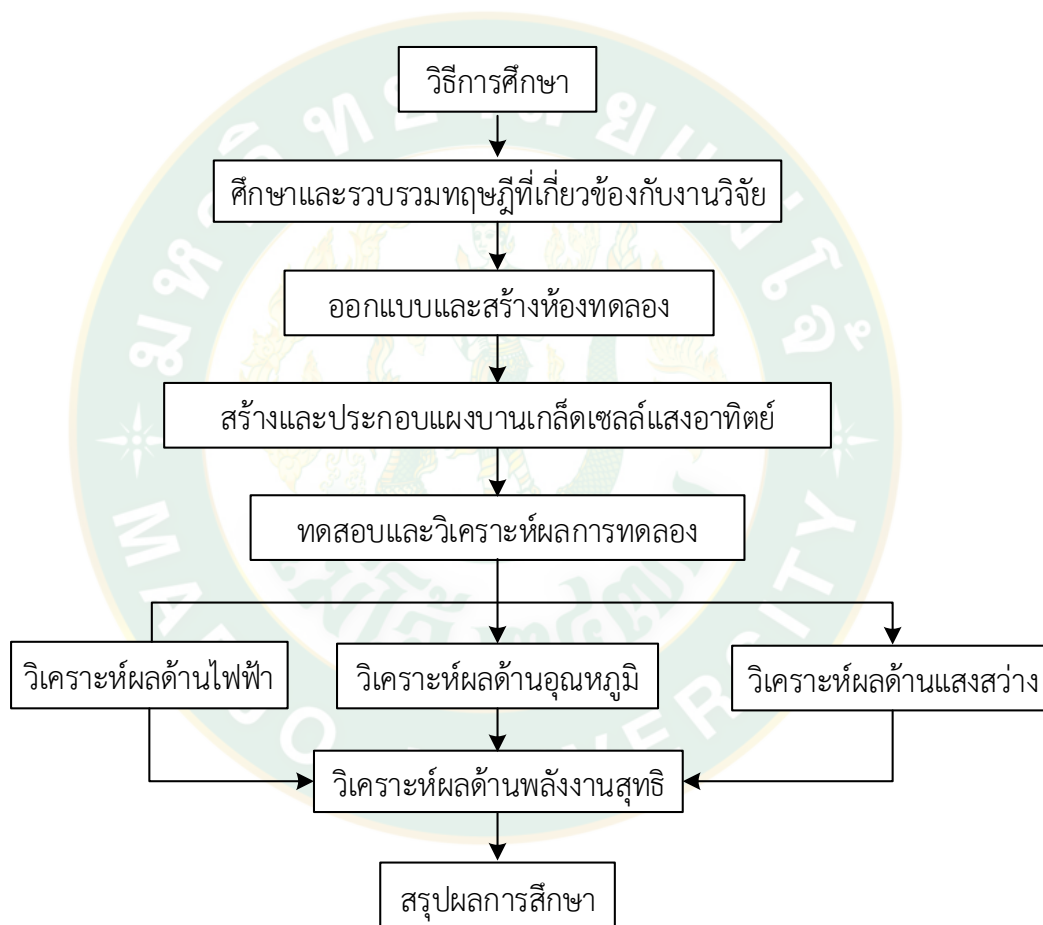
ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำมาประยุกต์ใช้
ประพันธ์พงศ์ จงปติยัตต์ และ วิจิต ค ลิ่ง บุ ญ ุ คร อ ง (2558)	ออกแบบและผลิต “แผ่นบานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์” สำหรับใช้กับหน้าต่างบานเกล็ดทั่วไป	ได้นำหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งกับอาคารทดลองจริง และมุมที่ใช้ในการทดสอบที่ดีขึ้น
Park et al และ คณะ (2010)	ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส (polycrystalline Silicon p-Si) ที่ มีการเว้นระยะบางส่วนเพื่อให้มีช่องผ่านของแสงบนพื้นที่กระจกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร	วิธีการผลิตหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์จากการใช้กระจกประกบทั้งสองด้าน และระยะห่างในการวางเซลล์ที่เหมาะสม
Poh Khai Nga และคณะ (2013)	การวิเคราะห์พลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งโปร่งใส (BIPV) และทำการศึกษาอาคารที่ใช้แสงธรรมชาติจากหน้าต่าง และการผลิตไฟฟ้า ศึกษาประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการประยุกต์ใช้กับอาคาร	การใช้พื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์และพื้นที่โปร่งแสง สำหรับการผลิตไฟฟ้าและการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติที่เหมาะสม
Lin Lu และ Kin Man Law (2013)	การประเมินศักยภาพด้านพลังงาน โดยพิจารณาถึงปริมาณความร้อนที่ได้รับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และแสงสว่างจากธรรมชาติ	หลักการในการประเมินผลพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ การประหยัดพลังงานด้านความร้อนและแสงสว่าง
Shen Xu และ	นำเสนอผลการหาอัตราส่วนพื้นที่เซลล์	ได้อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อ

ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำมาประยุกต์ใช้
คณะ (2014)	แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส	พื้นที่ผนังที่เหมาะสม
T. Miyazaki และคณะ (2014)	ทำการศึกษาค่าการส่องผ่าน (Transmittance) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างกับผนังที่อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างกับผนังที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใสชนิดฟิล์มบาง	อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างกับผนังที่เหมาะสมสำหรับการใช้แสงสว่างที่อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างกับผนังที่เหมาะสม
Rustu Eke และ Cihan Demircan (2015)	ระบบติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารบูรณาการ (BIPV) โดยติดตั้งบนหลังคา และ ทางด้านข้างของอาคาร	ทิศทางการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้รับรังสีอาทิตย์ที่มากที่สุด การเกิดเงาจากตัวอาคารและการเกิดเงาจากภายนอกให้น้อยที่สุด
Maria Mandalaki, และคณะ (2012)	การประเมินอุปกรณ์บังแดดด้วย PV แบบรวมเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความต้องการพลังงานสำหรับการทำความร้อนและการระบายความร้อนในเวลากลางวัน และผลิตพลังงานผ่านแผงโซลาร์เซลล์ อุปกรณ์บังแดดที่เหมาะสมสำหรับอาคารสำนักงาน	วิธีในการระบายความร้อนให้กับอาคาร
Helenice Sacht และ Marieli Azoie (2017)	การระบายความร้อนในอาคารเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคาร เพื่อความสะดวกสบายของผู้อยู่อาศัย และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยหน้าต่างที่มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศ	ใช้ขนาดของพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังที่เหมาะสมสำหรับการระบายอากาศ
ศศิธร ศรีเพ็องฟุ้ง (2560)	ศึกษาหาช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้เกิดความพึงพอใจเชิงคุณภาพของคนไทย และค้นหาสมการจำลองความรู้สึกสบายเชิงคุณภาพของคนไทย	การกำหนดสภาวะความอยู่สบายของคนไทยในพื้นที่ร่ม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการสร้างห้องทดลอง สร้างและประกอบแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ลักษณะต่าง ๆ จากนั้นทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีขั้นตอนแสดงได้ดังรูปที่ 3 และมีรายละเอียดในการดำเนินงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 47 แผนผังขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบและสร้างอาคารทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างอาคารทดลองที่มีขนาดความกว้างของห้องเท่ากับ 2.28 m ยาว 3.24 m สูง 2 m และหลังคาเป็นทรงหน้าจั่วมุม 18° ที่มีชายหลังคายาว 30 cm ซึ่ง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างทำด้วยโครงเหล็ก แผ่นเมทัลชีทเมื่อโดนแสงแดดอุณหภูมิจะสูงถึง 65 °C โดยอาคารจะมีช่องเปิดของผนังสองด้านในทางทิศเหนือและทิศใต้ โดยทิศใต้เป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ และทิศเหนือเป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดธรรมดา ซึ่งได้กำหนดพื้นที่หน้าต่างบานเกล็ดที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (WWR) เท่ากับ 23.68% ลักษณะของอาคารจำลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 48



รูปที่ 48 ลักษณะของอาคารที่ใช้ในการทดลอง

การสร้าง และประกอบแผงหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

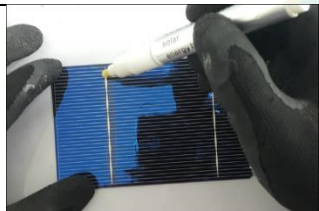
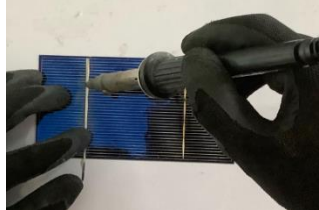
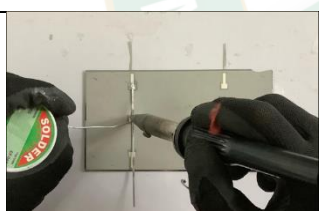

การสร้างหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบเข้ากับแผ่นกระจกใสประกบเข้าด้านหน้า และด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างประกอบมี ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 วัสดุที่ใช้ในการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุอุปกรณ์ในการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์	
	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Poly-Crystalline Silicon Solar Cell) ยี่ห้อ ML Solar ที่มีขนาด 7.62 x 15.24 cm กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อเซลล์เท่ากับ 1.8 W
	หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Gun) ใช้สำหรับการเชื่อมลวดนำไฟฟ้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ มีความร้อนสูงสุดที่ 380 องศา
	หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Gun) ใช้สำหรับการเชื่อมลวดนำไฟฟ้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ มีความร้อนสูงสุดที่ 380 องศา
	ลวดนำไฟฟ้า (Tabbing Wire) ใช้สำหรับเชื่อมเซลล์แสงอาทิตย์เข้าด้วยกันเป็นแผง ที่ใช้บัดกรีตะกั่ว
	น้ำยาประสานเซลล์ (Flux) ใช้บัดกรีเซลล์แสงอาทิตย์กับลวดนำไฟฟ้าโดยทาบนเซลล์ตามตะกั่วด้านหน้าของเซลล์เพื่อช่วยให้ลวดไฟฟ้าเกาะติดเซลล์ได้ดีขึ้น
	ตะกั่วประสาน (Solder) ใช้เป็นตัวเชื่อมเซลล์แสงอาทิตย์กับลวดนำไฟฟ้า
	กระจกใส ใช้เป็นแผ่นบานเกล็ด ที่มีขนาดเท่ากับ กว้าง 10 cm ยาว 61 cm และหนา 3 mm

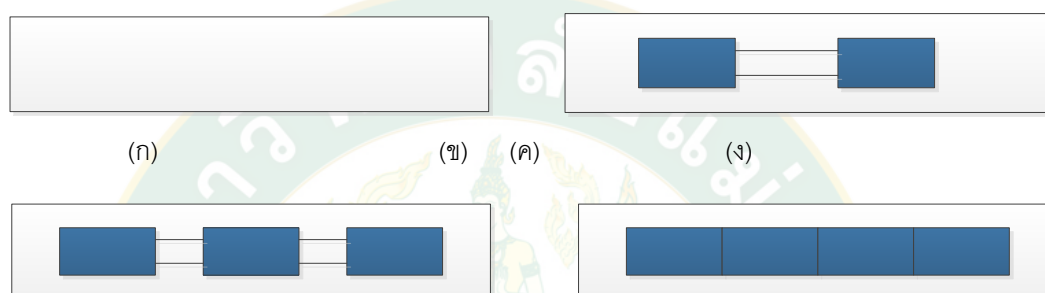
การเชื่อมเซลล์แสงอาทิตย์กับลวดนำไฟฟ้าด้วยวิธีการบัดกรี จะนำลวดนำไฟฟ้าเชื่อมด้านบน ที่เป็นขั้วลบ กับด้านล่างที่เป็นขั้วบวก และจะมีปลายลวดนำไฟฟ้าทั้งสองด้านเหลือออกมาเพื่อจะสามารถเชื่อมกับเซลล์ต่อไปได้ ในการบัดกรีจำเป็นจะต้องทาน้ำยาประสานก่อนเพื่อจะสามารถช่วยให้ลวดนำไฟฟ้าเชื่อมกับผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี แล้วใช้หัวแร้งไฟฟ้าเชื่อมลวดนำไฟฟ้ากับเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากัน ซึ่งมีขั้นตอนการเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ขั้นตอนในการสร้างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนในการเชื่อมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการบัดกรี	
	ขั้นตอนในการทำน้ำยาประสานที่มีลักษณะเหมือนปากกา ทาลงบริเวณส่วนที่เป็นสีขาวยัง 2 เส้น ด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบ
	นำเอาลวดนำไฟฟ้ามาแนบลงบริเวณตามที่ได้ทำน้ำยาประสานไว้แล้ว จากนั้นทำการบัดกรีด้วยหัวแร้งไฟฟ้า เพื่อให้ลวดนำไฟฟ้าสามารถเชื่อมติดกับเซลล์แสงอาทิตย์
	จากนั้นทำการเชื่อมส่วนด้านหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก (+) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อนจะใช้วิธีเดียวกันกับด้านหน้า ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นจุด 6 จุด
	การทำแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ คือได้นำเอาเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกัน แล้วนำมาประกอบเข้ากับแผ่นบานเกล็ดกระจกใส ซึ่งใช้กระจกประกบหน้า และหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้กาวซิลิโคนใสเป็นตัวยึด

เมื่อได้ชุดเซลล์แสงอาทิตย์จากการเชื่อมเซลล์ด้วยการบัดกรีแล้ว จากนั้นได้ทำการเชื่อมต่อวงจรบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการต่อแบบอนุกรมกันทั้งหมด ซึ่งจะได้แรงดันที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนเซลล์แต่กระแสไฟฟ้าจะเท่าเดิม ในการเชื่อมบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทำการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับแผ่นกระจกใสของบานเกล็ด สำหรับการสร้างและประกอบแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบผลึกรวม ยี่ห้อ ML Solar โดย 1 เซลล์มีความ

กว้าง 7.62 cm ยาว 15.24 cm กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อเซลล์เท่ากับ 1.8 W โดย 1 บานเกล็ดจะทำการวางเซลล์จำนวน 2 3 และ 4 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 49 ซึ่งแต่ละเซลล์จะทำการต่อกันแบบอนุกรม จากนั้นวางชุดเซลล์เข้ากับกระจกใส แล้วนำมาประกอบเป็นแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั้งหมดได้ทำการประกอบบานเกล็ดจำนวน 3 บาน ที่เรียกว่า บานเกล็ด 1 บานเกล็ด 2 และ บานเกล็ด 3 และทั้งสามบานเกล็ดได้ใช้จำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 40 60 และ 80 เซลล์ โดยที่ 1 บานเกล็ดประกอบด้วยแผ่นบานเกล็ดจำนวน 20 แผ่นเท่ากันทั้งสามบาน



รูปที่ 49 แผ่นกระจกใส และการต่อทั้ง 3 รูปแบบ คือ (ก) แผ่นกระจกใส (ข) ใช้ 2 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด, (ค) ใช้ 3 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด และ (ง) ใช้ 4 เซลล์ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด

ในการประกอบบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทำการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากันหลายๆเซลล์ เพื่อให้มีกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้น แล้วนำมาประกอบเข้ากับแผ่นกระจกใส จะมีขั้นตอนในการประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 11

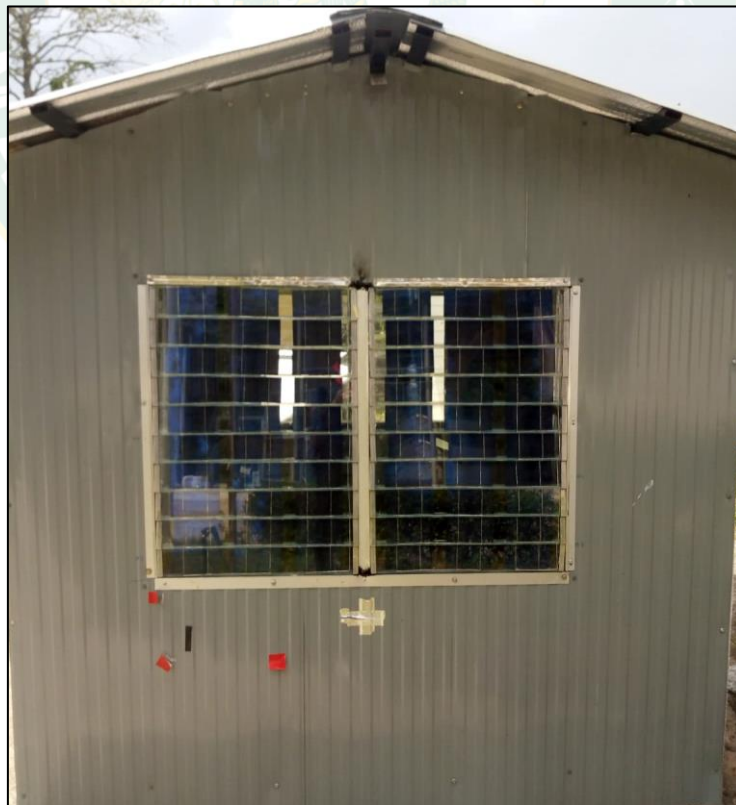
ตารางที่ 11 ลักษณะของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบการจัดเรียงของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์	
	<p>หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1 ที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 เซลล์ ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด รวมทั้งสิ้นจำนวน 40 เซลล์ ที่มีระยะห่างต่อเซลล์ 15 cm มีพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ 0.464 m^2 และมีพื้นที่โปร่งแสง 0.616 m^2</p> <ul style="list-style-type: none"> - แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 20 V - กระแสไฟฟ้าสูงสุด 1.8 A
	<p>หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 2 บานที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 เซลล์ ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด รวมทั้งสิ้นจำนวน 60 เซลล์ ที่มีระยะห่างต่อเซลล์ 4 cm มีพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ 0.696 m^2 และมีพื้นที่โปร่งแสง 0.348 m^2</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 V - กระแสไฟฟ้าสูงสุด 1.8 A
	<p>หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 3 บานที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 เซลล์ ต่อ 1 แผ่นบานเกล็ด รวมทั้งสิ้นจำนวน 80 เซลล์ ที่มีระยะห่างต่อเซลล์ 0 cm มีพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ 0.929 m^2 และมีพื้นที่โปร่งแสง 0.151 m^2</p> <ul style="list-style-type: none"> - แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 40 V - กระแสไฟฟ้าสูงสุด 1.8 A

การประกอบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอาคารเพื่อทำการทดลอง ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (WWR) เท่ากับ 23.68 % ติดตั้งทางทิศใต้ของอาคารทั้งสามแผง ดังแสดงในรูปที่ 50



(ก) หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บ้านเกล็ด 1



(ข) หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บ้านเกล็ด 2



(ค) หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บ้านเกล็ด 3
 รูปที่ 50 การติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารทั้ง 3 แผงติดตั้งทางทิศใต้



รูปที่ 51 การติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดในอาคารทดลองติดตั้งทางทิศเหนือ

การติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารแบบจำลองเพื่อทดสอบ ซึ่งอาคารหันหน้าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ และหน้าต่างบานเกล็ดเปล่าติดตั้งทางทิศเหนือในรูปที่ 51

การบันทึกข้อมูลการทดสอบ

บันทึกผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบของงานวิจัยครั้งนี้ ที่วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ที่มีพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่ละติจูด $18^{\circ}53'49.74''$ ลองจิจูด $99^{\circ}00'40.02''E$ เป็นพื้นที่ในการเก็บข้อมูลในการทำงานวิจัย เพื่อทดสอบการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การระบายอากาศแบบธรรมชาติ และปริมาณการส่องสว่างในอาคาร จะมีขั้นตอนการบันทึกผลดังนี้.

การบันทึกผลการผลิตไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

ได้ทำการทดสอบในได้สภาวะอากาศจริงของพื้นที่ในการติดตั้งบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารจำลอง ที่หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ที่เป็นทิศที่สามารถรับปริมาณอาทิตย์ได้มาก ซึ่งจะได้ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max}) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) โดยนำมาวิเคราะห์หา

- 1.) วิเคราะห์พลังงานที่ผลิตได้ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเข้ากับหน้าต่างบานเกล็ด
- 3.) เปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 หน้าต่างบานเกล็ด ที่ทำการทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน

การบันทึกผลการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° ซึ่งเป็นการระบายอากาศแบบธรรมชาติ ซึ่งได้ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของผนัง และหลังคา ทั้งด้านนอก และในห้องทดสอบ อุณหภูมิภายในห้อง อุณหภูมิแวดล้อม และวัดค่าความเร็วลมภายในห้องทดสอบ ที่มีพื้นที่ช่องเปิดของหน้าต่างทั้ง 3 มุมที่ต่างกัน โดยจะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ ดังนี้

- 1.) วิเคราะห์อัตราการแลกเปลี่ยนของอากาศและการระบายอากาศภายในห้องทดสอบ เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90°
- 2.) วิเคราะห์หาค่าการระบายความร้อน และการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90°
- 3.) วิเคราะห์ค่าการสมมูลพลังงานของห้องทดสอบที่ทดสอบ เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90°
- 4.) นำผลการระบายอากาศของห้องทดสอบ เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° มาเปรียบเทียบความเหมาะสมในการระบายอากาศที่ดีที่สุด

การบันทึกผลการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติ

ได้พิจารณาความส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติที่ทะลุผ่านทั้งสามแผงที่มีรูปแบบการจัดเรียงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน และทำการทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° โดยได้ทำการบันทึกการส่องสว่างภายในอาคาร และการส่องสว่างภายนอกอาคาร โดยจะพิจารณาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เปรียบเทียบค่าการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติที่ผ่านเข้ามาภายในอาคาร จากการจัดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามรูปแบบ ที่ปรับมุมบานเกล็ดเป็น 0° , 18° และ 90°
2. เปรียบเทียบความส่องสว่างภายในอาคารของแสงจากธรรมชาติกับค่าความสว่างมาตรฐาน ความส่องสว่างของอาคารสำนักงานเท่ากับ 500 Lux

3. การวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงธรรมชาติภายนอกอาคาร กับปริมาณแสงภายในอาคาร Daylight Factor Method (DF)

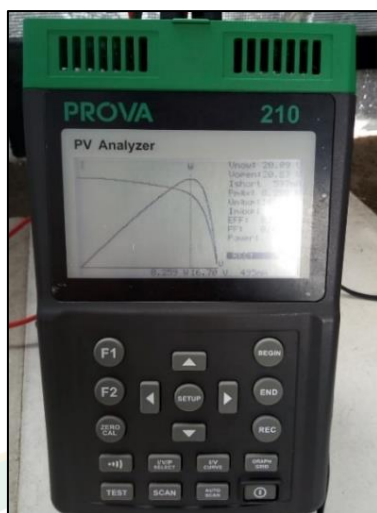
เมื่อได้ข้อมูลจากการทดสอบแล้วข้างต้นแล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าพลังงานสุทธิของอาคาร ที่ได้ทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมที่สุดในการผลิตไฟฟ้า การระบายอากาศ และการส่องสว่างภายในอาคาร ที่มีผลมาจากการทดสอบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามรูปแบบ ทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° โดยการกำหนดให้ค่าพลังงานที่ผลิตได้จากบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นบวก พลังงานที่ใช้สำหรับการปรับอากาศและแสงสว่างภายในห้องมีค่าเป็นลบ หากพลังงานสุทธิมีค่าเป็นบวกหมายความว่าพลังงานที่ผลิตได้จากหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการปรับอากาศ และการปรับแสงสว่างภายในอาคาร หากว่าพลังงานสุทธิมีค่าเป็นลบหมายความว่าพลังงานที่ผลิตได้จากหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีน้อยกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการปรับอากาศและปรับแสงสว่างภายในอาคาร

อุปกรณ์ตรวจวัดในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือในการบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลของการวิจัย ซึ่งการบันทึกข้อมูลแบ่งออกเป็นอยู่ 3 ส่วน คือ การตรวจวัดด้านไฟฟ้าของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ การตรวจวัดทางด้านอุณหภูมิ และการตรวจวัดทางด้านความส่องสว่างภายในห้องทดลอง ซึ่งช่วงเวลาในการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. บันทึกซ้ำทุก ๆ 5 นาที ซึ่งจะมีการตรวจวัดทั้งภายนอกและภายในของอาคาร จะประกอบมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้.

1.) เครื่องวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Module Analyzer) รุ่น PROVA 210

เป็นเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีความสามารถในการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 12 A และ 60 V ที่ใช้ในการตรวจวัดไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น การวัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max}) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) และกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ที่มีหน้าจอในการแสดงผล และบันทึกข้อมูลผ่านสาย USB สู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีข้อมูลเป็นตัวเลข และสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์เกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 52



รูปที่ 52 เครื่องวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Module Analyzer) รุ่น PROVA 210

2.) เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer)

เป็นอุปกรณ์ที่จะวัดการแผ่รังสีอาทิตย์บนพื้นที่ราบ ยี่ห้อ Apogee มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล 0.2 mV Per W/m^2 ความแม่นยำในการรับรังสีอาทิตย์ 5.00 W/m^2 per mV ในช่วงสเปกตรัม 0.3 μm ถึง 3 μm ไพรานอมิเตอร์สามารถตรวจวัดการกระจายของรังสีแสงอาทิตย์ผ่านลงบนเซนเซอร์ที่ติดตั้งให้รับรังสีรวมที่หน่วยเป็น (W/m^2) โดยให้มีทิศทางการวัดไปตามแนวเดียวกับแผงบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ด้านนอกของอาคารทดลอง โดย (Pyranometer) สามารถวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ได้สูงถึง 1,250 W/m^2 ที่ที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับ Data Logger ADAM-5000/TCP และบันทึกข้อมูลผ่านสาย USB สู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีข้อมูลเป็นตัวเลขแสดงในรูปที่ 53



รูปที่ 53 เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer)

3.) เทอร์โมคัปเปิล (K-type Thermocouple)

ชนิด Type K ทำจากส่วนประกอบของวัสดุ Chromel – Alomel 4/0.32 mm X 2 เหมาะสำหรับใช้ในสถานที่เปรี๊ยกขึ้น และมีอุณหภูมิแวดล้อมงานวัดอุณหภูมิด้ำนก้างๆ ถึงสูง โดยมีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ท่ -20°C ถึง $+90^{\circ}\text{C}$ ซึ่งได้ใช้วัดอุณหภูมิผนังห้อง อุณหภูมิภายในห้อง และวัดอุณหภูมิแวดล้อม ดังแสดงแด้งในรูปที่ 54



รูปที่ 54 เทอร์โมคัปเปิล (K-type thermocouple)

4.) อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger ADAM-5000/TCP)

เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลด้ำนอุณหภูมิ ARM 32-bit RISC CPU การใช้พลังงาน 5.0 W กำลังไฟฟ้้าขาเข้า 10 ~ 30 VDC อุณหภูมิในการทำงาน -10 ถึง 70°C อุณหภูมิการเก็บรักษา -25 ถึง 85°C ความชื้นวัดได้ 5 ถึง 95% ที่สามารถบันทึกค่าจากสาย Thermocouple และสัญญาณไฟฟ้้าจาก Pyranometer ที่มีจุดต่อเป็นขั้วบวก และลบ ใช้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสายแลน (Lan Cable) ในการทดสอบครั้งนี้ใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น ดังแสดงแด้งในรูปที่ 55



รูปที่ 55 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger ADAM-5000/TCP)

5.) เครื่องวัดความเร็วลม (TM-4002 Hot Wire Anemometer)

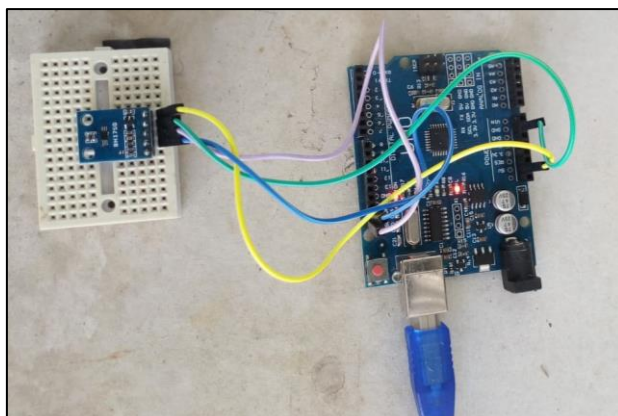
เป็นเครื่องมือวัดความเร็วลม อัตราการไหลของอากาศ สามารถแสดงหน่วยการวัด (m/s, Ft/min, Km/hr และ mp/hr) ความชื้น สามารถแสดงหน่วยการวัด (%RH) และอุณหภูมิ สามารถแสดงหน่วยการวัด (องศาเซลเซียส และองศาฟาเรนไฮต์) ที่มีจอแสดงผล LCD ขนาดใหญ่ ความเร็วในการวัด 0.01-25.00 m/s ดังแสดงในรูปที่ 56



รูปที่ 56 เครื่องมือวัดความเร็วลม

6.) อุปกรณ์วัดความส่องสว่างภายในอาคาร (Internal Illuminance)

ใช้วัดแสงสว่างภายในของอาคาร โดยใช้ GY-302 เซ็นเซอร์ วัดความเข้มแสง Light Sensor Module (BH1750FVI) ที่มีหน่วยเป็น (Lux) ต่อกับ Arduino เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสายแลน (Lan cable) ในการตรวจวัดความส่องสว่างภายในอาคารใช้อุปกรณ์โมดูลอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 16 บิตที่สามารถวัดความส่องสว่างได้ในช่วง 1- 65,535 lux ที่มีการสื่อสารผ่านระบบ I2C BUS ย่อมาจาก (Inter Integrate Circuit Bus) สามารถวัดได้หลายๆจุดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 56



รูปที่ 57 อุปกรณ์วัดความส่องสว่างภายในอาคาร (BH1750FVI)

7.) เครื่องมือวัดความส่องสว่าง (Indoor Lux meter)

เครื่องมือวัดความส่องสว่างภายในอาคาร สามารถวัดความส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติ ในช่วง 0-100,000 Lux ยี่ห้อ Lutron Lx 1128sd ดังแสดงในรูปที่ 57

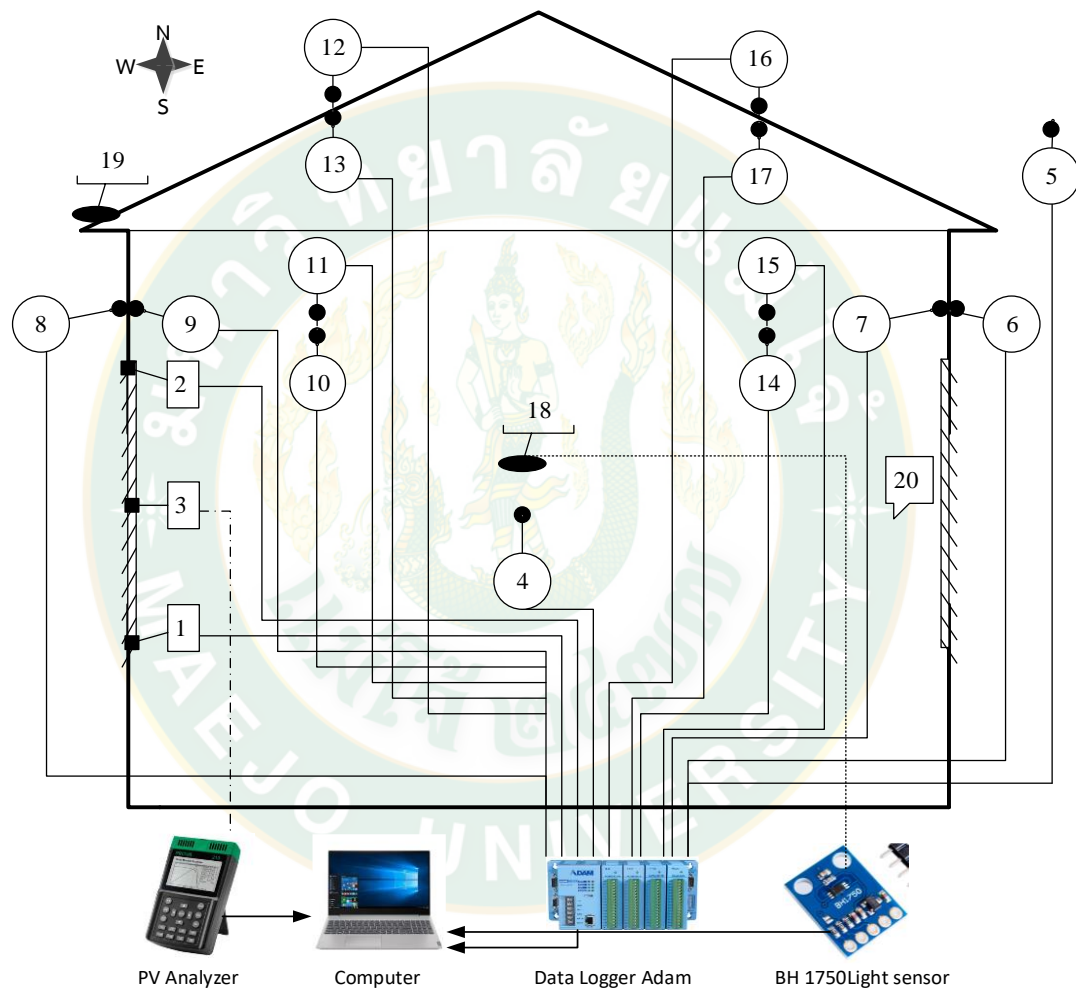


รูปที่ 58 เครื่องวัดปริมาณความส่องสว่าง (Outdoor Lux Meter)

ตำแหน่งสำหรับจุดตรวจวัด

ในการบันทึกข้อมูลของงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวางจุดตำแหน่งในการตรวจวัด เพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ในส่วนของจุดในการตรวจวัดต่าง ๆ ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมวัดข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้าและค่ารังสีอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับ PV Analyzer

และ Data logger Adam 500 ส่วนสัญลักษณ์รูปวงกลมแสดงการวัดข้อมูลด้านอุณหภูมิที่ประกอบด้วย การวัดอุณหภูมิของผนังและหลังคาด้านนอกด้านในทุกทิศทาง การวัดอุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิแวดล้อม ที่ทำการเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิล Thermocouple Type k และ Data logger Adam 5000 และสัญลักษณ์ขีดด้านล่างเป็นจุดในการตรวจวัดการสว่างของแสงด้านนอกและด้านในซึ่งทำการเชื่อมต่อกับ BH1750FVI และ Arduino UNO ดังแสดงในรูปที่ 59



รูปที่ 59 จุดต่าง ๆ ในการตรวจวัดข้อมูลทางด้านอุณหภูมิ ไฟฟ้าและความส่องสว่าง

ตารางที่ 12 ตำแหน่งและเครื่องมือในการตรวจวัดข้อมูลในงานวิจัย

จุดวัด	ความหมาย	สัญลักษณ์	เครื่องมือ	
1	กำลังไฟฟ้า	P_m	PV Analyzer	
2	ค่ารังสีอาทิตย์ 1	$I_{T,1}$	Apogee + Data logger	
3	ค่ารังสีอาทิตย์ 2	$I_{T,2}$		
4	อุณหภูมิในห้อง	$T_{i,room}$	Type k + Data logger	
5	อุณหภูมิแวดล้อม	T_{amb}		
6	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศเหนือ	$W_{o,N}$		
7	อุณหภูมิผนังด้านในทิศเหนือ	$W_{i,N}$		
8	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศใต้	$W_{o,S}$		
9	อุณหภูมิผนังด้านในทิศใต้	$W_{i,S}$		
10	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศตะวันออก	$W_{o,E}$		
11	อุณหภูมิผนังด้านในทิศตะวันออก	$W_{i,E}$		
12	อุณหภูมิหลังคาด้านนอกทิศตะวันออก	$W_{o,W}$		
13	อุณหภูมิหลังคาด้านในทิศตะวันออก	$W_{i,W}$		
14	อุณหภูมิผนังด้านนอกทิศตะวันตก	$R_{o,E}$		
15	อุณหภูมิผนังด้านในทิศตะวันตก	$R_{i,E}$		
16	อุณหภูมิหลังคาด้านนอกทิศตะวันตก	$R_{o,W}$		
17	อุณหภูมิหลังคาด้านในทิศตะวันตก	$R_{i,W}$		
18	ความส่องสว่างภายในอาคาร	E_i		BH1750FVI + Arduino UNO
19	ความส่องสว่างภายนอกอาคาร	E_o		

จุดวัด	ความหมาย	สัญลักษณ์	เครื่องมือ
20	อัตราความเร็วลมในห้องทดสอบ	Q	Hot Wire temperature

ตารางที่ 12 ความหมายของแต่ละจุดในการวัดข้อมูล 1-20 ที่มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ

ในบทนี้ได้นำเสนอการวิจัยจากการพัฒนาและการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับห้องทดลองโดยติดตั้งในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งได้ประกอบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ 3 รูปแบบ โดยมีจำนวนเซลล์ และระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 12 และทั้ง 3 แผงทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดที่มุมรับแสง 0° (เปิดบานเกล็ดทั้งหมด) 18° (เปิดบานเกล็ดบางส่วน) และ 90° (ปิดบานเกล็ดทั้งหมด) (เทียบกับพื้นโลก) ในการทดสอบหน้าต่างบานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จะแบ่งออกเป็นการทดสอบด้านไฟฟ้า โดยจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าฟิลแฟกเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบและทั้ง 3 มุมที่ทดสอบ จากนั้นวิเคราะห์ทางด้านความร้อนของห้องทดสอบโดยพิจารณา อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ การระบายอากาศ เพื่อหาค่าสมดุลพลังงานของห้องทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบการระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องทดสอบ และจากนั้นทดสอบปริมาณแสงสว่างภายในอาคาร โดยพิจารณาการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติผ่านหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผงทดสอบระดับการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0° , 18° และ 90° โดยนำผลการส่องสว่างที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการส่องสว่างภายในอาคารสำนักงาน เพื่อให้ได้การทดสอบการส่องสว่างภายในอาคารที่สูงกว่ามาตรฐานและเหมาะสมที่สุด ซึ่งได้ทำการทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม ปี 2562 และทดสอบในช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาการวิเคราะห์พลังงานของระบบระบายอากาศบานเกล็ดแสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

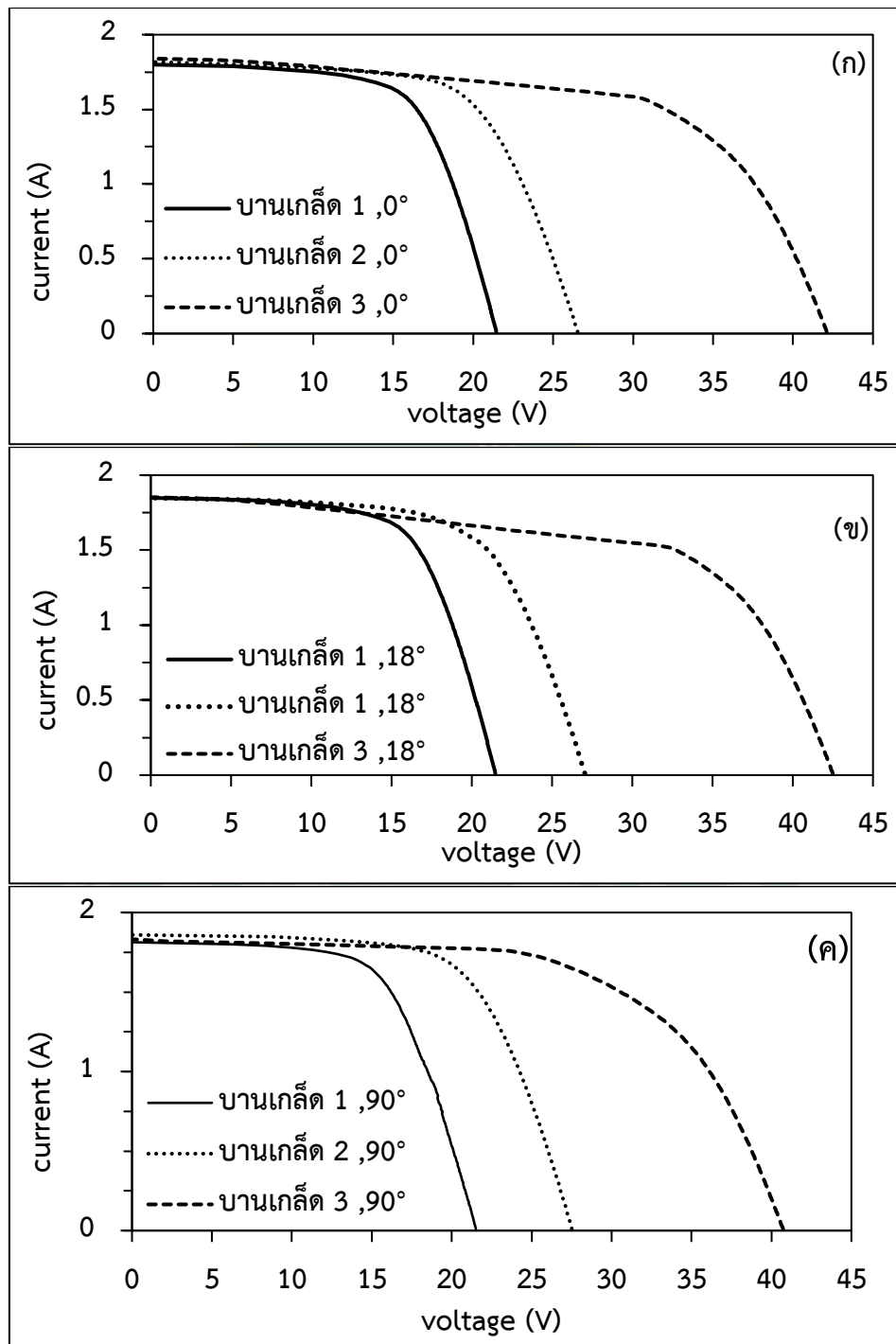
1. ผลการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์
2. ผลการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบที่การปรับมุมบานเกล็ด เป็น 0° , 18° และ 90°
3. ผลการส่องสว่างภายในอาคารจากการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

ซึ่งในแต่ละส่วนสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

ผลการวิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve) ซึ่งค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดง (I-V curve) ของทั้ง 3 บานเกล็ด ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ดังนี้

จากรูปที่ 60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 3 บานเกล็ด ที่มีจำนวนเซลล์ที่แตกต่างกัน ทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° โดย บานเกล็ด 1 ทดสอบในวันที่ 16-18/12/2019 บานเกล็ด 2 ทดสอบในวันที่ 10-12/12/2019 และบานเกล็ด 3 ทดสอบในวันที่ 7-9/12/2019 ตามลำดับมุมที่ทดสอบ ซึ่งทดสอบในวันที่ใกล้เคียงกันจะมีค่ารังสีอาทิตย์ในแต่ละวันมีความแตกต่างกันเล็กน้อย จากรูปจะพบว่า บานเกล็ด 1-3 ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ที่แสดงผลในเวลา 9:00 น ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่ารังสีอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 650 W/m^2 พบว่า หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 3 บานเกล็ดที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานอยู่ทั่วไป หน้าต่างบานเกล็ด 1-3 เมื่อมีจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการต่อเซลล์แต่ละเซลล์แบบอนุกรมทั้งหมด

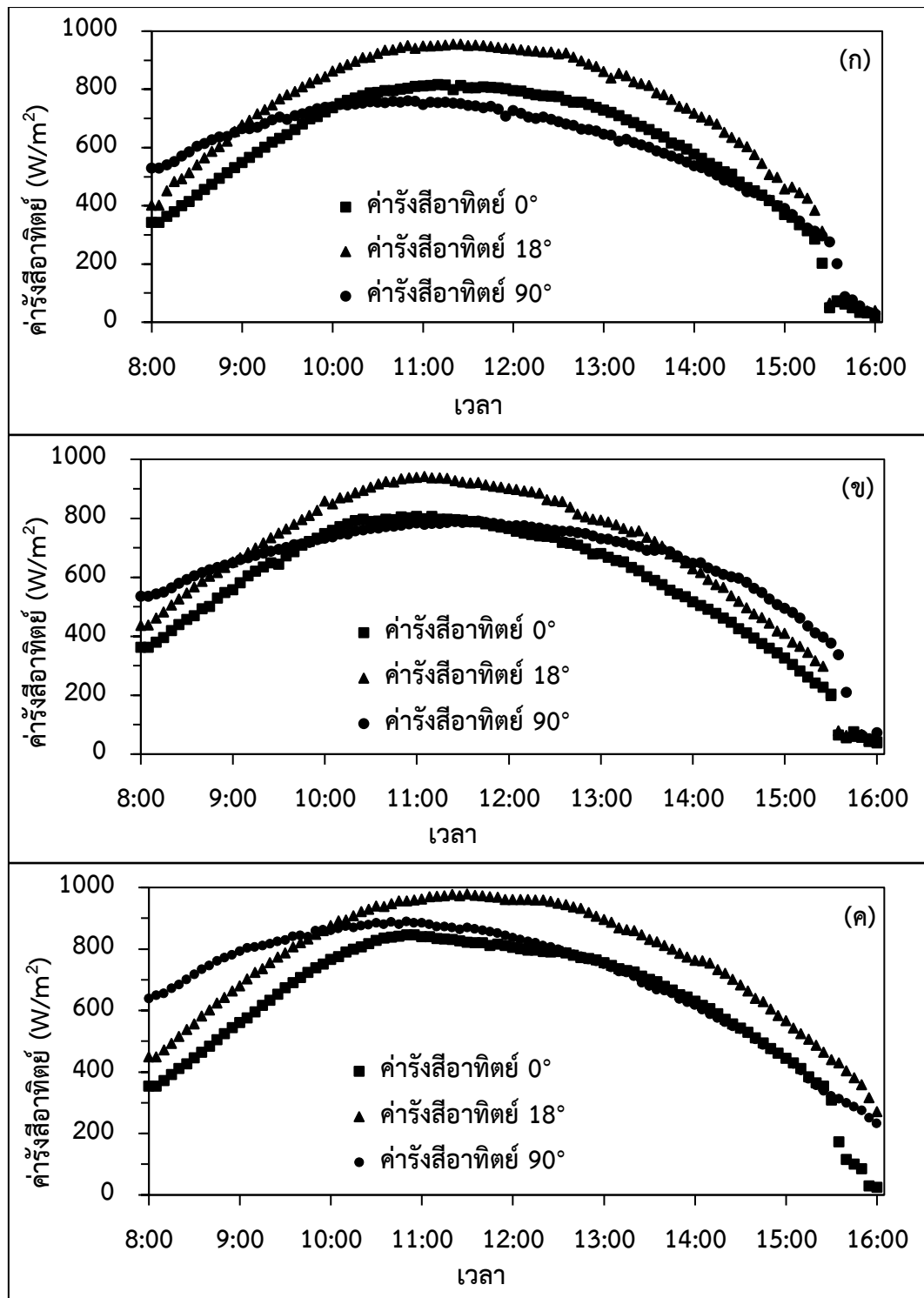


รูปที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงหน้าต่างบานเกล็ด (บานเกล็ด 1 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ (ก) 0° , (ข) 18° และ (ค) 90°

จากกราฟจะเห็นว่า รูปที่ 60 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของบานเกล็ด 1-3 ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° พบว่า มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยจะมี

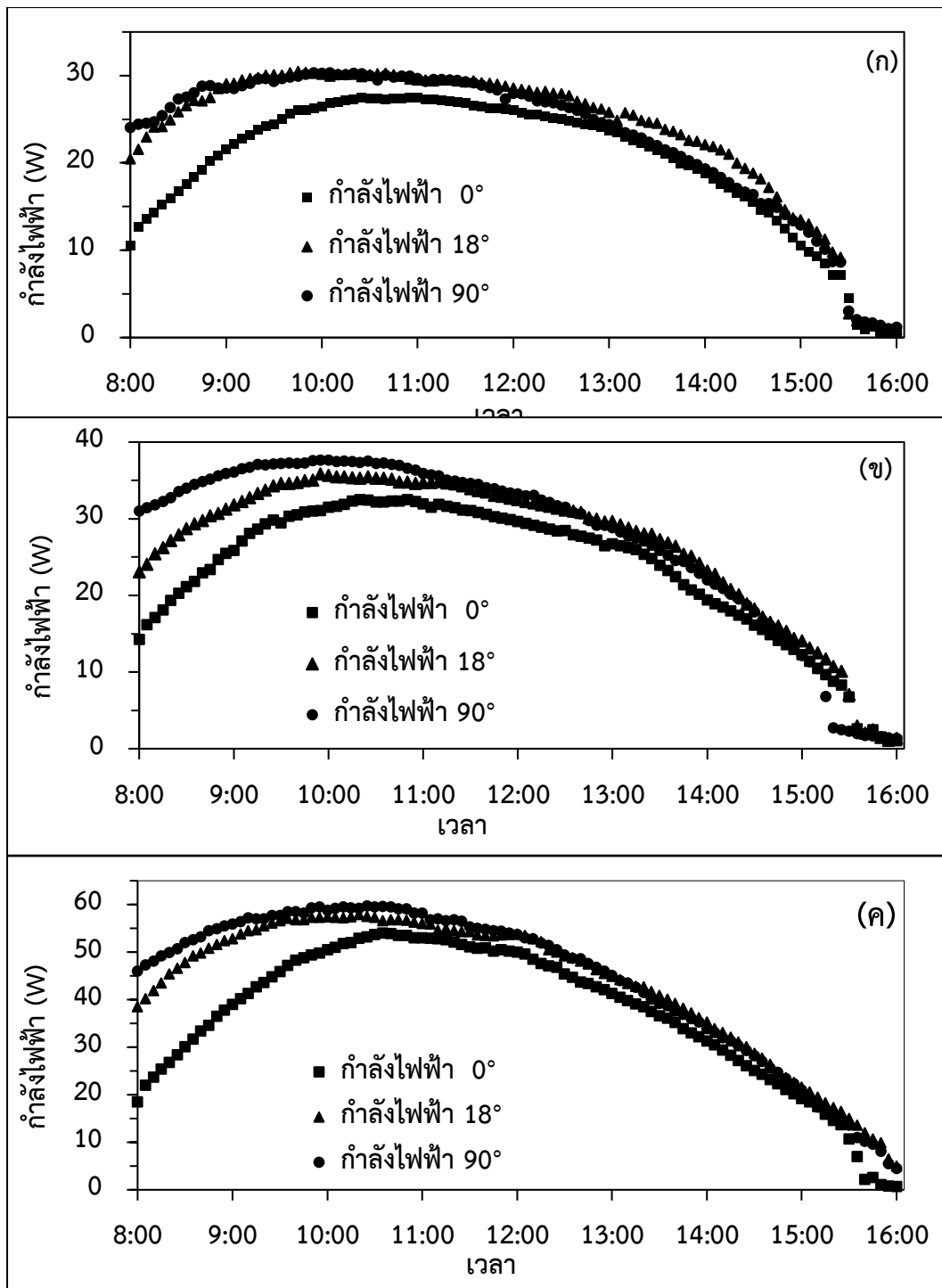
แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 บานเกล็ด เท่ากับ 21.4, 26.5 และ 42.1 V ตามลำดับแผงบานเกล็ด รูปที่ 60 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของบานเกล็ด 1-3 ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° พบว่า มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่นเดียวกันกับการทดสอบที่มีมุมบานเกล็ด 0° โดยจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 บานเกล็ด เท่ากับ 21.4, 27 และ 42.4 V ตามลำดับแผงบานเกล็ด และรูปที่ 60 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของบานเกล็ด 1-3 ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° พบว่า มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่นเดียวกันกับการทดสอบที่มีมุมบานเกล็ด 0° และ 18° โดยจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 บานเกล็ด เท่ากับ 21.5, 27.5 และ 40.7 V ตามลำดับแผงบานเกล็ด จะเห็นได้ว่า บานเกล็ด 3 จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า บานเกล็ด 1 และ บานเกล็ด 2 ที่มีผลมาจากจำนวนเซลล์ที่นำมาประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับมุมบานเกล็ด พบว่า แรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันที่มีผลมาจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบที่มีมุมบานเกล็ด 0° , 18° และ 90° มีค่าที่ต่างกัน และค่ารังสีอาทิตย์ในการทดสอบในแต่ละวันมีค่าไม่เท่ากัน ส่วนกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 บานเกล็ด มีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าประมาณ 1.8 A เนื่องจากการต่อเซลล์แต่ละเซลล์แบบอนุกรมทั้งหมดทำให้มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่าเดิมที่ 1.8 A ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะแตกต่างกันเมื่อมีค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบไม่เท่ากัน

จากรูปที่ 61 แสดงค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดวันของทั้ง 3 บานเกล็ด เมื่อมีการปรับมุมของบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° จากรูปจะพบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 3 บานเกล็ด มีลักษณะโดยรวมที่คล้ายกัน เนื่องจากทดสอบในวันที่ใกล้เคียงกันและเป็นช่วงวันที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง โดยที่ค่ารังสีอาทิตย์จะมีลักษณะที่แตกต่างกันก็ต่อเมื่อมีการปรับมุมของบานเกล็ด โดยในช่วงเช้า 8.00-9.00 น. บานเกล็ดที่ทำมุม 90° จะได้รับปริมาณแสงอาทิตย์สูงที่สุด เนื่องจากดวงอาทิตย์ยังอยู่ที่ต่ำทำให้รังสีอาทิตย์ตั้งฉากกับมุม 90° แต่หลังจากนั้นบานเกล็ดที่ทำมุม 18° จะมีค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบที่มากที่สุด เนื่องจากค่ารังสีอาทิตย์เล็งตั้งฉากกับมุมบานเกล็ดที่ 18° และค่ารังสีอาทิตย์ของการปรับมุมทั้งสามจะสูงสุดในช่วงเวลา 11.00-12.00 น. แต่หลังจากนั้นค่ารังสีอาทิตย์ของทั้งสามมุมก็เริ่มลดลงเรื่อย ๆ โดยเมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบรวมใน 1 วัน พบว่าค่ารังสีอาทิตย์ในกรณี รูปที่ 61 (ก) บานเกล็ด 1 เมื่อมีการปรับมุมของบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° จะมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.77, 5.74 และ 4.79 kWh/m² ส่วนที่หน้าต่างรูปที่ 61 (ข) บานเกล็ด 2 จะมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.62, 5.43 และ 5.19 kWh/m² และ รูปที่ 61 (ค) บานเกล็ด 3 จะมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.05, 6.17 และ 5.67 kWh/m² ตามลำดับมุมที่ทดสอบ



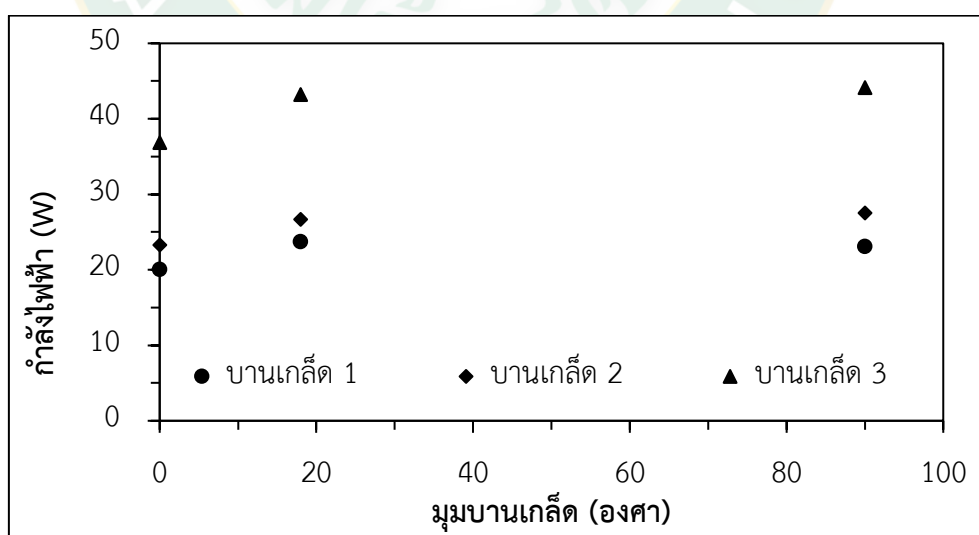
รูปที่ 61 ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบของหน้าต่างบานเกล็ด (บานเกล็ด 1 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ (ก) 0°, (ข) 18° และ (ค) 90° ทดสอบในช่วงวันที่ 7/12/2019 - 18/12/2019

จากรูปที่ 62 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1-3 ที่มีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° โดยบันทึกข้อมูลซ้ำทุก 5 นาที ในช่วงเวลา 8.00 -16.00 น. จากรูปจะพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของทั้ง 3 บานเกล็ด มีลักษณะกราฟที่คล้ายกันเมื่อทดสอบในกรณีเดียวกัน โดยลักษณะกราฟจะแตกต่างกันก็ต่อเมื่อมีการปรับมุมบานเกล็ดที่ต่างกัน และตามปริมาณการตกกระทบของค่ารังสีอาทิตย์ จากการทดสอบพบว่า ในช่วงเช้า 8.00-9.00 น. บานเกล็ดเมื่อปรับมุมเท่ากับ 90° จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงที่ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับระดับการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° แต่หลังจากนั้นในช่วงเวลา 9.00 น. เป็นต้นไป กำลังไฟฟ้าเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° และ 90° มีค่ากำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการทดสอบเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° เห็นว่า มีค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่าการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° และ 90° โดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 บานเกล็ด ในช่วงเวลา 10.00-11.00 น. เห็นว่าไม่ตรงกับช่วงเวลาที่ค่ารังสีอาทิตย์สูงที่สุด ในช่วงเวลา 11.00-12.00 น. เนื่องจากเกิดมีผลกระทบจากเงาของแผงบานเกล็ดเอง โดยการทดสอบทั้ง 3 บานเกล็ดมีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยคือ รูปที่ 62 (ก) แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเวลาต่าง ๆ ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1 โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.03, 23.63 และ 23.07 W โดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 30.49 W เนื่องจากที่มุม 18° ในช่วงที่ทดสอบมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยที่สูงที่สุด และหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1 มีพื้นที่โปร่งแสงที่มากจึงทำให้รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบานเกล็ดด้านบนสามารถทะลุผ่านลงสู่แผ่นบานเกล็ดด้านล่างได้ รูปที่ 62 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเวลาต่าง ๆ ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 2 โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ที่มีค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 23.22, 26.66 และ 27.52 W และจะมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 37.63 W เนื่องจากหน้าต่าง บานเกล็ด 2 มีพื้นที่โปร่งแสงที่ลดลงจากหน้าต่าง บานเกล็ด 1 ทำให้การทดสอบเมื่อมีการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° เกิดมีเงาเพิ่มขึ้นจากแผ่นบานเกล็ดด้านบนสู่แผ่นบานเกล็ดที่อยู่ด้านล่าง ทำให้การทดสอบเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° มีการผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุด รูปที่ 62 (ค) แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเวลาต่าง ๆ ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 3 โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ที่มีค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 36.80, 43.19 และ 44.08 W และจะมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 59.68 W เนื่องจากหน้าต่าง บานเกล็ด 3 มีพื้นที่โปร่งแสงที่ลดลงจากหน้าต่าง บานเกล็ด 1 และ 2 ทำให้การทดสอบเมื่อมีการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° เกิดมีเงาเพิ่มมากขึ้นจากแผ่นบานเกล็ดด้านบนสู่แผ่นบานเกล็ดที่อยู่ด้านล่าง ทำให้การทดสอบเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° มีการผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุด



รูปที่ 62 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเวลาต่าง ๆ ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1-3 โดยมีมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90°

จากรูปที่ 63 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันที่ผลิตได้จากบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1 2 และ 3) และที่มีการปรับมุมบานเกล็ดเป็น 0° 18° และ 90° จากรูปพบว่าบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ 4 เซลล์ต่อบานเกล็ดจะให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 36 - 44 W ขึ้นอยู่กับมุมของบานเกล็ด ขณะที่บานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ลดลงมาก็จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ลดลง เมื่อพิจารณาผลของการปรับมุมบานเกล็ดที่มีต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าพบว่ากรณีบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2 เซลล์ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมุมบานเกล็ดเท่ากับ 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 แต่ก็ทำให้เกิดปัญหา คือมีเงาเกิดขึ้นบนบานเกล็ดอันเนื่องมาจากบานเกล็ดด้านบน ทำให้บานเกล็ดที่อยู่ในลำดับถัดลงมา รับแสงอาทิตย์ได้น้อยลง การเกิดเงาในลักษณะนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ในหนึ่งบานเกล็ดมีค่าเพิ่มขึ้น (พื้นที่โปร่งแสงลดลง) แต่เมื่อปรับมุมบานเกล็ดไปที่ 90° (บานเกล็ดตั้งฉากกับพื้นโลก) จะไม่พบการเกิดเงาบนบานเกล็ดอันเนื่องมาจากบานเกล็ดด้านบน จึงทำให้บานเกล็ดที่มีมุมเท่ากับ 90° สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในหนึ่งวันได้มากกว่า



รูปที่ 63 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันที่ผลิตได้จากบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 2 3 และ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 1 2 และ 3) เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเป็น 0° 18° และ 90°

ตารางที่ 13 สมรรถนะทางไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ ทดสอบที่มุม 0° 18° และ 90°

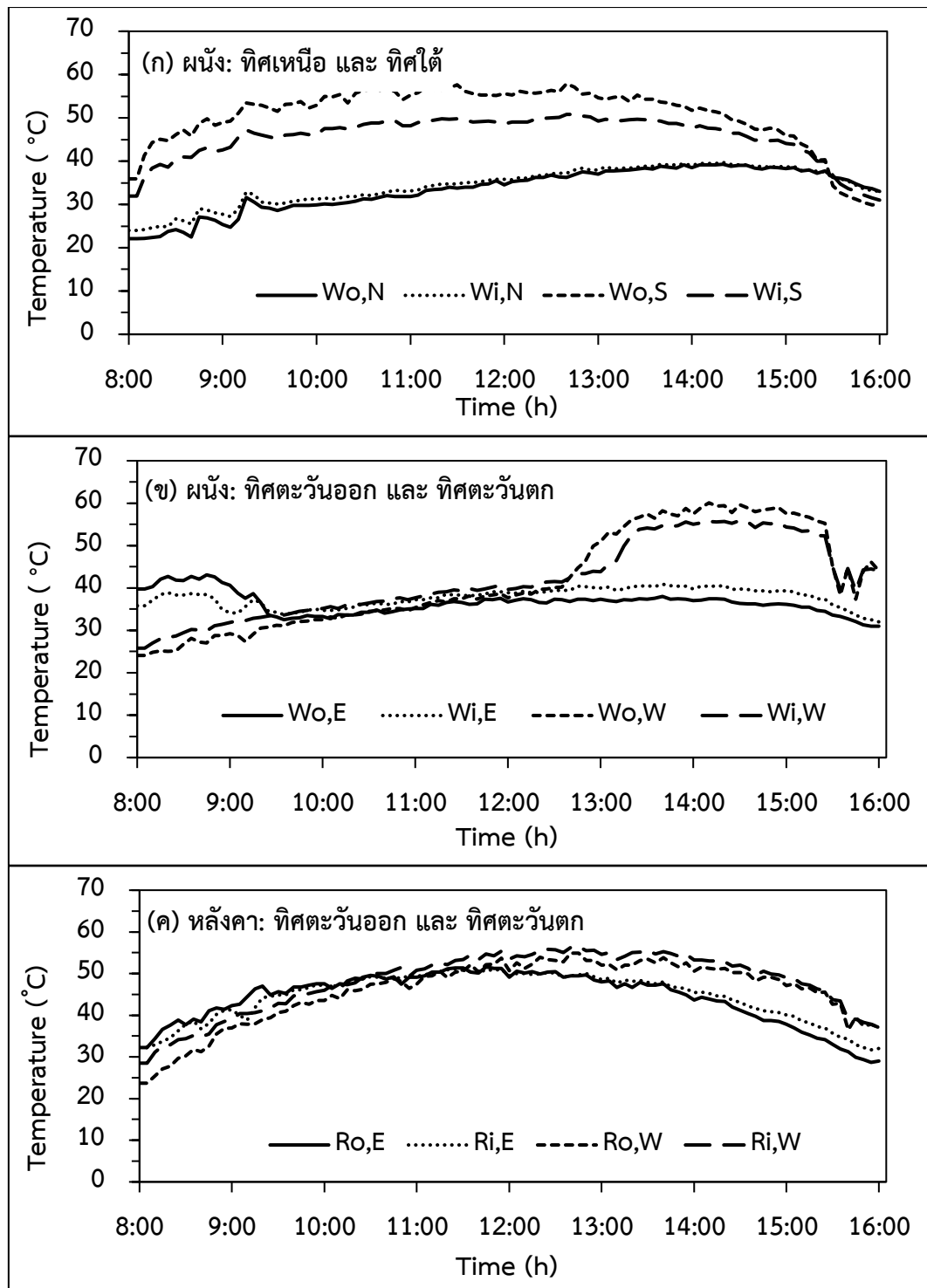
ระดับการปรับมุม	η (%)	FF (%)	Energy (Wh/day)
บานเกล็ด 1			
0°	7.26	0.62	161.95
18°	7.22	0.71	191.57
90°	8.12	0.61	186.56
บานเกล็ด 2			
0°	5.75	0.62	187.77
18°	5.68	0.62	215.54
90°	5.87	0.65	222.52
บานเกล็ด 3			
0°	6.06	0.61	297.53
18°	6.03	0.73	349.15
90°	6.49	0.76	356.38

ตารางที่ 13 แสดงสมรรถนะทางไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 รูปแบบ โดยทำการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° 18° และ 90° ซึ่งประกอบด้วย ประสิทธิภาพ (η) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดวันของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดสอบพบว่าบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 5.6-8% และมีค่าฟิลแฟกเตอร์อยู่ระหว่าง 0.6-0.7 ประสิทธิภาพและค่าฟิลแฟกเตอร์ของบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปซึ่งเป็นผลมาจากคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิตแผง เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่าบานเกล็ดที่มีจำนวนเซลล์ต่อบานเกล็ดเท่ากับ 4 เซลล์ (บานเกล็ด 3) สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อวันได้สูงสุดเท่ากับ 0.356 kWh และเมื่อพิจารณามุมของบานเกล็ดพบว่าบานเกล็ดที่ทำมุม 90° จะเป็นมุมที่ทำให้บานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด โดยจะมีค่าสูงกว่ากรณีมุมบานเกล็ด 18° เล็กน้อย

ผลด้านการระบายอากาศของห้องทดลอง

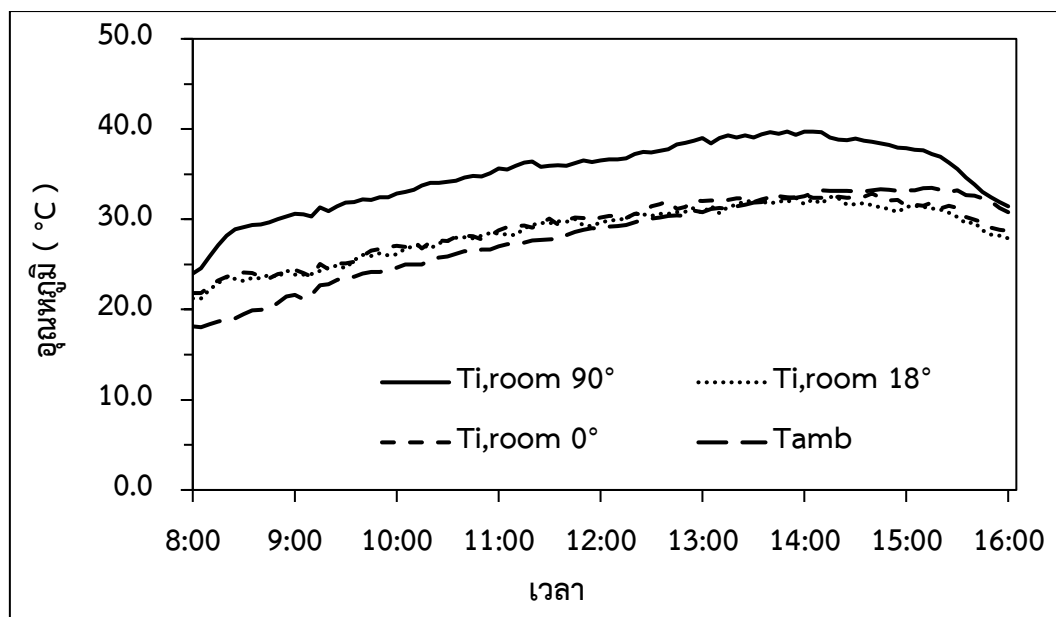
ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องมาจากความร้อนภายนอกที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารโดยผ่านกรอบของอาคาร เช่น ผ่านเข้ามาทางผนังหรือหลังคา เข้ามาทางหน้าต่างที่เป็นกระจกหรือช่องเปิด ซึ่งเกิดจากการนำ การพา และการแผ่รังสีของวัสดุ และความร้อนภายในห้องยังเกิดจากตัวของอาคารเองที่มีการสะสมความร้อน ในการออกแบบอาคารให้มีช่องเปิดเพื่อระบายอากาศจะสามารถช่วยลดความร้อนที่สะสมภายในห้อง โดยเฉพาะการระบายอากาศแบบธรรมชาติขนาดของช่องเปิดจึงเป็นส่วนสำคัญในการระบายอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนัง (WWR) เท่ากับ 23.68% และอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดจากการทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° ของแต่ละมุมมีขนาดที่แตกต่างกันโดย WWR, 0° เท่ากับ 22 %, WWR, 18° เท่ากับ 16 %, และ WWR, 90° เท่ากับ 0 % . ติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดทางทิศเหนือและทิศใต้ เพื่อวิเคราะห์ระบบการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ด และสมดุลความร้อนของห้องทดสอบระบบกรอบของอาคารเป็นส่วนสำคัญสำหรับอาคารเมื่อคำนึงถึงความร้อนที่จะเข้าสู่อาคาร โดยวัสดุกรอบอาคารมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่น้อย จะทำให้ค่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารได้น้อยตาม โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุกรอบอาคารเป็นแผ่นเมทัลชีทที่มีการติดฉนวนกันความร้อน จากรูปที่ 64 (ก) แสดงผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในของผนังทางทิศเหนือและทิศใต้ ผนังทำด้วยแผ่นเมทัลชีทติดฉนวนกันความร้อน ซึ่งผนังทางทิศเหนือด้านนอกและด้านในมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 33.3 และ 34.2 °C มีผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ -0.9 °C จะสังเกตได้ว่าผนังทางทิศเหนืออุณหภูมิผนังด้านในห้องสูงกว่าอุณหภูมิของผนังด้านนอกห้อง ส่วนทางทิศใต้อุณหภูมิเฉลี่ยผนัง ด้านนอกและด้านในห้องทดสอบมีค่าเท่ากับ 50.4 และ 45.5 °C มีผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ -4.9 °C อุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านในทางทิศเหนือมีค่าสูงสุดเท่ากับ 39.3 และ 39.7 °C ในช่วงเวลา 14.30 น. ซึ่งเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์สามารถส่องโดนผนังทางทิศเหนือได้ อุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านในทางทิศใต้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 57.9 และ 50.8 °C ในช่วงเวลาเที่ยงวันเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์มีความเข้มมากที่สุดและสามารถตกกระทบทางทิศใต้ได้มากที่สุด ทำให้อุณหภูมิของผนังทางทิศใต้มีค่าที่สูงมีผลต่างของอุณหภูมิที่มากทำให้ความร้อนเข้ามาสู่อาคารได้มากอีกด้วย รูปที่ 64 (ข) แสดงผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในของผนังทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ซึ่งผนังทางทิศตะวันออกด้านนอกและด้านในมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 36.5 และ 37.7 °C มีผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ -1.2 °C จะสังเกตได้ว่าผนังทางทิศตะวันออกอุณหภูมิผนังด้านในห้องสูงกว่าอุณหภูมิของผนังด้านนอกห้อง ส่วนทางทิศตะวันตกอุณหภูมิเฉลี่ยผนังด้านนอกและด้านในห้องทดสอบมีค่าเท่ากับ 42.1 และ 42.2 °C มีผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ -0.1 °C สังเกตได้ว่าผนังทางทิศตะวันตกอุณหภูมิผนังด้านในห้องสูงกว่าอุณหภูมิของผนังด้านนอกห้อง ซึ่งลักษณะของกราฟจะสังเกตได้

ว่า อุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านในทางทิศตะวันออกจะสูงในช่วงเช้าตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึง 09:30 น. ซึ่งเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบทางทิศตะวันออกได้มากที่สุดเท่ากับ 43.1 และ 40.9 °C จากนั้นอุณหภูมิก็ลดลงอยู่ในสภาวะปกติของผนังเมื่อโดนเงาจากตัวของอาคาร ส่วนผนังด้านนอกและด้านในทางทิศตะวันตกจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผนังทางทิศตะวันออก ซึ่งในช่วงเช้าอุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านในทางทิศตะวันตกไม่ได้รับการตกกระทบของรังสีอาทิตย์เนื่องจากเกิดเงาของตัวอาคารบัง จากนั้น 13.00 น. รังสีอาทิตย์เริ่มตกกระทบผนังทางทิศตะวันตกทำให้อุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านในทางทิศตะวันตกสูงถึง 43.1 และ 40.9 °C ในช่วงเวลา 13.00 น. เป็นต้นไป จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า ความร้อนจะผ่านผนังเข้าสู่อาคารทางทิศตะวันออกได้มากในช่วงเช้า แล้วจะผ่านเข้าสู่อาคารทิศตะวันตกได้มากในช่วงบ่าย รูปที่ 64 (ค) แสดงผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในของหลังคาทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ซึ่งหลังคาทางทิศตะวันออกด้านนอกและด้านในมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 40.0 และ 44.3 °C มีผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ -0.3 °C จะสังเกตได้ว่าหลังคาทางทิศตะวันออกอุณหภูมิผนังด้านในห้องสูงกว่าอุณหภูมิของหลังคาด้านนอกห้อง ส่วนทางทิศตะวันตกอุณหภูมิเฉลี่ยหลังคาด้านนอกและด้านในห้องทดสอบมีค่าเท่ากับ 56.6 และ 46.8 °C มีผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ -2.3 °C สังเกตได้ว่าหลังคาทางทิศตะวันตกอุณหภูมิผนังด้านในห้องสูงกว่าอุณหภูมิของหลังคาด้านนอกห้อง ซึ่งอุณหภูมิของหลังคาด้านนอกและด้านในทางทิศตะวันออกสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงวันซึ่งเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์สูงที่สุด และอุณหภูมิของหลังคาด้านนอกและด้านในทางทิศตะวันตกสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงวันเช่นกันกับทิศตะวันออก



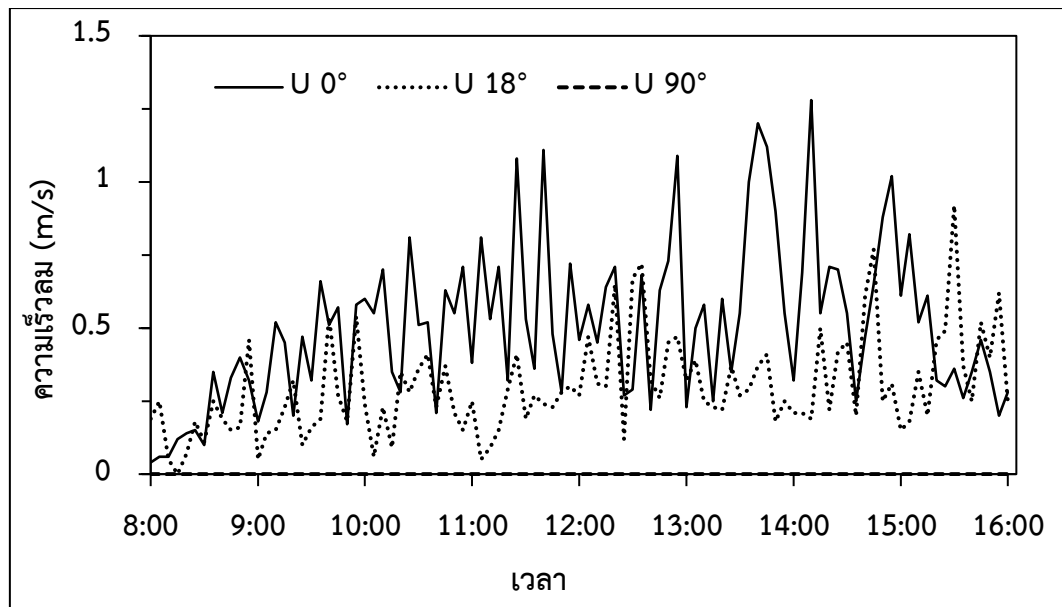
รูปที่ 64 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในของผนัง และหลังคา (ก) ผนัง: ทิศเหนือ และ ทิศใต้, (ข) ผนัง: ทิศตะวันออก และ ทิศตะวันตก และ (ค) หลังคา: ทิศตะวันออก และ ทิศตะวันตก

รูปที่ 65 แสดงค่าอุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิแวดล้อม จากการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° 18° และ 90° ตลอดทั้งวัน จากรูปพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องทดลองสำหรับการปรับมุมบานเกล็ดทั้งสามมุมมีค่าเท่ากับ 29°C 28°C และ 35°C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยในช่วงวันทดสอบที่ 28°C ซึ่งอุณหภูมิภายในห้องของทั้งสามมุมจะสูงสุดในช่วงเวลา 14:00 – 15:00 น. โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 32.9°C 32.5°C และ 39.7°C ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในห้องและนอกห้องจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดช่องเปิดบานเกล็ดลดลง ผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในห้องและอุณหภูมิแวดล้อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1, 0.5 และ 7°C สำหรับมุมบานเกล็ดที่ 0° 18° และ 90° ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของกราฟจะเห็นได้ว่าการทดสอบที่มุม 90° ที่เป็นช่องปิดของหน้าต่างทำให้ห้องทดสอบเกิดการสะสมอุณหภูมิภายในห้อง ทำให้อุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมทั้งวัน ส่วนการทดสอบที่ระดับการปรับมุมบานเกล็ด 0° และ 18° ที่เป็นช่องเปิดของหน้าต่างทำให้ห้องทดสอบมีการระบายความร้อนเข้าและออกได้ มีลักษณะของกราฟแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ในช่วงเวลา 8:00 – 14:00 น. จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม เนื่องจากสภาพอากาศแวดล้อมในช่วงเช้ามีความชื้นสูงทำให้อุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้อง และหลังจากช่วงเวลา 14:00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิแวดล้อมเริ่มสูงกว่าอุณหภูมิภายในห้อง เนื่องจากห้องทดสอบมีการระบายอากาศได้ดี มีความเร็วลมที่สามารถพัดผ่านเข้าและออกห้องทดลอง ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเริ่มคงที่และเริ่มลดลงเรื่อยๆ หลังจากช่วงเวลา 14.30 น. เป็นต้นไป ส่วนอุณหภูมิแวดล้อมเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมเกิดการสะสมความร้อน และอุณหภูมิแวดล้อมยังได้รับอิทธิพลความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง ทำให้อุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิแวดล้อมจะเริ่มลดลงในช่วงเวลา 15.30 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิภายในห้องที่มุม 0° และ 18° มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 32.9 และ 32.5°C เห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 33.5°C ในช่วงเวลา 15.30 น. จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขนาดของช่องเปิดทำให้อุณหภูมิภายในห้องใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมยิ่งขึ้น



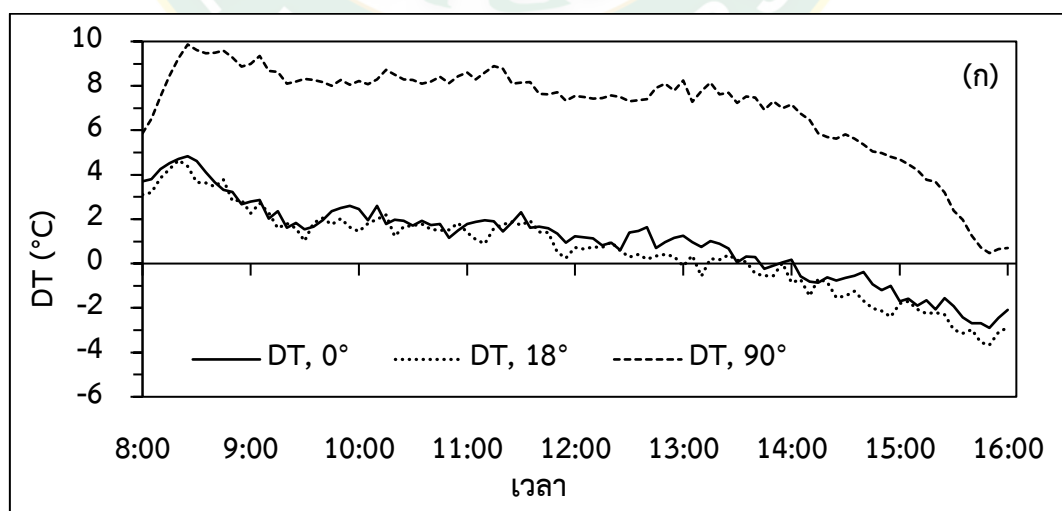
รูปที่ 65 อุณหภูมิในห้องทดลองและอุณหภูมิแวดล้อมที่มุม 0°, 18° และ 90°

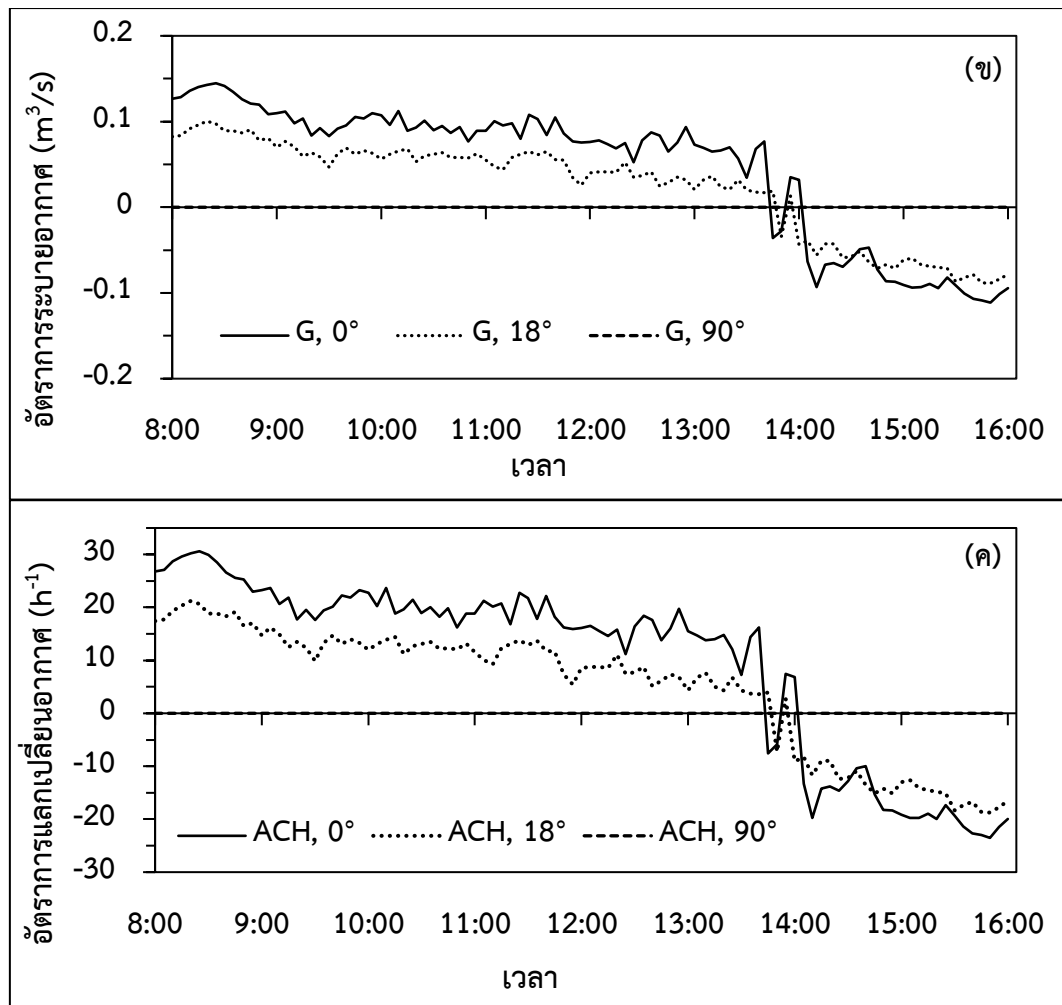
จากรูปที่ 66 แสดงค่าความเร็วลมจากภายนอกเข้าสู่ห้องทดสอบ เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°, 18° และ 90° จากรูปพบ ค่าความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีพื้นที่โปร่งแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความเร็วลมมีค่าเฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 0.50, 0.29 และ 0 m/s จากกราฟสังเกตเห็นได้ว่าการทดสอบเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° จะไม่มีลมเข้าสู่ภายในห้องทดสอบ เนื่องจากหน้าต่างบานเกล็ดเมื่อปรับมุม 90° เป็นมุมที่ปิดหมด ส่วนการทดสอบเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° พบว่าค่าความเร็วลมมีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่การปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° จะมีลมพัดผ่านเข้ามาในห้องทดสอบมากที่สุด เนื่องจากการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° เป็นมุมบานเกล็ดที่เปิดหมด ส่วนการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° เป็นมุมบานเกล็ดที่เปิดบางส่วน โดยลักษณะของเส้นกราฟพบว่าความเร็วลมที่ผ่านเข้าห้องทดสอบจะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 14.00 น นอกนั้นเห็นว่าค่าความเร็วลมมีค่าที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 66 ความเร็วลมจากภายนอกเข้าสู่ห้องทดสอบ

อุณหภูมิภายในและนอกห้องห้องมีผลมาจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม และขนาดช่องเปิดของอาคาร โดยมีผลต่างอุณหภูมิที่กำหนด ($T_{i,room} - T_{amb}$) เมื่อผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นบวก แสดงว่าอุณหภูมิในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม แต่กลับกัน เมื่อผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นลบ แสดงว่าอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม

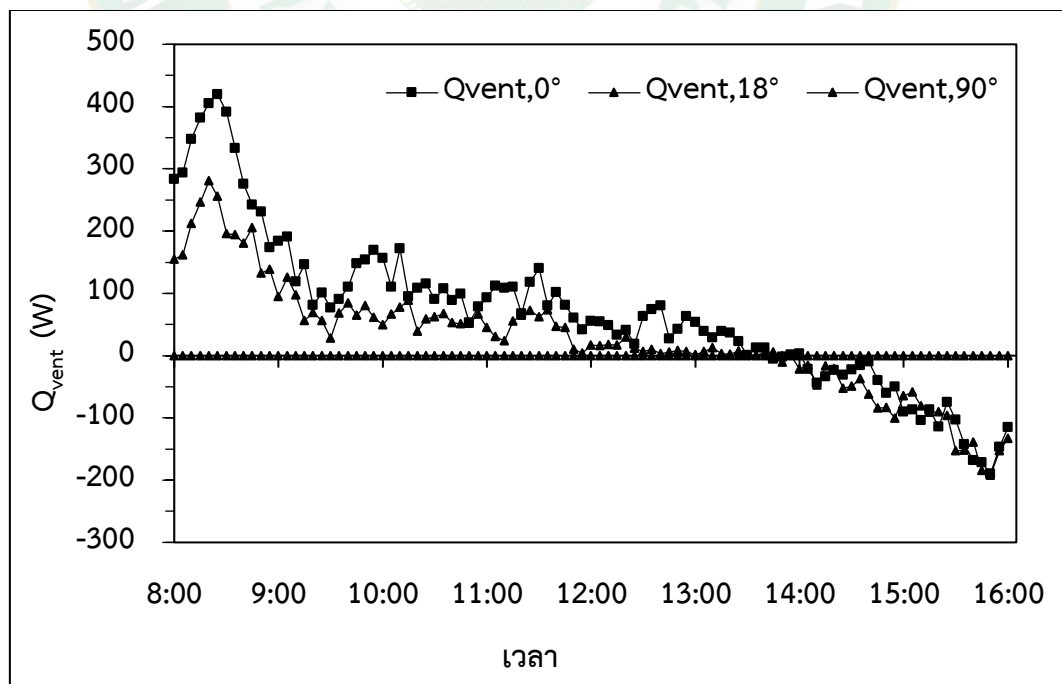




รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ผลต่างอุณหภูมิด้านในในห้อง และด้านนอกห้อง (ข) อัตราการระบายอากาศ และ (ค) อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ

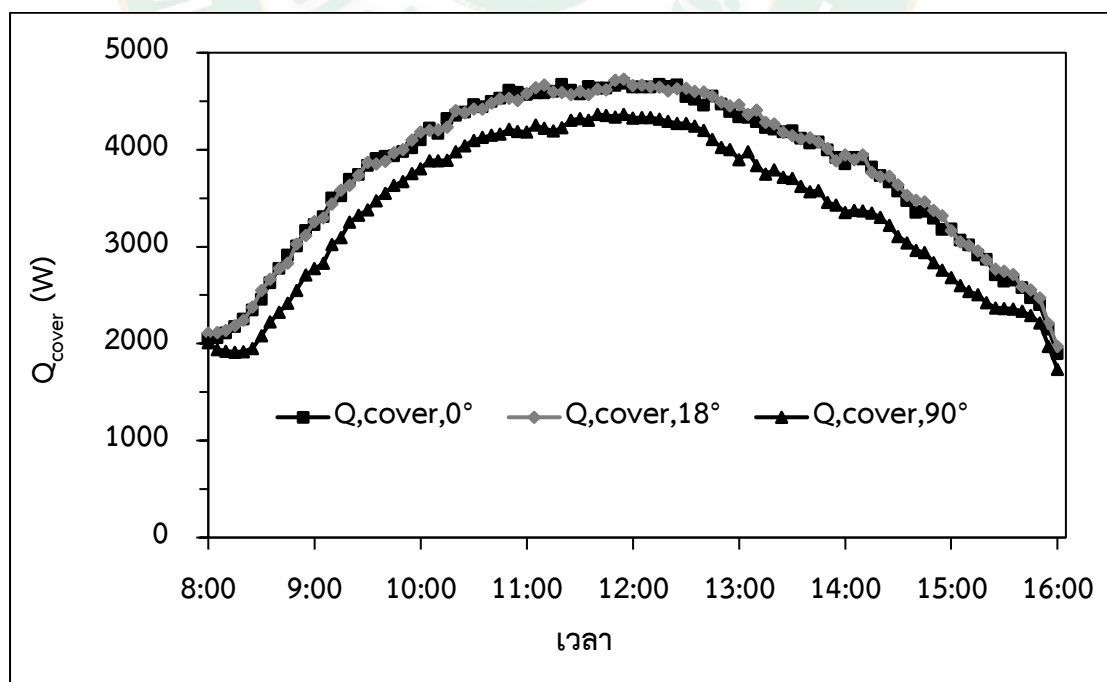
จากรูปที่ 67 แสดงในส่วนของการระบายอากาศของห้องทดลอง เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° , 18° , และ 90° โดยเพิ่มจาก รูปที่ 67 (ก) แสดงผลต่างอุณหภูมิด้านในในห้อง และด้านนอกห้องของทั้งสามมุม จากกราฟสังเกตได้ว่า ผลต่างอุณหภูมิของทั้งสามมุมมีความแตกต่างกัน โดยมีผลมาจากขนาดของช่องเปิด และความเร็วลมที่ไหลผ่านห้องทดสอบ ซึ่งกราฟมีลักษณะคือ ที่มุม 0° และ 18° มีผลต่างอุณหภูมิทั้งวันอยู่ 2 ส่วนคือ ในช่วงเวลา 8:00 – 14:00 น. ผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นบวก เนื่องจากอุณหภูมิในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม และหลังจากช่วงเวลา 14:00 น. ผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นบวก เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิในห้อง ส่วนที่มุม 90° จะเห็นได้ว่าผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นบวกบวกทั้งวัน เนื่องจากอุณหภูมิในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม โดยทั้งสามมุมมีผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 1.02, 0.57 และ 7.05 $^\circ\text{C}$ ตามลำดับ รูปที่ 67 (ข) แสดงผลอัตราการระบายอากาศผ่าน

ของเปิดที่มุม 0° , 18° , และ 90° โดยการใช้ผลต่างอุณหภูมิที่ทำให้ผลต่างอุณหภูมิมีค่าเป็นบวก (Absolute) ข้อมูล เพื่อให้สามารถคำนวณการระบายอากาศโดยอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ คำนวณจากสมการที่ (2) จากกราฟสังเกตได้ว่า การระบายเฉลี่ยทั้งวันมีค่าเท่ากับ 0.271, 0.115 และ 0 m^3/s สำหรับมุมบานเกล็ด 0° , 18° , และ 90° ตามลำดับ โดยกราฟมีลักษณะคือ.ที่มุม 0° และ 18° มีการไหลของอากาศทั้งวันอยู่ 2 ส่วนคือ ในช่วงเวลา 8:00 – 14:00 น.อากาศภายในห้องไหลออกสู่ภายนอก และหลังจากช่วงเวลา 14:00 น.เป็นต้นไป ได้มีอากาศจากด้านนอกไหลเข้าสู่อาคาร ซึ่งมีผลมาจากผลต่างอุณหภูมิ ส่วนที่มุม 90° จะเห็นได้ว่าตลอดทั้งวันไม่มีการระบายอากาศ เนื่องจาก ที่มุม 90° เป็นมุมปิด พื้นที่ช่องเปิดเท่ากับศูนย์ ($S_{90^\circ} = 0$) ความเร็วลมที่ผ่านเข้าห้องทดสอบจึงมีค่าเป็นศูนย์ ($U_{90^\circ} = 0$) จึงทำให้การทดสอบที่มุม 90° ไม่มีการระบายอากาศ รูปที่ 67 (ค). แสดงผลอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดลอง ที่มีผลมาจากอัตราการระบายอากาศ และปริมาตรของห้อง จากกราฟสังเกตได้ว่า อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของทั้งสามมุมมีค่าที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 9.72, 4.80 และ 0 h^{-1} ตามลำดับ โดยมีกราฟมีลักษณะที่คล้ายกับการระบายอากาศ และผลต่างอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานการแลกเปลี่ยนอากาศสำหรับอาคารสำนักงานของ ASHRAE Standard ที่มีค่าอยู่ในช่วง 8 – 15 h^{-1} จะเห็นได้ว่าการทดสอบเมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐาน ASHRAE Standard (ASHRAE, 2013)



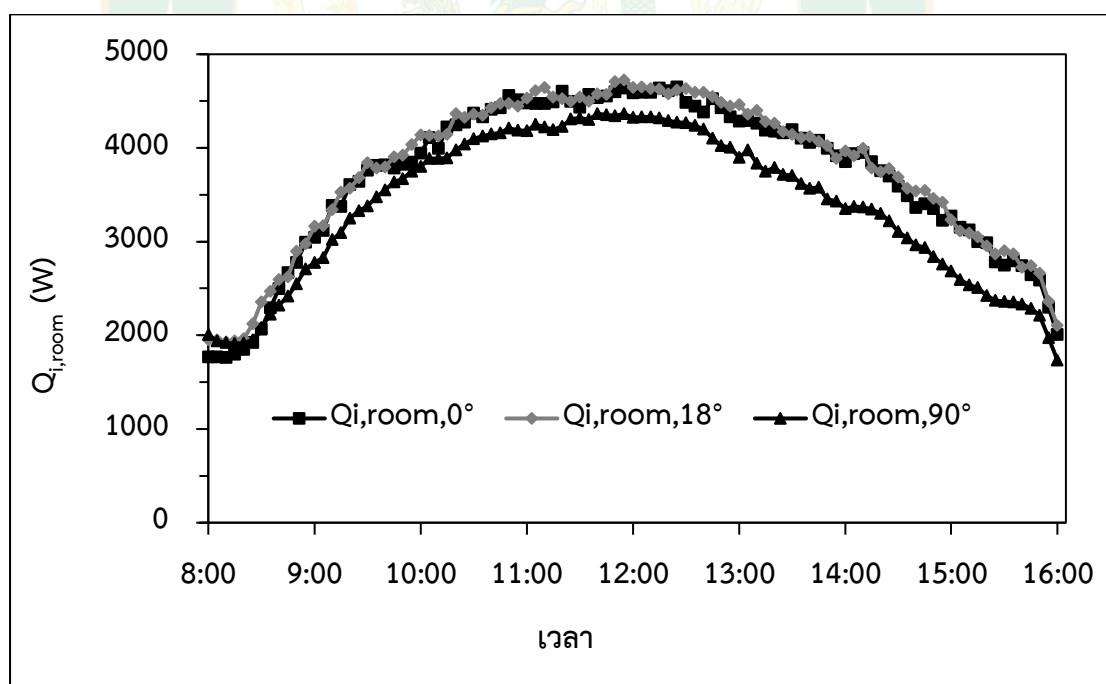
รูปที่ 68 การระบายความร้อนของห้องทดสอบ

จากรูปที่ 68 แสดงการระบายความร้อนของห้องทดสอบ เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° , 18° , และ 90° โดยการระบายความร้อนของห้องทดสอบนี้เป็นผลมาจาก อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ และการเคลื่อนที่ของอากาศภายในห้องอันเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิภายในห้องและอุณหภูมิแวดล้อม คำนวณจากสมการที่ (12) ส่งผลให้การระบายความร้อนภายในห้องที่มีพื้นที่ช่องเปิดที่ต่างกันการระบายความร้อนจึงมีค่าที่แตกต่างกัน เมื่อผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าเป็นบวกความร้อนภายในห้องก็จะระบายออกสู่ภายนอก แต่เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเป็นลบความร้อนจากภายนอกก็จะไหลเข้ามาสู่อาคาร จากกราฟสังเกตได้ว่า การระบายความร้อนภายในห้องมีค่าเฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 68, 25 และ 0 W ตามลำดับ. โดยลักษณะของกราฟ ที่มุม 90° เป็นมุมปิดทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศทำให้การระบายความร้อนเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ภายในห้องเกิดการสะสมความร้อน อุณหภูมิภายในห้องจึงสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมมาก (ประมาณ 7°C) สำหรับการระบายความร้อนที่มุม 0° และ 18° ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงเวลาประมาณ 14:00 น. เป็นช่วงที่ความร้อนภายในห้องระบายออกสู่ภายนอกเนื่องจากผลต่างอุณหภูมิมิมีค่าเป็นบวก โดยเฉลี่ยในช่วงเวลา 08.30 น มีการระบายอากาศที่สูงเนื่องจากมีผลต่างอุณหภูมิด้านนอกและด้านในห้องที่ต่างกันมาก หลังจาก 14:00 น.จนถึงช่วงเวลานสิ้นสุดการทดสอบ ความร้อนด้านนอกได้ระบายเข้าสู่อาคาร เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าเป็นลบ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยการระบายความร้อนตลอดทั้งวันจะมีค่าเท่ากับ 68 W และ 25 W เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° และ 18° ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทดสอบที่มุม 0° สามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุด



รูปที่ 69 ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร

จากรูปที่ 69 แสดงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารเมื่อทำมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° โดยการคำนวณจากความร้อนที่ผ่านเข้าทางผนัง และหลังคา ที่มีผลมาจากวัสดุกรอบอาคาร ความร้อนจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผนังและหลังคาในทุกทิศทาง โดยใช้ผลต่างอุณหภูมิเทียบเท่า TD_{eq} จาก T_{sol} ที่เป็นอุณหภูมิสมมติของอากาศที่ติดกับผิวของวัสดุในบริเวณที่ไม่มีอิทธิพลจากแสงแดด และการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจากท้องฟ้า สิ่งแวดล้อม และการพาความร้อนของอากาศ จากรูปพบว่า ความร้อนที่เข้าสู่อาคารโดยผ่านกรอบอาคารเมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° มีความร้อนที่เข้าสู่อาคารมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้อง $T_{i,room}$ ของทั้งสามมุมที่ทดสอบมีค่าที่แตกต่างกัน ทำให้ผลต่างอุณหภูมิเทียบเท่า TD_{eq} มีค่าที่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน โดยความร้อนที่ผ่านกรอบอาคารเมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,764, 3,784 และ 3,387 W จากกราฟพบว่า ความร้อนที่ผ่านเข้าสู่กรอบอาคารของทั้งสามมุมที่ทดสอบมีลักษณะที่คล้ายกัน ที่ค่าสูงสุดในช่วงเวลา 11.00 12.00 น โดยมีลักษณะที่คล้ายกับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ



รูปที่ 70 คือความร้อนภายในห้อง

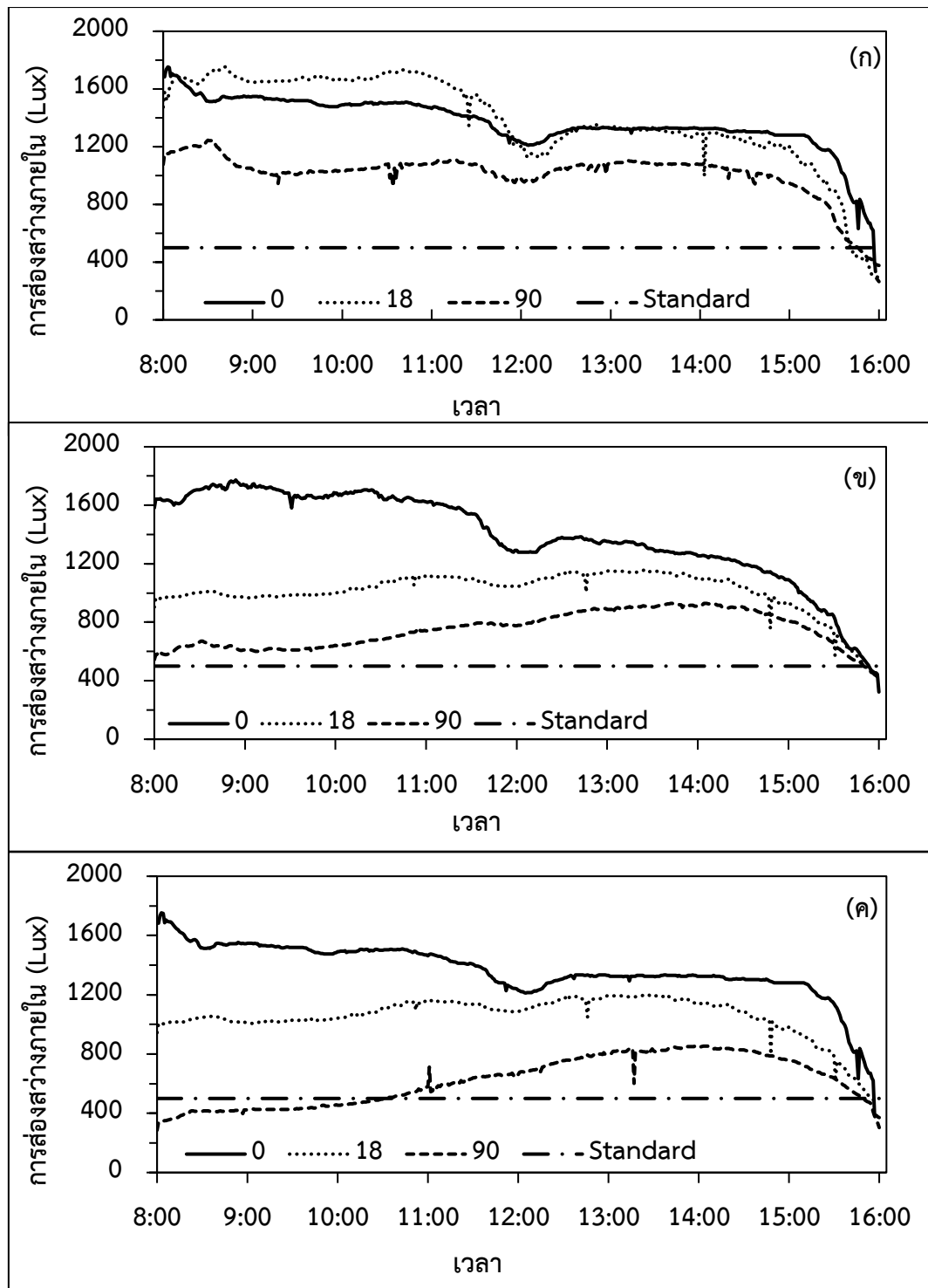
จากรูปที่ 70 แสดงค่าความร้อนของห้องทดลองเมื่อทดสอบกานปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ซึ่งความร้อนภายในอาคารมีผลมาจากการระบายความร้อน และความร้อนที่ผ่านกรอบของอาคาร จากรูปพบว่า ความร้อนภายในห้องทดสอบต่ำที่สุดเมื่อทดสอบที่มุม 90° เนื่องจากเป็นมุมบานเกล็ดที่ปิดหมด โดยความร้อนภายในห้องทดสอบของทั้งสามมุมมีค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันเท่ากับ 3,696, 3,758 และ 3,387 W สำหรับมุมบานเกล็ด 0° , 18° และ 90° โดยทั้งสามมุมมีความร้อนสูงสุดในช่วงเวลา 12.00 น ซึ่งความร้อนภายในห้องทดสอบส่วนมากได้รับอิทธิพลของความร้อนโดยตรงจากความร้อนที่ผ่านกรอบอาคาร ที่มีความร้อนมากกว่าความร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อน ซึ่งลักษณะของกราฟความร้อนภายในห้องของทั้งสามมุมมีลักษณะคล้ายกับค่ารังสีอาทิตย์ เมื่อความร้อนจากรังสีอาทิตย์สูงทำให้ความร้อนภายในห้องสูงขึ้นตาม ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ความร้อนในอาคารสูงมาจากวัสดุที่นำมาสร้างกรอบอาคาร ที่มีค่าความต้านทานความร้อนที่ต่ำ ทำให้ความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคารผ่านกรอบของอาคารได้มาก



ผลด้านความส่องสว่างภายในห้องทดลอง

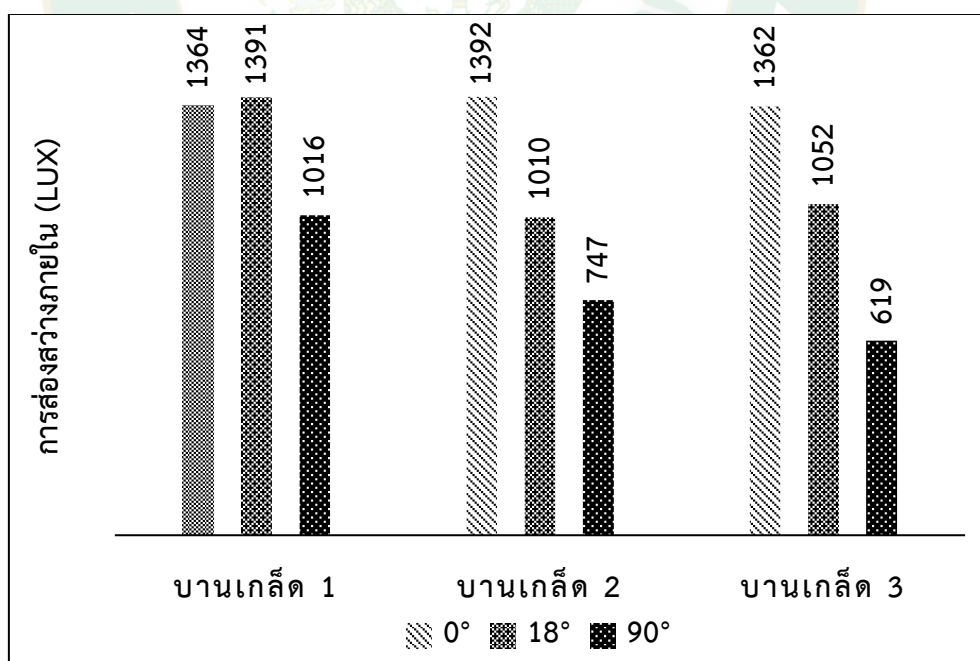
ผลการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติเข้าสู่อาคารในการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 บานเกล็ด เมื่อทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ที่มีพื้นที่โปร่งแสงที่แตกต่างกันคือ 0.616, 0.348 และ 0.151 m^2 ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบการส่องสว่างภายในอาคารเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux เพื่อทดสอบหาขนาดแผงและมุมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

จากรูปที่ 71 แสดงค่าความส่องสว่างภายในอาคารจากการทดสอบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 บานเกล็ด เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° จากรูปพบว่าการส่องสว่างภายในอาคารมีลักษณะของกราฟที่คล้ายกัน เนื่องจากวันที่ทดสอบใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความส่องสว่างของทั้ง 3 บานเกล็ด ทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากทั้ง 3 บานเกล็ดมีพื้นที่โปร่งแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าความส่องสว่างภายในอาคารจะลดลงเมื่อมีพื้นที่โปร่งแสง และพื้นที่ช่องเปิดที่น้อยลง รูปที่ 71 (ก) แสดงค่าการส่องสว่างภายในอาคารของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1 ที่มีพื้นที่โปร่งแสงเท่ากับ 0.616 m^2 เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° เทียบกับมาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux พบว่า ค่าความส่องสว่างของทั้ง 3 มุมที่ทดสอบมีค่าที่สูงกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงาน โดยมีค่าเฉลี่ยการส่องสว่างตลอดทั้งวันเท่ากับ 1,364, 1,391 และ 1,013 Lux ตามลำดับ จากกราฟเห็นว่า บานเกล็ด 1 จะมีค่าความส่องสว่างที่สูงใกล้เคียงกันเนื่องจากมีพื้นที่โปร่งแสงที่มาก โดยมีค่าความส่องสว่างสูงสุดถึง 1,753 Lux ที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ในช่วงเวลา 8.03 น ซึ่งเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์อยู่ในระดับตรงกับหน้าต่างทำให้แสงสว่างสามารถเข้ามาสู่อาคารได้สูง จากกราฟยังสังเกตเห็นว่า ในช่วงเวลา 12.00 น ค่าความส่องสว่างภายในอาคารของทั้ง 3 มุมที่ทดสอบ มีค่าความส่องสว่างที่ลดลงเนื่องจาก เป็นช่วงที่ค่ารังสีอาทิตย์อยู่สูงที่สุดและตรงกับหลังคาของอาคาร ทำให้ค่าความส่องสว่างในช่วงนี้ลดลงเล็กน้อย แต่หลังจากนั้นค่าความส่องสว่างได้เริ่มสูงขึ้น เนื่องจากดวงอาทิตย์ได้เอียงไปทางทิศเหนือทำให้ในช่วง 13.00 -16.00 น การทดสอบการส่องสว่างได้เข้ามาทางหน้าต่างบานเกล็ดทางทิศเหนือ รูปที่ 71 (ข) แสดงค่าการส่องสว่างภายในอาคารของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1 เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° เทียบกับมาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux พบว่า ค่าความส่องสว่างของทั้ง 3 มุมที่ทดสอบมีค่าที่สูงกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงาน มีลักษณะคล้ายกับการส่องสว่างของ บานเกล็ด 1 โดยมีค่าเฉลี่ยการส่องสว่างตลอดทั้งวันเท่ากับ 1,392, 1,010 และ 747 Lux ตามลำดับ ซึ่งค่าการส่องสว่างจะลดลงจากการส่องสว่างของหน้าต่างบานเกล็ด 1



รูปที่ 71 การส่องสว่างภายในอาคารของแผ่นหน้าต่างบานเกล็ด (บานเกล็ด 1 2 และ 3) ตามลำดับ และมุมบานเกล็ดเท่ากับ (ก) บานเกล็ด 1, (ข) บานเกล็ด 2 และ (ค) บานเกล็ด 3

จากกราฟเห็นว่า บานเกล็ด 2 เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° มีค่าส่องสว่างสูงสุดในช่วงเช้าจากนั้นก็ค่อยลดลงเรื่อย ๆ จนถึงช่วงปิดการทดสอบ ส่วนการทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° และ 90° เห็นว่า การส่องสว่างในช่วงเช้ามีค่าที่ต่ำจากนั้นก็สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าการส่องสว่างจะสูงสุดในช่วงบ่าย เนื่องจากแสงสว่างจะส่องเข้ามาทางหน้าต่างบานเกล็ดทางทิศเหนือที่เป็นหน้าต่างโปร่งแสง โดยที่หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งทางทิศใต้มีพื้นที่โปร่งแสงเท่ากับ 0.616 m^2 แสงสว่างที่เข้าสู่อาคารจึงลดลง จากรูปที่ 71 (ค) แสดงค่าการส่องสว่างภายในอาคารของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 3 ที่มีพื้นที่โปร่งแสงเท่ากับ 0.151 m^2 เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° เทียบกับมาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux พบว่า ค่าความส่องสว่างของทั้ง 3 มุมที่ทดสอบมีค่าที่สูงกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงาน มีลักษณะคล้ายกับการส่องสว่างของ บานเกล็ด 1 และ บานเกล็ด 2 โดยมีค่าเฉลี่ยการส่องสว่างตลอดทั้งวันเท่ากับ 1,362, 1,052 และ 619 Lux ตามลำดับ จากกราฟยังพบว่า ค่าความส่องสว่างของหน้าต่างบานเกล็ด 3 ในช่วงเวลา 8.00 – 10.31 น มีค่าความส่องสว่างที่ต่ำกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงาน นอกจากนั้นเห็นว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงาน ที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux โดยมีรายละเอียดค่าความส่องสว่างแสดงในรูปที่ 72



รูปที่ 72 ค่าเฉลี่ยความส่องสว่างภายในห้องทดลองที่ติดตั้งหน้าต่าง บานเกล็ด 1-3 เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90°

ผลด้านพลังงานสุทธิของห้องทดลอง

ผลด้านพลังงานของห้องทดลองที่ทำการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการวิเคราะห์พลังงานสุทธิ ของพลังงานที่ผลิตได้ และพลังงานที่ต้องการใช้เพิ่มเติม เมื่อพลังงานที่ผลิตได้มากกว่าพลังงานที่ใช้ค่าพลังงานสุทธิจะเป็นค่าบวก แต่เมื่อพลังงานที่ผลิตได้น้อยกว่าพลังงานที่ต้องการใช้พลังงานสุทธิจะเป็นค่าลบ แสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 พลังงานสุทธิที่ต้องการเพิ่มสำหรับห้องทดลอง

มุม	พลังงานไฟฟ้า (kWh/day)	พลังงานสำหรับแสง สว่าง (kWh/day)	พลังงานสำหรับการ ปรับอากาศ (kWh/day)	พลังงานสุทธิ (kWh/day)
บานเกล็ด 1				
0°	0.1619	0	4.8306	4.6686
18°	0.1915	0	4.9124	4.7209
90°	0.1865	0	4.4269	4.2403
บานเกล็ด 2				
0°	0.1877	0	4.8306	4.6428
18°	0.2155	0	4.9124	4.6969
90°	0.2225	0	4.4269	4.2044
บานเกล็ด 3				
0°	0.2975	0	4.8306	4.5330
18°	0.3491	0	4.9124	4.5633
90°	0.35638	0.0611	4.4269	4.1317

เมื่อพิจารณาพลังงานสุทธิของพลังทั้งหมดสำหรับห้องทดลองที่ประกอบด้วย พลังงานที่ผลิตได้ รวมถึงพลังงานที่ต้องใช้เพิ่มเติม สำหรับการทดสอบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 1-3 ทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0°, 18° และ 90° โดยพิจารณาพลังงานสุทธิจากการทดลองในสามส่วนคือ พลังงานที่ผลิตได้จากหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานสำหรับแสงสว่าง รวมถึงพลังงานที่ต้องใช้เพิ่มเติมในการปรับอากาศ พบว่า อาคารที่ทำการทดสอบมีความต้องการใช้แสงสว่างเพิ่มเติมเมื่อทดสอบ บานเกล็ด 3 ที่มุม 90° ในช่วงเวลา 8:00 – 10:31 น. โดยมีค่าการส่อง

สว่างที่ต่ำกว่ามาตรฐาน 500 Lux โดยมีพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการเท่ากับ 0.0611 kWh/day นอกนั้น เห็นว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ไม่จำเป็นต้องใช้แสงประดิษฐ์จากหลอดไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาถึงความร้อนของห้องทดสอบ พบว่า ห้องทดลองมีความต้องการพลังเพิ่มเติมสำหรับการปรับอากาศ โดยคำนวณการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อ Carrier 42SAE/38SAE Series (บริษัท แคนเรียร์, 2016) ทดสอบบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 0°, 18° และ 90° โดยมีค่าพลังงานที่ต้องการเท่ากับ 4.8306, 4.9124 และ 4.4269 kWh/day ดังนั้น พลังงานที่ผลิตได้จากหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานที่ใช้สำหรับการส่องสว่าง และพลังงานที่ใช้สำหรับการปรับอากาศ เห็นว่า พลังงานที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ต้องการใช้ โดยเห็นว่าพลังงานสุทธิทั้งหมดที่ต้องการเพิ่มเติมสำหรับห้องทดสอบ ประมาณ 4.1317 - 4.7209 kWh/day สำหรับ บานเกล็ด 1-3 เมื่อทดสอบบานเกล็ดทำมุม 0°, 18° และ 90° โดยพลังงานที่ต้องการใช้น้อยที่สุดคือ บานเกล็ด 3 เมื่อทดสอบบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 90° ต้องการพลังเพิ่มเติมเท่ากับ 4.1317 kWh/day.

รูปแบบการใช้งานบานเกล็ดที่เหมาะสม

จากผลด้านการผลิตไฟฟ้า การระบายอากาศ และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติสำหรับห้องทดลอง ของหน้าต่างบานเกล็ด 1-3 เมื่อทดสอบบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 0°, 18° และ 90° พบว่าการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลา 8.00 – 11.00 น หน้าต่างบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 90° สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด แต่หลังจากช่วงเวลา 11.00 น เป็นต้นไป หน้าต่างบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 18° และ 90° มีผลการผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีค่าใกล้เคียงกันโดยสูงกว่าการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° เล็กน้อย ส่วนการระบายอากาศพบว่า อุณหภูมิภายในห้องเมื่อทดสอบบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 0°, 18° และ 90° ตั้งแต่ 8.00 น อุณหภูมิภายในห้องทดสอบจะเลื่อมสูงขึ้นเรื่อย ๆ และ อุณหภูมิจะสูงสุดในช่วงเวลา 14.00 น แต่หลังจากช่วงเวลา 14.00 น อุณหภูมิภายในห้องทดสอบจะเลื่อมลดลง เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° เห็นว่ามีความร้อนที่สูงกว่าการทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° และ 18° ตลอดทั้งวัน โดยการระบายอากาศของห้องทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องเปิด เมื่อพิจารณาการระบายอากาศกับความร้อนที่เข้าสู่ภายในห้องทดสอบจะเห็นว่า การระบายอากาศยิ่งมากมาก ความร้อนที่เข้ามาในห้องทดสอบยิ่งสูงขึ้น และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติพบว่า ห้องทดสอบของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าการส่องสว่างที่สูงกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงาน โดยปริมาณการส่องสว่างจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีพื้นที่โรงแสง และพื้นที่ช่องเปิดที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ยังพบว่า การผลิตไฟฟ้า การระบายอากาศ และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติสำหรับห้องทดลอง ของหน้าต่างบานเกล็ด 1-3 เมื่อทดสอบบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 0° , 18° และ 90° การพัฒนาการปรับมุมหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง สำหรับ การผลิตไฟฟ้า การระบายอากาศ และการส่องสว่าง โดยการปรับมุมบานเกล็ดตามช่วงเวลา เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานดังนี้ ในช่วงเวลา 8.00 – 10.00 น เห็นว่ามีความเหมาะสมสำหรับการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° เนื่องจากเป็นช่วงที่การปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูง ความร้อนภายในอาคารยังต่ำ และการส่องสว่างก็ยังคงมีความเหมาะสม หลังจากช่วงเวลา 10.00 – 13.00 น เห็นว่ามีความเหมาะสมสำหรับการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° เนื่องจากเป็นช่วงที่ความร้อนภายในห้องสูงขึ้น ทำให้ห้องทดลองต้องการมีการระบายอากาศเพื่อให้สามารถความร้อน โดยมีการส่องสว่างที่เพิ่มขึ้น และเป็นช่วงที่การผลิตไฟฟ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบที่บานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 90° และหลังจากช่วงเวลา 14.00 น เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในห้องสูงที่สุด และต้องการการระบายอากาศมากที่สุด ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° เพื่อให้ห้องทดลองสามารถความร้อนได้มากที่สุด



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารทดลอง ซึ่งได้ทำการทดสอบหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการประกอบ 1 บานเกล็ดจะทำการวางเซลล์จำนวน 2 3 และ 4 เซลล์ ได้สร้างทั้งหมดจำนวน 3 แผง ที่มีจำนวนเซลล์ของแต่ละแผงเท่ากับ 40 60 และ 80 เซลล์ และได้ทำการทดสอบโดยการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0° , 18° และ 90° ซึ่งได้วิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบการระบายอากาศที่เหมาะสมจากการปรับมุมบานเกล็ด และการส่องสว่างของแสงจากธรรมชาติเข้าสู่อาคาร โดยได้ทำการทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 เวลาบันทึกข้อมูลเริ่มแต่เวลา 8.00-16.00 น สามารถสรุปผลตามแต่ละส่วนได้ดังนี้

จากการทดสอบผลด้านการผลิตไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสร้างขึ้นมาทั้ง 3 แผง และได้ทำการทดสอบโดยการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0° , 18° และ 90° โดยทั้ง 3 แผงมีพื้นที่เซลล์ที่แตกต่างกัน พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก บานเกล็ด 1-3 มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6-7 % เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพจากการปรับมุมบานเกล็ดโดยประสิทธิภาพจะขึ้นกับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โดยทั้ง 3 แผง พบว่า การทดสอบที่มุมบานเกร็ด 90° มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากได้รับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบได้น้อยแต่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ดี โดยค่ารังสีอาทิตย์ของทั้ง 3 มุมบานเกล็ด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 592, 710 และ 589 W/m^2 สำหรับการเปรียบเทียบพลังงานผลิตไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ทำการทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม ที่มีท้องฟ้าปลอดโปร่ง พบว่า จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดที่มุม 18° เมื่อมีพื้นที่โปร่งแสงที่มาก (บานเกล็ด1) เท่ากับ 0.1916 (kWh/day).และ จะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดที่มุม 90° เมื่อมีพื้นที่โปร่งแสงที่น้อย (บานเกล็ด 3) เท่ากับ 0.3563 (kWh/day) โดยที่พลังงานไฟฟ้าเมื่อทดสอบที่มุม 18° และ 90° มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับผลด้านการระบายอากาศของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าระดับในการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0° (เปิดบานเกล็ดทั้งหมด) 18° (เปิดบานเกล็ดบางส่วน) และ 90° (ปิดบานเกล็ดทั้งหมด) พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิภายในห้องตลอดทั้งวันทดสอบที่มุม 0° 18° และ 90° เท่ากับ 29 28 ละ $35^{\circ}C$ และมีอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยในช่วงวันทดสอบเท่ากับ $28^{\circ}C$ โดยการระบายอากาศของห้องทดสอบ (G) พบว่า มีค่าเฉลี่ยการระบายอากาศของทั้งสามมุมเท่ากับ 0.271 0.115 และ $0 m^3/s$ และยังมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้องทดสอบ (Air Change Rate) เฉลี่ยตลอดทั้งวันเท่ากับ 9.72 4.80 และ $0 h^{-1}$ โดยมีผลการระบายความร้อนของห้องทดสอบ (Q_{vent}) ทั้งสามมุมมีค่าเฉลี่ย

เท่ากับเท่ากับ 108, 70 และ 0 W โดยการระบายความร้อนจากการทดสอบที่มุมบานเกล็ด 0° และ 18° สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงที่ 1 เวลา 8:00 – 14:00 น เป็นช่วงที่อากาศภายในห้องสามารถระบายออกสู่แวดล้อม เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ในช่วงที่ 2 หลังจากเวลา 14:00 น เป็นต้นไป เป็นการระบายความร้อนจากแวดล้อมเข้าสู่ห้องทดสอบ เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งอากาศจะไหลจากอุณหภูมิสูงไปหาอุณหภูมิต่ำ จากผลการระบายอากาศแบบธรรมชาติของห้องทดสอบเห็นว่า การทดสอบที่มุม 0° สามารถระบายอากาศได้ดีที่สุด ส่วนความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร (Q_{cover}) เมื่อบานเกล็ดทำมุม 0° , 18° และ 90° พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 3,764, 3,784 และ 3,387 W และความร้อนภายในห้องทดสอบ ($Q_{i,room}$) ของทั้งสามมุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,696, 3,758 และ 3,387 W

สำหรับผลด้านความส่องสว่างภายในห้องทดสอบที่ทำการติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง และทำการทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0° , 18° และ 90° โดยมีพื้นที่โปร่งแสงของแผ่นกระจกบานเกล็ดที่ 1-3 เท่ากับ 0.615, 0.383 และ 0.150 m^2 พบว่า ค่าเฉลี่ยความส่องสว่างของหน้าต่างบานเกล็ดที่ทดสอบทั้ง 3 มุม มีค่าเท่ากับ 1372, 1150 และ 793 Lux เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux เห็นว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐานทั้ง 3 มุม และ ทั้ง 3 แผง แต่มีบางช่วงเวลาของแผงที่ 3 ปรับมุมบานเกล็ดที่ 90° ในช่วงเช้าเวลา 8.00 -10.30 น ได้มีการส่องสว่างภายในอาคารที่ต่ำกว่ามาตรฐานการส่องสว่างในอาคารสำนักงานที่มีค่าเท่ากับ 500 Lux จากการทดสอบเห็นว่า การติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์สามารถให้แสงสว่างจากธรรมชาติเข้าสู่อาคารที่สูงกว่ามาตรฐาน

สำหรับผลด้านพลังงานสุทธิของห้องทดลองที่ประกอบด้วย พลังงานที่ผลิตได้จากหน้าต่างบานเกล็ด พลังงานที่ใช้สำหรับปรับอากาศ รวมถึงพลังงานที่ต้องใช้เพิ่มเติมสำหรับแสงสว่าง โดยการทดสอบหน้าต่าง บานเกล็ด 1-3 ทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดที่ 0° , 18° และ 90° พบว่า อาคารที่ทำการทดสอบมีความต้องการใช้แสงสว่างเพิ่มเติมเมื่อทดสอบ บานเกล็ด 3 ที่มุม 90° ในช่วงเวลา 8:00 – 10:31 น. มีค่าการส่องสว่างที่ต่ำกว่ามาตรฐาน 500 Lux โดยมีพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการเท่ากับ 0.0611 kWh นอกนั้นเห็นว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ไม่จำเป็นต้องใช้แสงประดิษฐ์จากหลอดไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาด้านความร้อน พบว่า ห้องทดลองมีความต้องการพลังเพิ่มเติมสำหรับการปรับอากาศ เท่ากับ 4.8306, 4.9124 และ 4.4269 kWh/day เมื่อบานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 0° , 18° และ 90° ดังนั้นเห็นว่า พลังงานสุทธิของห้องทดลองมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มเติมทั้งหมดโดยมีค่าประมาณ 4.1317 - 4.7209 kWh/day สำหรับ บานเกล็ด 1-3 เมื่อทดสอบบานเกิดที่มุม 0° , 18° และ 90° โดยพลังงานที่ต้องการใช้น้อยที่สุดคือ บานเกล็ด 3 เมื่อทดสอบบานเกิดทำมุมเท่ากับ 90° ต้องการพลังเพิ่มเติมเท่ากับ 4.1317 kWh/day

สามารถสรุปงานวิจัยในครั้งนี้ได้ว่า หน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์มีความเหมาะสมในการผลิตไฟฟ้า สามารถระบายอากาศ และยังให้แสงสว่างจากธรรมชาติเข้าสู่อาคารได้อีกด้วย โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุดที่ บานเกล็ด 3 เมื่อทำมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° และยังมีค่าใกล้เคียงกับ บานเกล็ดทำมุมเท่ากับ 18° ซึ่งอุณหภูมิภายในห้องทดสอบจะต่ำที่สุดเมื่อทดสอบที่มุม 18° สามารถระบายอากาศและมีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่ดีที่สุดที่มุม 0° (โดยมีความเหมาะสมสำหรับการระบายอากาศแบบธรรมชาติ) และเมื่อพิจารณาถึงความร้อนที่มีผลมาจากการระบายความร้อน ความร้อนที่ผ่านกรอบอาคาร จนกระทั่งความร้อนภายในอาคาร พบว่า ความร้อนของอาคารมีค่าต่ำสุดเมื่อทดสอบที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° เมื่อคิดผลด้านพลังงานสุทธิของห้องทดสอบเห็นว่า ที่มุม 90° มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มเติมที่น้อยที่สุด ที่มีความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนารูปแบบการใช้งานหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับการผลิตไฟฟ้า การระบายอากาศและการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติสามารถกำหนดช่วงการปรับปรุงบานเกล็ดดังนี้ ในช่วงเวลา 8.00 – 10.00 น ควนปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° ในช่วงเวลา 10.00 – 13.00 น ควนปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 18° และหลังจากช่วงเวลา 14.00 น ควนปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0°

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการวิเคราะห์ระบบระบายอากาศบ้านเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อติดตั้งร่วมกับอาคารทดลอง ในขั้นตอนการประกอบบ้านเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ เห็นว่า มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่ทั่วไป ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติ โดยการปรับมุมบานเกล็ดเพื่อระบายอากาศ และการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติ โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1.) ในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์เข้ากันควรปฏิบัติดังนี้ ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด วัดค่ากระแสลัดวงจร ค่าความต้านทานขนาน และค่าความต้านทานอนุกรม เพื่อตรวจสอบหาความบกพร่องของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์ จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในขั้นตอนการต่อแบตเตอรี่ควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม และควรหลีกเลี่ยงความชื้นที่จะเข้าไปในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ประกอบ

2.) ในด้านการระบายอากาศของห้องทดสอบ มีหลายปัจจัยที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในอาคาร ซึ่งประกอบด้วยวัสดุในการสร้างกรอบของอาคาร ควรใช้วัสดุที่มีความต้านทานความร้อนที่สูงหรือควรติดฉนวนกันความร้อน และในการระบายอากาศด้วยหน้าต่างบานเกล็ด ควรติดตั้งในทิศทางที่มีลมพัดผ่านเฉลี่ยทั้งปีในปริมาณที่มากเพื่อให้อาคารสามารถระบายอากาศได้ดี ในการปรับมุมบานเกล็ดควรเลือกปรับมุมที่หลายระดับ ตามความต้องการของผู้อยู่อาศัย และตามความเหมาะสมในการใช้งานจริง

3.) ในการใช้แสงสว่างจากธรรมชาติควรใช้พื้นที่โปร่งแสงให้เหมาะสมกับพื้นที่ใช้งานภายในอาคาร ในการทดสอบมีบางกรณีที่แสงสว่างสูงเกินมาตรฐานอย่างมากควรใช้ผ้ามาปิดเพื่อลดแสงสว่างที่มากเกินไป

บรรณานุกรม

- ASHRAE. 2013. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013. Ventilation for Acceptable Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering, Inc, Atlanta,GA.
- . 2014. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia.
- Beeson และMayer. 2008. Patterns of light : chasing the spectrum from Aristotle to LEDs. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.springer.com/gp/book/9780387751061>
- Biyik, Emrah, Araz, Mustafa, Hepbasli, Arif, Shahrestani, Mehdi, Yao, Runming, Shao, Li, Essah, Emmanuel, Oliveira, Armando C., del Caño, Teodosio, Rico, Elena, Lechón, Juan Luis, Andrade, Luisa, Mendes, Adélio และAtli, Yusuf Bayer. 2017. A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. Engineering Science and Technology, an International Journal,20(3), 833-858.
- Bodart, M. และDe Herde, A. 2002. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. Energy and Buildings,34(5), 421-429.
- Boulard, T. และBaille, A. 1995. Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. Journal of Agricultural Engineering Research,61(1), 37-47.
- CIE. 1913. International Commission on Illumination. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://cie.co.at/>
- ConstruPM. 2017. EDGE Green Buildings: what's window to wall ratio. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://mundobim.com/construpm/edge-green-buildings-whats-window-to-wall-ratio/>
- Eke, Rustu และDemircan, Cihan. 2015. Shading effect on the energy rating of two identical PV systems on a building façade. Solar Energy,122(48-57).
- EMSD HK RE Net. 2019. Solar Photovoltaic Electrical Properties of PV Modules. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://re.emsd.gov.hk/english/index.html>

- ENERGIS Smart energy solutions. 2014. Transparent Window Solar Panels. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://energis.com.au/2015/11/transparent-window-solar-panels/>
- IES. 1906. Illuminating Engineering Society of North America. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.ies.org/>
- Inanici, Mehlika N. และDemirbilek, F. Nur. 2000. Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey. *Building and Environment*,35(1), 41-52.
- International Energy Agency. 2008. Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/1707.pdf>
- Kunchornrat, Amporn, Namprakai, Pichai และdu Pont, Peter. 2009. The impacts of climate zones on the energy performance of existing Thai buildings. *Resources, Conservation and Recycling*,53(545-551).
- Li, Danny H. W., Lam, Tony N. T., Chan, Wilco W. H. และMak, Ada H. L. 2009. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings. *Applied Energy*,86(5), 722-729.
- Lu, Lin และLaw, Kin Man. 2013. Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong. *Renewable Energy*,49(250-254).
- Majdoubi, H., Boulard, T., Hanafi, A., Bekkaoui, Ahmed, Fatnassi, Hicham, Demrati, H., Nya, M. และBouriden, L. 2007. Natural Ventilation Performance of a Large Greenhouse Equipped with Insect Screens. *Transactions of the ASABE*,50(641-650).
- Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T. และVazakas, A. 2012. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*,86(9), 2561-2575.
- Mandalaki, Maria, Zervas, K., Tsoutsos, Theocharis และVazakas, A. 2012. Assessment of shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*,86(2561-2575).
- ML solar. 2015. SOLAR CELLS. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.mlsolar.com/solar-cells/>

- Park, K. E., Kang, G. H., Kim, H. I., Yu, G. J. และ Kim, J. T. 2010. Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. *Energy*,35(6), 2681-2687.
- Poh Khai, Mithraratne, Nalanie และ Kua, Harn Wei. 2013. Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings. *Energy and Buildings*,66(274-281).
- S-Energy. 2014. BIPV Modul. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.s-energy.com/epage.php?it_id=1426727258
- Sacht, Helenice และ Lukiantchuki, Marieli Azoia. 2017. Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. *Procedia Engineering*,196(972-979).
- Stegou-Sagia, A., Antonopoulos, K., Angelopoulou, C. และ Kotsiovelos, G. 2007. The impact of glazing on energy consumption and comfort. *Energy Conversion and Management*,48(11), 2844-2852.
- Wong, Nyuk Hien, Liping, Wang, Chandra, Aida, Pandey, Anupama และ Xiaolin, Wei. 2005. Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. *Energy and Buildings*,37(563-572).
- World Business Council for Sustainable Development. 2007. Energy and Climate: Pathways to 2050. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/1746/21728>
- Xu, Shen, Liao, Wei, Huang, Jing และ Kang, Jian. 2014. Optimal PV cell coverage ratio for semi-transparent photovoltaics on office building façades in central China. *Energy and Buildings*,77(130-138).
- Yumrutaş, Recep, Kaşka, Önder และ Yıldırım, Erdal. 2007. Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution. *Building and Environment*,42(5), 1878-1885.
- Zain Ahmed, Azni, Sopian, Kamaruzzaman, Othman, Mohd, Sayigh, Ali และ Surendran, P. N. 2002. Daylighting as a passive solar design strategy in tropical buildings: A case study of Malaysia. *Energy Conversion and Management*,43(1725-1736).
- เสริมจันทร์ฉาย. 2557. รังสีอาทิตย์ (Solar radiation). พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2550. คู่มือมาตรฐานการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร

- [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.dede.go.th/main.php?filename=index>
กระทรวงพลังงาน. 2539. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ:
กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- . 2558. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579. กรุงเทพฯ: กรม
พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- . 2562. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files>
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2542. แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย.
[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www4.egat.co.th/re/egat_pv/sun_thailand.htm
คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน อาคาร. 2553. บทที่ 3 ระบบกรอบอาคาร (Building Envelope
System). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
[http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Build/Build_13.
pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Build/Build_13.pdf)
- บริษัท เฟรช เอ็นเนอร์ยี่ เซฟวิง จำกัด. 2012. การคำนวณ (Air Changes) และมาตรฐาน ระบบ
ระบายอากาศ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.freshenergysaving.com>
- บริษัท แคนเรียร์, (ประเทศไทย) จำกัด. 2016. Carrier 42SAE/38SAE Series 9,000-24,000 BTU/H.
[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
https://www.carrier.co.th/products/carrier/dl/42SAE_catalog.pdf
- บริษัท โรงพิมพ์ตะวันออก จำกัด มหาชน. 2014. พลังงานแสงอาทิตย์อีกหนึ่งทางเลือกของพลังงาน
ทดแทน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://www.epco.co.th/departmentofenergybusiness.php>
- บริษัท กรุงเทพธุรกิจ มีเดีย จำกัด. 2013. พลังงาน. กรุงเทพฯ: สมดุลพลังงาน เพื่อความยั่งยืนของ
เศรษฐกิจและสังคมไทย.
- บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด มหาชน. 2019. หน้าต่างบานเกล็ด มีดีกว่าแค่เปิดหรือ
ปิดก็หมุนปรับ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<https://www.baanlaesuan.com/120924/ideas/house-ideas/jalousie-window>
- บริษัท อาร์พีซี อินโนเวชั่น จำกัด. 2015. ระบบระบายอากาศ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://www.rpci.co.th/15366434/ventilation-system>
- ประพันธ์พงศ์, จงปติยัตต์. และวิจิต, คลังบุญครอง. 2558. นวัตกรรมบานเกล็ดพลังงานแสงอาทิตย์
Solar Cell Louver Innovation. วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์.
- ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. 2545. การออกแบบระบบแสงสว่าง (Lighting system design) กรุงเทพฯ :

บริษัทแสงมิตรกรุ๊ป.

- มนตรี เจาเดช. 2558. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาออกแบบระบบไฟฟ้าและแสงสว่าง บทที่ 2 หน่วยและศัพท์การวัดแสง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- รัชนีวรรณ อังกรบุตร, ทวิน จันดา, สิทธิพร ศรีเมือง และนพรัตน์ เกตุขาว. 2561. การประเมินการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนสำหรับประเทศไทย. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14.
- ศรัญญา, ทองทับ และลมลเพ็ชร, อภิสัทธีร์รัตนตร. 2555. สมดุลพลังงาน เพื่อความยั่งยืนของเศรษฐกิจและสังคมไทย. บริษัท กรุงเทพธุรกิจ มีเดีย จำกัด.
- ศศิธร ศรีเฟื่องฟู. 2560. การศึกษาความสบายเชิงอุณหภูมิของคนไทยภายในสถาปัตยกรรมประเภทโบสถ์. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสต์แฮมป์ตัน Vol. 11 December 2560
- สถาบันวิทยาการพลังงาน. 2558. พลังงานฟอสซิลสู่พลังงานทดแทนผลกระทบต่อผู้คนในอนาคต กลุ่มไพลิน หลักสูตรผู้บริหารระดับสูงด้านวิทยาการพลังงาน รุ่น 8. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.thailand-energy-academy.org/th/home>
- สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. 2016. คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร (Guidelines for Indoor Lighting Design).
- สุนทร บุญญาธิการ. 2538. เทคนิคการออกแบบ บ้านประหยัดพลังงาน เพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรินทร์, คันใจ และสุลักษณา, มงคล. 2560. การศึกษาการทำความเข้าใจแบบประเพณีโดยตรงร่วมกับการลดความชื้น ด้วยฮีทปั๊มสำหรับใช้ในบ้านพักอาศัย. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2560.



ภาคผนวก ก

พลังงานไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดสอบการเก็บเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แผง ซึ่งได้ทำการทดสอบสามแผงที่มุม 0° , 18° และ 90° ได้บันทึกข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตั้งแต่ช่วงเวลา 8.00 - 16.00 น ซึ่งได้ทำการทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม ปี 2562 เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเอาค่าเฉลี่ยของข้อมูลมาวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้.

ตารางภาคผนวกที่ 1 ลักษณะของทางด้านไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ทั้ง 3 แผง ทดสอบที่มุมบานเกล็ด 0° , 18° และ 90°

PV		Intensity (W/m ²)	I _{max} (A)	V _{max} (V)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)
Module1	90°	592.08	1.38	15.16	1.80	20.68
	18°	710.14	1.65	15.22	1.62	20.82
	0°	589.82	1.23	15.37	1.53	20.76
Module2	90°	641.80	1.48	19.38	1.68	25.92
	18°	671.90	1.41	19.90	1.64	26.29
	0°	571.88	1.15	19.94	1.44	26.09
Module3	90°	701.27	1.40	29.75	1.67	40.15
	18°	762.97	1.44	30.33	1.70	40.53
	0°	624.69	1.25	29.75	1.48	40.26

พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 10.464 m²

พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 20.659 m²

พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 30.929 m²

กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ทดสอบที่มุม 0° , 18° และ 90° ซึ่งได้ยกตัวอย่างการคำนวณ บานเกล็ด 1 ที่มุม 90° จะมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m) ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{pv}) และค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) ที่บันทึกข้อมูลซ้ำทุก ๆ 5 นาที

- กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m)

$$P_m = I_m \times V_m$$

$$P_m = 1.38 \times 15.16 = 20.92 \text{ W}$$

$$\text{Electric Power} = \sum P_{\max} 8:00-16:00 = 2238.74 \text{ W / Day}$$

$$\text{Electric Power} = 2238.74 \div 12 \div 1000 = 0.186 \text{ kWh / m}^2$$

$$\text{Electric Power} = 0.186 \text{ kWh / m}^2$$

- ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{pv})

$$\eta_{pv} = \frac{P_m}{I_G A_m} \times 100\%$$

$$\eta_{pv} = \frac{20.92}{592.08 \times 0.464} \times 100\% = 9.79\%$$

$$\eta_{pv} = 9.79\%$$

- ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF)

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

$$FF = \frac{1.38 \times 15.16}{1.8 \times 20.68} = 0.65$$

$$FF = 0.65$$

- ค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง

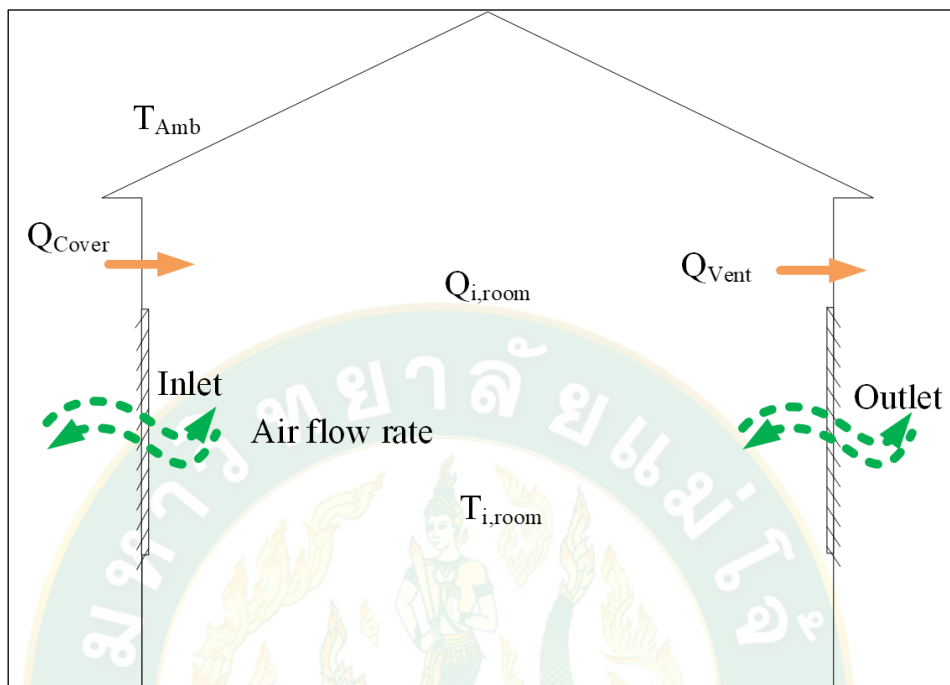
$$I = I_G \times 12$$

$$I = 592.08 \times 12 = 49.34 \text{ Wh / Day}$$

$$I = 49.34 \text{ Wh / Day}$$



การคำนวณการระบายอากาศ



รูปภาคผนวกที่ 1 สมดุลพลังงานความร้อน (Energy Balance)

1. ความร้อนจากการระบายอากาศ (Q_{vent})

การคำนวณการระบายความร้อนของห้องทดสอบที่ระบายเข้าออกภายในอาคาร โดยใช้ตัวอย่างการคำนวณที่มุม 0° องศา ในเวลา 8.00 น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้.

กำหนด

$$T_{amb} = 18.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$S = 1.008 \text{ m/s}$$

$$T_{i,room} = 21.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (เวลา 7.55 น.)}$$

$$C_d = 0.75$$

$$T_{i,room} = 21.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (เวลา 8:00 น.)}$$

$$DT = 3.70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$U = 0.04 \text{ m/s}$$

$$H = 0.9 \text{ m}$$

$$V_{room} = 17.024 \text{ m}^3$$

$$\Delta t = 30 \text{ s}$$

$$C_w = 0.023$$

- อัตราการระบายอากาศโดยอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ (G)

$$G = \frac{S}{2} C_d \left[2g \left(\frac{DT}{T_{amb}} \right) \left(\frac{H}{2} \right) + C_w U^2 \right]^{0.5}$$

$$G = \frac{1.008}{2} \times 0.75 \left[2(9.81) \left(\frac{3.70}{18.1} \right) \left(\frac{0.9}{2} \right) + (0.023)(0.04) \right]^{0.5}$$

$$G = 0.126 \text{ m}^3 / \text{s}$$

- อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate)

$$N = \frac{G}{V_{room}}$$

$$N = \frac{0.126}{17.024} = 0.0074 \text{ s}^{-1}$$

$$N = 0.0074 \text{ s}^{-1}$$

$$ACH = 0.0074 \times 3600 = 26.774 \text{ h}^{-1}$$

- ความหนาแน่นของอากาศภายในห้องทดสอบ ($\rho_{da,i,room}$)

$$\rho_{da,i,room} = 360.77819 \times (T_{i,room})^{-1.00336}$$

$$\rho_{da,i,room} = 360.77819 \times ((29 + 273.15)^{-1.00336}) = 1.171 \text{ kg/m}^3$$

- มวลอากาศภายในห้องทดสอบ ($M_{da,i,room}$)

$$M_{da,i,room} = \rho_{da,i,room} V_{room}$$

$$M_{da,i,room} = 1.171 \times 17.024 = 19.942$$

- ค่าความจุความร้อนรองอากาศภายในห้องทดสอบ ($C_{p,da,i,room}$)

$$C_{p,da,i,room} = (0.9957 + 0.000037 \times T_{i,room})$$

$$C_{p,da,i,room} = (0.9957 + (0.000037 \times 29)) = 1.007$$

- ความร้อนจากการระบายอากาศ (Q_{Vent})

$$Q_{\text{Vent}} = 0.5 V_{\text{room}} N (T_{\text{amb}} - T_{i,\text{room}}) \rho_{\text{da},i,\text{room}} C_{p,\text{da},i,\text{room}} \times 1000$$

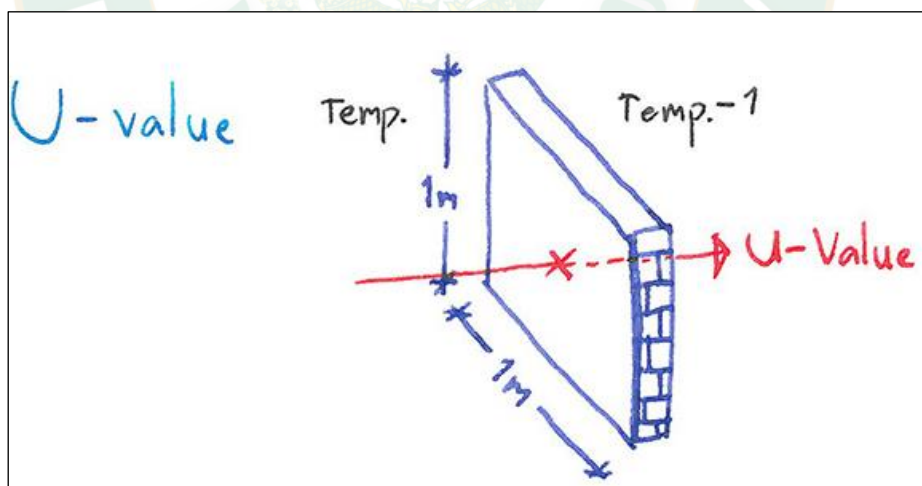
$$Q_{\text{Vent}} = 0.5 \times 17.024 \times 0.0074 \times (18.12 - 28.2) \times 1.171 \times 1.007 \times 1000 = 282.936 \text{ W}$$

$$Q_{\text{Vent}} = 282.936 \text{ W}$$

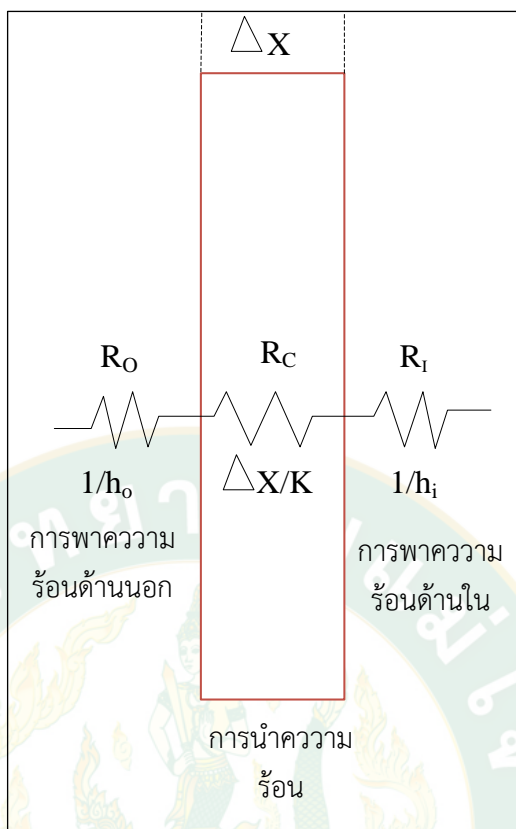
2. ความร้อนจากตัวห้องทดสอบ (Q_{Cover})

การคำนวณค่าความร้อนจากกรอบอาคาร วิเคราะห์โดยหาค่า U ของผนังและหลังคา รวมถึงหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ เฉลี่ยตลอดวันของข้อมูลการทดสอบแล้วจึงวิเคราะห์ค่าความร้อนจากตัวห้องทดสอบ โดยรายละเอียดดังนี้.

- ความร้อนจากตัวห้องทดสอบ (Q_{Cover})



รูปภาคผนวกที่ 2 ความร้อนผ่านผนัง



รูปภาคผนวกที่ 3 การนำความร้อนและการพาความร้อนของวัสดุ
สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{wall}} + Q_f$$

$$Q_w = U_w \times A_w \times dT$$

$$Q_f = (U_f \times A_f \times dT) + (A_f \times \text{SCS} \times \text{SHGF} \times \text{CLF})$$

$$U_w = 1 / \Sigma R$$

$$U_f = 1 / \Sigma R$$

$$R = \Delta x / K$$

- วิธีการคำนวณความร้อนผ่านผนังที่อาคาร

กำหนด

$$A_w = 33.65 \text{ m}^2$$

$$R_o = 0.44 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$R_{\text{เมทัลชีท}} = 0.001/0.28 = 0.00357 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$R_{\text{ฉนวน}} = 0.003/0.046 = 0.0652 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$R_i = 0.12 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

จะได้

$$U_w = 1 / \sum R = 1 / 0.00357 + 0.0652 + 0.12 = 4.295 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- วิธีการคำนวณความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกอาคาร

กำหนด

$$A_f = 2.16 \text{ m}^2$$

$$R_o = 0.44 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$R_{\text{กระจกใส}} = 0.003/1.053 = 0.00284 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$R_{\text{Solar cell}} = 0.003/0.046 = 0.00117 \text{ m}^2 \text{ k/W (ML solar, 2015)}$$

$$R_{\text{กระจกใส}} = 0.003/1.053 = 0.00284 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$R_i = 0.12 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

$$SC = SC_{\text{ทิศเหนือ}} + SC_{\text{ทิศใต้}} = (0.682 + 0.678)/2 = 0.868$$

$$SHGF = 0.73$$

$$SC = CLF_{\text{ทิศเหนือ}} + CLF_{\text{ทิศใต้}} = (0.7 + 1.11)/2 = 0.905$$

จะได้

$$U_f = 1 / \sum R = 1 / 0.00284 + 0.00117 + 0.00284 + 0.12 = 5.852 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- วิธีการคำนวณความความร้อนผ่านกรอบของอาคาร Q_{Cover} จะคำนวณหาโดยใช้วิธีผลต่างอุณหภูมิหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า TD_{eq} จากอุณหภูมิสมมติของอากาศที่ติดกับผิวของวัสดุในบริเวณที่ไม่มีอิทธิพลจากแสงแดด และการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจากท้องฟ้าสิ่งแวดล้อม และการพาความร้อนของอากาศ T_{sol} (Sol-Temperature) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ก่อนต้องคำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังและหลังคาในทิศต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

กำหนด วันที่ 7 เดือนธันวาคม กรณีผนังทางทิศเหนือ

เวลา 8.00 น.

$$I = 449 \text{ W/m}^2$$

$$\text{ละติจูด (Latitude, } \phi) = 18^\circ$$

$$L_{local} = 99^\circ$$

$$L_{st} = 105$$

$$I = 449.56 \text{ W/m}^2$$

$$G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$$

$$\beta = 90^\circ$$

$$\rho_g = 0.2$$

$$\alpha = 0.3$$

■ ค่า Solar Time

$$B = \frac{360(n - 81)}{365} = \frac{360(342 - 81)}{365} = 257.424 \text{ min}$$

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B$$

$$E = 9.87 \sin 2(257.424) - 7.53 \cos(257.424) - 1.5 \sin(257.424) = 16.09 \text{ min}$$

$$\text{SolarTime} = \text{StandardTime} + 4(L_{st} - L_{local}) + E$$

$$\text{SolarTime} = 8 + \frac{4(105 - 99) + (-10.7)}{60} = 8.66 \text{ hr}$$

- มุมชั่วโมง (Hour Angle, ω)

$$\omega = (8.66 - 12)15 = -49.97^\circ$$

- มุมแควคลิเนชัน (Declination Angle, δ)

$$\delta = 23.54 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) = 23.54 \sin\left(\frac{360(284 + 342)}{365}\right) = -17.108^\circ \text{C}$$

- มุมอะซิมูทพื้นดิน (Surface Azimuth Angle, γ)

ทิศเหนือ $\gamma = 180^\circ$

ทิศใต้ $\gamma = 0^\circ$

ทิศตะวันออก $\gamma = -90^\circ$

ทิศตะวันตก $\gamma = 90^\circ$

- มุมตกกระทบ (Incidence Angle, θ)

มุมตกกระทบ คือ มุมระหว่างแนวเวลาแสงอาทิตย์บนพื้นผิวกับแนวตั้งฉากของพื้นผิว ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมอื่นๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

กรณีพื้นผิวห้องทดสอบแนวตั้ง ($\beta=90^\circ$) มุมตกกระทบ

$$\cos\theta = -\sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \sin\phi \cos\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \sin\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega$$

$$\cos\theta = -\sin(-17.1) \sin 18 \cos 90 - \sin(-17.1) \sin 18 \cos 90 \cos 180 + \cos(-17.1) \cos 18 \cos 90 \cos(-49.97) + \cos(-17.1) \sin 18 \sin 90 \sin 180 \cos(-49.97) + \cos(-17.1) \sin 90 \sin 180 \sin(-49.97)$$

$$\cos\theta = -0.469$$

- มุมซีกนิต (Zenith Angle, θ_z)

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta$$

$$\cos\theta_z = \cos 18 \cos(-17.1) \cos(-49.97) + \sin 18 \sin(-17.1) = 0.49$$

- อัตราส่วนรังสีตรงบนพื้นเอียงต่อรังสีตรงพื้นราบ (R_b)

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} = \frac{0.469}{-0.49} = -0.951$$

โดย ค่า $R_b < 0$ ให้เท่ากับ 0 และ ค่า $R_b > 1$ ให้เท่ากับ 1

- รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระนาบเหนือบรรยากาศ (I_0)

$$I_0 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta)$$

$$I_0 = 1367 \left(1 + 0.033 \cos \frac{360(342)}{365} \right) (-0.49) = 687.088 \text{ W / m}^2$$

- ดัชนีการมีเมฆ (Cloudiness Index, k_T)

$$K_T = \frac{I}{I_0} = \frac{449.6}{687.88} = 0.653$$

- ความเข้มรังสีกระจาย (Diffuse Radiation, I_d)

$$\frac{I_d}{I} = 1 - (0.09K_T); K_T \leq 0.02$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.165; K_T > 0.88$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.0260K_T + 4.388K_T^2 - 16.638K_T^3 + 12.366K_T^4; 0.22 < K_T \leq 0.88$$

$$I_d = I(0.9511) - 0.0260K_T + 4.388K_T^2 - 16.638K_T^3 + 12.366K_T^4$$

$$I_d = 449.6(0.9511) - 0.0260(0.653) + 4.388(0.653)^2 - 16.638(0.653)^3 + 12.366(0.653)^4$$

$$I_d = 350.56 \text{ W / m}^2$$

- รังสีตรง (Beam or Direct Radiation, I_b)

$$I_b = I - I_d = 449.6 - 350.56 = 99.0 \text{ W/m}^2$$

- รังสีรวมที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ (I_T)

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$I_T = (99.0)(-0.951) + (350.56) \left(\frac{1 + \cos 90}{2} \right) + (449.6)(0.2) \left(\frac{1 - \cos 90}{2} \right)$$

$$I_T = 346.26 \text{ W / m}^2$$

โดย ค่า I_T ที่คำนวณได้เป็นของทิศเหนือ ส่วนการ คำนวณค่า I_T ของทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก ตัวแปรที่เปลี่ยนคือ มุมอะซิมุทพื้นดิน γ และหลังจากจะมีตัวแปรเพิ่มคือ มุมเอียงของพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ β โดยจะได้ผลการคำนวณในทิศต่างๆ เฉลี่ยตลอดทั้งวันดังนี้

$$I_{T,wall,N} = 539.98 \text{ W/m}^2$$

$$I_{T,wall,S} = 856.78 \text{ W/m}^2$$

$$I_{T,wall,E} = 884.13 \text{ W/m}^2$$

$$I_{T,wall,W} = 925.24 \text{ W/m}^2$$

$$I_{T,roof,E} = 579.71 \text{ W/m}^2$$

$$I_{T,roof,W} = 776.31 \text{ W/m}^2$$

ตารางภาคผนวกที่ 2 ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ

Time	I	$I_{T,wall,N}$	$I_{T,wall,S}$	$I_{T,wall,E}$	$I_{T,wall,W}$	$I_{T,roof,E}$	$I_{T,roof,W}$
8:00	449.57	299.29	532.34	855.76	324.14	665.50	228.90
8:05	449.57	305.05	529.84	842.88	344.95	655.32	248.94
8:10	471.54	316.43	552.95	871.10	364.92	677.04	264.73
8:15	493.36	327.61	575.77	898.40	385.08	697.88	280.79
8:20	515.26	338.66	598.55	925.21	405.43	718.19	297.04
8:25	537.84	349.71	621.99	952.57	425.96	738.76	313.42
8:30	556.53	359.81	640.98	972.92	446.44	753.77	330.35
8:35	581.64	371.06	667.00	1003.12	467.42	776.24	346.87
8:40	601.93	381.23	687.61	1025.03	488.20	792.15	363.93
8:45	623.60	391.52	709.64	1048.54	509.17	809.15	381.02
8:50	642.75	401.27	728.86	1067.75	529.96	822.72	398.32
8:55	664.03	411.25	750.34	1089.64	551.03	838.18	415.63
9:00	680.29	420.35	766.35	1103.87	571.50	847.69	433.08
9:05	702.03	430.16	788.21	1125.43	592.70	862.61	450.53
9:10	724.38	439.88	810.63	1147.20	614.05	877.51	468.09
9:15	736.44	448.16	822.14	1154.76	633.75	881.63	485.43
9:20	755.59	457.26	841.11	1171.41	654.56	892.42	502.95
9:25	774.13	466.16	859.41	1186.79	675.25	902.12	520.48
9:30	787.48	474.34	872.28	1195.33	694.84	906.63	537.61
9:35	807.55	483.20	892.11	1211.73	715.78	916.79	555.26
9:40	820.59	491.16	904.68	1219.30	735.10	920.36	572.24
9:45	832.72	498.91	916.31	1225.58	754.02	922.89	588.97
9:50	848.13	506.92	931.32	1235.34	773.66	927.80	606.03
9:55	859.27	514.36	941.96	1239.99	792.03	928.93	622.40
10:00	876.13	522.31	958.43	1250.57	811.92	934.14	639.59
10:05	890.78	529.90	972.65	1258.31	831.11	937.18	656.41
10:10	894.37	536.19	975.71	1254.27	846.64	931.89	671.01
10:15	908.18	543.48	989.11	1260.53	865.29	933.65	687.46

Time	I	$I_{T,wall,N}$	$I_{T,wall,S}$	$I_{T,wall,E}$	$I_{T,wall,W}$	$I_{T,roof,E}$	$I_{T,roof,W}$
10:20	922.06	550.66	1002.58	1266.43	883.90	934.99	703.91
10:25	928.63	556.92	1008.72	1264.84	899.77	931.10	718.56
10:30	940.38	563.64	1020.08	1267.94	917.39	930.25	734.36
10:35	938.62	568.66	1017.99	1258.26	929.50	920.78	746.37
10:40	947.17	574.76	1026.20	1257.93	945.46	917.43	760.97
10:45	956.47	580.82	1035.20	1257.92	961.62	914.13	775.71
10:50	956.17	585.52	1034.67	1249.31	973.33	905.18	787.23
10:55	959.98	590.60	1038.27	1244.10	986.59	898.34	799.83
11:00	962.73	595.37	1040.84	1237.81	999.10	890.70	811.84
11:05	970.13	600.68	1048.06	1235.04	1013.72	885.11	825.42
11:10	970.74	604.84	1048.58	1226.56	1024.72	875.90	836.26
11:15	972.88	609.08	1050.64	1219.08	1036.27	867.18	847.49
11:20	977.23	613.52	1054.93	1212.99	1048.84	859.13	859.51
11:25	973.18	616.43	1050.94	1200.45	1056.49	847.24	867.68
11:30	978.98	620.84	1056.73	1194.81	1069.59	839.13	880.12
11:35	974.78	623.35	1052.67	1181.82	1076.60	826.78	887.73
11:40	972.19	625.95	1050.22	1169.79	1084.27	814.86	895.84
11:45	969.67	628.37	1047.89	1157.61	1091.73	802.75	903.77
11:50	968.83	630.95	1047.25	1146.29	1100.07	790.94	912.41
11:55	961.26	631.95	1039.96	1130.46	1103.65	776.74	917.16
12:00	960.78	634.28	1039.76	1118.86	1111.86	764.48	925.68
12:05	961.11	636.65	1040.40	1107.38	1120.56	752.05	934.64
12:10	960.42	638.65	1040.09	1094.91	1128.48	738.91	942.97
12:15	959.66	640.50	1039.75	1081.99	1136.29	725.32	951.24
12:20	959.53	642.37	1040.08	1068.98	1144.56	711.38	959.93
12:25	954.18	642.85	1035.27	1052.87	1148.75	696.00	965.21
12:30	948.08	642.95	1029.75	1036.09	1152.18	680.17	969.86
12:35	944.88	643.62	1027.18	1020.39	1157.89	664.43	976.46
12:40	936.33	642.72	1019.30	1001.87	1159.04	647.60	979.20

Time	I	$I_{T,wall,N}$	$I_{T,wall,S}$	$I_{T,wall,E}$	$I_{T,wall,W}$	$I_{T,roof,E}$	$I_{T,roof,W}$
12:45	932.82	643.00	1016.55	985.28	1164.41	630.99	985.57
12:50	918.94	640.19	1003.37	963.98	1160.54	613.09	984.00
12:55	905.74	637.26	990.89	942.85	1156.92	595.12	982.63
13:00	896.12	635.15	982.10	922.97	1156.36	577.16	983.92
13:05	887.12	633.04	973.99	903.04	1156.28	558.90	985.63
13:10	868.89	627.65	956.44	879.61	1146.93	540.29	979.27
13:15	862.94	626.14	951.58	860.24	1149.65	521.46	983.46
13:20	860.34	625.67	950.29	841.39	1156.02	501.90	990.92
13:25	846.84	621.22	937.78	818.85	1151.07	482.41	988.45
13:30	831.58	615.87	923.48	795.64	1144.02	462.84	984.13
13:35	823.03	612.80	916.27	773.91	1144.31	442.30	986.34
13:40	811.89	608.57	906.44	751.16	1141.79	421.60	986.08
13:45	799.69	603.72	895.56	727.84	1138.07	400.67	984.78
13:50	785.34	597.80	882.49	703.84	1131.80	379.76	981.23
13:55	773.14	592.54	871.79	679.91	1128.16	358.07	980.06
14:00	763.60	588.25	864.10	655.93	1128.08	335.25	982.14
14:05	760.94	586.81	864.10	631.96	1137.43	309.79	992.81
14:10	754.60	583.70	860.35	606.79	1142.73	284.40	999.90
14:15	733.08	573.69	840.00	580.52	1127.66	263.49	988.56
14:20	720.30	567.36	829.44	554.23	1124.75	239.22	988.28
14:25	701.00	557.74	811.68	527.68	1112.59	217.09	979.62
14:30	683.00	548.42	795.47	500.94	1102.29	194.19	972.66
14:35	664.00	538.31	778.20	474.08	1090.45	171.50	964.32
14:40	640.00	525.23	755.17	447.64	1070.51	151.09	948.55
14:45	629.00	518.75	747.46	419.46	1071.75	123.82	952.26
14:50	605.00	504.97	724.53	392.92	1051.52	103.16	936.24
14:55	584.00	492.44	705.20	365.89	1036.16	80.78	924.71
15:00	567.00	481.92	690.84	337.83	1028.07	55.74	919.91
15:05	543.00	466.92	667.97	311.41	1007.11	34.99	903.23

Time	I	$I_{T,wall,N}$	$I_{T,wall,S}$	$I_{T,wall,E}$	$I_{T,wall,W}$	$I_{T,roof,E}$	$I_{T,roof,W}$
15:10	524.00	454.58	651.39	283.57	995.57	10.81	895.27
15:15	507.00	443.24	637.55	254.79	988.38	5.07	891.36
15:20	487.00	429.71	620.05	226.84	975.48	8.97	882.17
15:25	464.00	413.85	598.72	200.12	956.26	6.58	867.11
15:30	440.00	396.88	576.07	174.04	934.56	6.24	849.73
15:35	429.00	388.64	571.23	140.98	942.80	2.15	860.19
15:40	404.00	370.29	547.41	115.37	918.91	1.57	840.75
15:45	381.00	352.93	526.32	88.84	899.32	1.22	825.25
15:50	359.00	335.90	506.58	61.80	881.74	1.12	811.55
15:55	316.00	301.90	455.94	52.12	808.20	1.02	745.79
16:00	271.00	264.57	400.38	48.23	722.79	-170.06	668.57

ผลต่างอุณหภูมิกรณีทางทิศเหนือกรณีการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ในเวลา 8.00 น

$$\text{เมื่อ } T_{\text{amb}} = 18.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{i,room}} = 21.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนค่ารังสีของผนัง, 0.7

ϵ คือการแผ่รังสีของวัสดุ 1

I_T คือรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวพื้นเอียง, W/m^2

I_r คือรังสีอาทิตย์คลื่นยาวที่ตกกระทบบนผิวจากท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อม กับรังสีที่ปล่อยออกจากวัสดุที่อุณหภูมิอากาศภายนอก 0

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

$$T_{\text{sol}} = 18.1 + \left(\frac{0.7(346.28)}{17} \right) - \left(\frac{0(1)}{17} \right) = 32.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$TD_{eq} = T_{sol} - T_{i,room}$$

$$TD_{eq} = 32.4 - 21.8 = 10.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ตารางภาคผนวกที่ 3 ผลต่างอุณหภูมิเทียบเท่า TD_{eq} ของผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ กรณีทำมูมบาน
เกร็ดเท่ากับ 0°

Time	$TD_{eq,Wall,N}$	$TD_{eq,Wall,S}$	$T_{Deq,Wall,E}$	$T_{Deq,Wall,W}$	$TD_{eq,R00f,E}$	$TD_{eq,R00f,W}$
8:00	8.6	18.2	31.5	9.6	23.7	5.7
8:05	8.8	18.0	30.9	10.4	23.2	6.5
8:10	8.8	18.5	31.6	10.8	23.6	6.7
8:15	9.0	19.2	32.5	11.3	24.2	7.0
8:20	9.2	19.9	33.4	12.0	24.9	7.5
8:25	9.6	20.8	34.4	12.7	25.6	8.1
8:30	10.2	21.8	35.4	13.8	26.4	9.0
8:35	11.2	23.3	37.2	15.1	27.8	10.2
8:40	12.0	24.7	38.6	16.5	29.0	11.3
8:45	12.8	25.9	39.8	17.6	30.0	12.4
8:50	13.3	26.8	40.7	18.6	30.7	13.2
8:55	14.3	28.2	42.2	20.0	31.8	14.4
9:00	14.5	28.8	42.7	20.7	32.1	15.0
9:05	14.9	29.6	43.5	21.6	32.7	15.7
9:10	16.1	31.4	45.2	23.3	34.1	17.2
9:15	16.1	31.5	45.2	23.7	33.9	17.6
9:20	17.2	33.0	46.6	25.3	35.1	19.1
9:25	17.4	33.6	47.0	26.0	35.3	19.6
9:30	18.0	34.4	47.7	27.1	35.8	20.6
9:35	18.2	35.1	48.2	27.8	36.1	21.2
9:40	18.3	35.3	48.3	28.3	36.0	21.6
9:45	18.2	35.4	48.1	28.7	35.6	21.9
9:50	18.4	35.8	48.4	29.4	35.7	22.5
9:55	18.6	36.2	48.5	30.0	35.7	23.0

Time	$T_{Deq,Wall,N}$	$T_{Deq,Wall,S}$	$T_{Deq,Wall,E}$	$T_{Deq,Wall,W}$	$T_{Deq,R00f,E}$	$T_{Deq,R00f,W}$
10:00	19.1	37.0	49.0	31.0	36.0	23.9
10:05	19.9	38.1	49.9	32.3	36.7	25.1
10:10	19.5	37.6	49.1	32.3	35.8	25.0
10:15	20.6	38.9	50.1	33.8	36.7	26.5
10:20	20.7	39.3	50.2	34.4	36.5	27.0
10:25	21.0	39.6	50.2	35.1	36.4	27.7
10:30	21.5	40.3	50.5	36.1	36.6	28.5
10:35	21.5	40.0	49.9	36.4	36.0	28.8
10:40	21.9	40.5	50.1	37.2	36.0	29.6
10:45	22.1	40.8	50.0	37.8	35.9	30.2
10:50	23.0	41.4	50.3	38.9	36.1	31.3
10:55	22.8	41.3	49.7	39.1	35.5	31.4
11:00	22.7	41.1	49.2	39.4	34.9	31.7
11:05	22.8	41.3	49.0	39.9	34.6	32.1
11:10	23.0	41.2	48.6	40.3	34.1	32.5
11:15	23.2	41.4	48.3	40.8	33.8	33.0
11:20	23.8	42.0	48.5	41.8	33.9	34.0
11:25	23.5	41.4	47.6	41.6	33.0	33.9
11:30	23.3	41.2	46.9	41.7	32.2	33.9
11:35	24.1	41.7	47.1	42.7	32.4	35.0
11:40	24.1	41.6	46.5	43.0	31.9	35.2
11:45	24.3	41.5	46.1	43.4	31.5	35.6
11:50	24.6	41.8	45.9	44.0	31.2	36.2
11:55	25.1	41.9	45.6	44.5	31.0	36.8
12:00	24.9	41.6	44.8	44.6	30.3	36.9
12:05	25.0	41.7	44.4	45.0	29.8	37.3
12:10	25.2	41.7	44.0	45.3	29.3	37.7
12:15	25.6	42.0	43.7	46.0	29.0	38.4
12:20	25.5	41.9	43.1	46.2	28.4	38.6

Time	$T_{Deq,Wall,N}$	$T_{Deq,Wall,S}$	$T_{Deq,Wall,E}$	$T_{Deq,Wall,W}$	$T_{Deq,R00f,E}$	$T_{Deq,R00f,W}$
12:25	25.9	42.0	42.7	46.7	28.0	39.1
12:30	25.1	41.0	41.3	46.1	26.6	38.5
12:35	25.0	40.8	40.6	46.2	25.9	38.7
12:40	24.8	40.3	39.6	46.1	25.0	38.7
12:45	25.8	41.1	39.9	47.2	25.3	39.9
12:50	25.4	40.4	38.7	46.8	24.3	39.6
12:55	25.1	39.6	37.7	46.5	23.3	39.3
13:00	24.9	39.2	36.8	46.4	22.5	39.3
13:05	25.1	39.1	36.2	46.6	22.0	39.6
13:10	25.1	38.6	35.5	46.5	21.5	39.6
13:15	24.8	38.2	34.4	46.3	20.5	39.5
13:20	24.9	38.2	33.7	46.7	19.8	39.9
13:25	24.9	37.9	33.0	46.7	19.2	40.0
13:30	25.3	38.0	32.7	47.1	19.0	40.5
13:35	24.9	37.4	31.5	46.8	17.9	40.3
13:40	24.8	37.0	30.6	46.7	17.1	40.3
13:45	25.1	37.1	30.2	47.1	16.7	40.8
13:50	24.7	36.4	29.1	46.7	15.7	40.5
13:55	24.3	35.8	27.9	46.4	14.7	40.3
14:00	24.1	35.4	26.8	46.3	13.6	40.3
14:05	24.7	36.2	26.6	47.4	13.3	41.5
14:10	24.8	36.2	25.8	47.9	12.5	42.0
14:15	24.5	35.4	24.8	47.3	11.7	41.6
14:20	24.0	34.8	23.4	46.9	10.5	41.3
14:25	23.7	34.2	22.5	46.6	9.7	41.1
14:30	23.2	33.4	21.3	46.0	8.6	40.7
14:35	22.7	32.6	20.1	45.4	7.6	40.2
14:40	22.0	31.5	18.8	44.4	6.6	39.4
14:45	22.3	31.7	18.2	45.1	6.0	40.2

Time	$TD_{eq,Wall,N}$	$TD_{eq,Wall,S}$	$T_{Deq,Wall,E}$	$T_{Deq,Wall,W}$	$TD_{eq,R00f,E}$	$TD_{eq,R00f,W}$
14:50	22.0	31.0	17.4	44.5	5.4	39.7
14:55	21.3	30.0	16.1	43.7	4.3	39.1
15:00	21.5	30.1	15.6	44.0	4.0	39.6
15:05	20.8	29.1	14.4	43.1	3.0	38.8
15:10	20.6	28.7	13.6	42.9	2.3	38.8
15:15	19.9	27.9	12.1	42.4	1.0	38.4
15:20	19.8	27.6	11.4	42.2	0.5	38.4
15:25	18.6	26.2	9.8	40.9	-0.9	37.3
15:30	18.3	25.6	9.1	40.4	-1.4	36.9
15:35	18.4	25.9	8.2	41.2	-2.2	37.8
15:40	17.9	25.2	7.4	40.5	-2.7	37.3
15:45	17.2	24.4	6.3	39.7	-3.6	36.7
15:50	16.7	23.8	5.4	39.2	-4.2	36.3
15:55	14.9	21.2	4.6	35.7	-4.7	33.2
16:00	13.0	18.6	4.1	31.8	-4.9	29.6

ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลต่างอุณหภูมิเทียบเท่า TD_{eq} ของผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ กรณีทำมุมบาน
เปิดเท่ากับ 18°

Time	$TD_{eq,Wall,N}$	$TD_{eq,Wall,S}$	$T_{Deq,Wall,E}$	$T_{Deq,Wall,W}$	$TD_{eq,R00f,E}$	$TD_{eq,R00f,W}$
8:00	9.2	18.8	32.1	10.2	24.3	6.3
8:05	9.4	18.6	31.5	11.0	23.8	7.1
8:10	9.2	18.9	32.0	11.2	24.0	7.0
8:15	9.2	19.4	32.7	11.6	24.5	7.3
8:20	9.3	20.0	33.4	12.0	24.9	7.6
8:25	10.0	21.2	34.9	13.2	26.1	8.5
8:30	11.2	22.7	36.4	14.7	27.4	9.9
8:35	11.7	23.8	37.7	15.6	28.3	10.7
8:40	12.2	24.9	38.7	16.6	29.2	11.5

8:45	12.3	25.4	39.4	17.2	29.5	11.9
8:50	13.7	27.2	41.1	19.0	31.1	13.6
8:55	14.1	28.0	42.0	19.8	31.6	14.2
9:00	15.0	29.3	43.2	21.3	32.6	15.6
9:05	15.0	29.7	43.6	21.7	32.8	15.8
9:10	15.8	31.1	44.9	23.0	33.8	17.0
9:15	16.9	32.3	46.0	24.5	34.7	18.4
9:20	17.0	32.8	46.4	25.1	34.9	18.9
9:25	17.6	33.8	47.3	26.2	35.5	19.8
9:30	18.5	34.9	48.2	27.6	36.3	21.1
9:35	18.1	34.9	48.1	27.7	35.9	21.0
9:40	18.2	35.2	48.2	28.2	35.8	21.5
9:45	18.8	36.0	48.7	29.3	36.2	22.5
9:50	18.8	36.3	48.8	29.8	36.2	22.9
9:55	19.5	37.2	49.4	31.0	36.6	24.0
10:00	20.1	38.0	50.0	32.0	37.0	24.9
10:05	20.0	38.2	50.0	32.4	36.8	25.2
10:10	20.1	38.2	49.7	32.9	36.4	25.6
10:15	20.2	38.5	49.7	33.4	36.3	26.1
10:20	21.4	40.1	50.9	35.2	37.3	27.8
10:25	21.3	39.9	50.4	35.4	36.7	27.9
10:30	21.5	40.3	50.5	36.1	36.6	28.5
10:35	21.6	40.1	50.0	36.5	36.1	28.9
10:40	22.1	40.7	50.3	37.4	36.2	29.8
10:45	22.4	41.1	50.3	38.1	36.2	30.5
10:50	22.6	41.1	49.9	38.6	35.8	30.9
10:55	22.5	40.9	49.4	38.8	35.2	31.1
11:00	23.1	41.5	49.6	39.8	35.3	32.0
11:05	23.6	42.1	49.8	40.7	35.4	32.9
11:10	24.0	42.3	49.6	41.3	35.2	33.5

11:15	23.5	41.7	48.6	41.1	34.1	33.3
11:20	23.5	41.7	48.2	41.4	33.6	33.6
11:25	23.5	41.4	47.5	41.6	33.0	33.8
11:30	23.8	41.8	47.5	42.3	32.8	34.5
11:35	23.7	41.4	46.7	42.4	32.1	34.6
11:40	24.4	41.8	46.7	43.2	32.1	35.5
11:45	24.5	41.7	46.3	43.5	31.6	35.8
11:50	25.5	42.6	46.7	44.8	32.1	37.1
11:55	25.8	42.6	46.3	45.2	31.7	37.5
12:00	25.4	42.1	45.4	45.1	30.8	37.4
12:05	25.6	42.2	44.9	45.5	30.3	37.8
12:10	25.6	42.1	44.3	45.7	29.7	38.1
12:15	25.7	42.1	43.8	46.1	29.2	38.5
12:20	25.5	41.9	43.0	46.2	28.3	38.6
12:25	25.9	42.1	42.8	46.7	28.1	39.2
12:30	26.2	42.1	42.4	47.2	27.7	39.6
12:35	26.1	41.9	41.6	47.3	26.9	39.8
12:40	26.3	41.8	41.0	47.5	26.5	40.1
12:45	26.1	41.5	40.2	47.6	25.6	40.2
12:50	25.9	40.9	39.3	47.4	24.8	40.1
12:55	25.9	40.5	38.5	47.3	24.2	40.1
13:00	26.3	40.6	38.1	47.7	23.9	40.6
13:05	25.7	39.7	36.8	47.2	22.6	40.2
13:10	26.4	40.0	36.8	47.8	22.8	40.9
13:15	25.6	39.0	35.2	47.1	21.2	40.3
13:20	25.6	39.0	34.5	47.4	20.5	40.6
13:25	25.2	38.2	33.3	47.0	19.5	40.3
13:30	25.2	37.9	32.6	47.0	18.9	40.4
13:35	25.1	37.6	31.8	47.0	18.1	40.5
13:40	25.5	37.8	31.4	47.5	17.8	41.1

13:45	25.4	37.4	30.5	47.4	17.0	41.1
13:50	25.2	36.9	29.5	47.1	16.2	40.9
13:55	24.4	35.9	28.0	46.4	14.7	40.3
14:00	25.1	36.4	27.9	47.3	14.7	41.3
14:05	24.9	36.3	26.7	47.5	13.5	41.6
14:10	25.5	36.9	26.5	48.5	13.2	42.6
14:15	24.3	35.3	24.6	47.1	11.5	41.4
14:20	24.2	35.0	23.7	47.1	10.7	41.5
14:25	24.5	35.0	23.3	47.3	10.5	41.9
14:30	24.0	34.2	22.1	46.8	9.4	41.5
14:35	23.4	33.3	20.8	46.2	8.3	41.0
14:40	23.3	32.8	20.1	45.8	7.9	40.7
14:45	23.4	32.8	19.3	46.1	7.1	41.2
14:50	22.9	32.0	18.3	45.4	6.4	40.7
14:55	22.7	31.4	17.5	45.1	5.7	40.5
15:00	21.6	30.2	15.7	44.1	4.1	39.7
15:05	20.9	29.2	14.5	43.2	3.1	38.9
15:10	20.8	28.9	13.7	43.1	2.5	38.9
15:15	20.5	28.5	12.8	43.0	1.6	39.0
15:20	19.9	27.7	11.5	42.4	0.6	38.5
15:25	19.3	26.9	10.5	41.7	-0.2	38.0
15:30	19.3	26.7	10.2	41.5	-0.4	38.0
15:35	19.1	26.7	9.0	42.0	-1.5	38.6
15:40	18.2	25.5	7.7	40.8	-2.4	37.6
15:45	18.1	25.2	7.2	40.6	-2.7	37.5
15:50	17.5	24.5	6.2	40.0	-3.4	37.1
15:55	15.5	21.9	5.2	36.4	-4.1	33.8
16:00	13.8	19.4	4.9	32.6	-4.1	30.4

ตารางภาคผนวกที่ 5 ผลต่างอุณหภูมิเทียบเท่า T_{Deq} ของผนัง และหลังคาในทิศต่างๆ กรณีทำมุมบาน
 เกร็ดเท่ากับ 90°

Time	$T_{Deq,Wall,N}$	$T_{Deq,Wall,S}$	$T_{Deq,Wall,E}$	$T_{Deq,Wall,W}$	$T_{Deq,Roof,E}$	$T_{Deq,Roof,W}$
8:00	6.5	16.1	29.4	7.5	21.5	3.6
8:05	6.0	15.3	28.2	7.7	20.5	3.7
8:10	5.5	15.3	28.4	7.5	20.4	3.4
8:15	5.0	15.2	28.5	7.4	20.3	3.1
8:20	4.7	15.4	28.8	7.4	20.3	3.0
8:25	4.5	15.7	29.4	7.7	20.6	3.0
8:30	5.2	16.8	30.4	8.8	21.4	4.0
8:35	5.8	18.0	31.8	9.8	22.5	4.8
8:40	6.2	18.8	32.7	10.6	23.1	5.5
8:45	6.5	19.6	33.6	11.4	23.7	6.1
8:50	7.2	20.7	34.7	12.5	24.6	7.1
8:55	8.1	22.0	36.0	13.8	25.6	8.2
9:00	8.3	22.6	36.5	14.5	25.9	8.8
9:05	8.4	23.1	37.0	15.1	26.2	9.2
9:10	9.4	24.7	38.6	16.6	27.4	10.6
9:15	9.8	25.2	38.9	17.5	27.7	11.4
9:20	10.7	26.5	40.1	18.8	28.6	12.6
9:25	11.0	27.2	40.7	19.6	28.9	13.2
9:30	11.2	27.6	40.9	20.3	29.0	13.8
9:35	11.6	28.5	41.6	21.2	29.5	14.6
9:40	12.1	29.1	42.0	22.1	29.7	15.4
9:45	12.6	29.7	42.5	23.1	30.0	16.3
9:50	12.6	30.1	42.6	23.6	29.9	16.7
9:55	13.1	30.7	43.0	24.6	30.2	17.6

10:00	13.3	31.2	43.3	25.2	30.2	18.1
10:05	13.7	32.0	43.7	26.1	30.5	19.0
10:10	13.8	31.9	43.4	26.6	30.1	19.3
10:15	13.6	32.0	43.2	26.9	29.7	19.6
10:20	14.2	32.8	43.6	27.9	30.0	20.5
10:25	14.6	33.2	43.8	28.8	30.0	21.3
10:30	14.9	33.7	43.9	29.5	30.0	22.0
10:35	15.3	33.8	43.7	30.2	29.8	22.6
10:40	15.5	34.0	43.6	30.7	29.6	23.1
10:45	15.5	34.2	43.4	31.2	29.2	23.5
10:50	16.0	34.5	43.3	32.0	29.2	24.3
10:55	15.9	34.3	42.8	32.2	28.6	24.5
11:00	15.9	34.2	42.4	32.5	28.1	24.8
11:05	16.4	34.9	42.6	33.5	28.2	25.7
11:10	16.3	34.6	41.9	33.6	27.5	25.8
11:15	16.2	34.4	41.3	33.8	26.8	26.0
11:20	16.5	34.7	41.2	34.4	26.6	26.6
11:25	17.3	35.2	41.3	35.4	26.8	27.6
11:30	17.4	35.4	41.1	35.9	26.4	28.1
11:35	17.5	35.2	40.5	36.2	25.9	28.4
11:40	18.1	35.6	40.5	37.0	25.9	29.2
11:45	18.2	35.5	40.0	37.3	25.4	29.6
11:50	18.3	35.4	39.5	37.6	24.9	29.9
11:55	18.7	35.5	39.2	38.1	24.7	30.4
12:00	18.6	35.3	38.5	38.2	23.9	30.6
12:05	18.7	35.4	38.1	38.7	23.5	31.0
12:10	18.9	35.4	37.7	39.0	23.0	31.4
12:15	18.9	35.4	37.1	39.3	22.4	31.7
12:20	18.9	35.2	36.4	39.5	21.7	31.9
12:25	19.0	35.1	35.8	39.8	21.1	32.2

12:30	19.2	35.1	35.3	40.1	20.7	32.6
12:35	19.1	34.9	34.7	40.3	20.0	32.8
12:40	19.1	34.6	33.9	40.3	19.3	32.9
12:45	18.6	34.0	32.7	40.0	18.1	32.7
12:50	18.3	33.2	31.6	39.7	17.2	32.4
12:55	18.5	33.0	31.0	39.8	16.7	32.7
13:00	17.9	32.2	29.8	39.4	15.5	32.3
13:05	18.8	32.8	29.9	40.3	15.7	33.3
13:10	18.1	31.6	28.5	39.5	14.5	32.6
13:15	17.6	31.0	27.3	39.2	13.3	32.4
13:20	18.1	31.5	27.0	40.0	13.0	33.2
13:25	17.9	30.9	26.0	39.7	12.2	33.0
13:30	18.1	30.8	25.5	39.9	11.8	33.3
13:35	17.7	30.2	24.3	39.6	10.7	33.1
13:40	17.6	29.9	23.5	39.5	9.9	33.1
13:45	17.9	30.0	23.0	39.9	9.6	33.6
13:50	17.3	29.0	21.7	39.3	8.3	33.1
13:55	17.4	28.9	21.0	39.5	7.7	33.4
14:00	17.1	28.4	19.8	39.3	6.6	33.3
14:05	17.4	28.8	19.3	40.1	6.0	34.1
14:10	17.6	29.0	18.5	40.6	5.2	34.7
14:15	17.7	28.7	18.0	40.6	5.0	34.8
14:20	17.7	28.5	17.1	40.6	4.2	35.0
14:25	17.3	27.8	16.1	40.2	3.3	34.7
14:30	16.8	26.9	14.8	39.6	2.2	34.2
14:35	16.5	26.4	13.9	39.3	1.4	34.1
14:40	16.3	25.7	13.1	38.7	0.9	33.7
14:45	16.3	25.7	12.2	39.1	0.0	34.2
14:50	15.8	24.9	11.2	38.3	-0.7	33.6
14:55	15.5	24.2	10.3	37.9	-1.5	33.3

15:00	15.1	23.7	9.2	37.6	-2.4	33.2
15:05	14.8	23.0	8.3	37.0	-3.0	32.7
15:10	14.5	22.6	7.5	36.8	-3.8	32.7
15:15	14.5	22.5	6.7	36.9	-4.4	32.9
15:20	14.0	21.9	5.7	36.5	-5.3	32.7
15:25	13.8	21.4	5.0	36.2	-5.7	32.5
15:30	14.0	21.3	4.8	36.1	-5.7	32.6
15:35	14.0	21.5	3.8	36.8	-6.6	33.4
15:40	14.0	21.3	3.5	36.6	-6.7	33.4
15:45	13.8	20.9	2.9	36.3	-7.0	33.3
15:50	13.4	20.4	2.1	35.8	-7.6	32.9
15:55	11.8	18.1	1.5	32.6	-7.9	30.1
16:00	10.2	15.8	1.3	29.1	-7.7	26.8

ความร้อนผ่านผนังกรณีผนังทางทิศเหนือ $Q_{cover,i,N}$ เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ในเวลา 8.00 น. สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{cover,W,N} = UA(TD_{eq}) = (4.295)(3.48)(10.6) = 158 \text{ W}$$

$$Q_{cover} = Q_{cover,W,N} + Q_{cover,W,S} + Q_{cover,W,E} + Q_{cover,W,W} + Q_{cover,F,N} + Q_{cover,F,S} + Q_{cover,R,W} + Q_{cover,R,E}$$

ความร้อนผ่านกรอบอาคารรวม Q_{cover} ที่ผ่านผนัง ผ่านหน้าต่างกระจก และผ่านหลังคาในทิศทาง เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ในเวลา 8.00 น. สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{cover} = Q_{cover,W,N} + Q_{cover,W,S} + Q_{cover,W,E} + Q_{cover,W,W} + Q_{cover,F,N} + Q_{cover,F,S}$$

$$Q_{cover} = 192 + 272 + 824 + 252 + 464 + 112 = 2053 \text{ W}$$

$$Q_{cover} = 2053 \text{ W}$$

3. ความร้อนในห้องทดสอบ ($Q_{i,room}$)

เป็นความร้อนที่เกิดจากการสะสมความร้อนภายในห้องตรวจสอบ เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ในเวลา 8.00 น. สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{i,room} = Q_{cover} + Q_{vent}$$

$$Q_{i,room} = 2053 - 282 = 1770 \text{ W}$$

4. อุณหภูมิภายในห้องเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

พิจารณาสมดุลทางความร้อนในห้องทดสอบที่มีติดตั้งหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ เมื่อปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ในเวลา 8.00 น โดยมีรายละเอียดดังนี้.

สมมติฐาน (Following Assumption)

- ไม่คิดเงา
- ไม่คิดการนำความร้อนจากดินมายังพื้นห้อง
- ไม่คิดความร้อนจากหลังคา เนื่องจากมีการหุ้มฉนวนที่เพดานห้องทดสอบ
- ไม่มีความร้อนจากผู้อาศัยเนื่องจากเป็นห้องเปล่า

$$Q_{i,room} = Q_{Cover} + Q_{Vent}$$

$$M_{da,i,room} C_{p,da,i,room} \frac{dT}{\Delta t} = Q_{Cover} + Q_{Vent}$$

$$M_{da,i,room} C_{p,da,i,room} \frac{T_{i,room}^{t+\Delta t} - T_{i,room}^t}{\Delta t} = Q_{Cover} + Q_{Vent}$$

$$T_{i,room}^{t+\Delta t} = \frac{(Q_{Cover} + Q_{Vent})\Delta t}{M_{da,i,room} C_{p,da,i,room}} + T_{i,room}^t$$

$$T_{i,room}^{t=8:00 \text{ น}} = \frac{(Q_{Cover} + Q_{Vent})\Delta t}{M_{da,i,room} C_{p,da,i,room}} + T_{i,room}^{t=7:55 \text{ น}}$$

$$T_{i,room}^{t=8:00 \text{ น}} = \frac{(849.15 + 224.1)}{19.942 \times 1.007 \times 1000} + 21.5 = 23.1^{\circ}\text{C}$$

$$T_{i,room}^{t=8:00 \text{ น}} = 23.1^{\circ}\text{C}$$

5. พลังงานที่ต้องการใช้สำหรับการปรับอากาศ

ในการคำนวณหาพลังงานที่ต้องการใช้สำหรับการปรับอากาศ จำเป็นต้องทราบถึงปริมาณความร้อนภายในห้อง $Q_{i,room}$ เพื่อกำจัดความร้อนให้อยู่ในอุณหภูมิที่ต้องการ โดยใช้ตัวอย่างการคำนวณในเวลา 8.00 น ที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$$Q_{i,room} = 1770 \text{ W}$$





$$Q_{i,room} = Q_{evap}$$

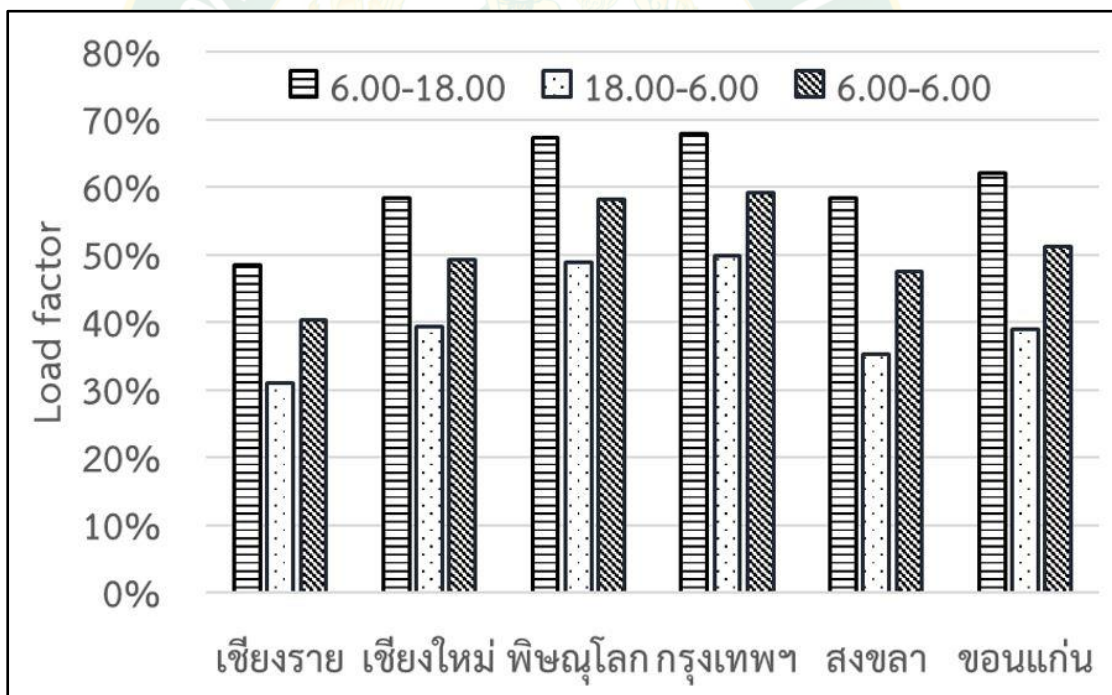
$$Q_{i,room} = 1770 \times 3.414 = 6040.75 \text{ BTU/hr}$$

$$1\text{W} = 3.414 \text{ BTU/hr}$$

โดยในการคำนวณได้กำหนดใช้เครื่องปรับอากาศชนิด Carrier 42SAE/38SAE Series ที่มีความสามารถในการทำความเย็น (Cooling Capacity) เท่ากับ 18652 BTU/hr. มีค่าประสิทธิภาพ EER เท่ากับ 12.24 BTU/hr./Watt มีกำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 1520 Watt ดังแสดงใน ตารางภาคผนวกที่ 2 (บริษัท แคนเรียร์, 2016)

ตารางภาคผนวกที่ 6 รายละเอียดของเครื่องปรับอากาศ (Specification)

Specification (รายละเอียดของเครื่อง)		Hi-wall Cooling Only				
Model Name (ชื่อรุ่น)	Indoor Unit (เครื่องภายใน)	42SAE010	42SAE012	42SAE018	42SAE025	
	Outdoor Unit (เครื่องภายนอก)	38SAE010	38SAE012	38SAE018	38SAE025	
Cooling Capacity (ความสามารถในการทำความเย็น)	btu/hr.	9,347	12,162	18,652	24,015	
Efficiency (ค่าประสิทธิภาพ)	EER	12.13	12.15	12.24	12.32	
	SEER	12.88	12.90	13.00	13.08	
	EGAT#5					
Power Consumption (กำลังไฟฟ้า)	w	765	990	1,520	1,949	
Power Supply (ระบบไฟฟ้า)		220V / 1 Ph / 50Hz	220V / 1 Ph / 50Hz	220V / 1 Ph / 50Hz	220V / 1 Ph / 50Hz	
Operating Current (กระแสไฟฟ้า)	Amp.	3.57	4.65	7.80	8.98	
Indoor Unit (เครื่องภายใน)	Standard air flow rate (H / M / L)(ปริมาณลมหมุนเวียน)	cfm	375/340/285	430/390/330	625/540/425	810/580/490
Sound Pressure Level (ระดับเสียง)	Indoor Unit (H / M / L)	dB(A)	42/40/35/32	42/40/35/32	50/45/40/35	50/47/45
Dimension (ขนาดของเครื่อง)	Outdoor Unit (H x W x D)	mm	680X540X250	680X540X250	895X697X325	895X697X325
	Indoor Unit (H x W x D)	mm	280X800X185	280X900X202	313X1,033X202	340X1,186X260
Net Weight (น้ำหนักเครื่อง)	Outdoor Unit	kg	19	21	43	45
	Indoor Unit	kg	10	11	14	19



รูปภาคผนวกที่ 4 Load Factor ของเครื่องปรับอากาศ (รัชนิวรรณ อังกรบุตร์ และคณะ, 2561)

พลังงานที่ต้งกานใช้สำหรับเครื่องปรับอากาศ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่มีค่า Load Factor ของจังหวัดเชียงใหม่ เท่ากับ 0.85 % คำนวณได้จาก

$$W_{\text{comp}} = \frac{Q_{i,\text{room}}}{\text{EER}} = \frac{6040.75}{12.24} = 493.58 \text{ W}$$

$$W_{\text{comp}} = 493.58 \times 8 \times 0.58 \text{ W / hr}$$

$$W_{\text{comp}} = 493.58 \times 8 \times 0.58 = 190.83 \text{ Wh / day}$$

$$W_{\text{comp}} = 190.83 / 1000 = 0.1908 \text{ kWh / day}$$

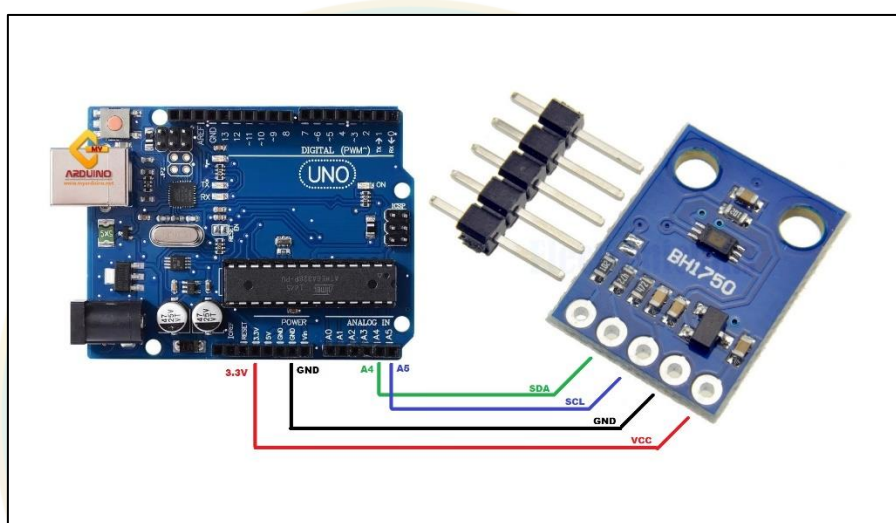




การคำนวณการส่องสว่างภายในอาคาร

ในการตรวจวัดความส่องสว่างภายในอาคาร ได้ใช้งาน Arduino วัดความเข้มแสงด้วยเซ็นเซอร์ GY-302 BH1750FVI เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ที่มีหน่วยเป็นลักซ์ (lux) ทำการเก็บข้อมูลซ้ำทุกๆ 5 นาที ในช่วงเวลา 8.00 - 16.00 น โดยได้เขียน Code เพื่อการบันทึกข้อมูลดังนี้

วิธีการเชื่อมต่อ Arduino เข้ากับเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง GY-302 BH1750FVI เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่



รูปภาคผนวกที่ 5 Arduino วัดความเข้มแสงด้วยเซ็นเซอร์ GY-302 BH1750FVI

โค้ดสำหรับการวัดแสง

/*

Example of BH1750 library usage.

This example initialises the BH1750 object using the default high resolution continuous mode and then makes a light level reading every second.

Connection:

VCC -> 3V3 or 5V

GND -> GND

SCL -> SCL (A5 on Arduino Uno, Leonardo, etc or 21 on Mega and Due, on esp8266 free selectable)

SDA -> SDA (A4 on Arduino Uno, Leonardo, etc or 20 on Mega and Due, on esp8266 free selectable)

ADD -> (not connected) or GND

ADD pin is used to set sensor I2C address. If it has voltage greater or equal to 0.7VCC voltage (e.g. you've connected it to VCC) the sensor address will be 0x5C. In other case (if ADD voltage less than $0.7 * VCC$) the sensor address will be 0x23 (by default).

*/

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <BH1750.h>
```

```
BH1750 lightMeter;
```

```
void setup(){
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  // Initialize the I2C bus (BH1750 library doesn't do this automatically)
```

```
  Wire.begin();
```

```
  // On esp8266 you can select SCL and SDA pins using Wire.begin(D4, D3);
```

```
  lightMeter.begin();
```

```
  Serial.println(F("BH1750 Test begin"));
```

```

}

void loop() {

  float lux = lightMeter.readLightLevel();

  Serial.print("Light: ");

  Serial.print(lux);

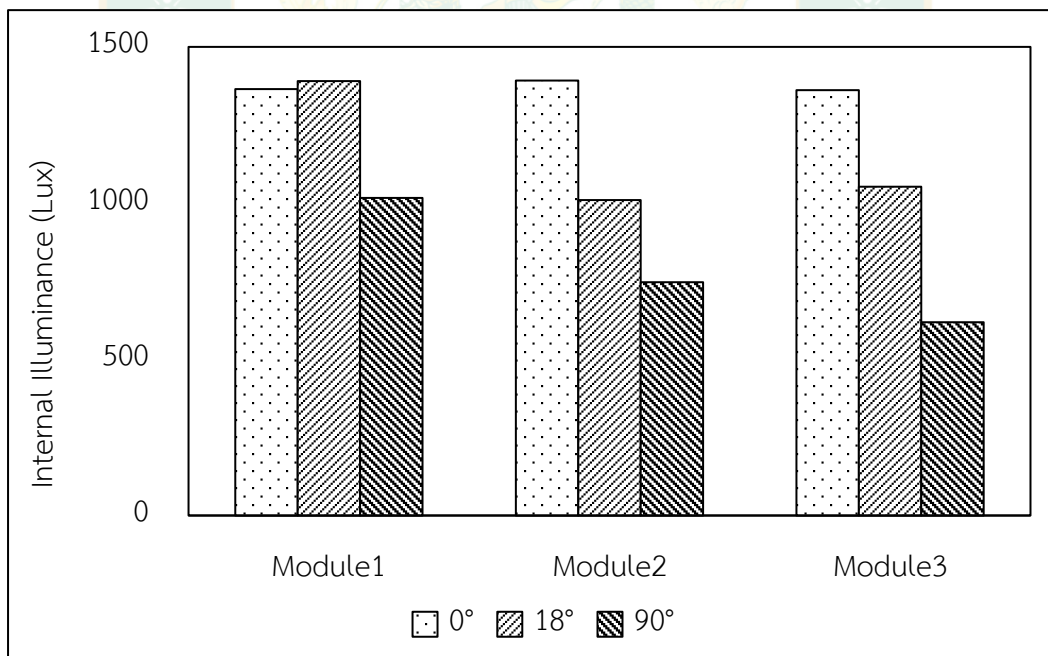
  Serial.println(" lx");

  delay(6000);

}

```

ค่าความส่องสว่างในห้องทดลองโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ 1-3 เมื่อทดสอบการปรับมุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° , 18° และ 90° โดยมีผลกานทดสอบแสดงในในรูป ภาพผนวกที่ 6



รูปภาคผนวกที่ 6 ค่าเฉลี่ยการส่องสว่างภายในห้องทดสอบ

การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าสำหรับแสงสว่างเพิ่มเติม

ตัวอย่างในการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับแสงสว่างประดิษฐ์เพิ่มเติม การส่องสว่างแบบธรรมชาติ ที่มีการส่องสว่างไม่เพียงพอตามมาตรฐาน 500 Lux ของหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ บานเกล็ด 3 เมื่อทำมุมบานเกล็ดเท่ากับ 90° ในช่วงเวลา 8.00 น โดยมีข้อมูลด้านค่าความส่องสว่างดังนี้

บานเกล็ด 3 การทดสอบที่มุม 90° มีค่าความส่องสว่างเท่ากับ 285 Lux

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าความส่องสว่างตามมาตรฐานเท่ากับ 500 lux ดังนั้นจึงต้องหาค่าความส่องสว่างที่ต้องการเพิ่ม เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตารางเมตรที่ต้องการติดตั้งแสงประดิษฐ์ โดยสามารถคำนวณค่าความส่องสว่างที่ต้องการเพิ่มเติมจากสมการ

ค่าความส่องสว่างเพิ่มเติม (Lux) = ค่าความส่องสว่างมาตรฐาน – ค่าความส่องสว่างเดิม

$$\text{ค่าความส่องสว่างเพิ่มเติม (Lux)} = 500 \text{ (Lux)} - 285 \text{ (Lux)} = 214 \text{ (Lux)}$$

ดังนั้นที่เวลา 8 น. มีความต้องการใช้แสงสว่างเพิ่มเติมเท่ากับ 214 (Lux) โดยการคำนวณค่าความส่องสว่างที่ต้องการเพิ่มเติมสำหรับอาคารจำลอง มีตัวแปรในการคำนวณดังนี้

การหาค่าการใช้ประโยชน์จากดวงโคม (CU) จะต้องทราบถึงตัวแปรคือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิววัสดุประกอบอาคาร ขนาดของเพดานรวมถึงขนาดความกว้างและความลึกของห้องที่พิจารณา รวมถึงขอบค่าอัตราส่วนโพรงของห้องที่ได้จากสมการต่อไปนี้

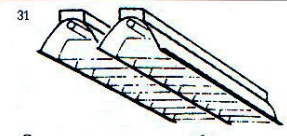
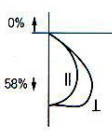
$$\text{RCR} = \frac{3 \times \text{HRC} \times (W + L)}{W \times L}$$

สามารถแทนค่าเพื่อหาอัตราส่วนของโพรงห้องได้ดังนี้

$$\text{RCR} = \frac{3 \times 1.45 \times (2.28 + 3.04)}{2.28 \times 3.04}$$

$$\text{RCR} = 3.33$$

ตารางภาคผนวกที่ 7 ค่า CU ที่หาได้จากการ Interpolate

ลักษณะของดวงโคม	ลักษณะการกระจายความเข้มแสงและอัตราส่วนลูเมนของหลอดไฟ	80			70			50			30			10			0					
		$p_{oc} \rightarrow$	$p_w \rightarrow$		$p_{oc} \rightarrow$	$p_w \rightarrow$		$p_{oc} \rightarrow$	$p_w \rightarrow$		$p_{oc} \rightarrow$	$p_w \rightarrow$		$p_{oc} \rightarrow$	$p_w \rightarrow$		$p_{oc} \rightarrow$	$p_w \rightarrow$				
 <p>โคมหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้ 2 หลอดแบบเซลล์พาราโบลาและมีการบังขนาด 150x150 มม.</p>		IV	1.5/1.2	RGR ↓	ค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์เมื่อค่าประสิทธิภาพของการสะท้อนแสงของโพรงพื้นมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ($p_{fc} = 20$)																	
		0	.69	.69	.69	.67	.67	.67	.64	.64	.64	.62	.62	.62	.59	.59	.59	.58				
		1	.63	.61	.59	.62	.60	.58	.59	.58	.57	.57	.56	.55	.55	.54	.53	.52	.51			
		2	.57	.54	.52	.56	.53	.51	.54	.52	.50	.52	.50	.49	.49	.48	.47	.46	.45			
		3	.52	.48	.45	.51	.47	.45	.49	.46	.44	.48	.45	.43	.46	.44	.42	.41	.40			
		4	.47	.42	.39	.46	.42	.39	.44	.41	.38	.43	.40	.38	.42	.40	.38	.36	.35			
		5	.42	.37	.34	.41	.37	.34	.40	.36	.34	.39	.36	.33	.38	.35	.33	.32	.31			
		6	.38	.33	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.29	.35	.32	.29	.34	.31	.29	.28	.27			
		7	.34	.29	.26	.33	.29	.26	.32	.29	.26	.32	.28	.26	.31	.28	.25	.24	.23			
		8	.30	.26	.22	.30	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.25	.22	.28	.24	.22	.21	.20			
		9	.27	.22	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.19	.25	.22	.19	.25	.21	.19	.18	.17			
10	.24	.20	.17	.24	.20	.17	.23	.19	.17	.23	.19	.17	.22	.19	.17	.16	.15					

จากผลการ interpolate เพื่อหาค่าการใช้ประโยชน์จากดวงโคม CU สำหรับค่าการสะท้อนของผนังและเพดาน ที่มีค่าเท่ากับ 80% อัตราส่วนของโพรงห้องเท่ากับ 3.33 จึงสามารถคำนวณหาค่า CU จากตารางได้เท่ากับ 0.411 เมื่อคำนวณหาค่ากำลังการส่องสว่างของหลอดไฟฟ้า (W/m^2) สามารถหาได้จากสมการ

สามารถแทนลงสมการได้ดังนี้

$$\text{กำลังการส่องสว่างของหลอดไฟฟ้า } (W/m^2) = \frac{214}{72 \times 0.411 \times 0.7} = 10.299 W/m^2$$

ผลที่ได้จากการคำนวณข้างต้นเป็นค่ากำลังไฟฟ้าการส่องสว่าง จะต้องเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในหน่วยวัตต์ชั่วโมง Wh โดยการบันทึกข้อมูลเข้ากับ 5 นาที หาได้จากสมการดังนี้

$$\text{พลังงานไฟฟ้าสำหรับการส่องสว่าง (Wh)} = \text{กำลังการส่องสว่างของหลอดไฟ } (W/m^2) \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ต้องการเพิ่ม (h)} \times \text{พื้นที่ที่พิจารณา } (m^2)$$

สามารถแทนเข้าสมการได้ดังนี้

$$\text{พลังงานไฟฟ้าสำหรับการส่องสว่าง (Wh)} = 10.299 (W/m^2) \times 0.083 (h) \times 6.885 (m^2)$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้าสำหรับการส่องสว่าง (Wh)} = 5.886 \text{ หรือ } 0.0058 \text{ kWh}$$



ภาคผนวก ง

การคำนวณพลังงานสุทธิสำหรับอาคาร

การคำนวณพลังงานสุทธิสำหรับอาคาร

ในการคำนวณพลังงานพลังงานสุทธิสำหรับอาคารได้ใช้พลังงานที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ช่วยลดการใช้ พลังงานในด้านแสงสว่าง และพลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศของพลังงานไฟฟ้าจากสายส่ง โดยใช้ตัวอย่างในการคำนวณ ในเวลา 8.00 น ที่มุมบานเกล็ดเท่ากับ 0° ตัวอย่างการคำนวณดังนี้

พลังงานที่ผลิตได้จากหน้าต่างบานเกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 0.1619 kWh/day

พลังงานที่ต้องการใช้สำหรับแสงสว่างของแสงประดิษฐ์เท่ากับ 0 kWh/day

พลังงานที่ต้องการใช้สำหรับการปรับอากาศ 0.0238 kWh/day

สามารถคำนวณพลังงานสุทธิได้ดังนี้

$$\text{พลังงานสุทธิ} = 0.1619 (0 + 0.0238) = 0.1381 \text{ kWh/day}$$

เมื่อคิดเป็นจำนวนเงินที่ต้องจ่ายในเวลา 8.00 น โดยการคิดราคาไฟฟ้าเท่ากับ 3.96 Bath/kWh

$$\text{ค่าพลังงานไฟฟ้า} = 0.1381 \times 3.96 = 0.5468 \text{ Bath/day}$$



การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

ผู้แต่ง: Phetdavanh Ladthavong and Akarin Intaniwet

เรื่อง: Semi-transparent photovoltaic window louvers for building integration application

งานประชุมวิชาการ:

The 1st International Conference on Smart Community Development in the Asia Pacific (ISCAP2020)

สถานที่: Asian Development College for Community Economy and Technology,

Chiang Mai Rajabhat University, 20th - 21st February 2020, หน้า 37-44,





Certificate of Participation

This is to certify that

Phetdavanh Ladthavong and Akarin Intaniwet

has presented a paper entitled

**Semi-Transparent Photovoltaic Window Louvers for Building
Integration Application**

The 1st International Conference on Smart Community Development
in the Asia Pacific (iSCAP2020)

20th - 21st February 2020

Asian Development College for Community Economy and Technology
Chiang Mai Rajabhat University, Thailand

Dr. Nuttiya Tantranont
Conference Chair

Dr. Worajit Setthapun
Dean of Asian Development College for
Community Economy and Technology





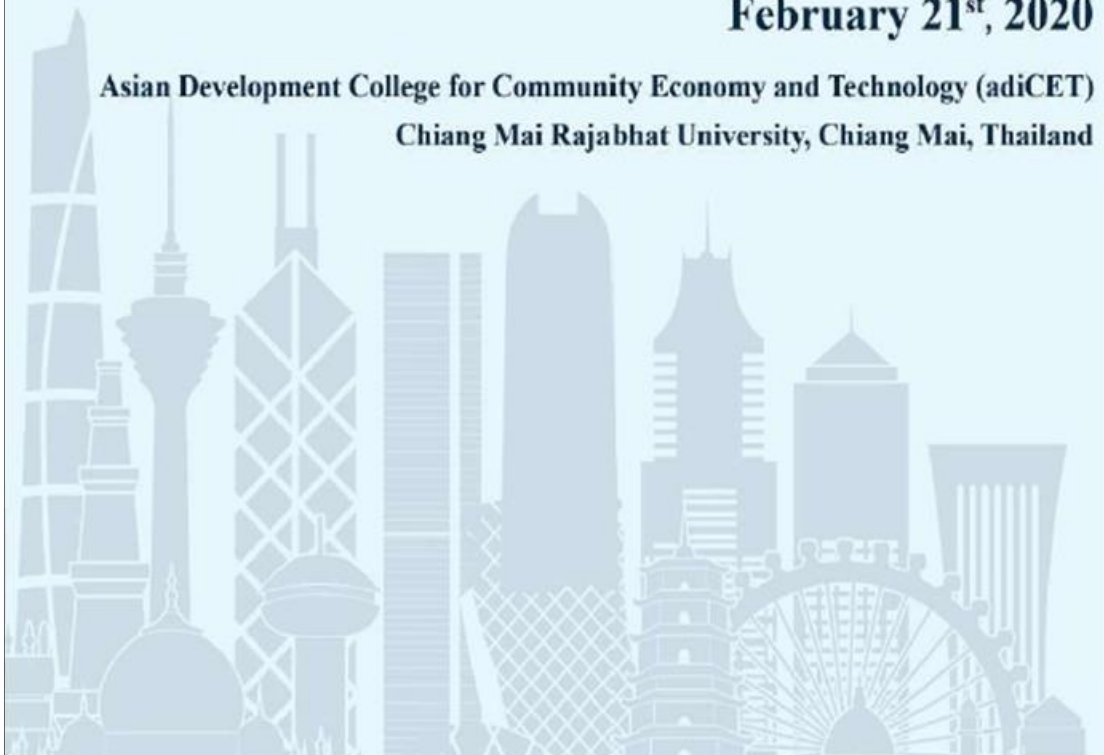
adiCET



**The 1st International Conference
on Smart Community Development
in the Asia Pacific (iSCAP2020)**

February 21st, 2020

**Asian Development College for Community Economy and Technology (adiCET)
Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand**





The 1st International Conference on Smart Community Development
in the Asia Pacific (iSCAP2020)

**Agenda The 1st International Conference on Smart Community
Development in the Asia Pacific (iSCAP2020)**

Asian Development College for Community Economy and Technology,
Chiang Mai Rajabhat University

20th - 21st February 2020

Session 1: WEF Nexus; Renewable Energy & Environment

Session Chairs: Assistant Professor Dr. Saoharit Nitayavardhana
Assistant Professor Dr. Rotjapun Nirunsin

Room 1: AREC

Time	Topic
09:00-09:12	Experimental Study on Strength of Concrete with Partial Replacement of Fine Aggregate with Brick Waste by Pyae Su Htike
09:12-09:24	Estimation of Runoff Potential in Sittoung River Basin Using GIS Application by Thet Hnin Aung
09:24-09:36	Statistical Analysis for Initial Wind Characteristics in Southern Region of Myanmar by Ni Ni Moe Kyaw
09:36-09:48	Application of Support Vector Regression for Solar Power Predication by Narakorn Songkittirote
09:48-10:00	Semi-Transparent Photovoltaic Window Louvers for Building Integration Application by Phetdavanh Ladhavong
10:00-10:12	Comparison of Biodiesel Synthesis via Transesterification by Using Homogeneous and Heterogeneous Catalyst by Ying Chusree
10:12-10:24	The Thermal Performance of the Novel Solar Collector Integrated with Phase Change Material by Bundarith Nhel
10:24-10:36	Development of Biogas Fermentation Tank for Organic Food Waste in Chiangmai Community by Chakriya Chanracha
10:36-10:48	The Combustion Characteristic of a Community-Scale Biomass Stove by Paitoon Laodee
10:48-11:00	Modelling of Cooling Load in Close-System Solar Greenhouse Under Thailand Climates Using TRNSYS by Thiri Shoon Wai



*The 1st International Conference on Smart Community Development
in the Asia Pacific (ISCAP2020)*

Semi-Transparent Photovoltaic Window Louvers for Building Integration Application

Phetdavanh Ladthavong, and Akarin Intaniwet*

*Smart Energy and Environmental Research Unit, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai,
50290, Thailand*

**a.intaniwet@hotmail.co.th*

Abstract: This work demonstrates the feasibility of using a semi-transparent photovoltaic window louver that has been integrated into a building. The ability of the PV window louver to generate electricity was analyzed as well as the temperature and luminance profile inside the building. The louver was installed at three different angles, 0° (fully open), 18° (partially open) and 90° (fully close) with respect to the horizontal and the data were collected from 8.00-16.00. It was found from the testing that the PV window louver generated the maximum amount of electrical energy of 0.29 kWh/m²/day when the angle of the louver was fixed at 18°. On the other hand, installation of the louver at 0° (fully open) provided both the lowest temperature and the highest luminance inside the building with the average value over the day of 30 °C and 1,587 lux, respectively. The PV window louver exhibits the conversion efficiency between 5-7% and their performance is affected by shadow due to roof overhang. The PV window louver allows the generation of electrical energy while allowing some portion of sunlight to enter the room and at the same time provides the ventilation for the building. This offers the solution for the building integration where the PV window louver can be used to generate electricity and at the same time the temperature and luminance level inside the room can be controlled by it.

Keywords: Building integrated PV (BIPV), Semi-transparent, PV window louver.



1 INTRODUCTION

Currently, solar energy is extensively being used throughout the world due to its high reputation as a clean source of energy and environmental friendly. Solar energy can be directly converted to either electrical energy using a solar panel or to thermal energy using a solar collector. Changing the power from the sun right to electricity has been received a great deal of attention since the output can be used straightforward as a DC power source. For the AC system, on the other hand, an inverter is required to change DC to AC signal where the output signal matches the requirement of AC appliances. The main material used to fabricate the solar panel is call a semiconductor, mainly Si (Silicon). The conversion efficiency of Si solar panels can be varied between 5-18% depending on the quality of Si semiconductor (i.e. monocrystalline, polycrystalline or amorphous) (Wasfi, 2011).

The installation of solar panels can be done in several configurations. Solar farms require the panels to be installed on the ground where a large empty land space is needed. On the contrary, less empty space in the city forces the owner to attach the panels with the building where the panels can either be installed on the building (Building Attached Photovoltaic : BAPV) or can be integrated with the building (Building Integrated Photovoltaic : BIPV) (group, 13.november.2018, Peng et al., 2011). BAPV is the installation of solar panels on parts of the building such as on the wall or on the roof. While BIPV, the solar panel is installed as part of the building such as window, louver, roof or façade.

Window louvers are installed into the building as part of the ventilation system where the air inside the building can be exchanged with fresh air outside. At the same time, they are used to control the amount of light entering into the building (Ng et al., 2013). The louver also provides another advantage in which it requires smaller installation area compared to the conventional window. Two different louvers can be seen in typical buildings. The first type is usually made of wood or aluminum and the angle cannot be adjusted. The second type, which is more popular compared to the first type, is made of a transparent or opaque glass. The angle of the louver can be adjusted according to the requirement in order to optimize the air ventilation and luminance inside the room. The

utilization of adjustable louver initiates the idea of integrating solar cells into glass window to create the PV window louvers that can be used to generate electricity and at the same time the louver can be used to control the luminance and temperature level inside the building. Here, we investigate the home-made PV window louver that is installed at a different angle. The window to wall ratio (WWR) is maintained in between 20-30% (Miyazaki et al., 2005, Evola and Popov, 2006). The parameters used to indicate the electrical performance of the PV window louver such as I-V curve, conversion efficiency, power and total energy are examined from the current-voltage characteristic that is being monitored throughout the day. Temperature and luminance profile inside the building is also measured during the day so the optimum angle of the louver can be obtained. Moreover, we have gained more understanding on the utilization of PV technology with the building.

2 THEORY

2.1 Principle of solar cells

A solar cell is an electronic device made from a layer of semiconductor, mainly silicon (Si), sandwiching between two metal electrodes. Solar cells directly convert the energy from the sun to electrical energy. Its fundamental principle relies on the photovoltaic effect. When sunlight hits the semiconductor, the energy is transferred to the valence electrons in the atoms. If the transferred energy is greater than the binding energy, the valence electrons will be excited to the conduction level and the electron-hole pairs are created. Build in electric field inside the p-n junction is used to separate electron-hole pairs into free charge carriers (free holes and electrons). These carriers then move to the respective electrode and, with the connection to the external load, the current will be flowed (Bodart and De Herde, 2002). It is noted that a single cell normally generates a very low amount of current and voltage which typically too low for any application. Therefore, various number of cells has to be connected in order to increase output power level (Sacht and Lukiantchuki, 2017).

The electrical performance of a solar cell can be investigated using the current-voltage characteristic (I-V curve) upon the incident of



sunlight. Figure 1 shows typical I-V curve of a solar cell. From the curve, maximum current and voltage can be obtained as displayed in the figure (Harmati and Magyar, 2015). Several parameters used to indicate the performance of the solar cell can be obtained as a result from current-voltage measurement. With known maximum current (I_m) and voltage (V_m), the maximum power (P_m) and the conversion efficiency (η) can be found using equation 1 and 2.

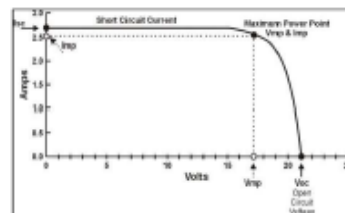


Figure 1: Current-voltage characteristic of a typical solar cell.

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

$$\eta = \frac{P_m}{I_0 A} \times 100\% \quad (2)$$

Where I_0 is the intensity of the incident solar radiation (W/m^2) and A is the area of the solar cell (m^2).

2.2 Ventilation system

Air ventilation is related to the circulation and transfer of air inside the building to the outside. Two different air ventilation systems can be classified according to their principle which are mechanical and natural process (Markvart and Castañer, 2003). The mechanical ventilation system often uses the air duct distribution system or relies on the inlet-outlet air vent. Wall fan can sometime be seen to provide the air flow inside the building. The natural ventilation system, on the other hand, employs louvers or façades to transfer the air naturally from outside to inside and vice versa. Several parameters must be taken into account when using the natural ventilation system including the position of the sun, wind direction and storm path (Asfour, 2015) so that the building optimizes the air ventilation and minimizes high solar radiation during summer

and rain during the rainy season. The size of the window must be carefully determined using the window to wall ratio (WWR) so that the optimum level of luminance and temperature inside the building is achieved. Acceptable WWR for typical building is ranging between 20-30% and it can be calculated using equation 3.

$$WWR = \frac{\text{Window area}}{\text{Wall area}} \times 100\% \quad (3)$$

2.3 Luminance in the building

The luminance level is very important for people who are using the building area and it must be properly designed to meet the requirement that is specified for each activity. Suitable luminance level ensures good visibility and low effect on eyesight. There are currently the international standards use for luminance level reference such as CIE (Commission Internationale de L'éclairage) and IES (Illumination Engineering Society) (Viessmann, 2015, Cho et al., 2012). The proper luminance level will be differed from one area to another depending on the requirement of light level for each specific activity as shown in table 1.

Table 1: The CIE and IES standard luminance level.

Area	CIE (LUX)	IES (LUX)
Meeting room	500	300
Office, library, computer room	500	300
Storage room	150	150
Rest room	150	150
Corridor	100	150
Staircase	150	150
Elevator	150	150

Note: The number in the table is the average value.

3 METHODOLOGY

This section describes the experimental procedures which can be divided into three steps including construction of louver housing, production of photovoltaic window louver and testing procedures. The detail of each step is explained as the following.

The louver housing unit was constructed with the dimension of $2.28 \times 3.24 \times 2 \text{ m}^3$. The roof was tilted at an angle of 18° with the overhang of 30 cm. Metal sheet with a layer of insulator was used to create walls and roof. Two rectangular



open spaces, on the north and south side of the room, were created for the installation of louvers. In our case, the window to wall ratio was estimated to be 23.68%. Figure 2 demonstrates the completed louver housing unit. It is noted that the PV window louver was installed on the south side of the room to receive the maximum sunlight while pristine louver (i.e. louver without solar cell) was installed on the opposite side.



Figure 2: Louver housing unit.

In this work, polycrystalline silicon solar cells (ML solar) were used to fabricate the PV window louver. Each cell has the dimension of $7.62 \times 15.24 \text{ cm}^2$ and is capable of generating the maximum power of 1.8 W (3.6 A, 0.5 V). Each louver plate contained two solar cells connecting in series (Figure 3) and the PV window was consisted of 20 louvers (40 cells) connecting in series (Figure 4). Table 2 summarizes the detail of PV window louver.

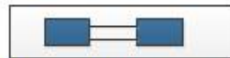


Figure 3: Position of solar cells on the louver.



Figure 4: PV window louver.

Table 2: PV window louver characteristic.

Characteristic	Detail
Number of solar cells	40
Space between each cell (cm)	11
Total solar cell area (m^2)	0.464
Transparent area (m^2)	0.615
WWR (%)	23.68

Electrical properties of the PV window louver were investigated using the PV module analyzer (PROVA 210) where the I-V curve of the panel was repeatedly traced every 5 min from 8.00-16.00. The incident solar radiation was obtained using the silicon light detector (SP-421-SS SDI-12 Digital Silicon-cell Pyranometer, Apogee instruments). The detector was placed on the louver to ensure similar sunlight incident angle. The type K thermocouple was used to measure the temperature profile inside the room and both the silicon detector and the thermocouple were connected to the data logger (Adam-500/TCP, 21 channels) for data acquisition. Luminance profile inside and outside the room was monitored using typical light sensor (BH1750FVI). The sensor was linked to Arduino for data acquisition.



4 RESULT AND DISCUSSION

The PV window louvers were installed at the angle of 0° (fully open), 18° (partially open) and 90° (fully close) with respect to the horizontal. The performance of the panels was tested between October-December 2019 and the data obtained on the clear sky condition were used to analyze the effect of the louver angle upon the electrical properties of the PV window louver, the temperature and luminance inside the room.

In the beginning, the PV window louver was examined through the I-V curves. Since the louver was home-made so the test was performed to ensure that the PV window louver provides a good photovoltaic property. Figure 5A-C show the I-V curves of the PV window louver that was installed at three different angles (0°, 18° and 90°) and measured at three different times (morning, noon and late afternoon). It can be seen that the PV window louver exhibits a typical I-V curve throughout the day as normally seen from a typical solar panel under the illumination of sunlight. However, the photovoltaic property seems to be disappeared in the late afternoon. This can be assigned to the low level of incident solar radiation and shadow from the roof overhang.

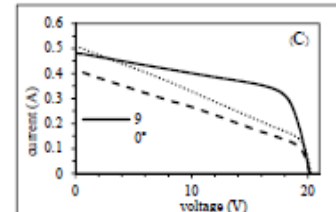
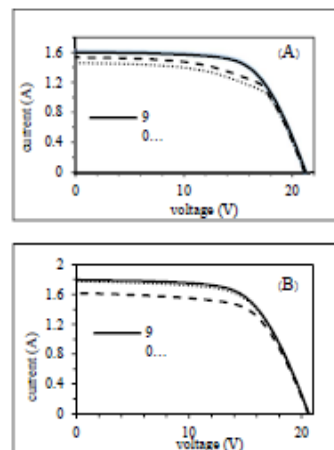


Figure 5: Current voltage characteristic of the PV window louver positioned at a different angle and measure at (A) 9.00, (B) 12.00 and (C) 15.00.

Table 3 displays the electrical properties of the PV window louver. Each number represents the average value over the day of testing (from 8.00-16.00). The efficiency of the panel was found to be in the range of 5-7.4% depending on the angle of the louver. The efficiency of the PV louver is relatively lower compared to typical solar panels available in the market. This might be related to the production process since our PV louvers were constructed using the low-tech procedures. The field factor (FF) was determined to be 0.57-0.65. The FF implied the quality of the solar panel and the value is lower than 1 because of the presence of the internal resistance of the panel.

Table 3: Electrical properties of the PV window louvers.

Angle (°)	I_{max} (A)	V_{max} (V)	FF	Efficiency (%)
0	0.94	15.13	0.57	5.06
18	1.08	16.38	0.645	5.55
90	1.04	15.77	0.62	7.4

Figure 6 shows the incident solar radiation profile on the PV window louvers. It can be clearly seen that the angle of the louvers affects the incident solar radiation. The amount of incident solar radiation depends directly on the position of the sun in sky. The incident solar radiation increased in the morning as the sun moving high up in the sky until noon where the peak value was seen. The peak solar intensity for louver angle of 0°, 18° and 90° was measured to be 960 W/m², 1,060 W/m² and 630 W/m², respectively. The incident solar radiation then reduced and, at about 14.00, the abrupt reduction was observed. This was because part of the louvers were covered by the shadow from the roof overhang. In the experiment, light detector was placed in the middle of the louver and it was not



affected by the overhang shadow in the morning. In the afternoon, however, the shadow from roof overhang grows and eventually the light detector was covered by it. During the time of testing, positioning the louvers at the angle of 18° provided the highest incident solar radiation throughout the day.

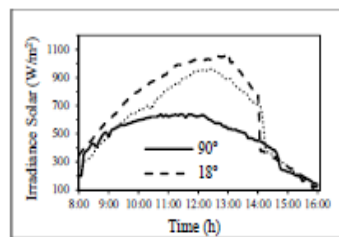


Figure 6: Incident solar radiation on the PV window louver positioned at a different angle.

Figure 7 shows the amount of output power for each PV window louver position. It can be seen that the electrical characteristic of the PV window louver changes with the position of the louver, time and area of roof overhang shadow. The generated power increased from 10-15 W in the early morning to about 22-25 W at noon. The power dropped rapidly after 12.30 and the panel generated almost no power after 16.00. The maximum power occurred from 10.00-12.00 when the louver angle is 18° and 90°. The result from Figure 7 seems to be contradicted to that from Figure 6 and this can be explained by the position of silicon light detector used to measure the incident solar intensity and the roof overhang shadow area. During the experiment, it was observed that the roof overhang shadow area on the louver positioning at 18° was largest and that positioning at 90° was lowest. Therefore, both panel can generate a similar amount of power throughout the morning even though the solar intensity on the louver at 18° was higher. As the sun was setting, the shadow area became larger for all condition and ultimately it covered almost all of the louver area (at about 14.00) and hence lower output power production from each louver was observed. The total electrical energy generated over a day from each louver can be found from the area under the curve of Figure 7. Here, the number represents the amount of energy per unit area of the solar cell. Positioning the angle of the louver at 18° offered the maximum amount of electrical energy of 0.29 kWh/m² while

the angle of the louver at 0° provided the lowest one of 0.255 kWh/m².

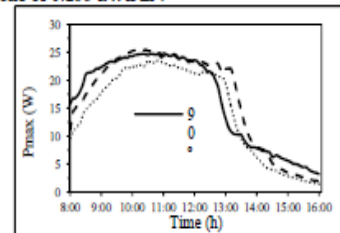
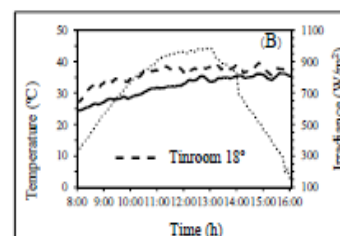
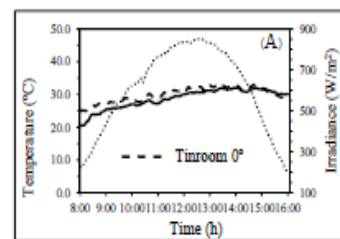


Figure 7: Output power from PV window louver positioned at 0°, 18° and 90°.

Figure 8A-C display the temperature profile both inside and outside the room when the angle of the louver was varied from 0° to 90°. It can be seen that the temperature inside the room was higher than the ambient in every louver angle. When the louvers were fully opened (Figure 8A), the temperature inside the room was relatively closed to the ambient temperature implying maximum air ventilation. The average temperature was found to be 30 °C and 29 °C for the inside and ambient temperature, respectively, with the average solar radiation of 600 W/m². The temperature difference between inside and ambient becomes greater when the louvers were fixed at a larger angle. The average temperature difference of 4 °C and 11 °C was observed for the louver angle of 18° and 90°, respectively.



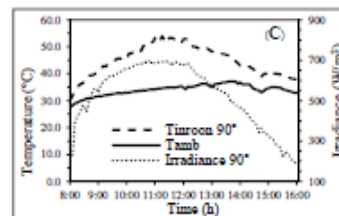


Figure 8: Temperature profile over the day inside and outside the room for the angle of the PV window louvers at (A) 0°, (B) 18° and (C) 90°.

It was clearly seen that the maximum temperature difference occurs during noon. Positioning the louver at 18° (Figure 8B) provides moderately air ventilation to the room and therefore the temperature inside the room remains just above that of the ambient. Completely close the louver (Figure 8C) prevents air ventilation to the room. The absorbed heat cannot escape from the room so the maximum temperature difference is seen.

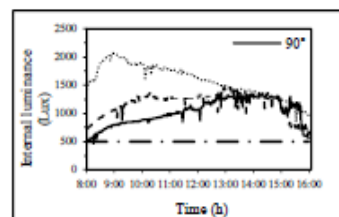


Figure 9: Luminance profile over the day inside the room for various PV window louver angles.

Figure 9 reveals the internal luminance profile for each PV window louver position compared to the standard luminance requirement for office room (500 Lux). The maximum internal luminance occurs when the louvers were fully opened (0°). Lower luminance level was recorded when the louver angle was increased. Each PV window louver position provides the internal luminance well above the standard requirement and no artificial light was required during the testing period.

5 CONCLUSIONS

The investigation of using home-made semi-transparent PV window louver with

building was carried out for various positions of louver angles. Electrical properties as well as temperature and luminance profile inside the room were closely monitored over several days of testing. It was found that positioning the louver at the angle of 18° offered the maximum amount of electrical energy of 0.29 kWh/m². At this condition, the temperature difference between inside the room and ambient was only 4 °C and the luminance profile was found to be higher than that of the standard requirement for typical office room. This ensures that no artificial light is needed inside the room. Therefore, it can be concluded that fixing the louver angle at 18° offers the optimum condition for practical utilization.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the scholarship from School of Renewable Energy, Maejo University.

REFERENCES

- ASFOUR, O. 2015. Natural ventilation in buildings: An overview.
- BODART, M. & DE HERDE, A. 2002. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings*, 34, 421-429.
- CHO, J., YOO, C. & KIM, Y. 2012. Effective Opening Area and Installation Location of Windows for Single Sided Natural Ventilation in High-rise Residences. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 11, 391-398.
- EVOLA, G. & POPOV, V. 2006. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 38, 491-501.
- GROUP, S. 13.november.2018. Building integrated and Attached Photovoltaics.
- HARMATI, N. & MAGYAR, Z. 2015. Influence of WWR, WG and Glazing Properties on the Annual Heating and Cooling Energy Demand in Buildings. *Energy Procedia*, 78, 2458-2463.
- MARKVART, T. & CASTAÑER, L. 2003. Chapter IA-1. Principles of Solar Cell Operation.



The 1st International Conference on Smart Community Development
in the Asia Pacific (ISCAP2020)

- MIYAZAKI, T., AKISAWA, A. & KASHIWAGI, T. 2005. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. *Renewable Energy*, 30, 281-304.
- NG, P. K., MITHRARATNE, N. & KUA, H. W. 2013. Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings. *Energy and Buildings*, 66, 274-281.
- PENG, C., HUANG, Y. & WU, Z. 2011. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and Buildings*, 43, 3592-3598.
- SACHT, H. & LUKIANTCHUKI, M. A. 2017. Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. *Procedia Engineering*, 196, 972-979.
- VIESSMANN 2015. Mechanical ventilation systems.
- WASFI, M. 2011. Solar Energy and Photovoltaic Systems. *JRSE*.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	phetdavanh Ladthavong
เกิดเมื่อ	18 January 1995
ประวัติการศึกษา	2002 - 2007 Houaykhone Elementary School in Vapi District, Saravanh Province 2007 - 2014 Houaykhone High School in Vapi District, Saravanh Province 2014 - 2018 Bachelor of Industrial Engineering Department at National University of Laos, Vientiane, Laos

