

การศึกษาศมรณะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบรับแสงสองด้าน



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

การศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบรับแสงสองด้าน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบรับแสงสองด้าน

นเรนทร์ฤทธิ กันทะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

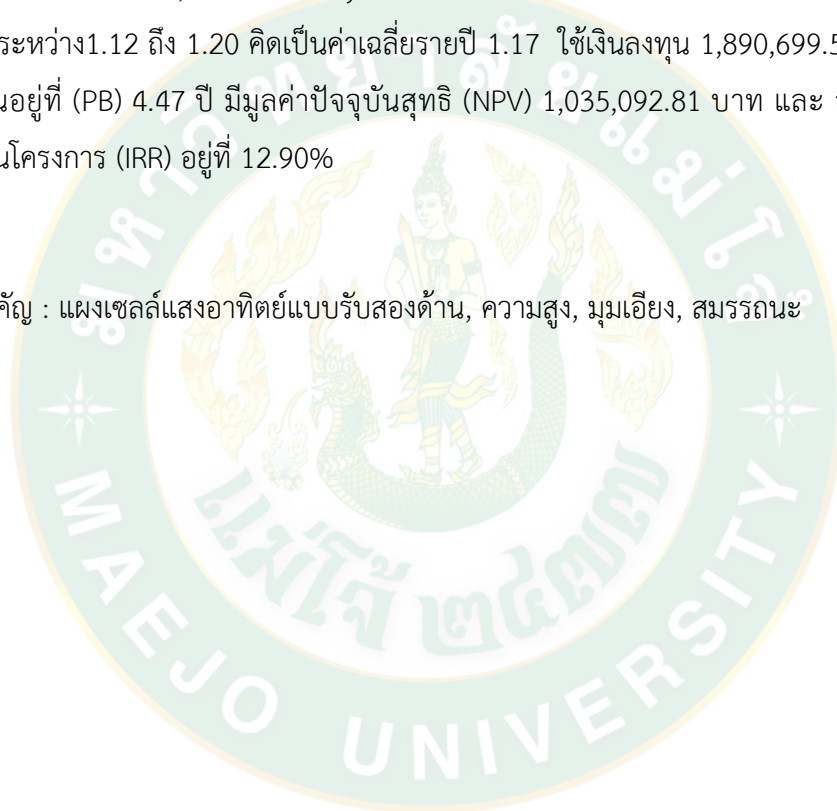
| | |
|----------------------|------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง | การศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน |
| ชื่อผู้เขียน | นายนเรนทร์ฤทธิ กันทะ |
| ชื่อปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านโดยการทดสอบหาพื้นผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน รวมทั้งความสูง และมุมติดตั้ง ซึ่งแผงที่ใช้ในการทดสอบเป็นชนิด Monocrystalline แบบ Haft Cut Cell ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 430 W ในส่วนแรกทำการทดสอบพื้นผิวที่มีอัตราการสะท้อนแสงสูงสุด โดยทำการติดตั้งแผงมุมเอียง 18° หันไปทางทิศใต้ และมีความสูงจากพื้นถึงขอบล่างของแผงเท่ากับ 1.00 m ข้อมูลในการทดลองถูกบันทึกตั้งแต่ 9.00 น. – 16.00 น. ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พื้นผิวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 4 พื้นผิว ได้แก่ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $31-37^\circ\text{C}$ อัตราการสะท้อนแสงหรือ Albedo ของ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า มีค่าเท่ากับ 0.22 0.53, 0.26, และ 0.30 ตามลำดับ พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวมีอัตราการสะท้อนแสงสูงสุดส่งผลทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 354.67 W และมีค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 20.51% สำหรับพื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวหญ้า และพื้นผิวดิน แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้ 319.08 W, 308.75 W, และ 304.00 W ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 18.12%, 18.35%, 18.57% ตามลำดับ จากนั้นในส่วนที่ 2 ทำการทดสอบหาความสูงจากพื้นผิว และมุมในการติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน โดยติดตั้งบนพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว จากศึกษาพบว่า ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m มุม 15° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 361.29 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 21.82% มุม ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 723.79 – 831.05 W/m^2 และ ค่ารังสีสะท้อนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 383.74 – 498.65 W/m^2 อุณหภูมิสภาพแวดล้อมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $26.9 - 29.1^\circ\text{C}$ โดยความสูง มุมในการติดตั้ง ที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ มุม 15° ที่ความสูง 1.50 m ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สามารถรับแสงได้ดีที่สุดในการทดสอบ ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วปัจจัย

ที่มีผลต่อสมรรถนะผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมากที่สุดคือรังสีสะท้อนจากพื้นผิวที่มีอัตราการสะท้อนแสง (Albedo) สูง และความสูงจากพื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อปริมาณการรับรังสีแสงสะท้อน จากนั้นนำผลการทดสอบดังกล่าวมาสร้างสมการทำนายค่าพลังงานไฟฟ้า ในการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้ารายปีโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจำลองการติดตั้งระบบบนหลังคาอาคาร ศูนย์กีฬาภุณญาภิเชษรัชการที่ 9 โซน A มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยใช้พื้นที่ 534 m² ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 430 W จำนวน 124 แผง ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 115,502.33 kWh/year โดยสมรรถนะของระบบ (Performance Ratio: PR) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.12 ถึง 1.20 คิดเป็นค่าเฉลี่ยรายปี 1.17 ใช้เงินลงทุน 1,890,699.50 บาท ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ (PB) 4.47 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,035,092.81 บาท และ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อยู่ที่ 12.90%

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับสองด้าน, ความสูง, มุมเอียง, สมรรถนะ



| | |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Title | ELECTRICAL PERFORMANCE STUDY OF BIFACIAL PV MODULE |
| Author | Mr. Narenrit Kantha |
| Degree | Master of Engineering in Renewable Energy Engineering |
| Advisory Committee Chairperson | Assistant Professor Dr. Sarawut Polvongsri |

ABSTRACT

The research studied the power generation performance of bipolar photovoltaic modules by testing the surface effect on power generation efficiency of Bifacial PV Monocrystalline half cut cell type, rated power 430 W installed the height from the floor to the bottom edge of the panel was 1.00 m. by installing an 18° angled panel facing south. The experimental data were recorded from 9:00 a.m. to 4:00 p.m. at the Renewable Energy School Maejo University. The surfaces used in the study consisted of 4 surfaces: concrete surfaces; White painted concrete surfaces, soil surfaces and grass surfaces, Albedo is 0.22, 0.53, 0.26 and 0.30 respectively The study found that the Albedo of the surface has a significant effect on the power generation efficiency of the solar panel. The White painted concrete surface had the highest reflectance rate and resulted in the solar panel producing the highest power on average and the highest efficiency in electricity generation. Furthermore, the study found that the height from the surface of the panel and the installation angle also affect the power generation efficiency of the solar panel. The most effective height and installation angle were 1.50 m and 15°, respectively, which were the optimum light-receiving conditions in the test. The study created an equation to predict the electric energy value and used a mathematical model to calculate the annual energy cost for economic analysis. Using the research results, the study simulated the system installation on the roof of the Kanchanaphisek Rama 9 Sports Center Building, Zone A, Maejo University, with an area of 534 m² and 124 Bifacial photovoltaic modules with a maximum power of 430 W. The simulation resulted in

an electricity generation of 115,502.33 kWh/ year, with a performance ratio (PR) between 1.12 and 1.20, calculated as an annual average of 1.17, an investment cost of 1,890,699.50 baht, payback period (PB) of 4.47 years, Net Present Value (NPV) of 1,035,092.81 baht, and the Internal Rate of Return (IRR) of 12.90%.

Keywords : Bifacial PV, Height, Tilt, Performance



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ พลวงษ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำแนวทางในการดำเนินการศึกษาวิจัย รวมถึงการให้กำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร อาสนคำ ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการสอบ และให้คำแนะนำในการแก้ไขเพื่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Energy and Environmental Research Unit : SEEU) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ สถานที่ สำหรับการทำวิจัย รวมถึงทุนสนับสนุนโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2562

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโทในครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ หัวหน้าส่วนงาน รวมทั้ง เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้กำลังใจและคอยสนับสนุน ช่วยเหลือตลอดมา

นเรนทร์ฤทธิ์ กันทะ

สารบัญ

| | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ซ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| วัตถุประสงค์..... | 5 |
| ขอบเขตการวิจัย..... | 5 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 6 |
| ตำแหน่งของดวงอาทิตย์..... | 6 |
| ชนิดรังสีอาทิตย์..... | 8 |
| การสะท้อนของรังสี..... | 9 |
| เซลล์แสงอาทิตย์..... | 11 |
| เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV)..... | 12 |
| ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์..... | 15 |
| การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์..... | 19 |
| ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... | 23 |
| การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 26 |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 29 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย | 33 |
| อุปกรณ์การทดสอบ..... | 33 |
| วิธีการดำเนินการวิจัย | 37 |
| บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง | 48 |
| ผลของสภาพพื้นผิวที่มีต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน..... | 48 |
| ผลของมุม และความสูงต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน | 56 |
| การสร้างสมการทำนาย | 68 |
| การสร้างแบบจำลองกรณีติดตั้งบนอาคารและการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์..... | 70 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 76 |
| สรุปผลการวิจัย | 76 |
| ข้อเสนอแนะ..... | 78 |
| บรรณานุกรม..... | 79 |
| ภาคผนวก..... | 83 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 143 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 1 โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนใหม่และมาตรการอนุรักษ์พลังงาน | 2 |
| ตารางที่ 2 ค่า albedo ของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ | 10 |
| ตารางที่ 3 เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล..... | 34 |
| ตารางที่ 4 ภาวะโหลดไฟฟ้า | 36 |
| ตารางที่ 5 ค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน และอุณหภูมิ | 48 |
| ตารางที่ 6 ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ทดสอบในแต่ละชนิด..... | 52 |
| ตารางที่ 7 ความเข้มแสง กับ power ที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นผิว..... | 55 |
| ตารางที่ 8 ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า | 56 |
| ตารางที่ 9 ข้อมูลค่ารังสีสะท้อน..... | 56 |
| ตารางที่ 10 อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... | 57 |
| ตารางที่ 11 ค่าประสิทธิภาพตามสมการที่ 21 | 67 |
| ตารางที่ 12 รายละเอียดการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน..... | 75 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 1 การติดตั้งแผง Bifacial แบบแนวตั้ง | 3 |
| ภาพที่ 2 การติดตั้งแผง Bifacial แบบแนวนอน | 4 |
| ภาพที่ 3 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง | 7 |
| ภาพที่ 4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง | 7 |
| ภาพที่ 5 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า | 8 |
| ภาพที่ 6 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก | 8 |
| ภาพที่ 7 การสะท้อนของรังสี Albedo | 10 |
| ภาพที่ 8 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ | 12 |
| ภาพที่ 9 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน | 13 |
| ภาพที่ 10 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านแบบ PERC+ | 14 |
| ภาพที่ 11 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านแบบ PERT | 15 |
| ภาพที่ 12 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ | 16 |
| ภาพที่ 13 เซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ แถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์ | 17 |
| ภาพที่ 14 ความแตกต่างระหว่างแผง Monofacial PV และ Bifacial PV | 18 |
| ภาพที่ 15 การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน | 19 |
| ภาพที่ 16 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ | 20 |
| ภาพที่ 17 I-V curve ของ เซลล์แสงอาทิตย์ในอุณหภูมิต่ำ เมื่อได้รับแสง | 21 |
| ภาพที่ 18 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบุจุดทำงานที่เหมาะสม | 21 |
| ภาพที่ 19 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ | 24 |
| ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพของโฟโตคอนเวอร์ชันของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นฟังก์ชันของแสงอาทิตย์ตก กระทบการแผ่รังสี | 24 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 21 พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรในการเพิ่มประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ bifacial | 32 |
| ภาพที่ 22 แผง Bifacial PV สำหรับใช้ในการทดสอบ..... | 33 |
| ภาพที่ 23 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินการวิจัย | 37 |
| ภาพที่ 24 การออกแบบโครงสร้างรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน | 38 |
| ภาพที่ 25 การติดตั้งบนโครงสร้างเหล็ก..... | 38 |
| ภาพที่ 26 ชนิดของพื้นผิวที่ใช้ในการทดสอบ..... | 39 |
| ภาพที่ 27 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ที่มุม 15° ที่ความสูง 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m.. | 41 |
| ภาพที่ 28 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ที่มุม 18° ที่ความสูง 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m.. | 42 |
| ภาพที่ 29 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ที่มุม 21° ที่ความสูง 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m . | 43 |
| ภาพที่ 30 ไดอะแกรมแสดงตำแหน่งเครื่องมือวัด ในการเก็บข้อมูล | 44 |
| ภาพที่ 31 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน อุณหภูมิแผง | 45 |
| ภาพที่ 32 อุปกรณ์ตรวจอุณหภูมิแวดล้อม..... | 45 |
| ภาพที่ 33 การติดตั้งเครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้..... | 46 |
| ภาพที่ 34 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละพื้นผิว | 50 |
| ภาพที่ 35 ค่า Albedo ในแต่ละพื้นผิว | 51 |
| ภาพที่ 36 ค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละสภาพพื้นผิว..... | 54 |
| ภาพที่ 37 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละพื้นผิว | 55 |
| ภาพที่ 38 ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m มุมเอียง 15° 18° และ 21° | 59 |
| ภาพที่ 39 ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m มุมเอียง 15° 18° และ 21° | 61 |
| ภาพที่ 40 ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m มุมเอียง 15° 18° และ 21° | 63 |
| ภาพที่ 41 ค่าประสิทธิภาพของแผง Bifacial PV ในแต่ละความสูงจากพื้นผิว และ มุมเอียง | 64 |

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 42 | ค่า Energy Yield DC ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m..... | 65 |
| ภาพที่ 43 | ค่า Energy Yield DC ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m..... | 65 |
| ภาพที่ 44 | ค่า Energy Yield DC ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m..... | 66 |
| ภาพที่ 45 | ค่าสมรรถนะ Performance Ratio : (PR) DC | 67 |
| ภาพที่ 46 | ค่าประสิทธิภาพตามสมการที่ 21..... | 68 |
| ภาพที่ 47 | ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์ | 69 |
| ภาพที่ 48 | แสดงผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ | 70 |
| ภาพที่ 49 | การจำลองการติดตั้งบนหลังคาอาคาร | 71 |
| ภาพที่ 50 | ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ | 71 |
| ภาพที่ 51 | ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ที่มุม 15° | 72 |
| ภาพที่ 52 | ค่าอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่ | 72 |
| ภาพที่ 53 | ค่า Energy Yield (Reference Yield (Yr), Final Yield (Yf)) | 73 |
| ภาพที่ 54 | ค่าสมรรถนะของระบบ Performance Ratio ในแต่ละเดือน | 73 |
| ภาพที่ 55 | การทำนายค่าพลังงานเป็นรายเดือนตลอดทั้งปี..... | 74 |

บทที่ 1 บทนำ

ในปัจจุบันการดำเนินชีวิตประจำวันล้วนแต่มีพลังงานไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องแทบจะทุกกิจกรรม ซึ่งทำให้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีต่อการดำรงชีวิต และความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสวนทางกับทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เช่น ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน ที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้จำเป็นต้องหาพลังงานทดแทนที่จะนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น พลังงานหมุนเวียนรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ จึงเป็นอีกทางเลือกที่จะนำมาเป็นพลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้า และที่สำคัญเป็นพลังงานสะอาด ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยในหลาย ๆ ประเทศเห็นความสำคัญและมีการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมากขึ้นรวมทั้งประเทศไทย โดยได้ส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน (AEDP) ตามประเภทพลังงานงานเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ลม ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งมีการรับซื้อเป็นรายปีตามนโยบายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (กระทรวงพลังงาน, 2562) เพื่อให้สอดคล้องกับศักยภาพพลังงานหมุนเวียนคงเหลือของประเทศ และรองรับพฤติกรรมของผู้ใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

พลังงานทดแทนอีกรูปแบบที่มีศักยภาพ และเหมาะสมกับประเทศไทยคือพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร สังเกตได้จากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใน พ.ศ. 2559 มีการติดตั้งรายปี 1,026 MW กำลังการผลิตติดตั้งสะสม 2,446 MW และใน พ.ศ. 2560 เป็นการติดตั้งรายปี 251 MW กำลังการผลิตติดตั้งสะสม 2,697 MW (กระทรวงพลังงาน, 2561) ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังการผลิตสะสมเพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งบนพื้นดิน (Solar Farm) ติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) นอกจากนี้ยังมีการส่งเสริมให้ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เอง และขายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้แก่ การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้มาตรการส่งเสริมการรับซื้อไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ที่เรียกว่า Feed-in Tariff (FIT) เพื่อจูงใจให้ผู้ที่สนใจลงทุนติดตั้ง นอกจากนี้ คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) ได้มีมติดำเนินโครงการพลังงานแสงอาทิตย์โซลาร์ภาคประชาชน ปีละ 100 MW และต่อเนื่องไปเป็นระยะเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี 2562 เป็นต้นไป ดังตารางที่ 1 โดยให้ผู้ใช้พลังงานประเภทครัวเรือนขนาดเล็กเป็นผู้ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เอง ก่อนที่จะนำส่วนที่เหลือใช้ส่งขายให้การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยติดตั้งครัวเรือนละไม่เกิน 10 kWp และอัตรารับซื้อไฟฟ้าเป็นไปตามประกาศของ คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ที่ 2.20 บาท/kWh ภายใต้อายุสัญญาซื้อขายไฟฟ้า 10 ปี (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2562)

ตารางที่ 1 โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนใหม่และมาตรการอนุรักษ์พลังงาน

| พลังงานหมุนเวียน/อนุรักษ์พลังงาน | กำลังการผลิตตามสัญญา (MW) | กำลังผลิตที่เชื่อถือได้ (MW) |
|---------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| พลังงานแสงอาทิตย์ | 10,000 | 4,250 |
| ชีวมวล | 3,376 | 2,296 |
| ก๊าซชีวภาพ | 546 | 325 |
| พลังงานแสงอาทิตย์ทุ่นลอยน้ำร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ | 2,725 | 1,158 |
| พลังงานลม | 1,485 | 189 |
| ขยะอุตสาหกรรม | 44 | 26 |
| มาตรการอนุรักษ์พลังงานด้านไฟฟ้า | - | 4,000 |
| รวม ณ ปี 2580 | 18,176 | 12,244 |

ที่มา: กระทรวงพลังงาน, (2562)

หมายเหตุ:

1. ทั้งนี้จะมีการดำเนินโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ (โซลาร์ภาคประชาชน) ปีละ 100 MW เป็นระยะเวลา 10 ปี
2. ควรดำเนินการจัดหาพลังงานหมุนเวียนบนพื้นฐานของการแข่งขันที่ไม่เกินอัตราเฉลี่ยขายส่ง (Grid Parity)

เดิมการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่ได้ได้รับความนิยมแพร่หลายมากนัก เนื่องจากราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ยังมีราคาแพง แต่ในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ มีราคาถูกลงอย่างมากตามเทคโนโลยีในการผลิต จึงเริ่มได้รับความนิยม และ ประชาชนทั่วไปเริ่มหันมาติดตั้ง แผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) เพิ่มขึ้น หรือ แม้กระทั่งหน่วยงานราชการ หน่วยงานเอกชน ได้เริ่มนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เองเพื่อลดภาระค่าใช้จ่าย ด้านค่าไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ปัจจุบันเป็นแบบรับแสงเพียงด้านเดียว (Monofacial PV) มีอยู่หลายชนิด เรียกโดยภาพรวมว่า เทคโนโลยีรูปแบบเดิม(Conventional) ซึ่งหากต้องการผลิตพลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก จำเป็นต้องติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากตามกำลังการผลิตที่ต้องการ สิ่งหนึ่งที่ส่งผลต่อปัจจัยการลงทุนติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือสภาพพื้นที่ ซึ่งหากเป็นลักษณะการติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าจำนวนมาก เช่น

โซล่าฟาร์ม จำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากขึ้นอยู่กับการผลิตติดตั้ง และพื้นที่ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การเกษตร เนื่องจากเป็นพื้นที่โล่ง ไม่ค่อยมีแหล่งกำเนิดเงาที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้พื้นที่การเกษตรลดลงตามจำนวนโรงไฟฟ้าประเภทนี้ที่เกิดขึ้น เหตุผลอีกประการหนึ่งราคาซื้อขายพื้นที่เริ่มมีราคาสูงขึ้น ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการลงทุนสำหรับการติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ก็ไม่สามารถติดตั้งได้จำนวนมาก ด้วยข้อจำกัดด้านต่างๆ เช่น พื้นที่การรับน้ำหนักของโครงสร้างหลังคา และข้อจำกัดด้านกฎหมายต่าง ๆ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างมากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผงมากยิ่งขึ้น เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่รับแสงได้สองด้าน (Bifacial PV) ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานต่อกำลังของแผงสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบอื่น ๆ และยังสามารถติดตั้งในแนวตั้งฉากกับพื้นได้ ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 1 ทำให้ช่วยลดพื้นที่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์และในหลายประเทศได้มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial มาใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ แพร่หลายมากขึ้น เช่น ติดตั้งร่วมกับอาคารอยู่อาศัย ภาพที่ 2 (ก) จนกระทั่ง ทำในรูปแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ภาพที่ 2 (ข)



(ก) การติดตั้งแผงในแนวตั้งฉากเป็นแนวรั้ว

(ข) การติดตั้งแผงในแนวตั้งฉากแบบโรงไฟฟ้า

ภาพที่ 1 การติดตั้งแผง Bifacial แบบแนวตั้ง

ที่มา: (ก) <https://www.hannovermesse.de/files/files/001/media/webkit-newshub-migration/media-2019/hmi-id09-010br-oekostromsaar-02-2.jpg>

(ข) <https://solaron.am/en/tag/two-sided-bifacial-photoelectron-module/>



(ก) การติดตั้งในพื้นที่อยู่อาศัย

(ข) การติดตั้งแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ภาพที่ 2 การติดตั้งแผง Bifacial แบบแนวนอน

ที่มา: (ก) <https://www.thesolarnerd.com/blog/what-are-bifacial-solar-panel>

(ข) <https://pvbuzz.com/electricity-bifacial-solar-cells-generate/>

จากงานวิจัยในต่างประเทศที่มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial เช่น Hyeonwook (2018) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial กับแผง Monofacial แบบติดตามดวงอาทิตย์ ในประเทศเกาหลีใต้ ทำการเปรียบเทียบให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยสมรรถนะทางไฟฟ้า ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial สูงกว่า แผง Monofacial PV แบบติดตามดวงอาทิตย์ (ภายใต้เงื่อนไข Albedo ที่มีอัตราการสะท้อนแสงสูง) Baumann (2018) ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในแนวตั้งบนหลังคาแบบทรงแบนที่มีการจัดสวนบนหลังคา ในประเทศสวีเดน โดยทำการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial แนวตั้งขนาด 20 cell บนพื้นผิวที่ให้การสะท้อนแสงสูง เปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Monofacial ขนาด 72 cell ที่ติดตั้งตามมาตรฐาน จากการทดสอบพบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ให้ประสิทธิภาพสูงเกือบเท่ากับ Monofacial โดยมีค่าต่างกันเพียง 1.40% ซึ่งจากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมานั้น เห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial มีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง สามารถลดข้อจำกัดได้ในหลาย ๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการติดตั้งและพื้นที่การติดตั้ง ซึ่งในประเทศไทยยังมีการศึกษาเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial น้อย และยังไม่มีความรู้เกี่ยวกับสมรรถนะและประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในการติดตั้งตามการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ จึงเป็นที่มาของการศึกษาสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน Bifacial PV เพื่อนำข้อมูลที่ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน
2. เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน
3. เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

ขอบเขตการวิจัย

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบเป็นแผงแบบรับแสงสองด้าน (Bifacial) ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 430 W/แผง
2. พื้นผิวที่ทำการทดสอบได้แก่ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวดิน พื้นผิวหญ้า และพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว
3. ใช้มุมเอียงในการทดสอบ 3 มุมคือ มุม 15°, 18° และ 31°
4. ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านล่างที่ 3 ระดับ คือ 0.50 m, 1.00 m, 1.50 m
5. ตัวแปรที่จะใช้ทำการศึกษาได้แก่ สมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้า และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
6. ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน
2. ได้ทราบตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน
3. ได้ทราบถึงความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ในการคำนวณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบต่าง ๆ ทั้งอยู่นอกบรรยากาศโลกและพื้นผิวโลก จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะพิจารณาว่าท้องฟ้าเป็นครึ่งหนึ่งของวงกลม ที่เรียกว่า ทรงกลมท้องฟ้า โดยมีผู้สังเกตเป็นศูนย์กลาง เนื่องจากท้องฟ้ามีขนาดใหญ่มาก หรือมีรัศมีเป็นอนันต์ (Infinity) ดังนั้นการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จึงใช้มุมเพียง 2 มุม หรือใช้ส่วนโค้ง ของทรงกลมท้องฟ้า 2 ส่วนโค้ง ก็สามารถระบุตำแหน่งได้ในงานด้านรังสีอาทิตย์สามารถบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้ 2 ระบบ ดังนี้ (เสริม, 2560)

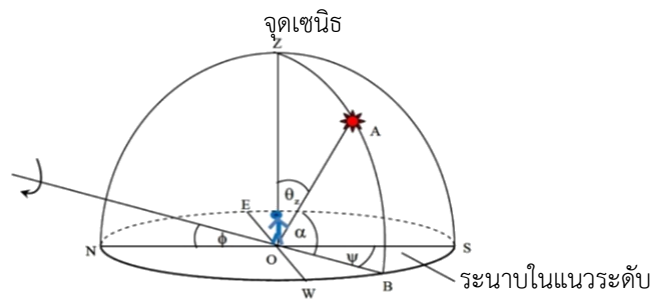
ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง (Horizontal System) ระบบนี้จะอาศัยมุม 2 มุม ในการระบุตำแหน่งของดวงอาทิตย์ดังนี้ มุมอาซิมุท (Azimuth, ψ) เป็นมุมที่วัดจากแนวทิศใต้ (OS) ไปยังภาพฉาย (Projection) ของเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ โดยมีค่าเป็นบวกถ้าเงาดังกล่าวอยู่ซีกตะวันออก และเป็นลบถ้าอยู่ซีกตะวันตกของท้องฟ้า หรือ $-180^{\circ} \leq \psi \leq 180^{\circ}$ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi} \quad \text{สมการที่ 1}$$

มุมอัลติจูด (Altitude, α) หรือมุมเงยเป็นมุมระหว่างเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ (OA) กับภาพฉายของเส้นตรงดังกล่าวบนระนาบที่ในแนวระดับ ซึ่งจะมีค่าจาก 0° ถึง 90° สำหรับมุมระหว่างเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ (OA) กับเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับจุดเซนิธ (OZ) จะเรียกว่า มุมเซนิธ (Zenith Angle, θ_z) ซึ่งนิยมใช้บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์เช่นกัน โดยที่ $\theta_z = 90 - \alpha$

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad \text{สมการที่ 2}$$

ดังภาพที่ 3 แสดงถึงการบอกตำแหน่งโดยใช้ระบบระนาบในแนวระดับอ้างอิง มีข้อดี คือ เข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อด้อยคือ ค่ามุมอาซิมุท และมุมอัลติจูด จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก และเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปีด้วย



ภาพที่ 3 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง
ที่มา: เสริม (2560)

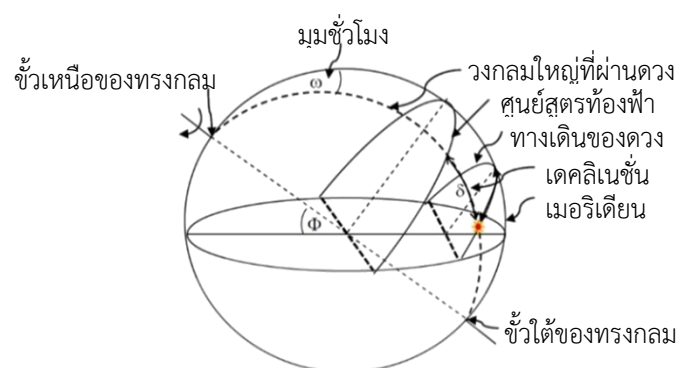
ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (Equatorial System) เนื่องจากระนาบของทางเดินของดวงอาทิตย์บนทรงกลมท้องฟ้าจะขนานกับระนาบของศูนย์สูตรท้องฟ้า โดยในช่วงเวลา 1 วัน ระนาบของทางเดินของดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถถือว่าคงที่ได้ ดังนั้นตามภาพที่ 4 ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิงจะบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยการลากวงกลมใหญ่ (great circle) จากขั้วหนึ่งของทรงกลมท้องฟ้าผ่านดวงอาทิตย์ไปยังอีกขั้วหนึ่ง และใช้ระยะห่างเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับศูนย์สูตรท้องฟ้าบนวงกลมใหญ่นี้ดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ 1 เพื่อบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และเรียกตัวแปรนี้ว่า เดคลิเนชัน (Declination) สำหรับตัวแปรที่ 2 จะใช้มุมบนผิวทรงกลมท้องฟ้าระหว่างวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์ และเส้นเมริเดียน โดยจะเรียกมุมนี้นี้ว่า มุมชั่วโมง (Hour Angle, ω) (เสริม, 2560)

$$\omega = 15(12 - \text{LST})^\circ$$

สมการที่ 3

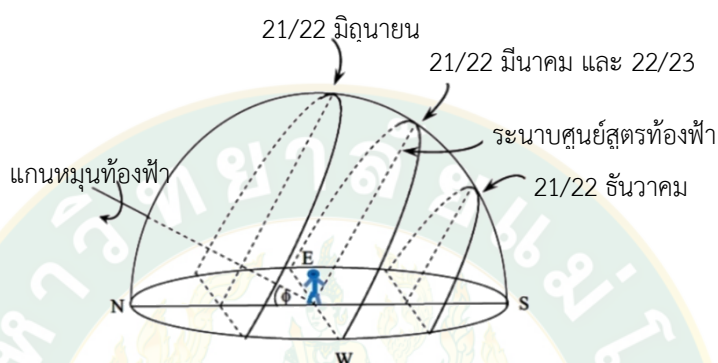
โดยที่

LST คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (ชม/นาที)



ภาพที่ 4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง
ที่มา: เสริม (2560)

สำหรับวันที่ 20 หรือ 21 มีนาคม และ วันที่ 22 หรือ 23 กันยายน ดวงอาทิตย์จะอยู่ในแนวศูนย์สูตรของโลก โดยในวันที่ 20 หรือ 21 มีนาคม และ 22 หรือ 23 กันยายน เราจะเห็นดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ในแนวศูนย์สูตรท้องฟ้าและในวันที่ 21 หรือ 22 มิถุนายน ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปเหนือสุดเมื่อเทียบกับศูนย์ท้องฟ้า สำหรับในวันที่ 21 หรือ 22 ธันวาคม ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนไปได้ต่ำสุดเมื่อเทียบกับศูนย์สูตรท้องฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 5 (เสริม, 2560)

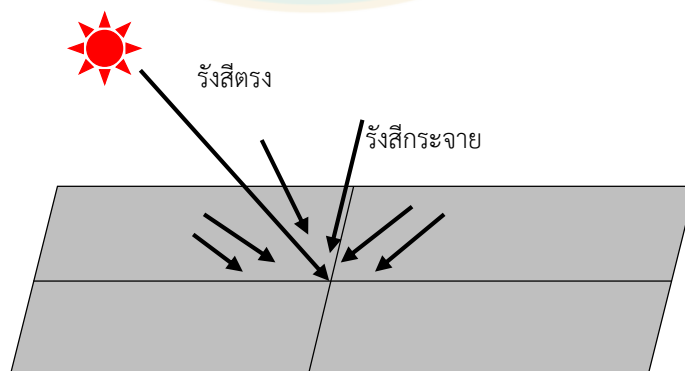


ภาพที่ 5 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า

ที่มา: เสริม (2560)

ชนิดรังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์เมื่อเคลื่อนผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก รังสีดังกล่าวจะถูกโมเลกุล อากาศ ฝุ่น ละออง และเมฆกระเจิงและดูดกลืน โดยรังสีที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลก ซึ่งจะเรียกว่ารังสีตรง (Direct Radiation) ส่วนรังสีที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่างๆ ของ บรรยากาศจะเรียกว่า รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) และเรียกผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายว่ารังสีรวม (Global Radiation) ดังที่แสดงในภาพที่ 6 (เสริม, 2560)



ภาพที่ 6 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก

ที่มา: เสริม (2560)

รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) เป็นรังสีที่มีจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกบนผิวรับแสงด้วยทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์ เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางแน่นอนและมีลำแสงขนานจึงสามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้

รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนและกระจาย โดยก๊าซและฝุ่นละอองรวมถึงวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าจึงไม่สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีกระจายได้

รังสีรวม (Total หรือ Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น (ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ โดยกรณีผิวรับเป็นพื้นเอียง (Incline Plane) รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากพื้นโลก อาคารบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากส่วนที่สะท้อนกลับจากพื้นโลก ในกรณีนี้เรียกว่า Total Radiation แต่กรณีผิวรับแสงเป็นพื้นแนวราบ (กระทรวงพลังงาน, 2558)

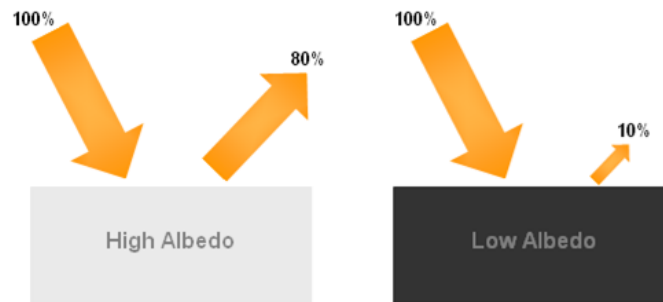
รังสีที่ขณะเวลาหนึ่ง (Irradiance) หรือความเข้มรังสีอาทิตย์ หมายถึง พลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ 1 หน่วย ที่ขณะเวลาหนึ่ง มีหน่วย $\text{MJ}/\text{m}^2\text{-sec}$ หรือ W/m^2 (เสริม, 2560)

รังสีในช่วงเวลา (Irradiation) หมายถึงปริมาณของพลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนด ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นช่วงเวลา 1 ชั่วโมงจะเรียกว่ารังสีรายชั่วโมง (Hourly Irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็น $\text{MJ}/\text{m}^2\text{-hour}$ หรือ กรณีที่เป็นช่วงเวลา 1 วัน ก็จะเรียกรังสีรายวัน (Daily Irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็น $\text{MJ}/\text{m}^2\text{-day}$

รังสีในมุมตัน (Radiance) หรือ เรเดียนรังสีอาทิตย์ หมายถึง พลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ที่เดินทางเข้ามาใน 1 หน่วยมุมตัน ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับมุมกันมีหน่วยเป็น $\text{MJ}/\text{m}^2\text{-sr}$

การสะท้อนของรังสี

การสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบกับวัตถุและถูกสะท้อนจากผิวพื้นโลกและบรรยากาศได้รับพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์เพียงร้อยละ 65 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 35 ถูกสะท้อนกลับเข้าสู่อวกาศ การสะท้อนแตกต่างกันไปตามพื้นผิวต่าง ๆ คิดเป็นร้อยละของรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบ เมื่อรังสีนั้นตกถึงพื้นผิว เมฆเป็นตัวการสำคัญที่สุดในการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ อัตราส่วนรังสีสะท้อนคิดเป็นร้อยละของรังสีที่สะท้อนกลับไปเรียกว่า “ค่า Albedo” คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงมากับรังสีสะท้อนกลับออกไป ดังแสดงในภาพที่ 7 (ดวงพร, 2536)



ภาพที่ 7 การสะท้อนของรังสี Albedo

ที่มา : <http://climate.ncsu.edu/edu/albedo>

โดยการหาค่า Albedo นั้น คำนวณได้จาก (SolarWorld, 2016)

$$\text{Albedo} = \frac{\text{Reflected Light}}{\text{Incident Light}}$$

สมการที่ 4

ตารางที่ 2 ค่า albedo ของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ

| พื้นผิว | Albedo |
|--------------------------------------------------|-------------|
| Corrugated roof (หลังคาลอนคู่) | 0.1 - 0.15 |
| Colored paint (ทาสี) | 0.15 - 0.35 |
| Trees (ต้นไม้) | 0.15 - 0.18 |
| Asphalt (แอสฟัลต์) | 0.05 - 0.2 |
| Concrete (คอนกรีต) | 0.25 - 0.7 |
| Grass (หญ้า) | 0.25 - 0.3 |
| Ice (น้ำแข็ง) | 0.3 - 0.5 |
| Red/Brown roof tiles (กระเบื้องหลังสีแดง/น้ำตาล) | 0.1 - 0.35 |
| Brick/Stone (อิฐ/หิน) | 0.2 - 0.4 |
| Oceans (มหาสมุทร) | 0.05 - 0.1 |
| Old snow (หิมะเก่า) | 0.65 - 0.81 |
| White paint (สีขาว) | 0.5 - 0.9 |
| Fresh Snow (หิมะใหม่) | 0.81 - 0.88 |

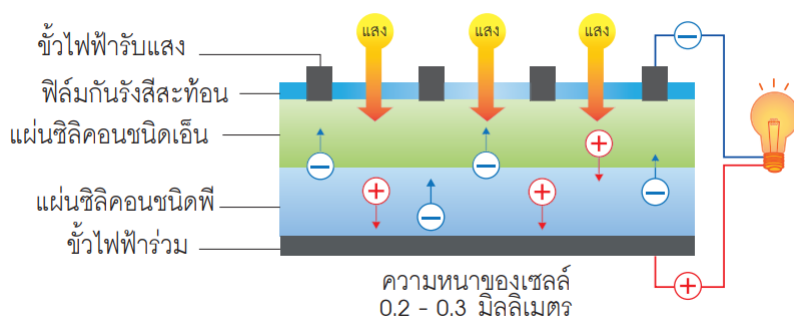
ที่มา: Y. Kotak BEng MSc et al, (2015)

เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) หรือที่มีอีกชื่อหนึ่งว่า Photovoltaic (PV) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1954 ณ ห้องปฏิบัติการของ Bell Telephone ซึ่งขณะนั้นได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้เป็นตัวกักเก็บพลังงานของดาวเทียมสื่อสาร เครื่องคิดเลข และนาฬิกา เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกันเพื่อเพิ่มกำลังงานให้มากพอเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรม อาคารพาณิชย์ และที่อยู่อาศัย เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรก ผลิตขึ้นจากสารซิลิคอน มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบและประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ ในยุคต่อมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่เรียกว่า “ฟิล์มบาง” ซึ่งทำจากซิลิคอนแบบไม่เป็นผลึกหรือแร่ธาตุอื่น ๆ เนื่องจากชั้นสารกึ่งตัวนำที่บาง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ยืดหยุ่น และสามารถนำไปประกอบเข้าเป็นส่วนหนึ่งของกรอบอาคารได้เป็นอย่างดี ในยุคต่อมา ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากวัสดุหลายชนิดนอกจากซิลิคอน เช่น โพลีเมอร์ พลาสติกที่เป็นตัวนำ และเซลล์สีย้อมไวแสงหรือ ดายเซนซีไทซ์ เป็นต้น รวมถึงการนำเลนส์รวมแสงมาใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ได้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น (กระทรวงพลังงาน, 2558)

เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ผลิตขึ้นโดยการสร้างรอยต่อพีเอ็น รอยต่อที่เกิดขึ้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type) มาเชื่อมต่อกัน อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจากฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าไปในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่หลุม (hole) ที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เสมือนว่าแพร่กระจายในทิศทางตรงกันข้าม ในบริเวณแคบๆ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) นั้น แรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างประจุลบและประจุบวกที่สะสมในแต่ละฝั่งทำให้เกิดศักย์ภายใน (built-in potential) ขึ้นต่อต้านการแพร่ของประจุจากทั้งสองฝั่ง การแพร่จะดำเนินไปจนกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองฝั่งอยู่ระดับเดียวกันจึงเข้าสู่สมดุลทางไฟฟ้าโดยจะไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นอีกที่บริเวณแคบๆ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็นที่มีการเคลื่อนที่ของประจุจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลนี้เรียกว่าบริเวณการพร่อง (depletion region) รอยต่อพี-เอ็น เป็นหลักการเบื้องต้นของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ของแผ่นซิลิคอนบริสุทธิ์ที่เจือ (dope) ด้วยธาตุฟอสฟอรัส (P) และโบรอน (B) เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น (n-type) และชนิดพี (p-type) ตามลำดับ แผ่นซิลิคอนความหนาประมาณ 0.2-0.3 มิลลิเมตร สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตวอลเทจิก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสง ตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ ที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) มีพลังงานสูงขึ้น

และหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบนำไฟฟ้าทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ (กระทรวงพลังงาน, 2557) ซึ่งแสดงในภาพที่ 8

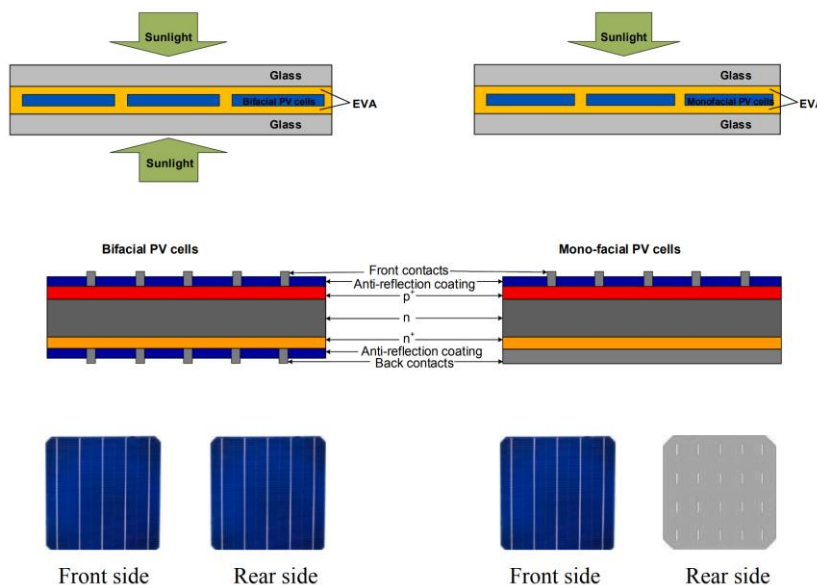


ภาพที่ 8 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: สารานุกรมพลังงาน (2557)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV)

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบด้านเดียวต่างกันที่บริเวณด้านหลังของเซลล์ ตามแสดงในภาพที่ 9 ในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (PV) นั้น มีหลายแบบ แต่ส่วนใหญ่จะใช้ซิลิคอนชนิด p ที่มีหน้าสัมผัสด้านหลังอะลูมิเนียมที่ทึบแสง เรียกว่าพื้นผิวด้านหลังอะลูมิเนียมเป็นเซลล์สนาม (Al-BSF) เนื่องจากสามารถรับเฉพาะแสงที่เข้าสู่เซลล์จากด้านหน้าด้านข้างได้ แต่ในเซลล์ชั้นสูงมากกว่านี้ยังมีการออกแบบเซลล์เพิ่มเติม เช่น ตัวส่งสัญญาณแบบพาสซีฟและเซลล์ด้านหลัง (PERC), ตัวปล่อยแบบพาสซีฟด้านหลังแบบกระจายทั้งหมด (PERT), ตัวส่งสัญญาณแบบพาสซีฟด้านหลังแบบกระจายเฉพาะที่ และซิลิคอน Heterojunction ที่มีชั้นบาง 15 ชั้น (HIT) ที่สามารถใช้ Back Contact ที่แตกต่างกันไปในแต่ละแบบ เซลล์ชั้นสูงเหล่านี้จะเป็นเซลล์สองหน้าที่สามารถรับแสงจากด้านหลังและด้านหน้าได้เช่นกัน โดยภายในแต่ละแบบนี้ อาจมีการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความไวต่อการสั่นสะเทือน ความทนทานต่อสภาพอากาศ และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละสถานที่ แต่ก็ต้องมีการใช้วัสดุและกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อน และต้องการความเชี่ยวชาญทางเทคนิคสูง ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงขึ้นเล็กน้อย แต่ก็มีการพัฒนาเพื่อลดต้นทุน (IEA, 2021)

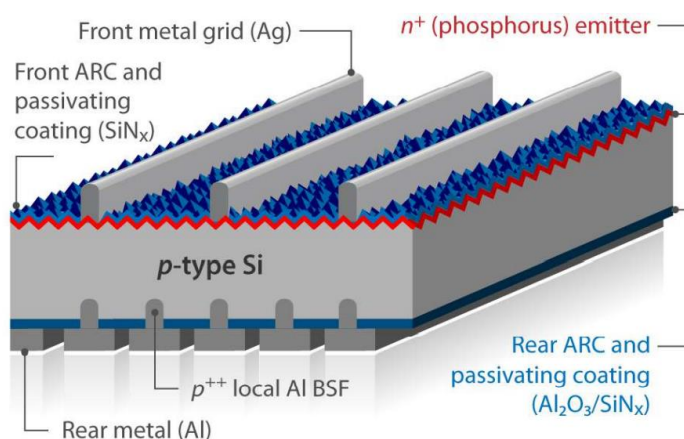


ภาพที่ 9 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

ที่มา: Gu et al. (2019)

เซลล์แสงอาทิตย์ แบบ PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้งานได้ดีในสภาวะแสงอ่อน โดยเซลล์ PERC จะมีการพัฒนาจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ เช่น Back Surface Field (BSF) และ Passivated Emitter Rear Locally Diffused (PERL) ซึ่งมีข้อจำกัดในการสะท้อนแสงและสูญเสียการสะสมไฟฟ้าจากพื้นผิวหลังเซลล์ โดยเทคโนโลยี PERC จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการใส่หน้าสัมผัสโลหะเฉพาะที่และบางส่วนที่ด้านหลังเซลล์ ซึ่งจะช่วยให้สะท้อนแสงกลับไปยังพื้นผิวหน้าและช่วยให้สะสมไฟฟ้าดีขึ้น ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพและผลิตรถยนต์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์อื่นๆ เซลล์ PERC ด้านเดียวกำลังเข้ามาแทนที่เซลล์ Al-BSF ในอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง การผลิตเซลล์ PERC ก็ได้มีความก้าวหน้ามากในช่วงสองสปีทที่ผ่านมา ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นมากสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ในวงการอุตสาหกรรม โดยตอนนี้ PERC ก็เป็นเทคโนโลยีที่นิยมแพร่หลาย ภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างของเซลล์ PERC+ สองหน้า ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและผลิตขึ้นโดยใช้กระบวนการ PERC หรือ Passivated Emitter and Rear Cell Technology ที่เป็นกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำกว่าเซลล์แบบอื่นๆ โดยการแปลง PERC แบบหน้าเดียวให้เป็นแบบสองหน้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีขึ้นโดยปกติแล้วการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ผลิตภัณฑ์ POCl_3 และ SiN_x ใน

กระบวนการผลิต และในการแปลง PERC แบบสองหน้านี้จะต้องเปลี่ยนการพิมพ์สกรีน Al ด้านหลังของเซลล์ด้วยการออกแบบหน้าจอบ Al finger grid โดยต้องใช้ระยะนิ้วที่เหมือนกับการเปิดหน้าสัมผัสเลเซอร์รูปเส้นเฉพาะที่ระยะพิชชี่เพื่อให้มีการเหลื่อมกันของนิ้ว Al และการเปิดหน้าสัมผัสด้วยเลเซอร์ผ่านก่องทุ่ด้านหลัง (โดยทั่วไปคือ AlO_x/SiN_y) เพื่อช่วยลดการใช้ซิลิโคนจาก 1.0 กรัมเป็น 0.2 กรัมต่อเวเฟอร์ ทั้งนี้ Al-BSF ก่อตัวขึ้นระหว่างกระบวนการเผาโดย Al สัมผัสโดยตรงกับเวเฟอร์ซิลิคอน (IEA, 2021)

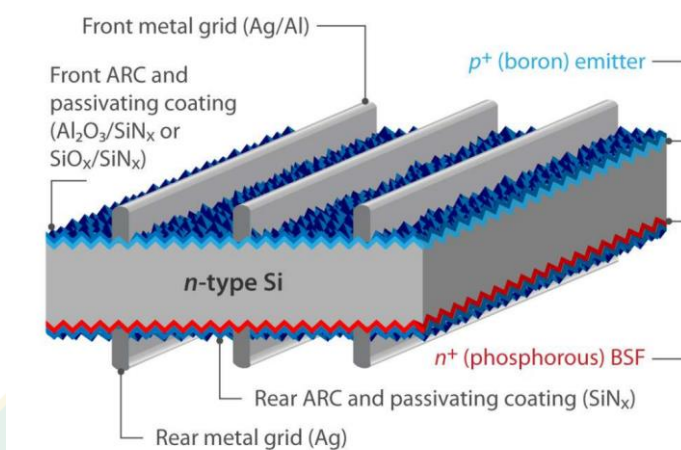


ภาพที่ 10 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านแบบ PERC+

ที่มา: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf

จากภาพที่ 11 แสดงให้เห็นถึงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ PERT หรือ Passivated Emitter Rear Totally Diffused มีหลายวิธีที่สามารถนำมาใช้ได้ เช่น ดำเนินการสองกระบวนการแพร่ที่ตามมาในเตาหลอมด้วย $POCl_3$ สำหรับสร้างพื้นผิวด้านหน้า $n+$ และ BBr_3 (หรือ BCl_3) สำหรับสร้างพื้นผิวด้านหลัง $p+$ ที่ใช้ยาสลบในกระบวนการวิธีที่สองคือการฝากแหล่งกำเนิดการแพร่กระจายบนพื้นผิวและดำเนินการบำบัดด้วยอุณหภูมิสูงในภายหลังเพื่อส่งเสริมสารเจือปนในการแพร่กระจายไปยังแผ่นเวเฟอร์ และวิธีที่สามคือใช้การฝังไอออนและการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับการกระตุ้นสารเจือปน เพื่อสร้างพื้นผิวด้านหน้า $n+$ และพื้นผิวด้านหลัง $p+$ ในเวเฟอร์โดยวิธีการสร้างพื้นผิวด้านหน้า $n+$ หรือด้านหลัง $p+$ นั้นมีการใช้สารเจือปนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นชนิด (n-type) หรือพีชนิด (p-type) ของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการใช้ชั้นไดอิเล็กทริก เช่น Al_2O_3/SiN_x หรือ SiO_2/SiN_x ใน

การเคลือบพื้นผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของเซลล์แสงอาทิตย์ (IEA, 2021)



ภาพที่ 11 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านแบบ PERT

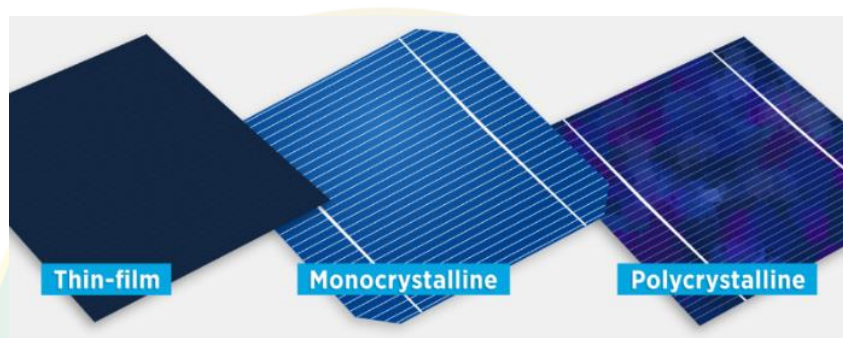
ที่มา: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการพัฒนาเพื่อผลิตเชิงพาณิชย์ จนถึงปัจจุบันมีดังนี้

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film) เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นผลึก (Amorphous Silicon) ภาพที่ 8(ก) มีลักษณะเป็นฟิล์มบางหนาประมาณ 0.5-1.0 Micron มีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบาง ตัวฟิล์มมีน้ำหนักเบา ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณ 7-10% เทคโนโลยีแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ได้มีการพัฒนาเป็นรูปแบบที่เรียกว่า Amorphous Triple Junction ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่รวบรวมข้อดีทั้งของซิลิคอนแบบผลึกและไม่เป็นผลึกเข้าไว้ด้วยกัน ตัวกรอบไม่จำเป็นต้องใช้กระจก ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon หรือ Mono c-Si) ภาพที่ 8(ข) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับการพัฒนาในยุคแรก ๆ โดยผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Continuous Crystal Lattice) และมีความหนาประมาณ 200-300 μm มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 14-18% ถือว่า มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยสูงกว่าเซลล์ซิลิคอนประเภทอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องใช้กระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนมากกว่า จึงทำให้เซลล์ประเภทนี้มีราคาสูงกว่าเซลล์ซิลิคอนประเภทอื่น ๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนหลายผลึก (Multi Crystalline Silicon หรือ Multi c-Si)

ภาพที่ 8(ค) มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนชนิดหลายผลึกหรือชนิดที่เรียกว่า ผลึกรวม (Polycrystalline Silicon) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบาง มีความหนาประมาณ 180-220 μm มีราคาปานกลาง โดยมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยประมาณ 12-15% ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แบบรังผึ้ง (Honeycomb Texture Cell) ขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 18-19% (กระทรวงพลังงาน, 2558)



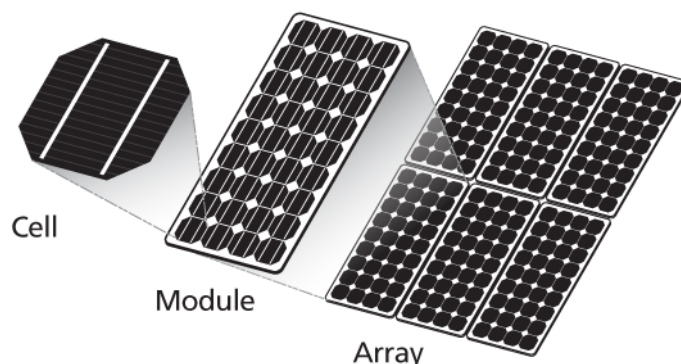
(ก) เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นผลึก (ข) ซิลิคอนผลึกเดี่ยว (ค) ซิลิคอนหลายผลึก

ภาพที่ 12 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/solar-photovoltaic-cell-basics>

แผงเซลล์แสงอาทิตย์

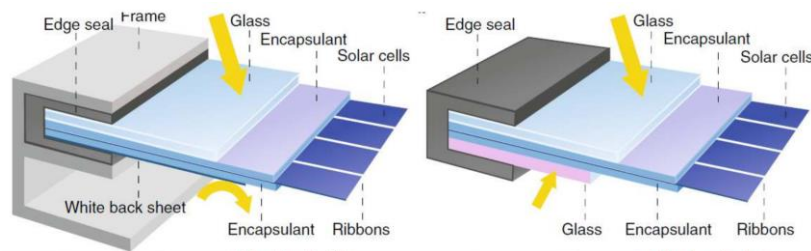
ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ จะนำเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์มาต่อกันทางไฟฟ้า (หากต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะเป็นการต่อแบบอนุกรม ในขณะที่หากต้องการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะเป็นการต่อขนาน โดยส่วนใหญ่จะเป็นการต่ออนุกรม) และประกอบโครงสร้างทางกล ซึ่งเรียกรวมกันว่า “แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module)” และหากต้องการผลิตกำลังไฟฟ้าปริมาณที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น ก็จะเป็นการนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกันทางไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า “แถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Array)” เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 13 หากต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของระบบโดยรวมจะเป็นการต่อแถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์ ในลักษณะอนุกรมกัน และหากต้องการเพิ่มกระแสไฟฟ้าของระบบโดยรวมจะเป็นการต่อแถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์ ในลักษณะที่ขนานกัน (กระทรวงพลังงาน, 2558)



ภาพที่ 13 เซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ แถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์
ที่มา: <http://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx>

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรังแสงสองด้าน

การออกแบบ Bifacial Module และ Monofacial Module แตกต่างกันอย่างมากระหว่างกัน แสดงให้เห็นดังภาพที่ 14 Monofacial Module มีขนาดใหญ่กว่าและมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า Bifacial Module เนื่องจากเซลล์สองหน้าสามารถผลิตได้โดยใช้กระบวนการที่ซับซ้อนขึ้น ทำให้เป็นที่นิยมในการใช้ในโมดูลแบบบางแผ่นที่มีน้ำหนักเบาและความพิเศษความแตกต่างระหว่างโลหะตารางกริดใน Monofacial Module และสองหน้าส่งผลให้เกิดการเคลือบป้องกันแสงสะท้อนที่ด้านหลัง Bifacial Module เนื่องจาก Bifacial Module มักมีความไวต่อแสงสูงกว่า เนื่องจากมีการใช้ชั้นที่มีส่วนสูงของสารกึ่งแสง และมีการออกแบบเซลล์ที่ช่วยให้มีประสิทธิภาพของการจับแสงที่สูงขึ้นในบางกรณีของ Bifacial Module กริดที่ใช้ไม่ใช่ Al-grid แต่อาจเป็น Ag-grid หรือกริดที่ผสมผสานระหว่างโลหะต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ นอกจากนี้ Bifacial Module มักจะมีวงจรทางไฟฟ้าที่ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากมีการออกแบบเซลล์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้มากขึ้น ฝาครอบด้านหลังประกอบด้วยกระจกหรือแผ่นหลังโพลีเมอร์ใส เมื่อใช้ Backsheets โมดูลจะต้องรองรับด้วยโครงอะลูมิเนียมอย่างไรก็ตาม ในบางกรณี ความแข็งแรงของโมดูลกระจกทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้เฟรม และชอบถูกปิดผนึกไว้เท่านั้น (IEA, 2021)



(ก) Monofacial PV Module

(ข) Bifacial PV Module

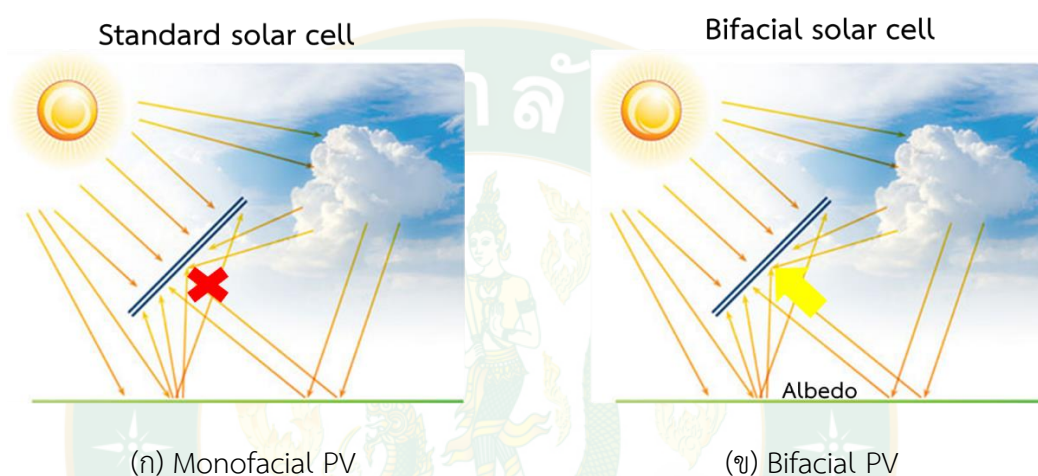
ภาพที่ 14 ความแตกต่างระหว่างแผง Monofacial PV และ Bifacial PV

ที่มา: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf

การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV)

จากภาพที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง Bifacial Module และ Standard Module Bifacial Module มีความสามารถในการจับรังสีแสงดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะที่มีแสงสะท้อนจากพื้นผิวโดยรอบ เพราะ Bifacial Module สามารถดูดรังสีแสงจากทั้งด้านหน้าและด้านหลังของโมดูลได้ ซึ่งส่งผลให้ Bifacial Module มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานมากกว่าโมดูลมาตรฐานในสถานะที่มีการสะท้อนแสง นอกจากนี้ Bifacial Module ยังมีข้อดีเพิ่มเติมในเรื่องของการออกแบบและการติดตั้ง โดยเฉพาะเมื่อติดตั้งบนพื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงมาก ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการติดตั้งและเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานได้มากขึ้นการใช้ Bifacial Module สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและผลผลิตของระบบได้มากขึ้นจาก Monofacial Module เพราะสามารถซึมซับและใช้งานพลังงานจากการสะท้อนแสงบนพื้นผิวด้านหลังของโมดูลได้เพิ่มเติม ซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วยการเพิ่มพลังงานของระบบให้สูงสุดด้วยการแผ่รังสีแบบกระจายแสงแบบสะท้อนจากพื้นใน Bifacial Module สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ถึง 30% จาก Bifacial Gain และ 10% จากการสะท้อนเพิ่มเติมที่ด้านบนนอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากการสะท้อนแสงของพื้นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของ Bifacial Module โดยพื้นผิวด้านหลังและด้านหน้าของ Bifacial Module จะมีการสะท้อนแสงที่ต่างกัน โดยพื้นผิวด้านหลังจะมีการสะท้อนแสงเพิ่มเติมจากพื้นซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้อีกด้วยนอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพของโมดูลสองหน้า เช่น สภาพอากาศ เวลาในแต่ละวัน ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ และอื่น ๆ ซึ่งทั้งหมดนี้ Monofacial Module จะมีการออกแบบให้สามารถรับแสงจากด้านหน้าเท่านั้น แต่เซลล์ที่มีสองหน้าจะมีการออกแบบให้สามารถรับแสงจากด้านหน้าและด้านหลังได้ทั้งคู่การใช้เซลล์

แสงอาทิตย์ที่สามารถรับแสงจากด้านหน้าและด้านหลังนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้มากขึ้น โดยเซลล์แบบนี้จะสามารถใช้แสงโดยตรงจากด้านหน้าและกระจายแสงจากด้านหน้าและด้านหลังได้ ทำให้มีการดูดซับแสงมากขึ้น และเพิ่มพลังงานได้มากขึ้น โดยสามารถเพิ่มผลผลิตของระบบได้ถึง 40% ในบางกรณี โดยการใช้ Bifacial Module ยังช่วยลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการสะท้อนแสงด้วยดังนั้นการ Bifacial Module จะเป็นทางเลือกที่ดีเมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ และลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นได้อย่างมาก (Johan, 2018)



ภาพที่ 15 การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

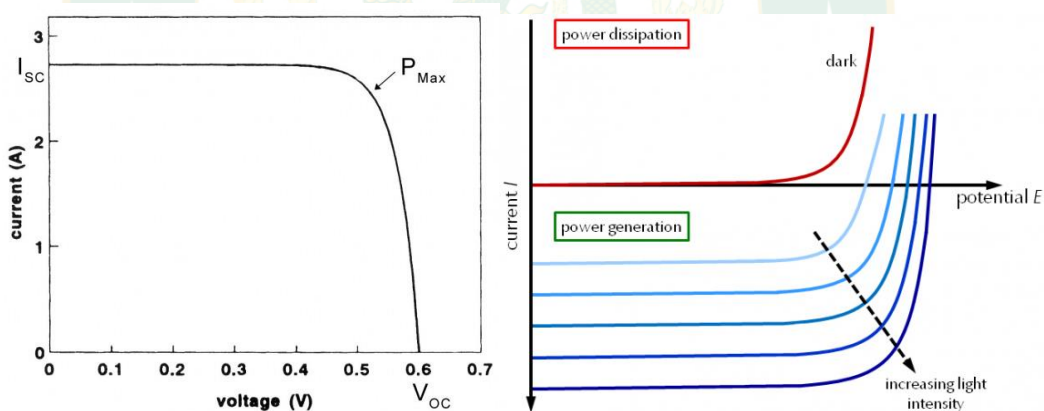
ที่มา: https://www.researchgate.net/figure/Side-view-of-duopitch-solar-PV-carpot_fig2_334033388

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เสร็จสมบูรณ์แล้วกระบวนการทดสอบจะต้องดำเนินการตามข้อกำหนดมาตรฐาน การทดสอบดังกล่าวสามารถแบ่งเป็น ทางกายภาพและวิธีการทางไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์สองประการสำหรับการทดสอบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตที่หลากหลายเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ (วัตถุประสงค์เพื่อการวิจัย) และเพื่อให้แน่ใจว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์พร้อมใช้งาน (วัตถุประสงค์เชิงพาณิชย์) กระบวนการทดสอบสามารถทำได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องมีการศึกษา การทดสอบที่สำคัญที่สุดคือ คุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (เส้นโค้ง I-V) ตั้งแต่สามารถระบุคุณสมบัติทางไฟฟ้า ที่สำคัญรวมถึงกระแสที่สภาวะลัดวงจร (Short circuit current : I_{sc}), แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit

current : V_{oc}), กระแสไฟฟ้าที่ใช้งาน, แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน (V_m), ฟิวแพคเตอร์ (FF) และ ประสิทธิภาพ (η) (อัครินทร์, 2560)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟ (I-V Curve) ซึ่งแกน Y หมายถึงกระแสไฟฟ้า (I) และแกน X หมายถึงแรงดันไฟฟ้า (V) เป็นการพล็อตระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้น กระแสที่ไหลผ่านในขณะที่ไม่ได้มีแสงตกกระทบเรียกว่า กระแสมืด (Dark Current) หรือ กระแสไฟฟ้าวรัว (Leakage Current) และกราฟเส้นโค้ง I-V สามารถแสดงให้เห็น ภาพที่ 11 เมื่อมีแสงอาทิตย์กระแสไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงให้เห็นในภาพที่ 16 (ใต้แกน x) เส้นโค้ง I-V สามารถแสดงค่าบวก ภาพที่ 16(ก) หรือค่าลบ ภาพที่ 16(ข) ได้ ดังนั้น กราฟเส้นโค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ เกิดจากผลรวมของแรงดันหรือกระแส ในสถานะที่ไม่มีแสงตกกระทบ จากกราฟ I-V สามารถทำนายได้ว่า I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อลัดวงจร (short circuit) เมื่อแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร (open circuit) เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น I_{sc} และ V_{oc} เพียงแค่นำมาจากค่า y และ x บนกราฟเส้นโค้ง I-V



(ก) ค่าบวก

(ข) ค่าลบ

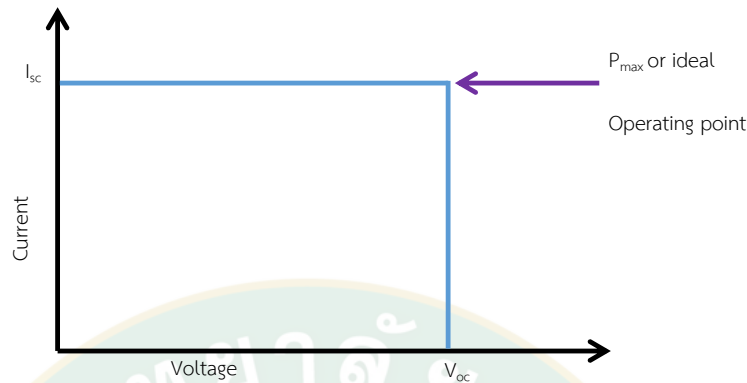
ภาพที่ 16 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (ก) <https://www.gamry.com/application-notes/physechem/dssc-dye-sensitized-solar-cells/>

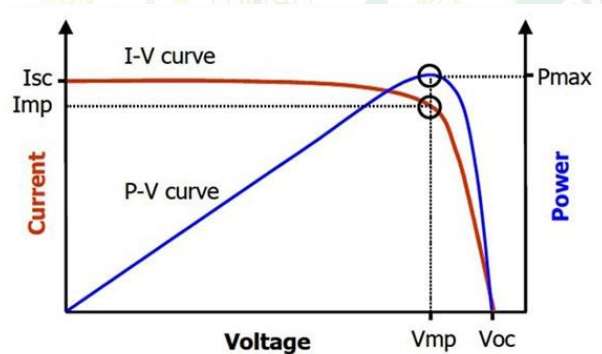
(ข) <https://www.itacanet.org/a-guide-to-photovoltaic-panels/photovoltaic-pv-cells/>

เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ กราฟเส้นโค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งแสดงในภาพที่ 17 ค่าพลังงานสูงสุดที่ผลิตได้ของ I_{sc} และ V_{oc} คือกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ในความเป็นจริง รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะเบี่ยงเบนเป็นเส้นโค้ง โดยระดับความเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ กราฟเส้นโค้ง I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นรูป

สี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 18 ผลลัพธ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับผลคูณของ I_{sc} และ V_{oc} คือ กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจากเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 17 I-V curve ของ เซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ เมื่อได้รับแสง
ที่มา: อัครินทร์ (2560)



ภาพที่ 18 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบุจุดทำงานที่เหมาะสม

ที่มา: <https://www.powerelectronics.com/solar-cells-power-part-2-power-extraction/>

ประโยชน์อีกประการหนึ่งของกราฟเส้นโค้ง I-V คือสามารถใช้กำหนดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ช่วงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ระหว่าง $V = 0$ และ V_{oc} กระแสที่ตรงกันอยู่ระหว่าง $I = 0$ และ I_{sc} กระแส และ แรงดัน ที่สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P = I \times V$$

สมการที่ 5

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

สมการที่ 5 เป็นการหาพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้ง I-V ที่ได้พลังงานสูงสุด ซึ่งเป็นจุดพื้นที่ใต้เส้นโค้งที่ดีที่สุดอยู่ ซึ่งสามารถทำได้โดยการแยกความแตกต่างของ P เทียบกับ V และทำให้เป็นศูนย์ (หาจุดสูงสุด) ภาพที่ 18 แสดงกราฟ เส้นโค้ง I-V ด้วยจุดทำงานที่ดีที่สุด ณ จุดนี้ เมื่อได้รับกระแสสูงสุด (I_m) และแรงดันสูงสุด (V_m) การเข้าถึงเงื่อนไขการทำงานจุดสูงสุด ดังนั้นค่าพลังงานสูงสุดที่สร้างจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_m) คือ

$$P_m = I_m \times V_m \quad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ P_m คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)

I_m คือ กระแสไฟฟ้า ณ จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)

V_m คือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนระหว่าง กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ พลังงานและ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 7 และ 8

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{sun}}} = \frac{I_m \times V_m}{P_{\text{sun}}} \quad \text{สมการที่ 7}$$

$$\eta (\%) = \frac{P_{\max}}{P_{\text{sun}}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 8}$$

เพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องกำหนดค่าพลังงานของดวงอาทิตย์ (P_{sun}) สิ่งที่ต้องทราบคือ ความเข้มแสง (I หรือ H) ของดวงอาทิตย์หน่วยเป็น W/m^2 และพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (A , m^2) วัดหน่วยเป็นตารางเมตร จากนั้นใช้การคำนวณอย่างง่ายเพื่อหาพลังงานที่ได้รับจากสมการที่ 9

$$P_{\text{sun}} = H \times A \quad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ

P_{sun} คือ พลังงานของดวงอาทิตย์ (W)

H คือ ความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ (W/m^2)

A คือ พื้นที่รับแสง (m^2)

นอกจากสะท้อนให้เห็นถึงสมรรถนะเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับ Spectrum ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นการทดสอบ ต้องระวังในการควบคุมเงื่อนไขสภาพแวดล้อมจากการเปรียบเทียบของแต่ละเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบคือ $1,000 \text{ W/m}^2$ (AM 1.5) และที่อุณหภูมิ 25°C

มีหลายพารามิเตอร์ที่สามารถใช้เพื่ออธิบายประสิทธิภาพไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

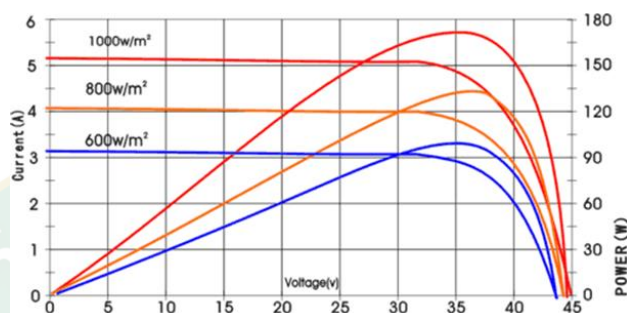
- Short Circuit Current (I_{sc}) คือ กระแสไฟขาออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็น 0 มันคือ เท่ากับ กระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้น
- Open Circuit Voltage (V_{oc}) คือ แรงดันเมื่อกระแสไฟขาออกเป็น 0
- Maximum Operating Current คือกระแสไฟขาออกจากโซลาร์เซลล์ที่จุดทำงานที่ดีที่สุด I_m น้อยกว่า I_{sc}
- แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) คือแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดทำงานที่ดีที่สุด V_m น้อยกว่า V_{oc}
- พลังงาน (P_m) เป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์
- ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานโดยรวม (η) คือความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์ในการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า
- Fill factor (FF) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาว่าคุณภาพของโซลาร์เซลล์เหมาะสม

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในทางปฏิบัติเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถทำงานได้เหมือนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เงื่อนไขสำหรับทดสอบสมรรถนะ ควบคุมตามขั้นตอนมาตรฐาน พารามิเตอร์ดังกล่าวรวมไปถึง ความเข้มแสง อุณหภูมิ และ ความเร็วลม ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการจะแตกต่างจากการวัดในสถานการณ์จริง เมื่อมีการออกแบบระบบ PV จะมีตัวแปรหลายอย่าง เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ มุมดวงอาทิตย์ เงา อุณหภูมิแวดล้อมทางเดินดวงอาทิตย์ เป็นต้น

ในการหาปริมาณของพลังงานสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ จากการทดสอบตามมาตรฐานคือค่าความเข้มแสงอยู่ที่ $1,000 \text{ W/m}^2$ (AM 1.5) แต่ในทางปฏิบัติมีรายงานว่าพลังงานของดวงอาทิตย์ บนโลกโดยเฉลี่ย คือ 170 W/m^2 (ในประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $300\text{-}800 \text{ W/m}^2$) ดังนั้นจึงไม่มีดวงอาทิตย์ที่สามารถทำได้ตามเงื่อนไขทดสอบ ตัวแปรทั้งหมดขึ้นจึงอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึง กระแสลัดวงจร แรงดันไฟฟ้า พีวแพคเตอร์ และ ประสิทธิภาพ โดยในภาพที่ 19 แสดงให้เห็นถึงความเข้มแสงที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามหลักความเป็นจริงพลังงานที่ป้อนเข้าระบบต่ำผลลัพธ์ที่ได้ก็ต่ำเช่นกัน สำหรับเซลล์

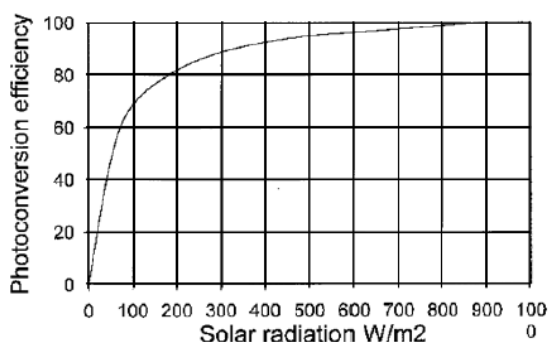
แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงลดลงพลังงานที่ผลิตได้ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงตลอดวันมีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไป ระหว่างค่า 0 ถึง ค่าสูงสุด ที่ระดับแสงน้อยผลกระทบต่อความต้านทานมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กำลังผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลง



ภาพที่ 19 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: <https://electronics.stackexchange.com/questions/152931/how-to-autoregulate-a-tp4056-for-maximum-solar-power-extraction>

แม้ว่าพลังงานที่ผลิตได้สูงสุดจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ แต่สมรรถนะไม่ได้เป็นเช่นนั้น ดังจะเห็นในภาพที่ 20 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความไวต่อปริมาณของแสงอาทิตย์มากเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบ รั้งสีอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 200 W/m^2) เมื่อรั้งสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น (สูงกว่า 500 W/m^2) ในทางกลับกัน สมรรถนะจะลดลงและ เซลล์แสงอาทิตย์ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อรั้งสีอาทิตย์มากกว่า 800 W/m^2 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพจะคล้ายกันในวันที่มีแดด และ วันที่มีเมฆบางส่วน แต่พลังงานขาออกที่ต่ำก็ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงต่ำบนเซลล์ด้วย



ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพของโฟโตคอนเวอร์ชันของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นฟังก์ชันของแสงอาทิตย์ตกกระทบการแผ่รังสี

ที่มา: อัครินทร์ (2560)

ในความเป็นจริงสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยวนั้นสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม การเชื่อมต่อไฟฟ้าที่ให้ผลกระทบอย่างมากต่อการสูญเสียพลังงาน อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานคือ กระแสไม่ตรงกัน เซลล์ที่เชื่อมต่อกันแม้จะมีเทคโนโลยีที่ดีที่สุด ก็ไม่สามารถจะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมือนกัน และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แน่นอน นั้นหมายความว่า เป็นไปไม่ได้ที่กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองที่เหมือนกัน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยเซลล์ขนาดเล็กหลายเซลล์ เชื่อมต่อแบบอนุกรม พบมากที่สุด แผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกจำกัดด้วยเซลล์ที่มีกระแสต่ำสุด (Weak Cell) เซลล์บางเซลล์ทำงานด้วยสมรรถนะสูงสุด แต่เซลล์อื่นอาจไม่ทำงาน ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกจำกัด โดยเซลล์ที่ weak เนื่องจากกระแสไม่ตรงกัน และพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าพลังงานจากเซลล์อื่น

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการทดสอบเพื่อกำหนด watt สูงสุดตามเงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ ($1,000 \text{ W/m}^2$ ที่อุณหภูมิเซลล์ 25°C) ผลข้างเคียงของการเคลือบ PV Panel คือการป้องกันความร้อนไหลออกนอกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลจากการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เกิดการขยายตัวของความร้อน ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของความร้อน อัตราการกระจายจะเพิ่มขึ้นจากปัจจัยทั้ง 2 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10°C ในการกำหนดพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในภาคสนาม จะต้องมีการคำนวณที่อุณหภูมิเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่แน่นอน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมและรังสีอาทิตย์

การคำนวณสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (พีระวุฒิ, 2558)

สมรรถนะของระบบ (Performance Ratio : PR)

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100$$

สมการที่ 10

เมื่อ

Y_f คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Final Yield (kWh)

Y_r คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางทฤษฎี Reference Yield (kWh)

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Reference Yield)

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ

Y_r คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh)

H_i คือ พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)

G_{STC} คือ ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ STC = 1 kW/m²

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array Yield)

$$Y_a = \frac{E_{DC}}{P_o} \quad \text{สมการที่ 12}$$

เมื่อ

Y_a คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh)

E_{DC} คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)

P_o คือ ขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้ง (kWp)

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield)

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_o} \quad \text{สมการที่ 13}$$

เมื่อ

Y_f คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh)

E_{AC} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบไฟฟ้า (kWh)

P_o คือ ขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้ง (kWp)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระยะเวลาคืนทุน ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสม จากการดำเนินงาน มีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (เขาวเรศ, 2551)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{เงินลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิรายปี}} \quad \text{สมการที่ 14}$$

การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนตลอดโครงการ เป็นวิธีการหนึ่ง que แสดงให้เห็นถึงการใชัทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ภายใต้จุดมุ่งหมายหรือความต้องการของสังคม จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ในหลายๆ มิติของการลงทุน เช่น มิติทางด้านการเงิน มิติเศรษฐศาสตร์ มิติทางด้านเทคนิค มิติทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น จุดประสงค์เพื่อทราบความคุ้มค่าที่จะลงทุน ตามหลักการวิเคราะห์เชิงผลได้ผลเสีย (Benefit-cost Analysis) ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบผลประโยชน์ที่จะได้รับจากการลงทุนกับรายจ่ายที่ลงทุนไป (วิชิตา, 2562)

(1) การวิเคราะห์ทางการเงิน (Financial Analysis) กล่าวถึงการวิเคราะห์ทางการเงินว่า จะต้องมีการคำนวณต้นทุนของโครงการ ได้แก่ แรงงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ วัสดุต่างๆ และคาดการณ์ถึงรายรับที่จะเกิดขึ้นจากโครงการ เพื่อนำมาคำนวณเป็นกำไรจากการดำเนินโครงการ แต่เนื่องจากรายรับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรายรับที่เกิดขึ้นในอนาคต ในการคิดรายรับจำเป็นต้องแปลงให้เป็นค่าปัจจุบัน แล้วจึงนำมาหักจากต้นทุนที่ลงไป เพื่อให้ได้ยอดเงินสุดท้ายออกมาเป็น Net Present Value (NPV)

มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (NPV) หมายถึง การประเมินหาผลรวมสุทธิของมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลประโยชน์และกระแสต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุโครงการ โดยการลดค่าด้วยอัตราส่วนลด ซึ่งการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ มีสูตรคำนวณ ดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \quad \text{สมการที่ 15}$$

โดยที่

R_n = รายรับในปีที่ n (Baht)

C_n = รายจ่ายในปีที่ n (Baht)

TIC = ค่าลงทุนในปีปัจจุบันหรือต้นทุนเริ่มแรก (Baht)

i = อัตราดอกเบี้ย (หรืออัตราส่วนลด) (%)

n = ปีของอายุโครงการ (y)

N = อายุของโครงการ (y)

หมายความว่า ถ้ามูลค่าปัจจุบันเป็นของผลตอบแทนสุทธิ (NPV) ที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่า มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์จากการลงทุนมีค่ามากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุน และถ้ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนมีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่า มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์จากการลงทุนมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนจากการลงทุนพอดี ซึ่งทั้งสองกรณีสามารถยอมรับโครงการได้ แต่ถ้าหากมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิมีค่าเป็นลบ แสดงว่า มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์จากการลงทุนมีค่าน้อยกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุน คือ จะเกิดการขาดทุน และไม่สามารถลงทุนได้

(2) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) หมายถึง อัตราที่คิดส่วนลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ (NPV = 0) หรือ หมายถึง อัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนพอดี

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) คืออัตราผลตอบแทนการลงทุนซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount rate) ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

สมการที่ 16

หมายความว่า อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ที่ได้ควรมีค่าสูงเกินกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินฝากประจำของธนาคารพาณิชย์ถัวเฉลี่ยหรือหรือสูงกว่าค่าเสียโอกาสต้นทุนของเงินทุน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Abotaleb and Abdallah (2018) ได้ศึกษาสมรรถนะทางไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ทดสอบในประเทศกาตาร์ โดยทำการเปรียบเทียบมุมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ที่ 22° กับ 90° พื้นผิวสะท้อนเป็นกรวดสีขาว มีขนาดกำลังไฟฟ้าของแผง 225 Wp จากการศึกษพบว่า ผลผลิตทางไฟฟ้าเดือนตุลาคม การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ที่มุม 22° มีค่าเท่ากับ 143 kWh/kWp และ มุม 90° มีค่าเท่ากับ 116 kWh/kWp และจากนั้นได้นำข้อมูลจากการทดลองไปเปรียบเทียบการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าในเดือนพฤศจิกายนการติดตั้งแผงที่ 22° มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าการติดตั้งแผงที่ 90° อนาคตคิดเป็น 14% (A. Abotaleb และ Abdallah, 2018)

Baumann et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการวางแผนผังและประสิทธิภาพติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในแนวตั้งบนหลังคาทรงแบนที่มีการจัดสวนบนหลังคา ในประเทศสวิสเซอร์แลนด์ โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ขนาด 9.09 kWp ด้วยแผงขนาด 20 เซลล์ แบบกระจกสองด้านที่สร้างขึ้นเองเพื่อลดแรงปะทะของลม ติดตั้งในทิศทางตะวันออก - ตะวันตก บนหลังคาทรงแบนที่มีการจัดสวนบนหลังคา โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มแยกตาม Albedo คือพื้นผิวที่มีการปลูกพืชแบบมาตรฐานทั่วไป พื้นผิวที่มีกรวด และพืชใบสีเงิน (มีอยู่ในภูมิภาคเมดิเตอร์เรเนียน) ทำการเปรียบเทียบอ้างอิงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Monofacial ขนาด 72 cell แบบมีแผ่นปิดด้านหลัง ติดตั้งแบบ Stand Alone หันแผงด้านทิศใต้ วัดแบบ Outdoor ผลที่ได้ทั้งปี แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ขนาด 9.09 kWp มีค่า Energy Yield อยู่ที่ 942 kWh/kWp โดยใช้พืชที่มีคุณลักษณะการสะท้อนแสงที่ดีทำให้ Energy Yield เพิ่มขึ้น 17% จาก Green Roof ทั่วไป ผลผลิตการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในแนวตั้งเกือบจะเท่ากับ แผง Monofacial แบบ Stand Alone ติดตั้งด้านทิศใต้ที่ใช้อ้างอิง (น้อยกว่าเพียง 1.4%) (Thomas Baumann. และคณะ, 2018)

Baloch (2017) ได้ประเมินประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ภายใต้เงื่อนไขแบบ real time โดยวิเคราะห์ตามสภาพภูมิอากาศที่ประเทศการ์ตา โดยประเมินผลกระทบจากสภาพของ ความสกปรก และ Albedo ใน 2 ฤดู โดยพบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในเดือนธันวาคม ค่อนข้างมากกว่า เดือนมิถุนายน ภายใต้เงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดยในเดือน มิถุนายน ค่าพลังงานไฟฟ้า อยู่ที่ 1.44 kWh และในเดือนธันวาคม เพิ่มขึ้นเป็น 1.72 kWh ในส่วนผลกระทบของ Albedo นั้น เมื่อเปลี่ยนจากคอนกรีตเป็นแผ่นสีขาว ทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 4.3% และสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น 29% โดยการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ทุกวัน (Ahmer A.B. Baloch และคณะ, 2017)

Gu et al. (2019) ได้ศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์แบบสองหน้า (Bifacial PV) ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองการระบายความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial จากการศึกษาพบว่า การประเมินประสิทธิภาพการทำงานรายวันและรายปีที่ฮ่องกงและเซี่ยงไฮ้ แสดงให้เห็นว่า วันที่มีแดดจัดมีค่า Gain Bifacial รายวันเท่ากับ 25.58% และสำหรับวันที่มีเมฆ Gain Bifacial รายวันเท่ากับ 28.21% นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ต้องพิจารณาถึงปัจจัยของการติดตั้ง มุมเอียงที่เหมาะสม ค่า Albedo ความสูง ความเข้มของรังสี ความเร็วลม อุณหภูมิ และควรหันหน้าไปทางทิศตะวันออก รวมถึงสภาพอากาศที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า เพื่อให้ได้ผลผลิตพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ที่สูง (Wenbo Gu. และคณะ, 2020)

Hyeonwook et al. (2019) ได้ศึกษาสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในประเทศเกาหลีใต้ ระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 1.5 kW ที่ ค่า Albedo 0.21 และ 0.79 ติดตั้งที่มุมเอียงจากพื้นผิว 30° หันหน้าไปทางทิศใต้ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลทางไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าแบบใช้แผงโซลาร์เซลล์ทั่วไป (Monofacial) สำหรับแผงแบบ Monofacial มีการเปรียบเทียบสมรรถนะทางไฟฟ้าระหว่างติดตั้งแผงแบบคงที่ กับติดตั้งแผงแบบติดตามดวงอาทิตย์จากการศึกษาพบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial สามารถเพิ่มสมรรถนะทางไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งปี โดยที่ค่า Albedo 0.21 สมรรถนะทางไฟฟ้าอยู่ที่ 10.5% และค่า albedo 0.79 สมรรถนะทางไฟฟ้าอยู่ที่ 33.3% สำหรับแผงแบบ Monofacial ที่ติดตั้งแบบติดตามดวงอาทิตย์ สมรรถนะทางไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งปีได้เท่ากับ 15.8% (Hyeonwook P และคณะ, 2019)

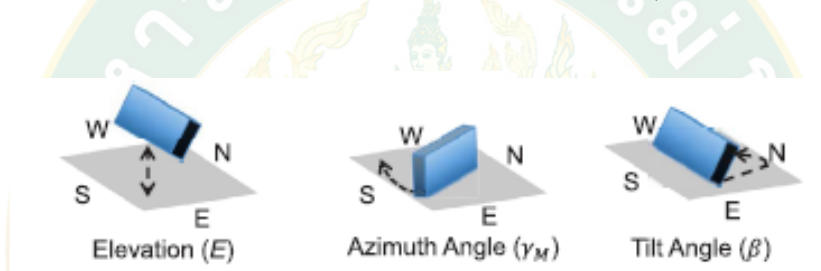
Ismail et al. (2016) ได้ศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์และทดสอบในพื้นที่โล่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial เพื่อหาค่าผลผลิตพลังงานไฟฟ้า (Y_B) โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลผลิตทางพลังงานไฟฟ้าของแผง Monofacial (Y_M) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ $(Y_B - Y_M)/Y_M$ โดยสมการแบบจำลองนี้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวเลือกในการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่เกี่ยวข้องได้ ได้แก่ ค่า Albedo, ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์, ระดับความสูง มุมเอียงของแผง และค่าการฉายรังสีกระจาย ซึ่งจะถูกนำไปใช้กำหนดวิธีการติดตั้งที่เหมาะสม สำหรับขนาดที่ต้องการ จากการศึกษพบว่า ค่า Albedo เท่ากับ 0.5 ระดับความสูง 1.5 m การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ให้ผลผลิตทางพลังงาน เท่ากับ 33.85% ที่มุมเอียงของแผง 25 องศา (Ismail Shoukry. และคณะ, 2016)

Jai Prakash SINGH (2012) ได้ศึกษาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในสิงคโปร์ (ภูมิอากาศแบบเขตร้อน) ที่ติดตั้งบนหลังคาทรงแบน (Flat Slab) ของมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ โดยติดตั้งด้วยความสูงจากพื้นหลังคา 100 cm หันหน้าไปทางทิศใต้ จากผลการทดลองประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial เพิ่มขึ้นเกือบ 10% เมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Monofacial โดยที่ไม่ต้องปรับปรุงหลังคา (การสะท้อนแสง < 20%) หากปรับปรุงหลังคาให้มีการสะท้อนแสงมากขึ้น (การทาสีขาว หรือ เคลือบหลังคาด้วยวัสดุที่สะท้อนแสง) จะทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial สามารถทำงานได้ดีเมื่อการกระจายรังสีสูง และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในแนวตั้งและหันหน้าไปทางตะวันออก – ตะวันตก มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเทียบกับการติดตั้งด้วยมุมเอียงประมาณ 10° โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ (เข้าหาเส้นศูนย์สูตร) (Jai Prakash Singh. และคณะ, 2012)

Katsaounis et al. (2019) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ทดสอบที่ภาคตะวันตกของซาวูดีอาระเบีย โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ขนาด 245 W นำไปเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทั่วไป (Monofacial) ขนาด 240 W ในการทดสอบหันหน้าแผงไปทางทิศใต้ ระดับความสูงจากพื้นผิว 20 cm พื้นผิวเป็นกรวดสีเทา ที่มุมเอียง 25° และ 45° จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial มีค่าเพิ่มขึ้น 10% ที่มุมเอียง 25° และ 15% ที่มุมเอียง 45° เมื่อเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์แบบทั่วไป (Monofacial) (Th. Katsaounis. และคณะ, 2019)

Min Hsian saw (2017) ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน (STC) โดยต้องการลดการสูญเสียการส่องผ่านของเซลล์แสงอาทิตย์ bifacial ที่ใกล้กับความยาวคลื่นของแสงอินฟราเรด (950-1,200 nm) โดยการเคลือบสารสะท้อนแสงอินฟราเรดบนกระจกหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Bifacial แบบกระจกสองด้าน ผลที่ได้ ค่ากระแสเพิ่มขึ้น 1% และการลดสูญเสียการส่องผ่านของเซลล์ Bifacial ทำได้โดยการเลือกใช้ลักษณะพื้นผิวของแผ่นปิดด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแผ่นปิดด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโปร่งแสง สามารถทำให้เพิ่มกระแสได้ถึง 0.3% และเพื่อลดการสูญเสียจากการส่องผ่านระยะห่างระหว่างเซลล์ สามารถใช้การเคลือบสารสะท้อนแสงสีขาวบนกระจกด้านหลัง ซึ่งทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มกระแสได้ถึง 3% เมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Bifacial แบบกระจกสองด้านทั่วไปที่ไม่มีการเคลือบผิว แต่หากใช้การเคลือบผิวทั้ง 2 แบบ สามารถเพิ่มกระแสได้ถึง 4% (Min Hsian Saw. และคณะ, 2017)

Xingshu et al(2018) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ bifacial โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีตัวแปรคือ ความสูง (E) มุมเอียง (ψ) และ มุมเอียง (β) (ภาพที่ 21) ในการวิเคราะห์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Bifacial Gain แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นดินทั่วโลกนั้นรับแสงได้น้อยกว่า 10% ที่ค่า albedo 0.25 แต่หากเพิ่มค่า Albedo เป็น 0.50 และยกระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น 1 เมตรจากพื้นสามารถรับแสงเพิ่มขึ้นถึง 30% และสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ที่ติดตั้งบนพื้นดินในแนวตั้ง การติดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันออก-ตะวันตก จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าหันหน้าไปทางทิศใต้ และทิศเหนือ สำหรับมุมเอียงที่เหมาะสมของพื้นที่ที่ต่ำกว่าละติจูด 30° อยู่ที่ 15% จากค่าละติจูด โดย ค่า Albedo ที่เหมาะสม คือ 0.50 ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางพื้นฐานสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ทั่วโลก (Sun X. และคณะ, 2018)



ภาพที่ 21 พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรในการเพิ่มประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ bifacial
ที่มา: Xingshu (2018)

Yusufoglu et al. (2014) ได้ศึกษาการผลิตพลังงานด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้า โดยศึกษาในประเทศ Norway และ Egypt ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial แบบ 60 เซลล์ โดยติดตั้งหันไปทางทิศใต้ ระดับความสูงตั้งแต่ 0.00, 0.50, 1.00, 1.50 และ 2.00 m โดยการปรับมุมเอียง และใช้ค่า Albedo ที่ 0.20, 0.35 และ 0.50 จากการศึกษาพบว่าความสูงที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ที่สามารถให้พลังงานสูงสุดคือตั้งแต่ 1.00 m ขึ้นไป สำหรับค่า Albedo ที่ให้พลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.50 สำหรับมุมเอียงในการติดตั้งแผงที่เหมาะสมในภูมิภาคประเทศ Norway คือ 54° ที่ค่า Albedo 0.2 และ 56° ที่ค่า Albedo 0.5 และในภูมิภาคประเทศ Egypt คือ 31° ที่ค่า Albedo 0.2 และ 32° ที่ค่า Albedo 0.5 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า มุมเอียงของแผงระดับความสูง และค่า Albedo มากกว่า 0.5 ที่เหมาะสม ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial สามารถให้ผลผลิตทางพลังงานมากกว่าแผง เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Monofacial ถึง 30% (Ufuk Alper Yusufoglu. และคณะ, 2014)

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์การทดสอบ


1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน (Bifacial PV)

แผงที่ใช้ในการทดสอบเป็นแผง Bifacial PV ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline Silicon) แบบ Haft Cut Cell ยี่ห้อ LONGi พิกัดกำลังไฟฟ้า 430 W ขนาด 2.094x1.038x0.035 m น้ำหนักแผง 29.5 kg



ภาพที่ 22 แผง Bifacial PV สำหรับใช้ในการทดสอบ



ตารางที่ 3 เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล

| ภาพอุปกรณ์ | ชื่ออุปกรณ์ | รายละเอียด |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Solar Irradiance Sensor | Output Responsivity: 0.2 mV per W/m^2 Sensitivity Calibrated to Exactly 5.00 W/m^2 per mV |
|  | Humidity/ Temperature Sensor | ย่านวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0-100%RH Accuracy $\pm 2\%$ RH ย่านวัดอุณหภูมิ -30 ถึง +70 °C Accuracy $\pm 5\%$ |
|  | สาย Thermocouple Type k | Output: 0-10V (-27-70°C) ± 0.2 K 4-20mA ± 0.3 K Accuracy $\pm 5\%$ |
|  | Data Logger | ยี่ห้อ: Graphtec รุ่น: GL240 แบบ 10 Channels บันทึกข้อมูลลง SD card Accuracy $\pm 5^\circ C$ |
|  | แผงวงจร Arduido รุ่น D1 | Based on ESP-8266EX 11 x I / O pins 1 x ADC pin (input range 0-3.3V) Onboard 5V 1A Switching Power Supply (maximum input voltage of 24V) |

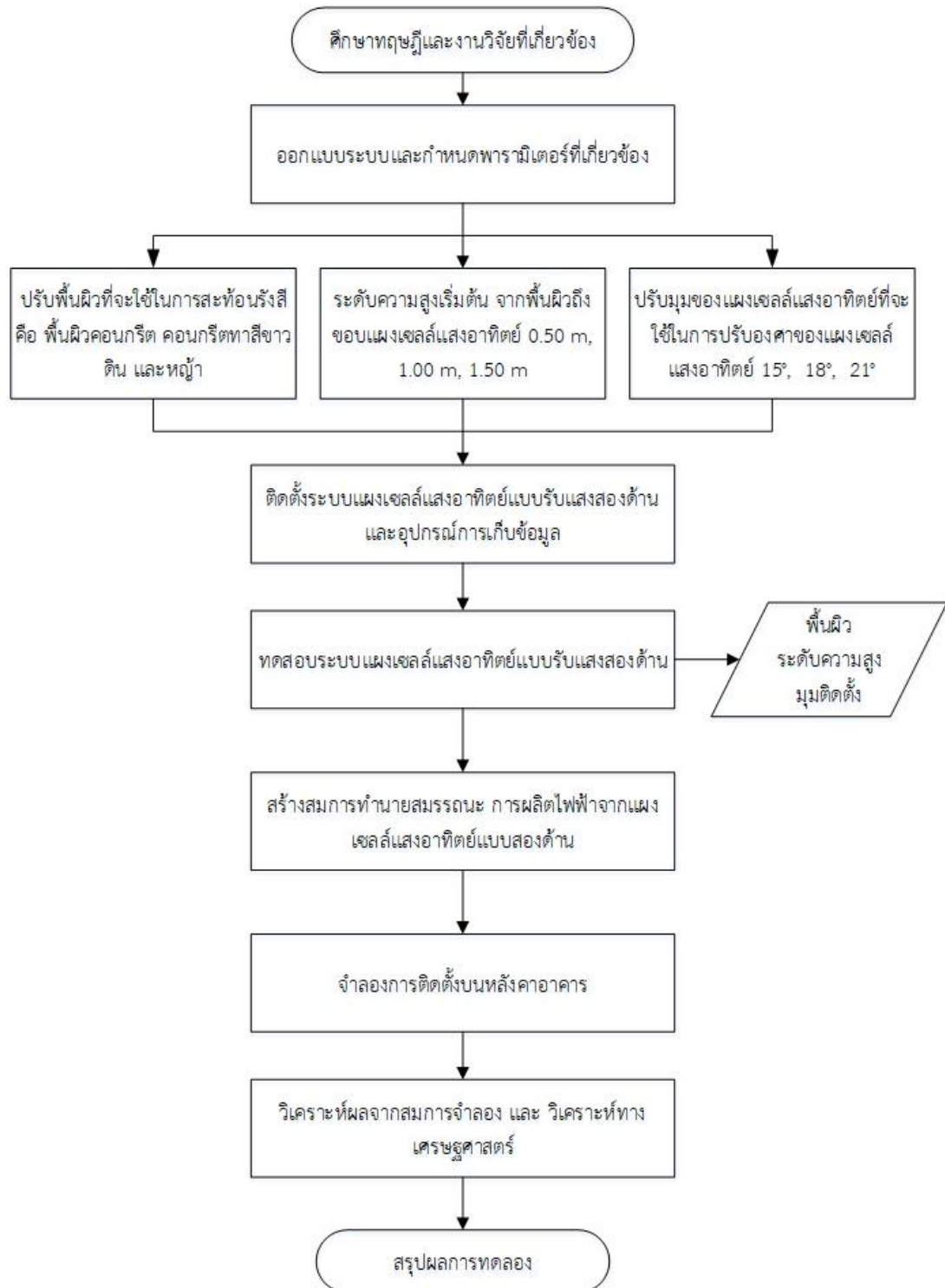
ตารางที่ 3 เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล (ต่อ)

| ภาพอุปกรณ์ | ชื่ออุปกรณ์ | รายละเอียด |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | เซ็นเซอร์ตรวจวัด กระแสไฟฟ้าตรง รุ่น Pzem-017 RS485 | Brand: PEACEFAIR Model: PZEM-017 Voltage: Measuring Range: 0.05-300V (When the test voltage is <7V, please use the independent power supply mode) Resolution: 0.01V Measurement Accuracy: 1% Current: Measuring Range: 0.02-300A (Can be matched with 50A, 100A, 200A, 300A four kinds of shunt) Resolution: 0.01A Measurement Accuracy: 1% Power: Measuring Range: 0.2-90kW Resolution: 0.1W Measurement Accuracy: 1% Working Temperature: -20~60 °c Product Size: Approx. 9x6x2.3cm/3.5x2.4x0.9 inch Weight: Approx. 77g~287g / 2.7oz~10.1o |

ตารางที่ 4 ภาระโหลดไฟฟ้า

| ภาพอุปกรณ์ | ชื่ออุปกรณ์ | ลักษณะการใช้งาน |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | MPPT charger ยี่ห้อ SUOER ขนาด 30A | อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จไฟฟ้าจาก แผงโซลาร์เซลล์ |
|  | Inverter ยี่ห้อ SUOER ขนาด 1000W | ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้า DC ที่ได้จาก แผงโซลาร์เซลล์ ให้กลายเป็น ไฟฟ้า AC เพื่อให้สามารถใช้งานกับ เครื่องใช้ไฟฟ้า |
|  | พัดลมตั้งพื้น 22 นิ้ว ขนาด 550 mm พิกัด กำลัง 195 W | ภาระโหลดไฟฟ้า |
|  | ปั้มน้ำ AC พิกัดกำลัง 0.5 HP (370W) | ภาระโหลดไฟฟ้า |
|  | Switching Power Supply | เป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟตรงคงค่า แรงดันแบบหนึ่งและสามารถเปลี่ยน แรงดันไฟสลับค่าสูงเป็นแรงดันไฟตรง ค่าต่ำได้ |
|  | แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle ชนิดน้ำ ขนาด 123A 12V | เก็บพลังงานไฟฟ้า |

วิธีการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 23 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินการวิจัย

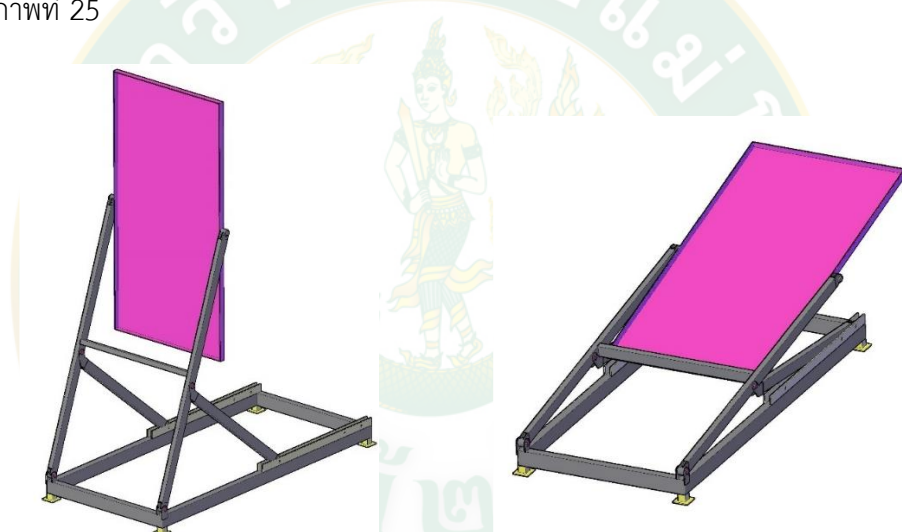
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังภาพที่ 23 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองหน้า (Bifacial PV)

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบระบบและกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

เมื่อได้ข้อมูลและปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของระบบ Bifacial PV จากนั้นออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจาก Bifacial PV เพื่อให้ได้การติดตั้งระบบที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยการออกแบบระบบในการศึกษาครั้งนี้ จะออกแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กแบบปรับมุมและระดับความสูงได้ดังภาพที่ 24 และนำมาติดตั้งจริงดังภาพที่ 25



(ก) การออกแบบการปรับระดับความสูง

(ข) การออกแบบการปรับมุมติดตั้ง

ภาพที่ 24 การออกแบบโครงสร้างรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน



ภาพที่ 25 การติดตั้งบนโครงสร้างเหล็ก

หลังจากนั้นจะกำหนดพื้นผิวสำหรับการสะท้อนแสงเป็น พื้นผิวคอนกรีต ตามภาพที่ 26(ก) พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว ตามภาพที่ 26(ข) พื้นผิวดิน ตามภาพที่ 26(ค) และพื้นผิวหญ้า ตามภาพที่ 26(ง)



(ก) พื้นผิวคอนกรีต



(ข) พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว



(ค) พื้นผิวดิน



(ง) พื้นผิวหญ้า

ภาพที่ 26 ชนิดของพื้นผิวที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อได้สภาพพื้นผิวที่ให้อัตราการสะท้อนแสงสูงแล้วจึงปรับระดับความสูง เป็น 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m โดยอ้างอิงจากบทความวิจัยของ Yusufoglu et al. มาทำการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน และมุมเอียงของแผง Bifacial PV ที่ 15° , 18° , 21° โดยอ้างอิงมาจาก Xingshu et al. สำหรับมุมเอียงที่เหมาะสมของพื้นที่ โดยการติดตั้งตามละติจูดของสถานที่ติดตั้ง โดยจังหวัดเชียงใหม่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร ($18^{\circ}55'30''N$ $99^{\circ}01'28''E$) พิกัด ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้





(ก) มุม 15° ที่ความสูง 0.50 m



(ข) มุม 15° ที่ความสูง 1.00 m



(ค) มุม 15° ที่ความสูง 1.50 m

ภาพที่ 27 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ที่มุม 15° ที่ความสูง 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m



(ก) มุม 18° ที่ความสูง 0.50 m



(ข) มุม 18° ที่ความสูง 1.00 m



(ค) มุม 18° ที่ความสูง 1.50 m

ภาพที่ 28 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ที่มุม 18° ที่ความสูง 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m



(ก) มุม 21° ที่ความสูง 0.50 m



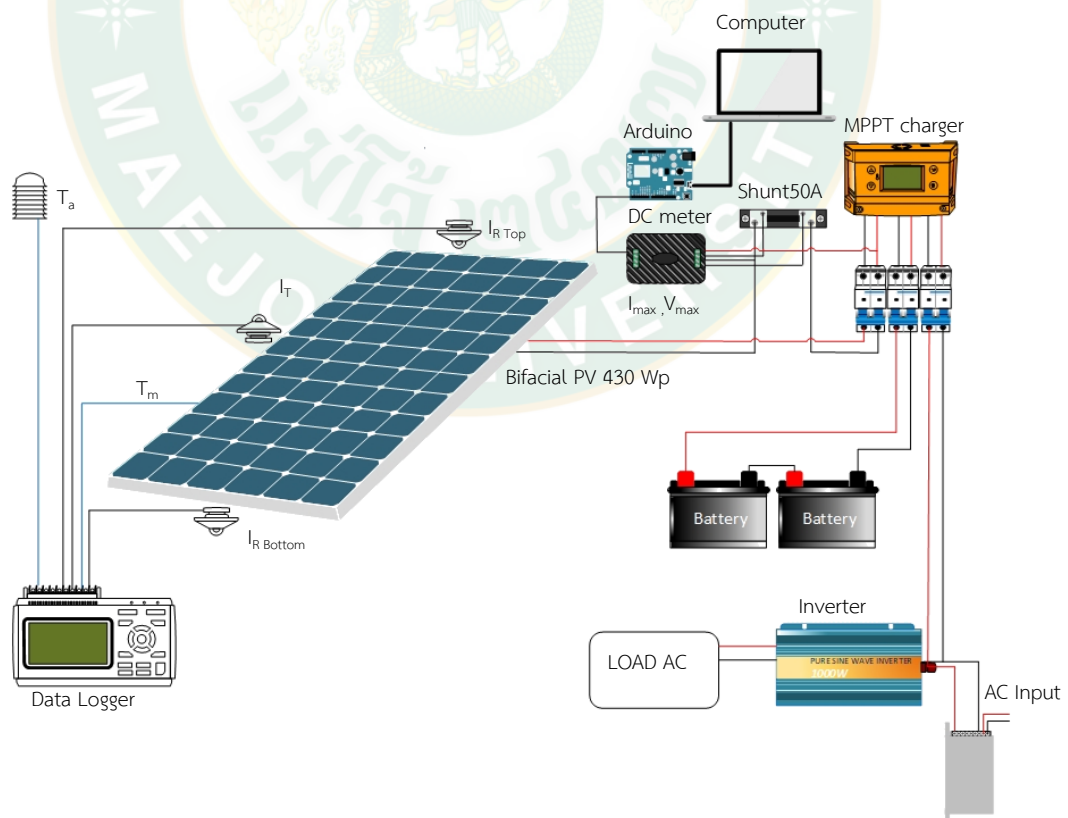
(ข) มุม 21° ที่ความสูง 1.00 m



(ค) มุม 21° ที่ความสูง 1.50 m

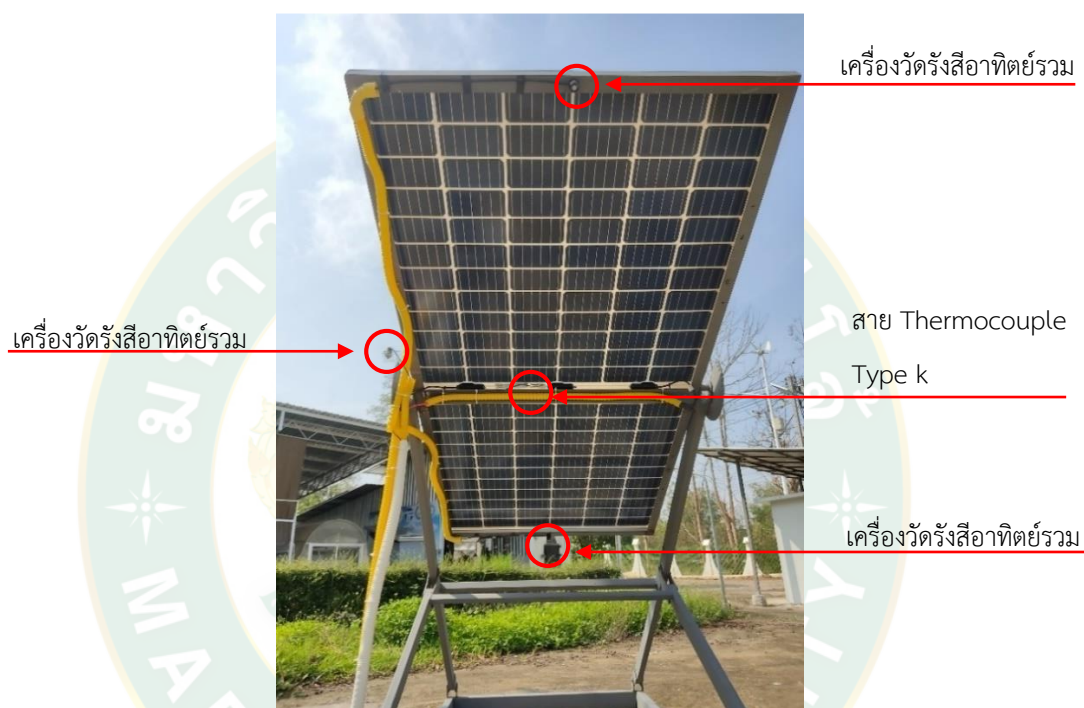
ภาพที่ 29 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ที่มุม 21° ที่ความสูง 0.50 m 1.00 m และ 1.50 m

ขั้นตอนที่ 3 ในภาพที่ 30 แสดงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์แบบสองหน้า (Bifacial PV) และเครื่องมือในการเก็บข้อมูล โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการเก็บค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง Bifacial PV โดยใช้เครื่องวัดรังสีอาทิตย์รวม จำนวน 3 ตัว ติดบริเวณด้านข้างในระนาบเดียวกับแผงเพื่อวัดค่ารังสีอาทิตย์รวม ส่วนด้านหลังติดตั้งบริเวณตรงกลางของขอบแผงด้านล่าง และบริเวณตรงกลางของขอบแผงด้านบนเพื่อวัดรังสีสะท้อน ในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อม และ อุณหภูมิของแผง Bifacial PV ใช้สาย Thermocouple Type k โดยใช้ Data Logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL240 แบบ 10 Channels ในการบันทึกข้อมูล ส่วนที่ 2 เป็นการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าของแผง Bifacial PV ที่ผลิตได้ โดยใช้แผงวงจร Arduino ต่อเข้ากับ DC Meter ส่งผ่านข้อมูลค่า I_{max} , V_{max} และ Power ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล ซึ่งการใช้งานโหลดจะทำการติดตั้งระบบ MPPT Charger ในการ Charge กระแสไฟฟ้าเข้าไปยังแบตเตอรี่ ที่ต่อขนานกันจำนวน 2 ลูก เพื่อเป็นระบบสำรอง จากนั้นต่อเข้ากับ Inverter เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าไปใช้งานให้กับภาระโหลด AC ซึ่งจะเป็นระบบ Ongrid เพื่อให้ใช้งานโหลดได้คงที่แม้การผลิตกำลังไฟฟ้าจากแผงไม่เพียงพอต่อการใช้ภาระโหลด



ภาพที่ 30 ไดอะแกรมแสดงตำแหน่งเครื่องมือวัด ในการเก็บข้อมูล

จากภาพที่ 31 เป็นการติดตั้งเครื่องวัดรังสีอาทิตย์รวมโดยจุดติดตั้งเพื่อเก็บข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์โดยตัวที่ 1 ติดบริเวณด้านข้างแผงในระนาบเดียวกับแผง ส่วนตัวที่ 2 ติดบริเวณขอบบนของแผง ตัวที่ 3 ติดบริเวณขอบล่างของแผงเพื่อเก็บค่ารังสีสะท้อน ส่วนอุณหภูมิแผงใช้ สาย Thermocouple Type k ติดบริเวณตรงกลางแผงบริเวณที่ไม่มีเซลล์แสงอาทิตย์และเก็บข้อมูล ผ่าน Datalogger



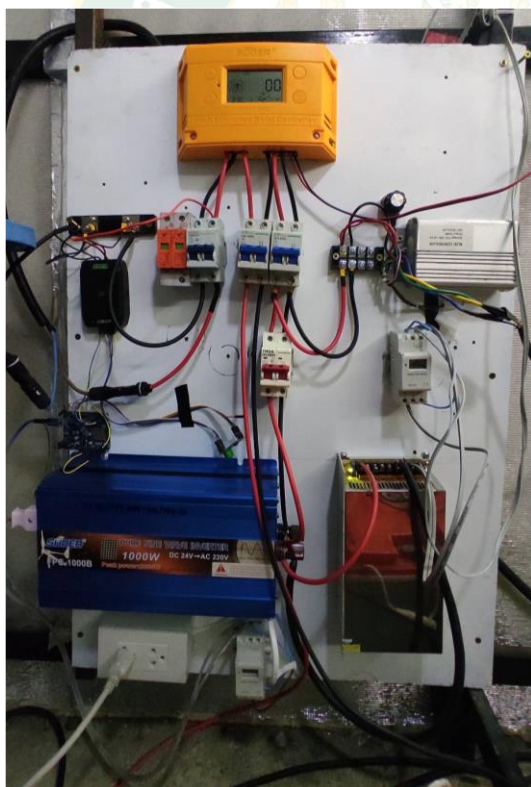
ภาพที่ 31 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน อุณหภูมิแผง

จากภาพที่ 32 จะเป็นเครื่องมือในการเก็บค่าอุณหภูมิแวดล้อมด้วยสาย Thermocouple Type k ผ่านเข้า Datalogger โดยจะตั้งในจุดบริเวณที่เงาไม่รบกวนพื้นที่การรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 32 อุปกรณ์ตรวจอุณหภูมิแวดล้อม

จากภาพที่ 33 (ก) เป็นการติดตั้งระบบจริงในการทดสอบเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าที่แผง Bifacial PV ผลิตได้ โดยใช้ MPPT Charger ยี่ห้อ SUOER ขนาด 30A ทำหน้าที่เป็น Charger ให้แก่ แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle ชนิดน้ำ ขนาด 123A 12V ต่อขนานกันจำนวน 2 ลูก พร้อมทั้งติดตั้ง Inverter ยี่ห้อ SUOER ขนาด 1000W ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจาก DC เป็น AC เพื่อจ่ายไฟฟ้า ให้แก่โหลด AC พร้อมทั้งติดตั้ง Switching Power Supply ทำหน้าที่ดึงกระแสไฟฟ้า AC ทำงาน ร่วมกับ Inverter เพื่อให้จ่ายไฟฟ้าได้สม่ำเสมอในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าไม่ เพียงพอต่อการใช้โหลด ส่วนในการเก็บข้อมูลกำลังไฟฟ้า ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าตรง รุ่น Pzem-017 RS485 ต่อผ่านแผงวงจร Arduido รุ่น D1 และส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บ ข้อมูลค่า กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตามภาพที่ 33 (ข)



(ก) ระบบไฟฟ้า

(ข) บันทึกข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 33 การติดตั้งเครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบพื้นผิว ปรับระดับความสูงจากพื้นผิว และ ปรับมุมติดตั้ง

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบและเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจาก Bifacial PV โดยเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ค่าการสะท้อน (Albedo) ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าสภาพอากาศแวดล้อม โดยเริ่มจากการทดสอบพื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงจากพื้นผิว 1.00 m ที่มุม 18° เพื่อหาพื้นผิวที่ให้ค่า Albedo สูงที่สุด เพื่อนำไปเป็นพื้นผิวในการติดตั้งการทดสอบ ความสูง ที่ 0.50 m 1.00 m 1.50 และ ปรับเปลี่ยนมุมเป็น 15° 18° 21° ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5 สร้างสมการทำนายสมรรถนะ การผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน เมื่อมีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างสมการทำนายสมรรถนะ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในการติดตั้งภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์รายเดือน ค่าอุณหภูมิแวดล้อม ของจังหวัดเชียงใหม่ เป็นข้อมูลประกอบ

ขั้นตอนที่ 6 จำลองการติดตั้งบนหลังคาอาคาร โดยใช้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการจำลองการติดตั้ง ซึ่งในการจำลองกำหนดให้ติดตั้งบนหลังคาอาคารที่เป็นรูปแบบหลังคาแบบเรียบที่เป็นพื้นคอนกรีตเพื่อที่สามารถหาได้ มีพื้นที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบตามข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์ผลสมการจำลองและการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลจากการจำลองการติดตั้งมาหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และ ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ได้จากการจำลองนำมาประมาณการค่าใช้จ่ายเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (PB) มูลค่าปัจจุบัน (NPV) ผลตอบแทนภายใน (IRR)

ขั้นตอนที่ 8 สรุปผลการทดลอง

บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง

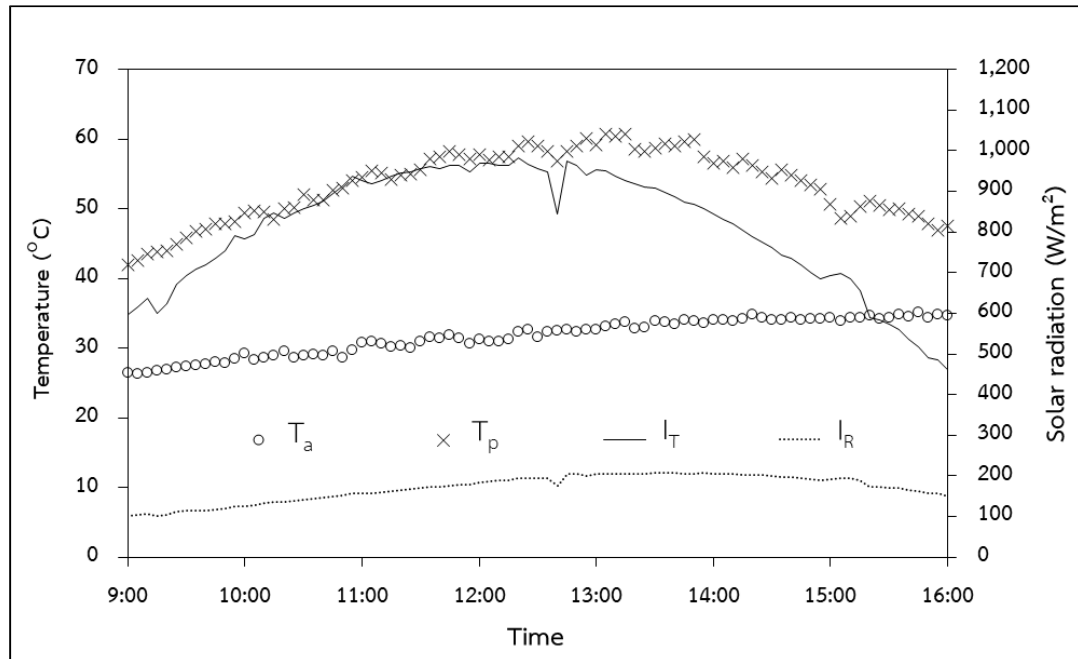
ผลของสภาพพื้นผิวที่มีต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบปรับแสงสองด้าน

การทดสอบเก็บข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิวในช่วงฤดูร้อน ระหว่างเดือน เมษายน – พฤษภาคม 2564 ช่วงเวลา 9.00 – 16.00 น. ใน 4 พื้นผิว ซึ่งได้แก่ คอนกรีต คอนกรีตทาสีขาว ดิน และ หญ้า โดยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่ารังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง 100–1,000 W/m² โดยข้อมูลจากตารางที่ 5 แสดงข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า (I_T) ค่ารังสีอาทิตย์ด้านหลัง (I_R) อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิแผง (T_p) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากช่วงเวลาก่อน 9.00 น. พื้นที่ทำกรทดลองมีเงาพาดผ่านบริเวณแผง และตั้งแต่วเวลา 16.00 น. มีเงาต้นไม้พาดบังในทิศตะวันตกทำให้ แผงไม่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้จนถึงดวงอาทิตย์ตก จึงเริ่มต้นทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9.00 – 16.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีเงารบกวนการรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

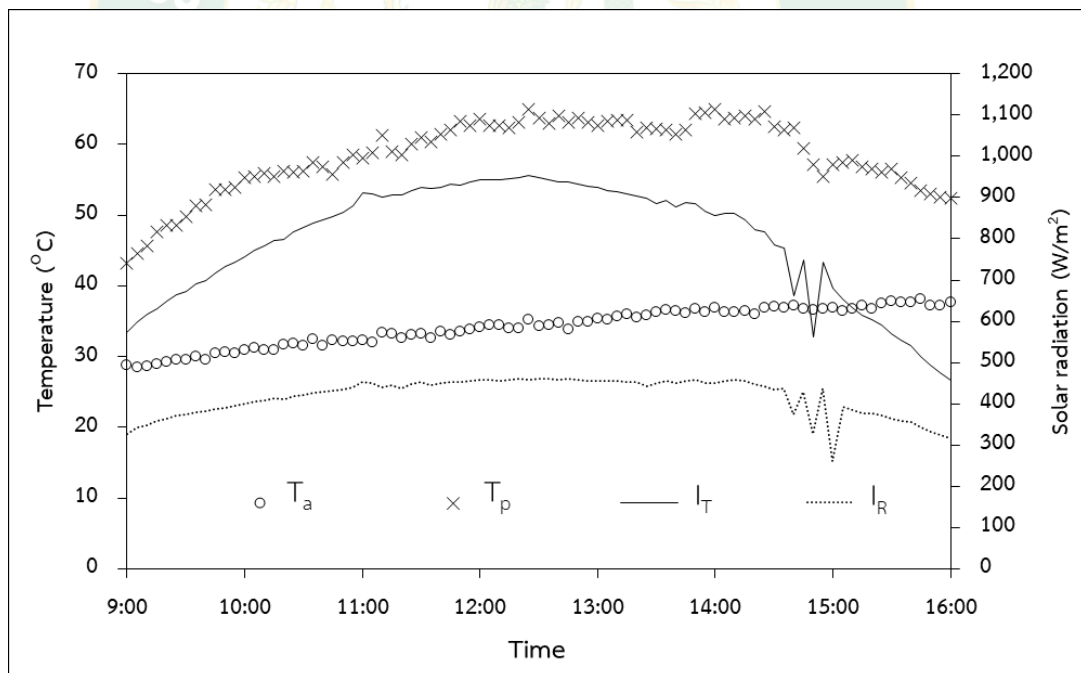
ตารางที่ 5 ค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน และอุณหภูมิ

| Surface | I_T | | I_R | | Temperature | |
|------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------|------------|
| | (W/m ²) | MJ/m ² -day | (W/m ²) | MJ/m ² -day | T_a (°C) | T_p (°C) |
| Concrete Surface | 810.10 | 20.66 | 170.49 | 4.34 | 31.6 | 53.4 |
| White Paint | 795.61 | 20.28 | 417.70 | 10.65 | 34.1 | 58.5 |
| Concrete Surface | | | | | | |
| Ground Surface | 762.36 | 19.44 | 197.40 | 5.03 | 36.5 | 57.9 |
| Grass Surface | 765.11 | 19.50 | 230.45 | 5.87 | 37.5 | 57.6 |

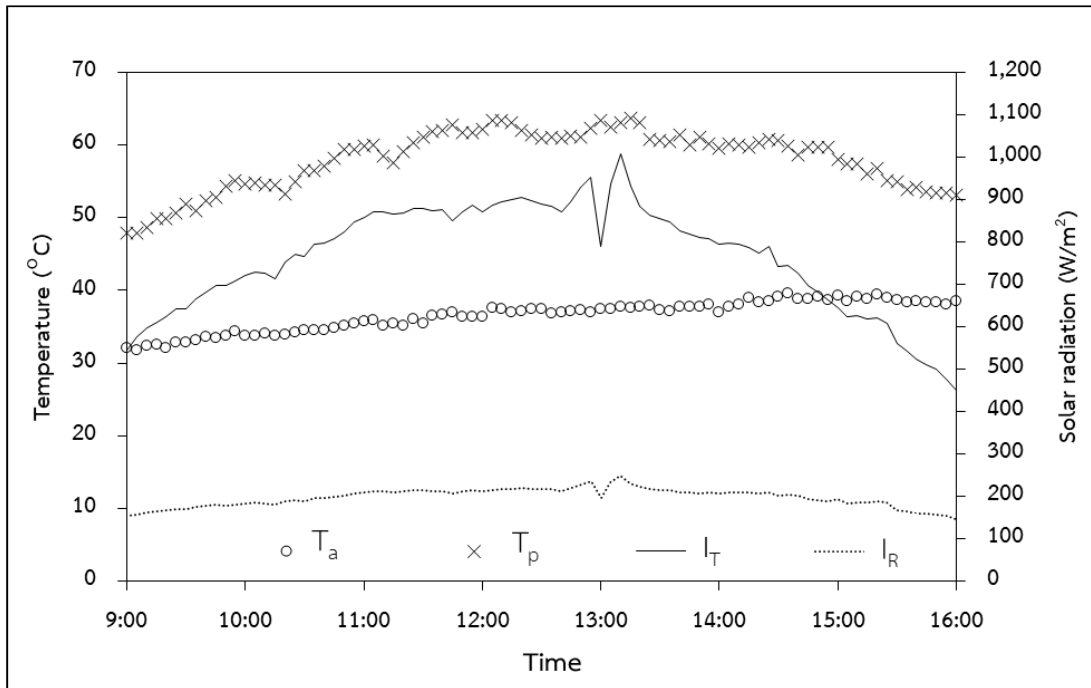
จากภาพที่ 34 แสดงถึงความสัมพันธ์ค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง ในรูปแบบกราฟ ของพื้นผิวคอนกรีต คอนกรีตทาสีขาว ดิน และ หญ้า ตามภาพที่ 34 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ



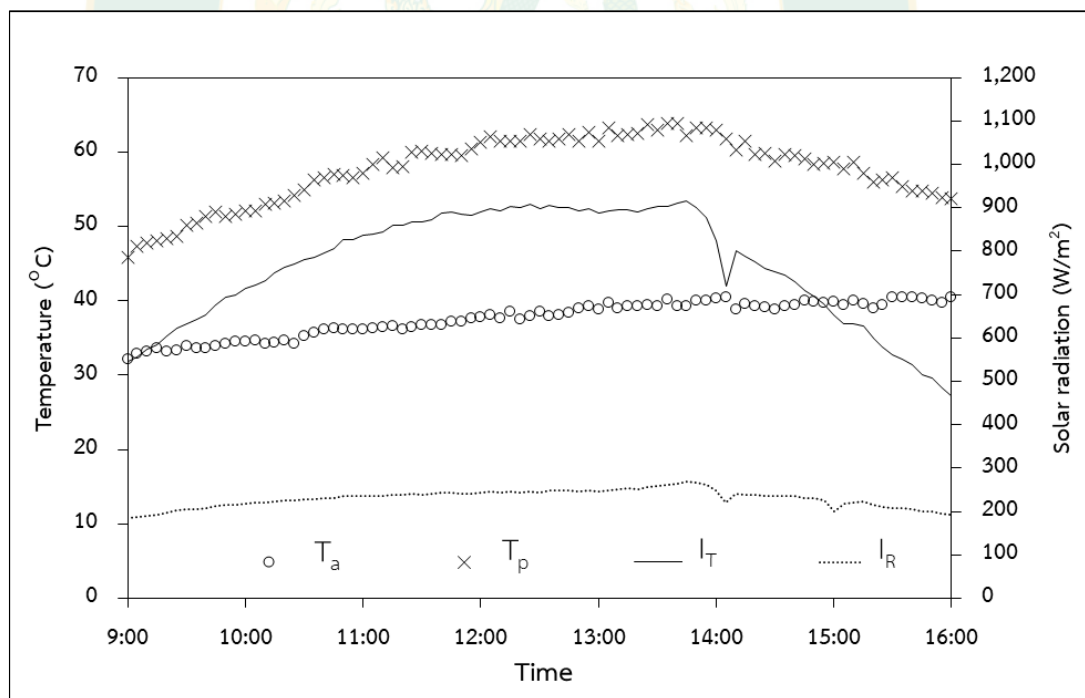
(ก) ค่ารังสีอาทิตย์ รังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง บนพื้นผิวคอนกรีต



(ข) ค่ารังสีอาทิตย์ รังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง บนพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว



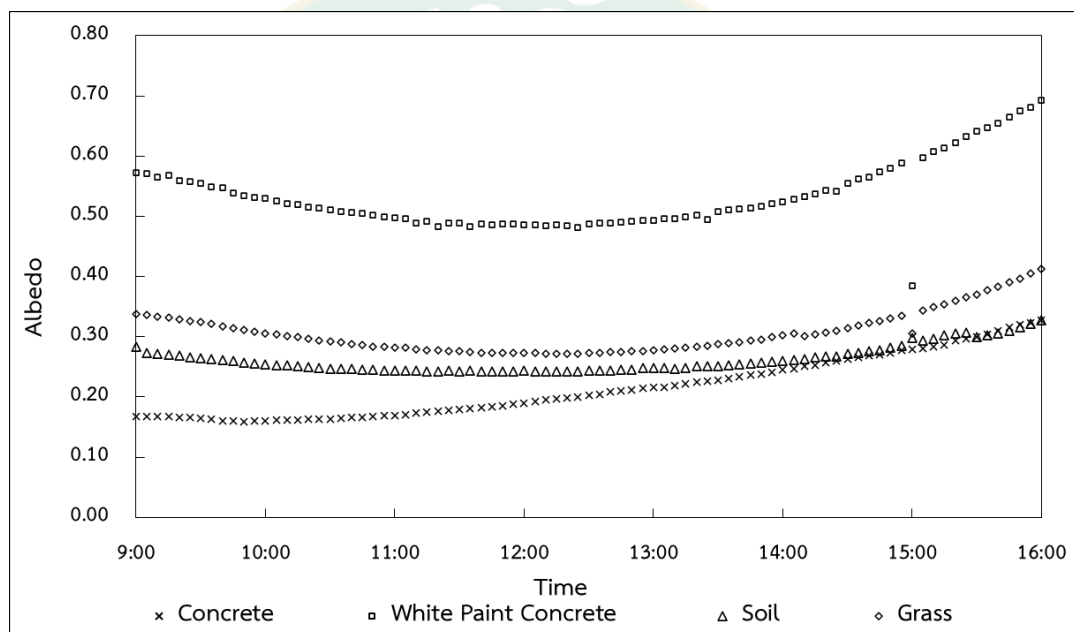
(ค) ค่ารังสีอาทิตย์ รังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง บนพื้นผิวดิน



(ง) ค่ารังสีอาทิตย์ รังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง บน พื้นผิวหญ้า

ภาพที่ 34 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละพื้นผิว





จากภาพที่ 35 เมื่อนำค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้มาคำนวณหาอัตราการสะท้อนแสง หรือ Albedo ตามสมการที่ (4) พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า พบว่าในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ทำมุมเข้าใกล้มุมตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาก (ช่วงเวลาประมาณ 11.00 น.-13.00 น.) ค่า Albedo จะเริ่มลดลงเนื่องจากเกิดเงาขึ้นใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในมุมตั้งฉาก ทำให้อัตราค่าสะท้อนแสงลดลง และเมื่อดวงอาทิตย์เปลี่ยนมุมไปทำให้เงาใต้แผงเปลี่ยนตำแหน่งไป ทำให้ค่า Albedo เพิ่มขึ้น และเนื่องจากเป็นการทดสอบในช่วงฤดูร้อน ระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม 2564 ทำให้สภาพอากาศมีเมฆบังดวงอาทิตย์บางเวลา จึงทำค่ารังสีอาทิตย์และค่ารังสีสะท้อนมีค่าต่ำ



ภาพที่ 35 ค่า Albedo ในแต่ละพื้นผิว

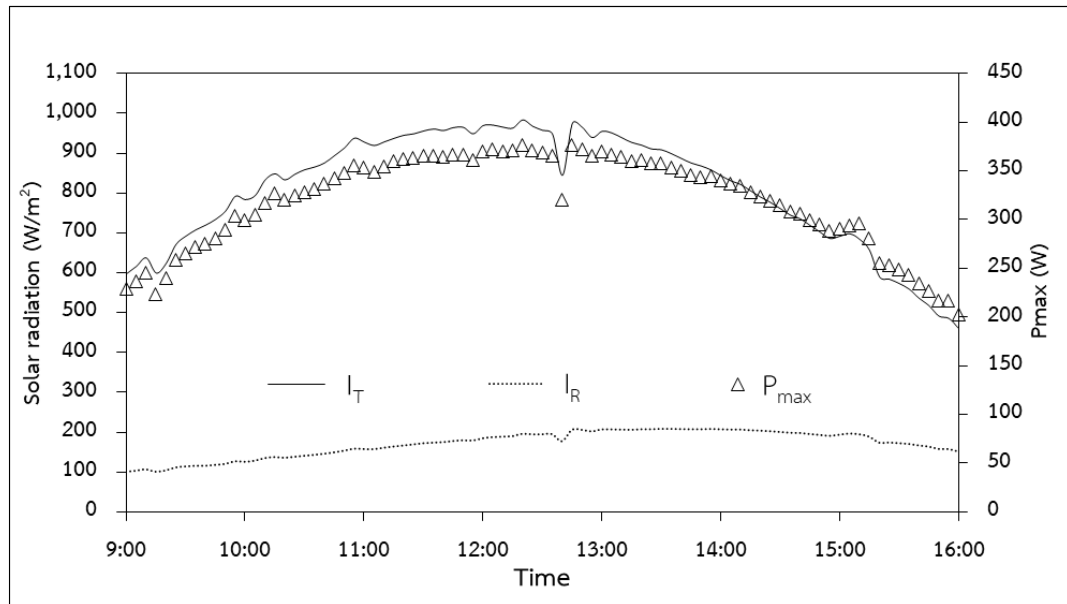
เมื่อทำการคำนวณแล้ว ค่า Albedo อยู่ที่ 0.22 0.53 0.26 และ 0.30 ตามลำดับ ซึ่งค่า Albedo ที่สูงจะทำให้ค่ารังสีที่สะท้อนตกกระทบบริเวณพื้นหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมากขึ้น โดยแสดงค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ทดสอบในแต่ละชนิดในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ทดสอบในแต่ละชนิด

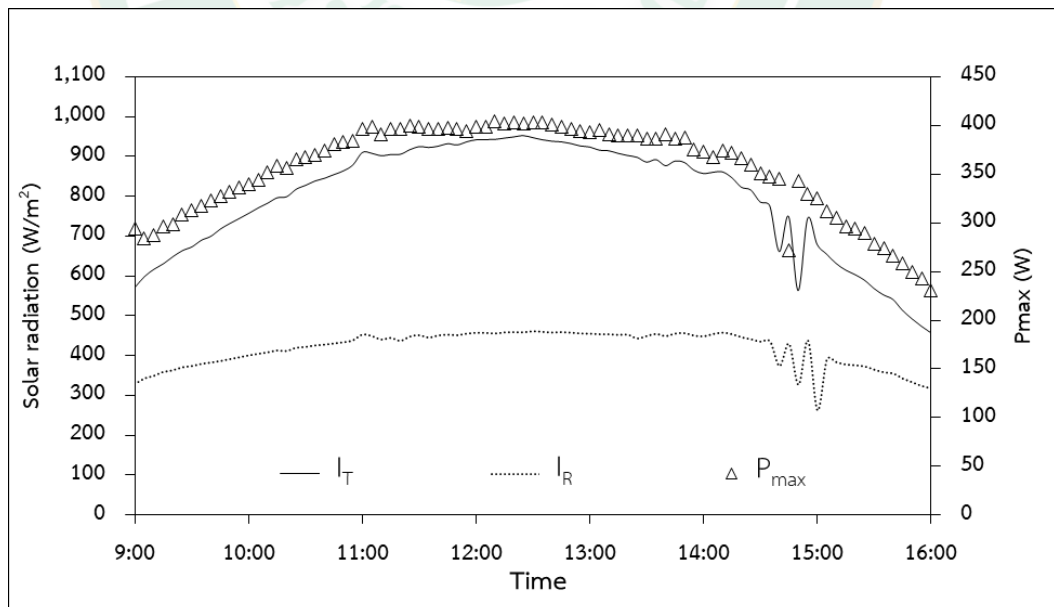
| Type of surface | Picture | Albedo |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Concrete Surface |  | 0.22 |
| White Paint Concrete Surface |  | 0.53 |
| Ground Surface |  | 0.26 |
| Grass Surface |  | 0.30 |

จากผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน ในแต่ละพื้นผิว ในสภาวะที่อุณหภูมิแวดล้อมใกล้เคียงกัน จากภาพที่ 31 (ก) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวคอนกรีตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 319.08 W คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 2.260 kWh ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 31.65 °C และอุณหภูมิแผงเฉลี่ย 53.47 °C จากภาพที่ 31 (ข) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 354.67 W คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 2.512 kWh ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 34.15 °C และอุณหภูมิแผงเฉลี่ย 58.49 °C จากภาพที่ 31 (ค) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวดิน แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 304.00 W คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 2.153 kWh ที่อุณหภูมิ

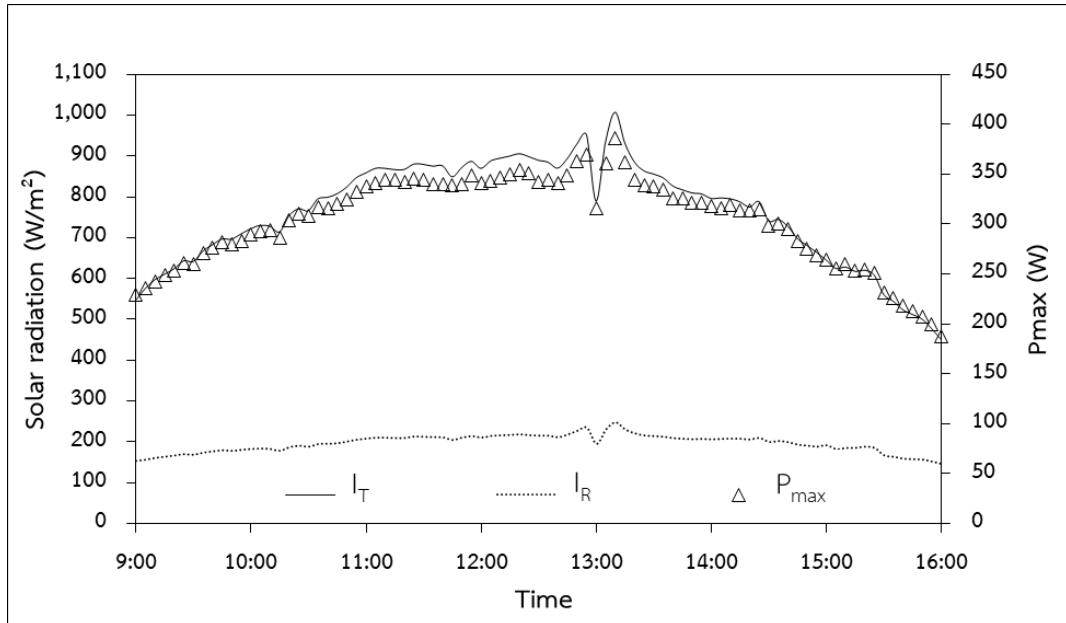
แวลลุ่มเฉลี่ย $36.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิแผงเฉลี่ย $57.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากภาพที่ 31 (ง) กราฟแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวหญ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมีค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 308.75 Wp คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 2.187 kWh ที่อุณหภูมิแวลลุ่มเฉลี่ย $37.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิแผงเฉลี่ย $57.67\text{ }^{\circ}\text{C}$



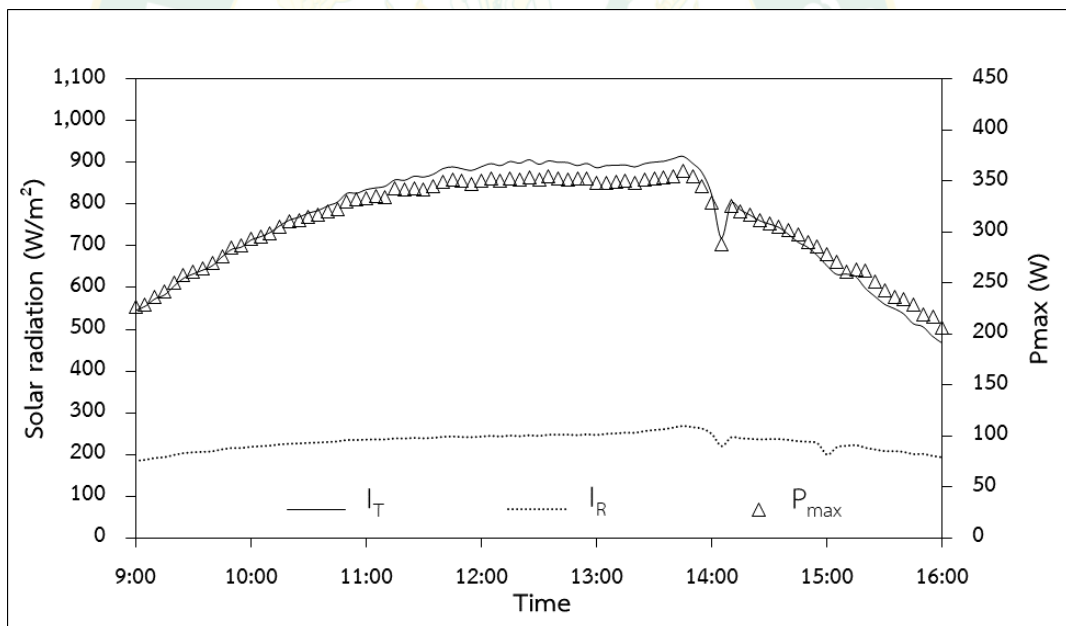
(ก) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณีพื้นผิวกอนกรีต



(ข) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณีพื้นผิวกอนกรีตทาสีขาว



(ค) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณีพื้นผิวดิน



(ง) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณีพื้นผิวหยาบ

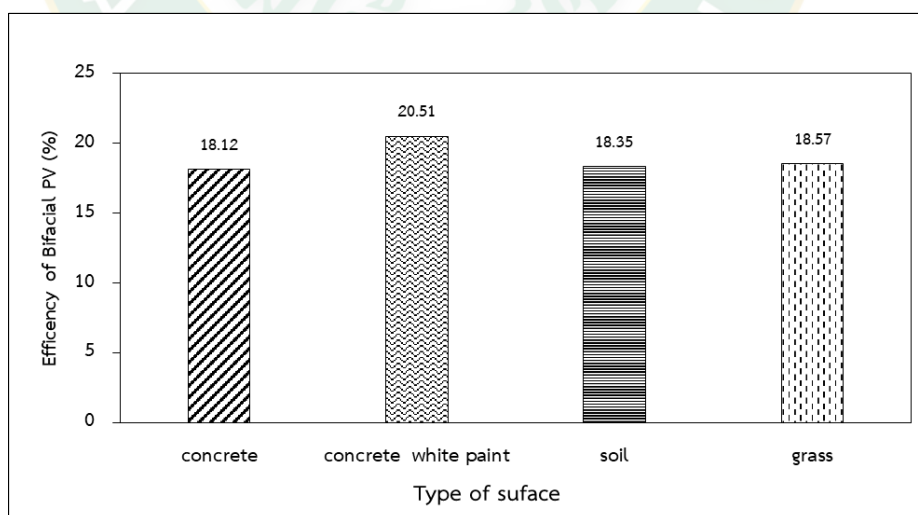
ภาพที่ 36 ค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละสภาพพื้นผิว

ตารางที่ 7 ความเข้มแสง กับ power ที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นผิว

| Surface | I_T (W/m ²) | I_R (W/m ²) | Pmax (W) |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| Concrete Surface | 810.10 | 170.49 | 319 |
| White Paint Concrete Surface | 795.61 | 417.70 | 354 |
| Ground Surface | 762.36 | 197.40 | 304 |
| Grass Surface | 765.11 | 230.45 | 308 |

ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านที่ติดตั้งบนพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นผิวชนิดอื่น เนื่องจากพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวมีอัตราการสะท้อนแสงหรือค่า Albedo ที่สูงส่งผลให้รังสีสะท้อนจากพื้นผิวดกกระทบบริเวณด้านหลังแผงมากทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น

จากภาพที่ 37 เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 4 พื้นผิว โดยนำมาหาประสิทธิภาพจากสมการที่ (8) พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่ 20.51% รองลงมาเป็นพื้นผิวหญ้า พื้นผิวดิน และคอนกรีตเก่าที่ 18.57%, 18.35% และ 18.12% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจาก พื้นผิวสีขาวที่มี Albedo สูง ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงกว่าพื้นผิวชนิดอื่น ซึ่งจากผลการทดสอบดังกล่าวจึงเลือกพื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวเพื่อนำไปทดสอบในส่วนต่อไป



ภาพที่ 37 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละพื้นผิว

ผลของมุม และความสูงต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

จากตารางที่ 8 แสดงข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า (I_p) กรณีที่ทดสอบติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนโครงสร้างเหล็กให้ขอบแผงด้านล่างสูงจากพื้นผิว 0.50 m ที่มุมเอียง 15° , 18° , 21° (ช่วงเวลาทดสอบ อยู่ระหว่าง มกราคม – กุมภาพันธ์ 2565) โดยค่ารังสีอาทิตย์ สูงสุดอยู่ที่ 831.05 W/m^2 คิดเป็น $21.19 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ที่ความสูง 1.50 m และมุม 21°

ตารางที่ 8 ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า

| มุมเอียง | ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m | | ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m | | ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m | |
|------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | (W/m^2) | ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) | (W/m^2) | ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) | (W/m^2) | ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) |
| 15° | 723.79 | 18.45 | 767.20 | 19.56 | 761.78 | 19.42 |
| 18° | 757.57 | 19.32 | 772.48 | 19.69 | 785.18 | 20.02 |
| 21° | 794.40 | 20.25 | 810.61 | 20.67 | 831.05 | 21.19 |

จากตารางที่ 9 แสดงค่ารังสีอาทิตย์ด้านหลัง (I_r) กรณีที่ทดสอบติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนโครงสร้างเหล็กให้ขอบแผงด้านล่างสูงจากพื้นผิว 0.50 m ที่มุมเอียง 15° , 18° , 21° (ช่วงเวลาทดสอบ อยู่ระหว่าง มกราคม – กุมภาพันธ์ 2565) โดยค่ารังสีสะท้อนสูงสุดอยู่ที่ 498.65 W/m^2 คิดเป็น $12.71 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ที่ความสูง 1.50 m และมุม 15°

ตารางที่ 9 ข้อมูลค่ารังสีสะท้อน

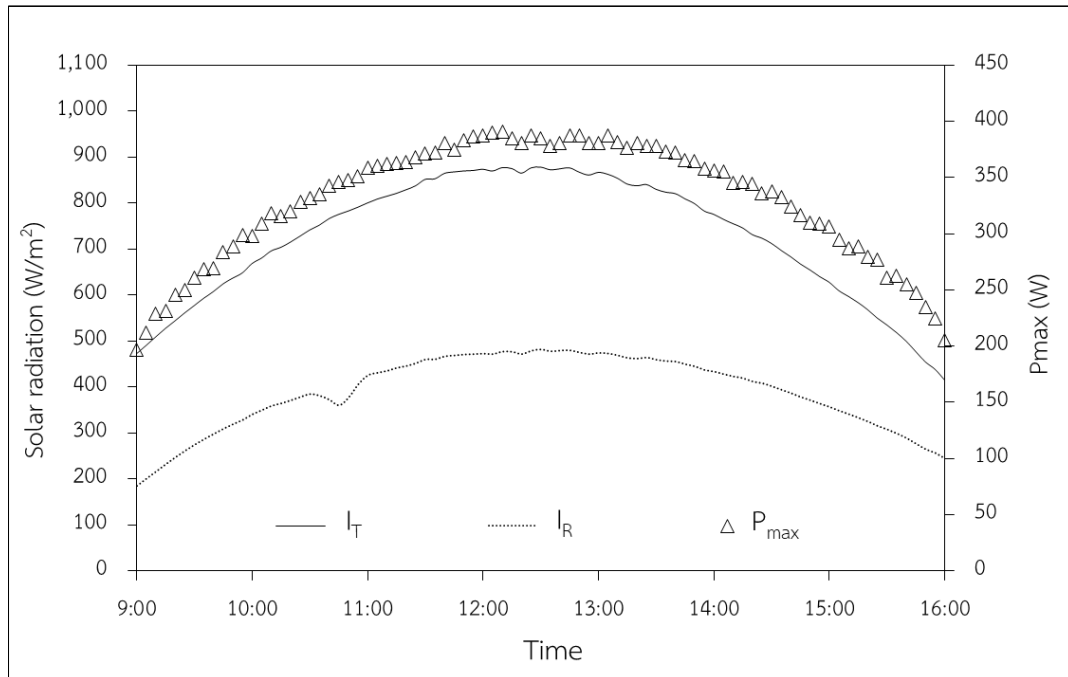
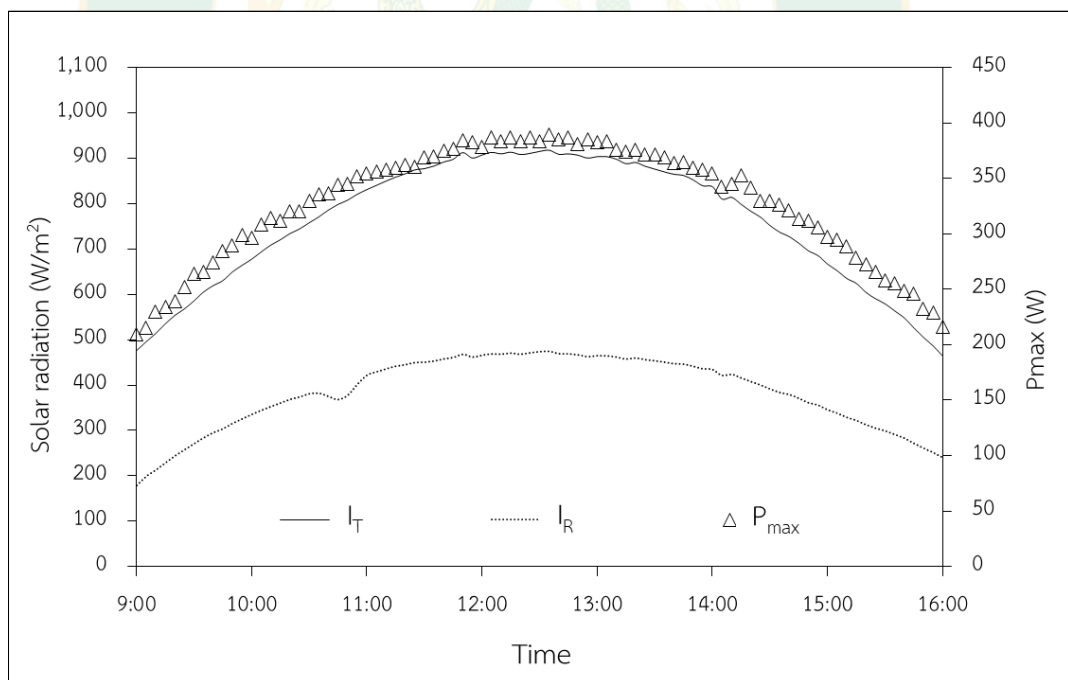
| มุมเอียง | ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m | | ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m | | ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m | |
|------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | (W/m^2) | ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) | (W/m^2) | ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) | (W/m^2) | ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) |
| 15° | 388.28 | 9.90 | 452.39 | 11.53 | 498.65 | 12.71 |
| 18° | 383.74 | 9.78 | 424.89 | 10.83 | 488.02 | 12.44 |
| 21° | 387.71 | 9.88 | 438.59 | 11.18 | 492.00 | 12.54 |

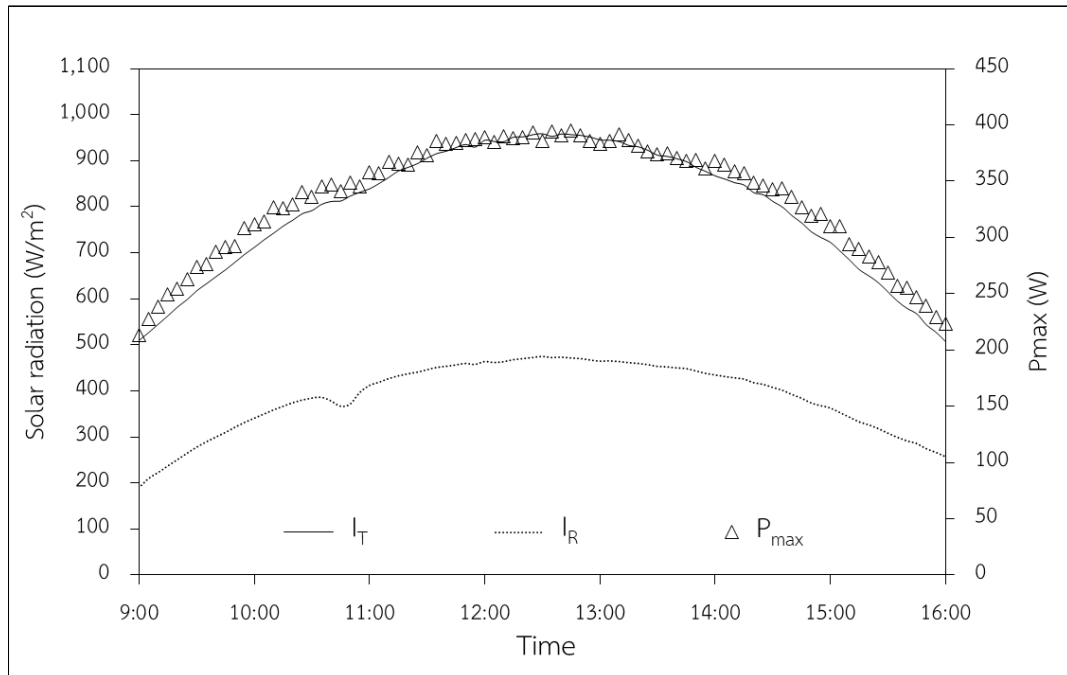
จากตารางที่ 10 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 26.97 – 29.74 °C และอุณหภูมิของแผงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 47.00 – 50.35 °C ซึ่งการเก็บข้อมูลผลการทดลองดังกล่าวจะเลือกใช้ข้อมูลที่มีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกันมากที่สุด ภายใต้สภาพพื้นผิวที่มีค่า Albedo อยู่ที่ 0.53

ตารางที่ 10 อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์

| มุม เอียง | ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m | | ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m | | ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m | |
|--------------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|
| | Ta (°C) | Tp (°C) | Ta (°C) | Tp (°C) | Ta (°C) | Tp (°C) |
| 15° | 29.15 | 48.74 | 28.49 | 48.17 | 29.74 | 47.00 |
| 18° | 28.74 | 47.68 | 26.97 | 47.51 | 28.47 | 48.08 |
| 21° | 28.97 | 49.08 | 28.20 | 48.79 | 28.42 | 50.35 |

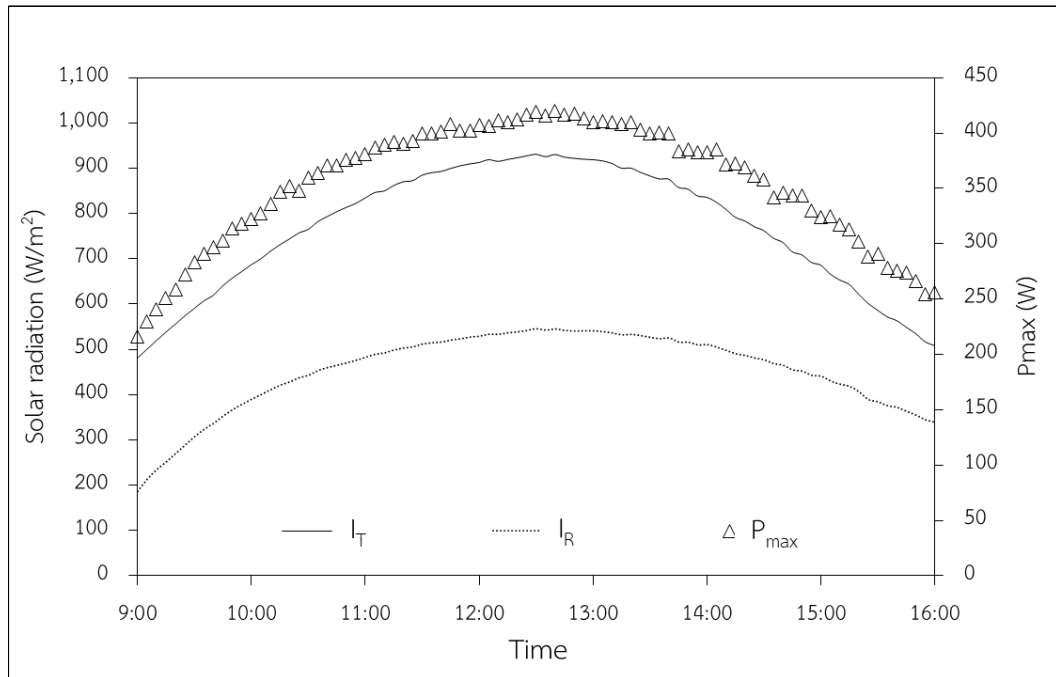
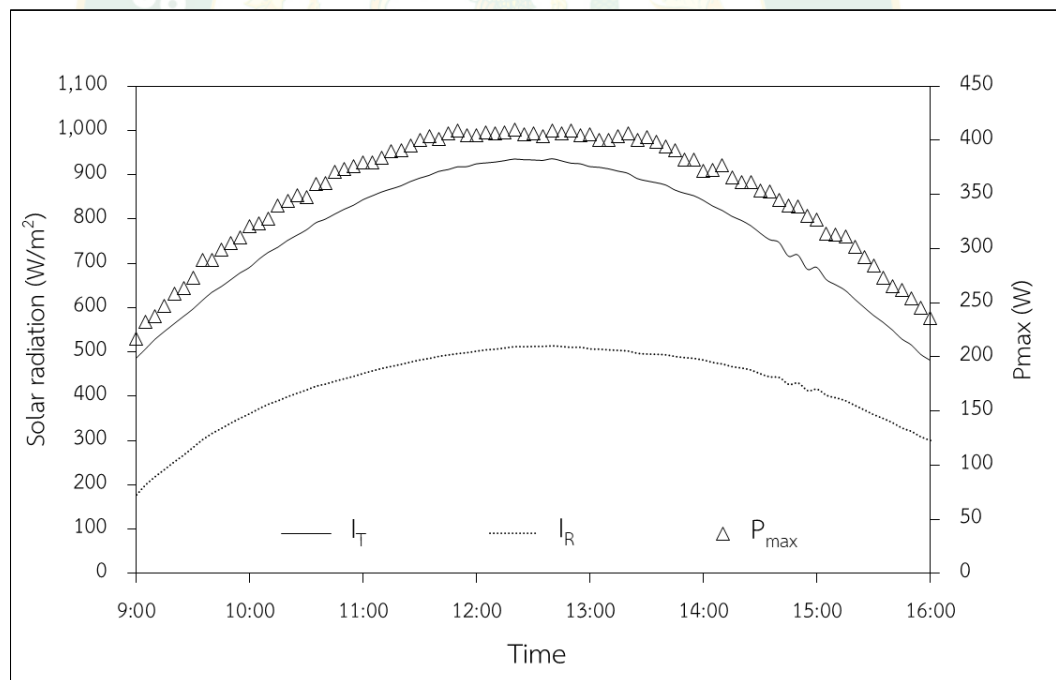
จากภาพที่ 38 แสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 0.50 m ที่มุมเอียง 15° มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 329.16 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.332 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.15 °C และอุณหภูมิแผง 48.74 °C มุมเอียง 18° มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 327.10 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.317 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 28.74 °C และอุณหภูมิแผง 47.67 °C มุมเอียง 21° กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 335.20 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.374 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 28.96 °C และอุณหภูมิแผง 49.08 °C โดยจะสังเกตได้ว่าความสูงจากพื้นที่ต่ำ (บริเวณขอบด้านล่างของแผง) ทำให้การสะท้อนแสงเข้าบริเวณด้านหลังแผงจึงทำได้น้อย เนื่องจากขอบมุมด้าน ทำให้เกิดเงาในบริเวณใกล้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน และปริมาณแสงที่สะท้อนเข้าบริเวณใต้แผงด้านล่างมีน้อย

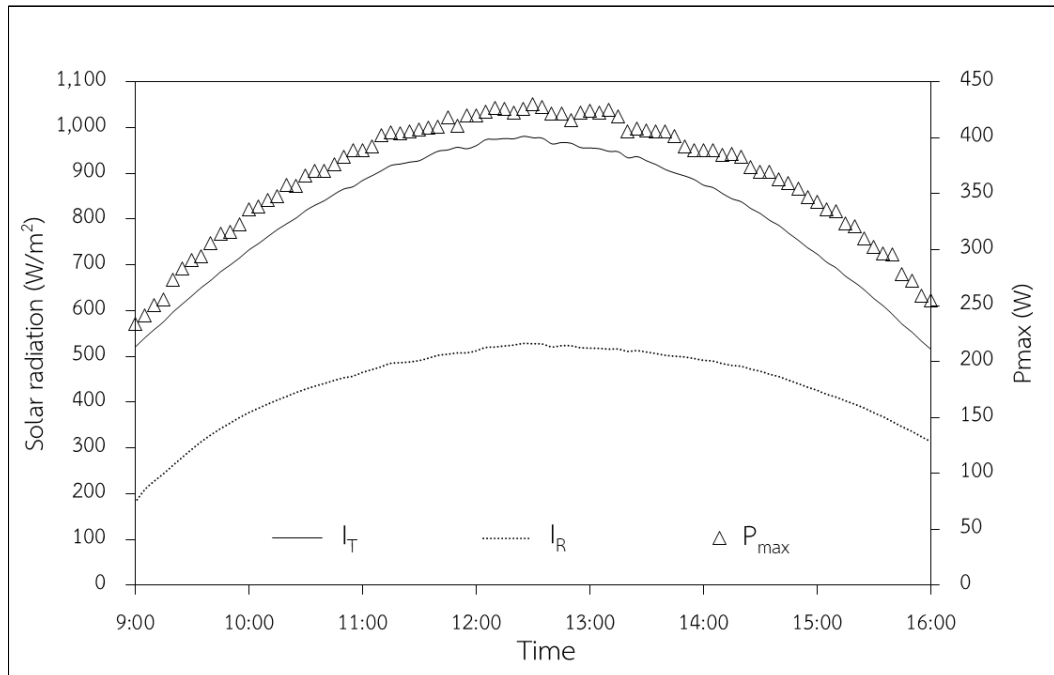
(n) Tilt angle 15° (o) Tilt angle 18°

(ค) Tilt angle 21°

ภาพที่ 38 ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m มุมเอียง 15° 18° และ 21°

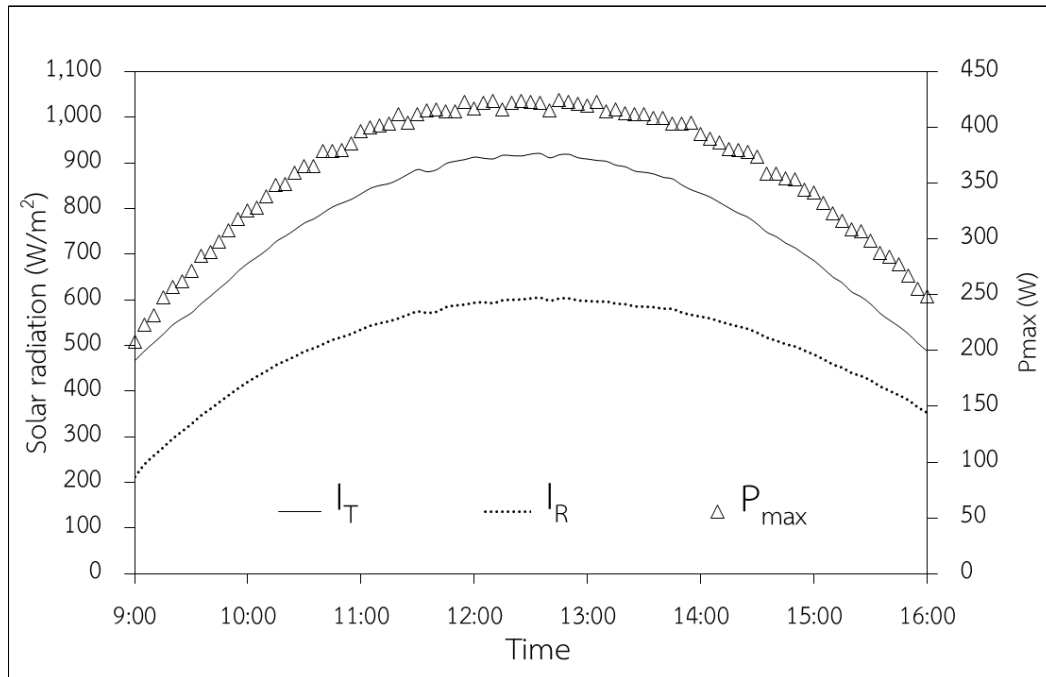
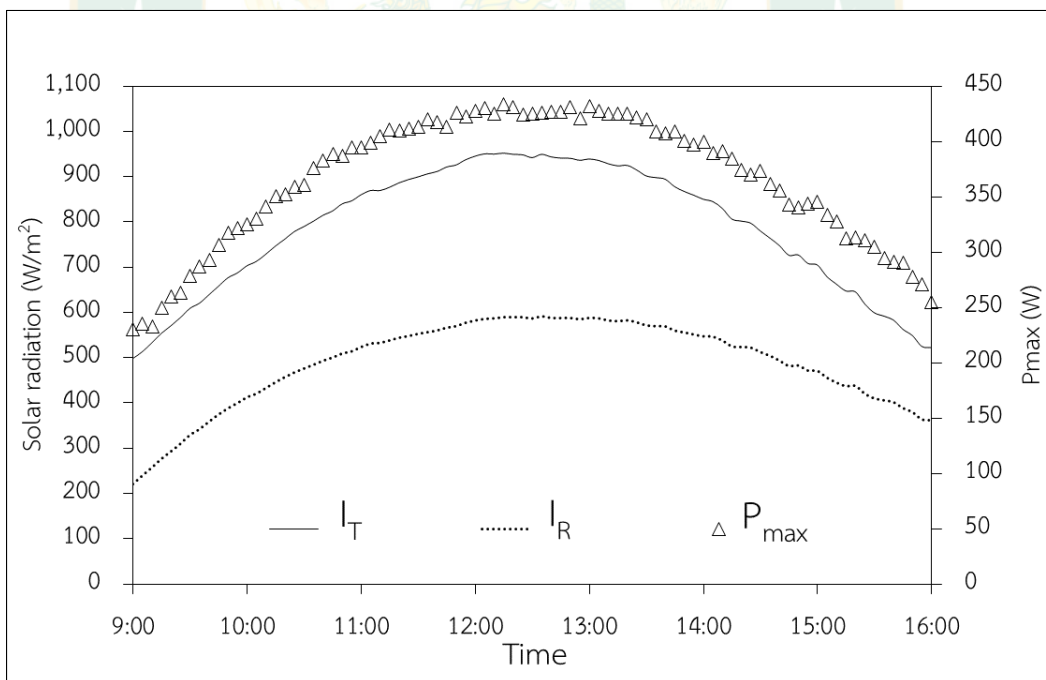
จากภาพที่ 39 กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1.00 m ที่มุมเอียง 15° มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 354.00 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.509 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $28.49^\circ C$ และอุณหภูมิแผง $48.17^\circ C$ มุมเอียง 18° กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 350.11 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.480 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $26.97^\circ C$ และอุณหภูมิแผง $47.51^\circ C$ มุมเอียง 21° กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 364.23 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.581 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $28.20^\circ C$ และอุณหภูมิแผง $48.79^\circ C$ สังเกตได้ว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 m แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงได้ดีขึ้นเนื่องจากความสูงเพิ่มมากขึ้นทำให้การสะท้อนของรังสีอาทิตย์เข้าสู่บริเวณด้านหลังแผงในปริมาณที่มากขึ้น

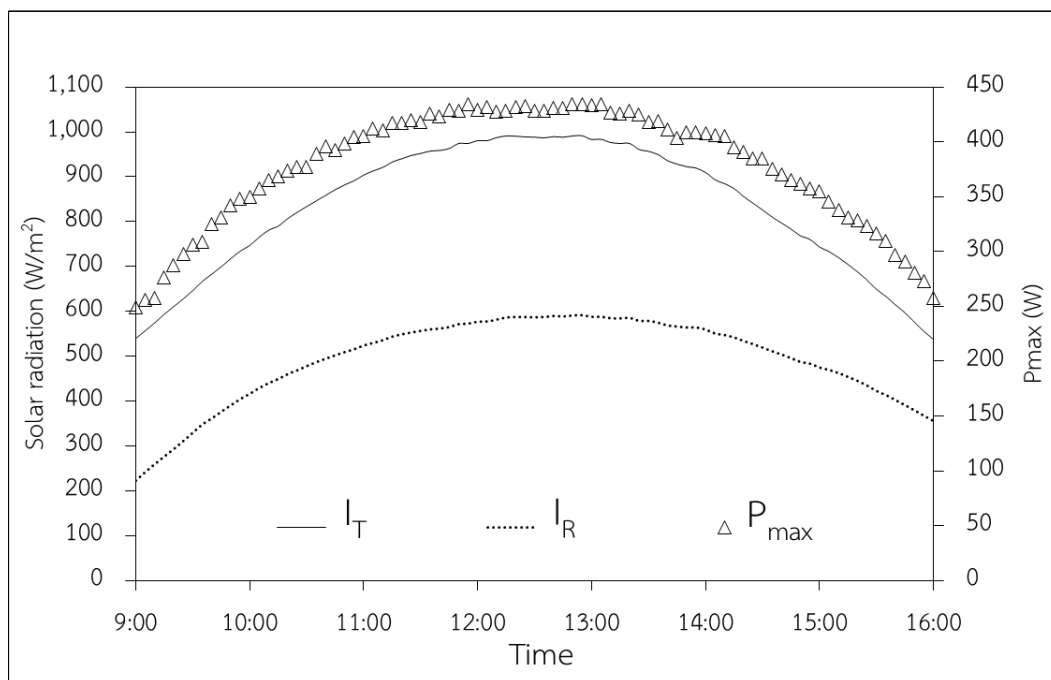
(n) Tilt angle 15° (j) Tilt angle 18°

(ค) Tilt angle 21°

ภาพที่ 39 ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m มุมเอียง 15° 18° และ 21°

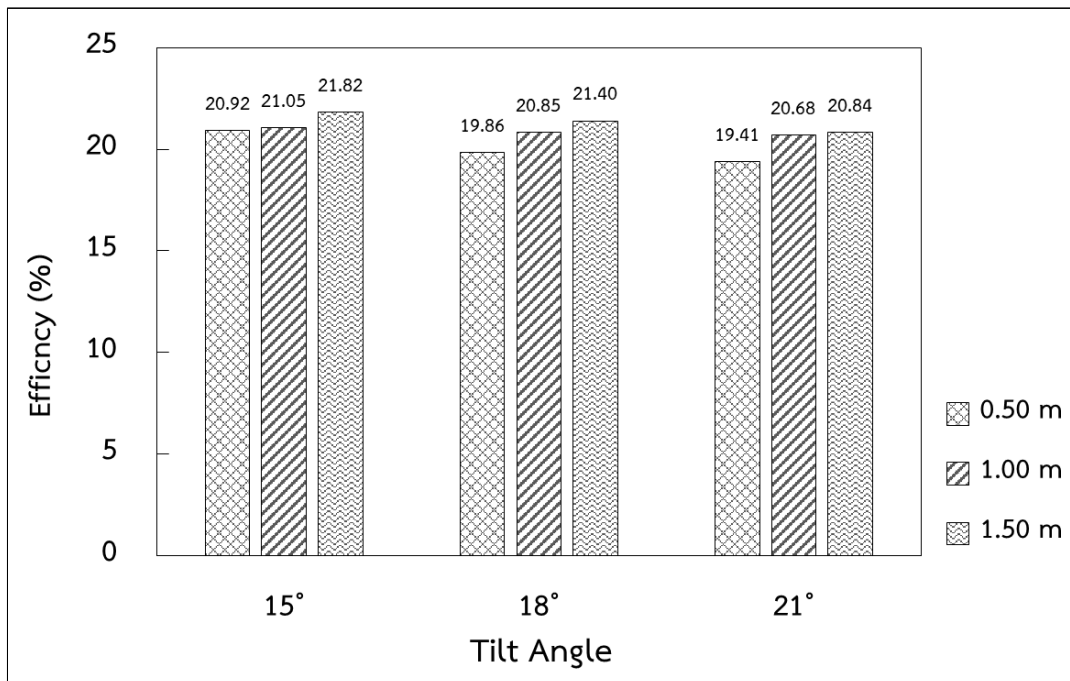
จากภาพที่ 40 กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากพื้นผิวถึงขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1.50 m ที่มุมเอียง 15° มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 361.29 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.559 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.74°C และอุณหภูมิแผง 47.00°C มุมเอียง 18° กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 365.19 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.589 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 28.47°C และอุณหภูมิแผง 48.08°C มุมเอียง 21° กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 376.92 W ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.670 kWh/day ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 28.42°C และอุณหภูมิแผง 50.35°C จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้า เพิ่มขึ้นจากความสูง 1.00 m ไม่มากซึ่งแสดงว่าหากเพิ่มความสูงมากเกินไป รังสีจะกระจายมากขึ้น ปริมาณการรับแสงด้านหลังแผงก็จะเพิ่มขึ้นไม่มาก

(n) Tilt angle 15° (v) Tilt angle 18°

(ค) Tilt angle 21°

ภาพที่ 40 ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m มุมเอียง 15° 18° และ 21°

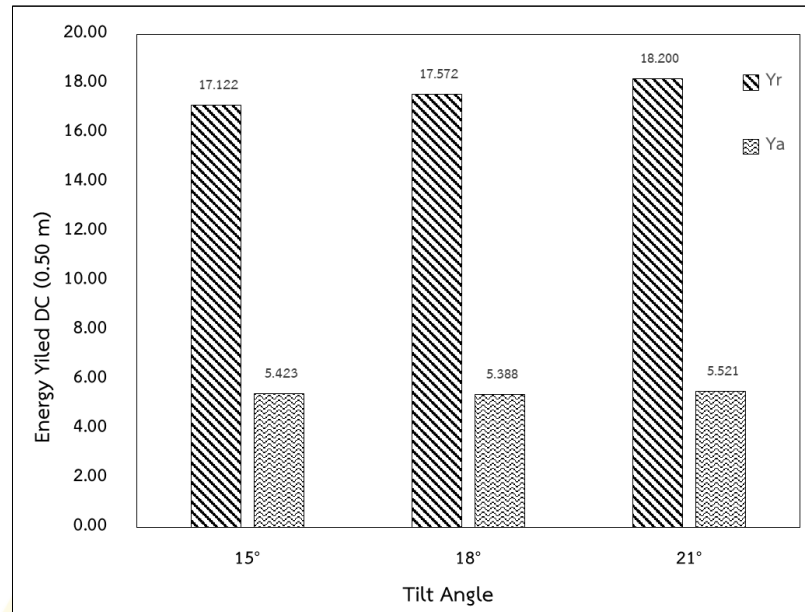
ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก ภาพที่ 41 พบว่าผลการทดสอบเมื่อความสูงของพื้นผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.50 m. เป็น 1.00 m. และ 1.50 m. ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงจะเพิ่มสูงขึ้นตามความสูงเนื่องจากความสูงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ารังสีสะท้อน I_R สูงขึ้นตาม และทำให้ผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากมีรังสีกระทบพื้นผิวกอนกรีตสีขาวใต้แผง สะท้อนเข้าบริเวณด้านหลังแผงได้มากขึ้นทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดเงาภายใต้แผงทำให้อัตราการสะท้อนแสงลดลง ซึ่งส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าด้วย ทำให้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ ที่ มุม 21° มีค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) ค่ารังสีสะท้อน (I_R) และค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P_{max}) สูง แต่เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนแล้วน้อยกว่ามุม 15° แสดงให้เห็นว่าที่มุม 15° สามารถสะท้อนค่ารังสีเข้าด้านหลังได้มากกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Bifacial PV จากผลการทดลองข้างต้นและสรุปได้ตาม ภาพที่ 39 พบว่าความสูงและมุมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m ที่มุมเอียง 15° โดยมีค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง 21.82%



ภาพที่ 41 ค่าประสิทธิภาพของแผง Bifacial PV ในแต่ละความสูงจากพื้นผิว และ มุมเอียง

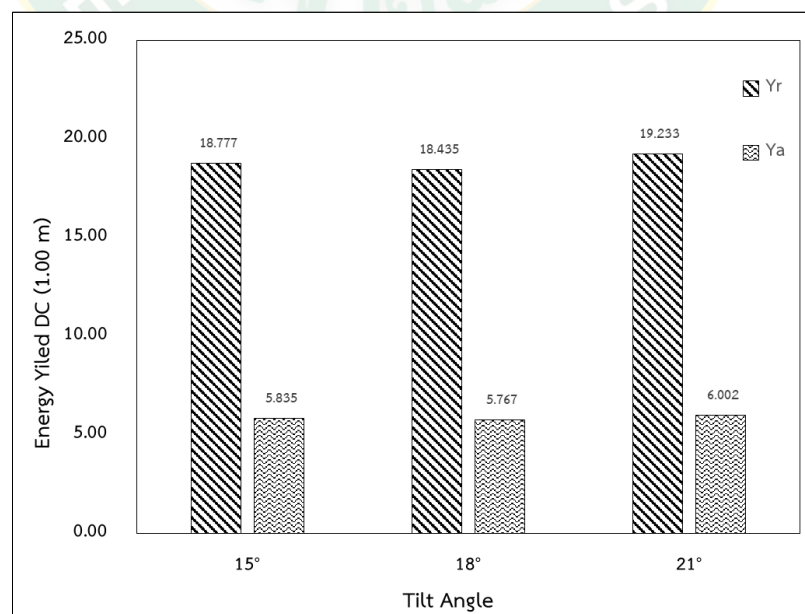
เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมดมาคำนวณเป็นค่า Energy Yield ในด้านของ DC เพื่อเปรียบเทียบในแต่ละมุม และความสูง และนำมาหาสมรรถนะของแผง Performance Ratio : (PR) ของด้าน DC

จากภาพที่ 42 ค่า Array Yield (Y_a) ที่ความสูง 0.50 m ของมุม 15° มีค่า 17.122 ของมุม 18° มีค่า 17.572 ของมุม 21° มีค่า 18.200 ในขณะที่ Reference Yield (Y_r) ของมุม 15° มีค่า 5.423 ของมุม 18° มีค่า 5.388 ของมุม 21° มีค่า 5.521 สังเกตได้ว่าค่า Energy Yield ที่มุม 21° มีค่าสูงที่สุด



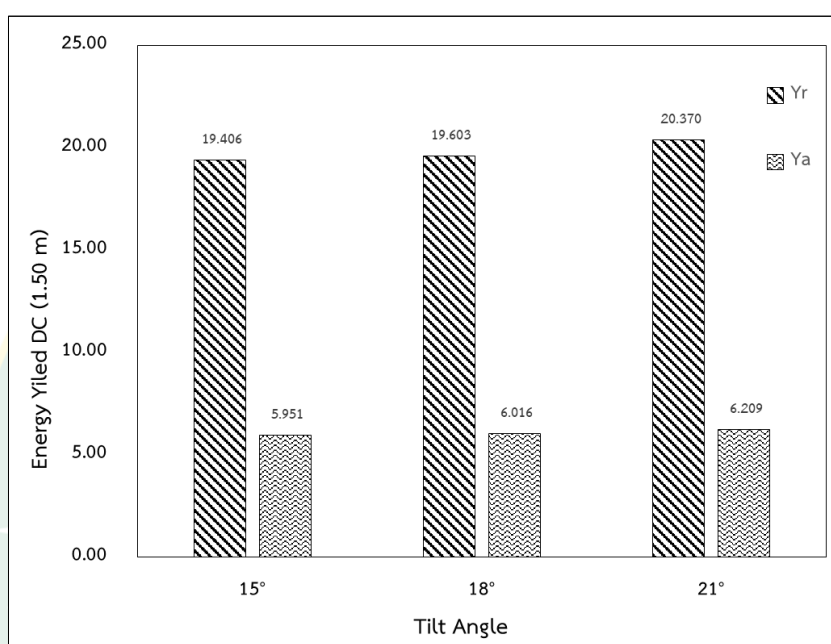
ภาพที่ 42 ค่า Energy Yield DC ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m

จากภาพที่ 43 ค่า Array Yield (Ya) ที่ความสูง 1.00 m ของมุม 15° มีค่า 18.777 ของมุม 18° มีค่า 18.435 ของมุม 21° มีค่า 19.233 ในขณะที่ Reference Yield (Yr) ของมุม 15° มีค่า 5.423 ของมุม 18° มีค่า 5.388 ของมุม 21° มีค่า 5.521 สังเกตได้ว่าค่า Energy Yield เพิ่มขึ้นจากความสูง 0.50 m



ภาพที่ 43 ค่า Energy Yield DC ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m

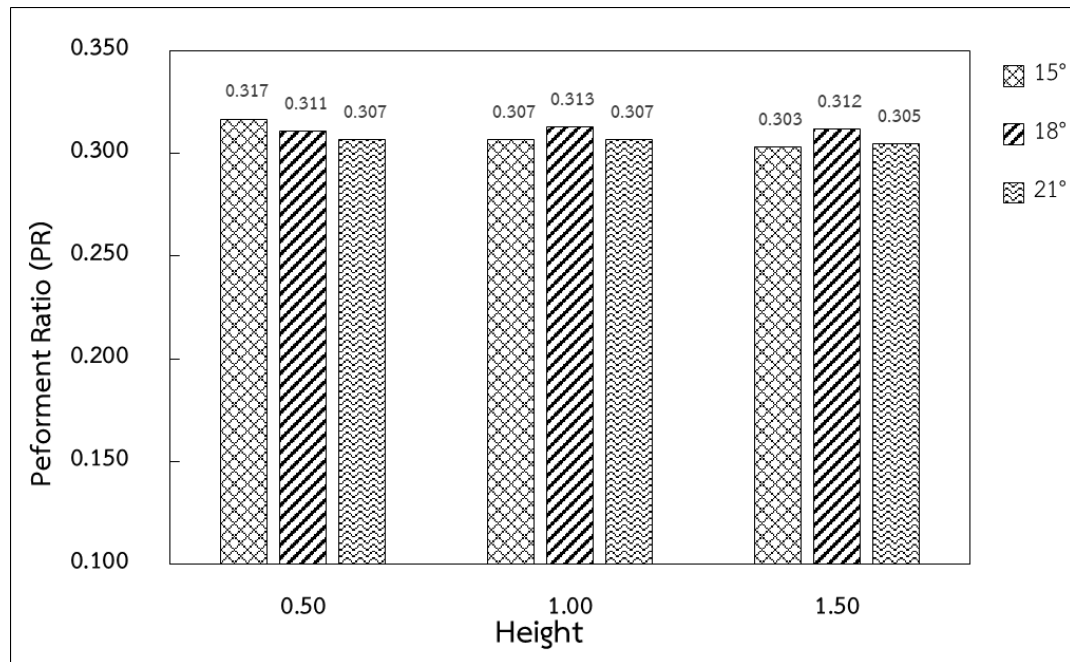
จากภาพที่ 44 ค่า Array Yield (Ya) ที่ความสูง 1.00 m ของมุม 15° มีค่า 19.406 ของมุม 18° มีค่า 19.603 ของมุม 21° มีค่า 20.370 ในขณะที่ Reference Yield (Yr) ของมุม 15° มีค่า 5.951 ของมุม 18° มีค่า 6.016 ของมุม 21° มีค่า 6.209 สังเกตได้ว่าค่า Energy Yield เพิ่มขึ้น จากความสูง 1.00 m



ภาพที่ 44 ค่า Energy Yield DC ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m

เนื่องจากในช่วงที่เก็บข้อมูลเป็นฤดูหนาว ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนไปได้สุดเมื่อเทียบกับศูนย์สูตร ท้องฟ้า ช่วงเวลาดังกล่าว ดวงอาทิตย์ตั้งฉากที่เส้นละติจูด 23° ได้ ในประเทศไทย ทำให้ที่มุม 21° มีค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบ และผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูง

เมื่อสรุปผลค่า Array Yield (Ya) และค่า Reference Yield (Yr) จากผลการทดสอบในความสูง และ มุมที่ติดตั้งจริง เพื่อนำมาหาค่าสมรรถนะ Performance Ratio : (PR) จากภาพที่ 45 พบว่า ค่า PR เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.3 ที่มุม 15° 18° 21° ในทั้ง 3 ความสูง คือ 0.50 1.00 1.50 m มีค่า PR ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งมุมเอียงตาม Latitude ของสถานที่ติดตั้งไม่ว่าความสูงขนาดไหน จะมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 45 ค่าสมรรถนะ Performance Ratio : (PR) DC

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

นอกจากการหาค่าประสิทธิภาพตามสมการที่ (8) ยังสามารถหาค่าประสิทธิภาพได้ตามสมการ

$$\eta (\%) = \frac{P_{pv,dt}}{A(I_r+I_r)dt} \times 100$$

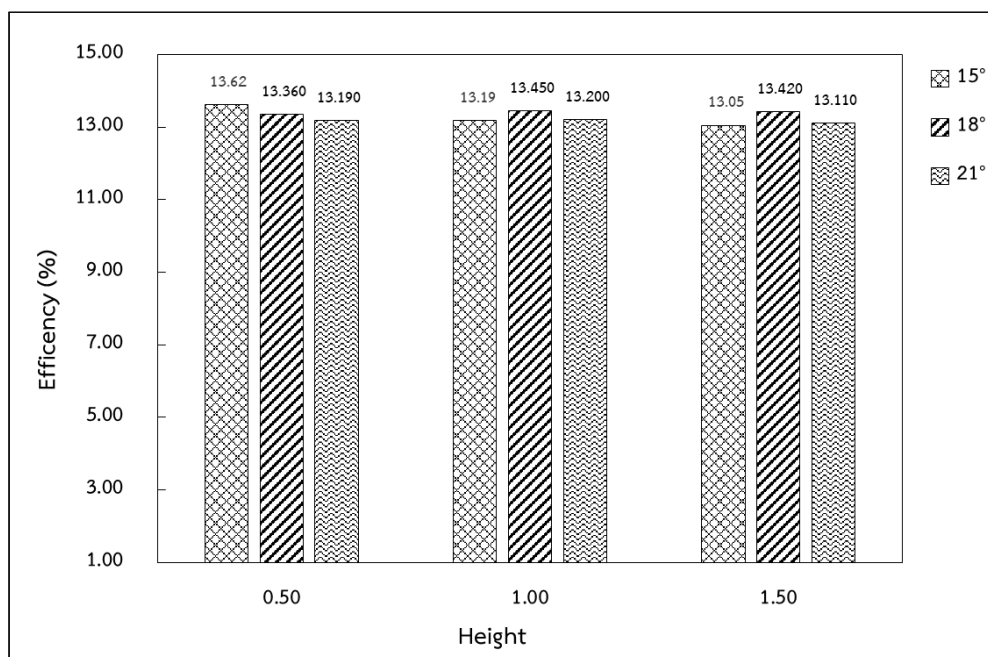
สมการที่ 21

โดยใช้ข้อมูลในการทดสอบชุดเดียวกันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าประสิทธิภาพตามสมการที่ 21

| ความสูง (m) | 0.50 | | | 1.00 | | | 1.50 | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| มุมติดตั้ง (°) | 15° | 18° | 21° | 15° | 18° | 21° | 15° | 18° | 21° |
| Efficiency (%) | 13.62 | 13.19 | 13.05 | 13.36 | 13.45 | 13.42 | 13.19 | 13.20 | 13.11 |

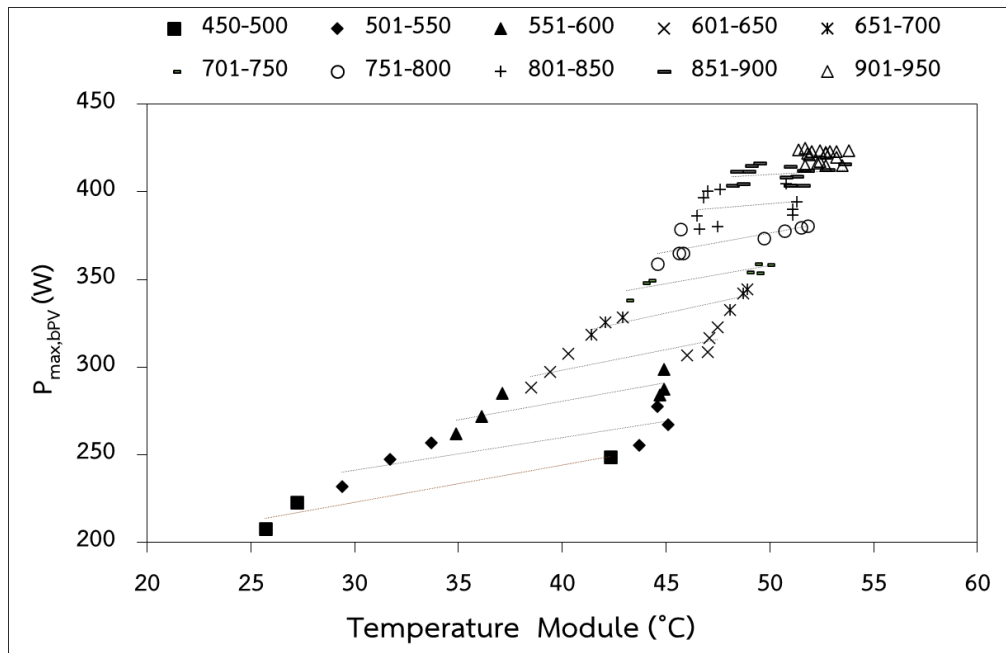
เมื่อนำค่าประสิทธิภาพจากตารางที่ 11 มานำเสนอเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 46 จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพตามสมการนี้จะอยู่ใกล้เคียงกัน โดยค่าประสิทธิภาพมีค่าอยู่ที่ประมาณ 13%



ภาพที่ 46 ค่าประสิทธิภาพตามสมการที่ 21

การสร้างสมการทำนาย

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับ ลักษณะที่ตั้งของแต่ละประเทศ และภูมิอากาศ Latitude ซึ่งจะมีปัจจัยหลายอย่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละพื้นที่ มุมเอียง และค่า Albedo ขึ้นอยู่กับพิกัดของแต่ละพื้นที่นั้น ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน จึงนำผลการทดสอบมาพิจารณาความสัมพันธ์ ของค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทำการสร้างสมการทำนายทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปี โดยพิจารณาความสัมพันธ์จากภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์

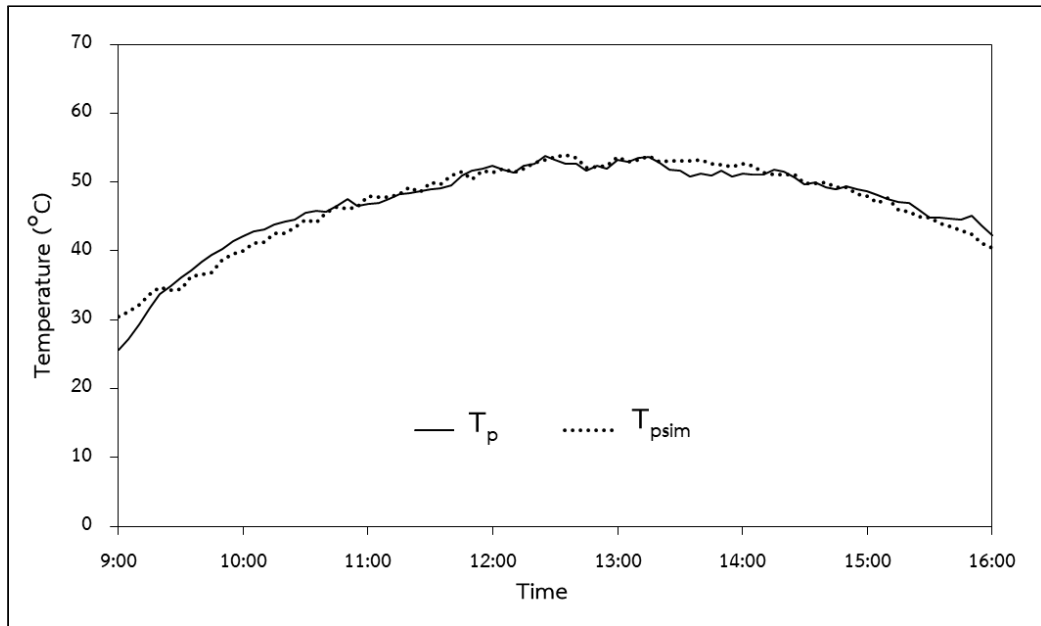
เมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น แต่เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน อาศัยการสะท้อนของรังสีอาทิตย์จากพื้นผิวเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากด้านหลังของแผง ปริมาณที่สะท้อนก็มีผลทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณที่สะท้อนด้านหลังเข้าสู่ด้านหลังแผง แม้ว่าค่ารังสีอาทิตย์ที่มีค่าใกล้เคียงกันแต่อาจผลิตไฟฟ้าได้ต่างกัน และจากเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะพบว่า อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้านั้นคืออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นหากต้องการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องทราบอุณหภูมิของแผงซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 22 โดยใช้ข้อมูลค่า Albedo = 0.53 ที่ความสูง 1.50 m. มุมเอียง 15°

$$T_{p, Sim} = 0.2122 \times (I_T^{0.5132}) \times (T_a^{0.5996}) \quad \text{สมการที่ 22}$$

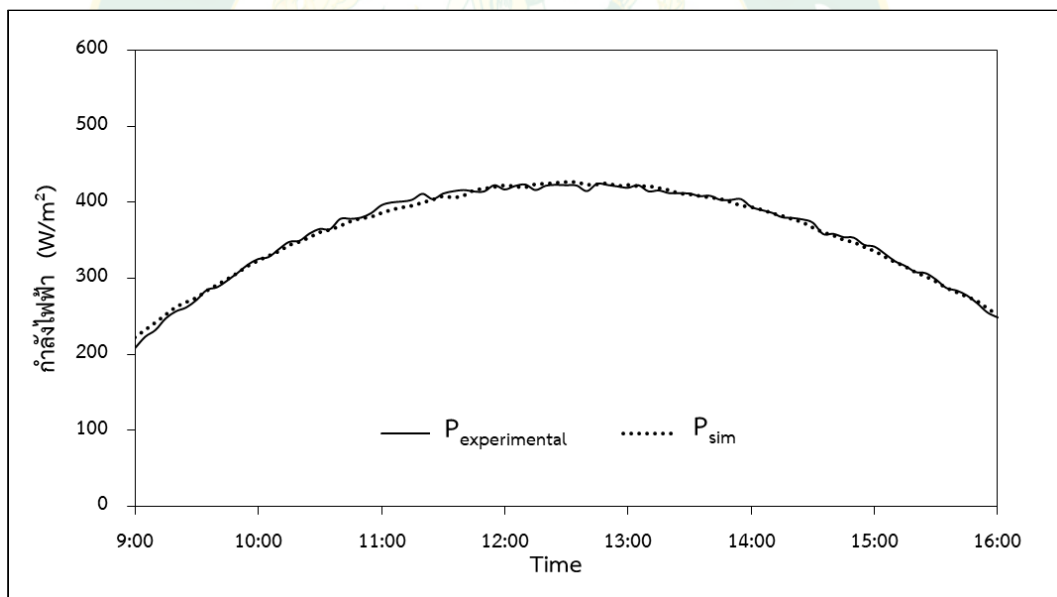
และเมื่อทราบถึงอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว สามารถทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จาก สมการที่ 22

$$P_{PV, Sim} = 1.0152 \times (I_T^{0.7781}) \times (T_a^{0.0333}) \times (T_M^{0.1559}) \quad \text{สมการที่ 23}$$

เมื่อนำสมการที่ (22) และ สมการที่ (23) มาคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า เป็นไปทิศทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลการทำนายอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (22) มีความคลื่อน 2.49 % ตามภาพที่ 48 (ก) และ การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามสมการที่ (23) มีความคลาดคลื่อน 1.12 % ซึ่งแสดงดังภาพที่ 48(ข)



(ก) อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดสอบและทำนาย



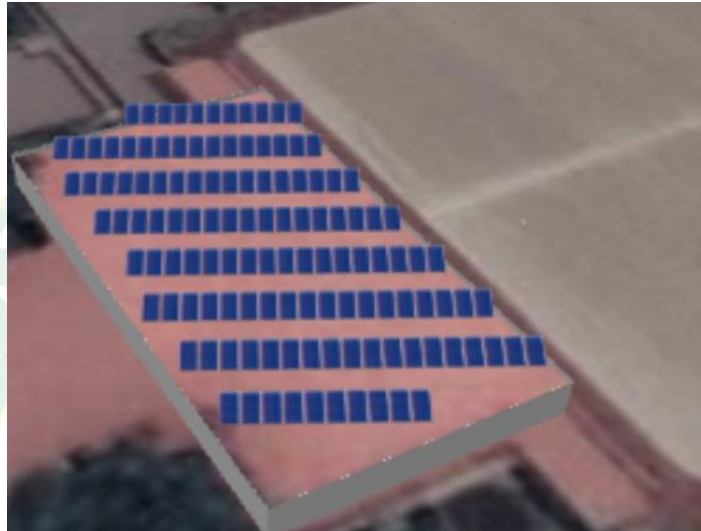
(ข) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการทดสอบและทำนาย

ภาพที่ 48 แสดงผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์

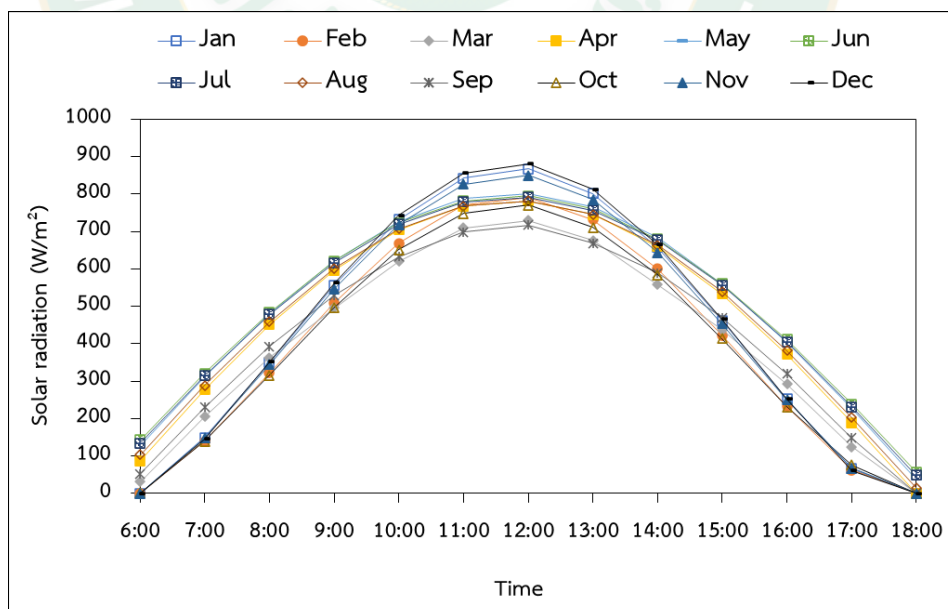
การสร้างแบบจำลองกรณีติดตั้งบนอาคารและการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะจำลองการติดตั้งบนหลังคาอาคารศูนย์กีฬาภาควิชาการศึกษาศาสตร์ที่ 9 โซน A มหาวิทยาลัยแม่โจ้ บนพื้นที่ 534 m² ทาพื้นผิว

คอนกรีตด้วยสีขาว ดังภาพที่ 49 ติดตั้งที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m. ที่มุมเอียง 15° ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านพิกัดกำลัง 430 W ได้จำนวน 124 แผง รวมกำลังการผลิตติดตั้ง 53,320 W โดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์จากภาพที่ 50 และอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่จากภาพที่ 50 และภาพที่ 51 โดยนำมาสร้างสมการทำนายกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งปี

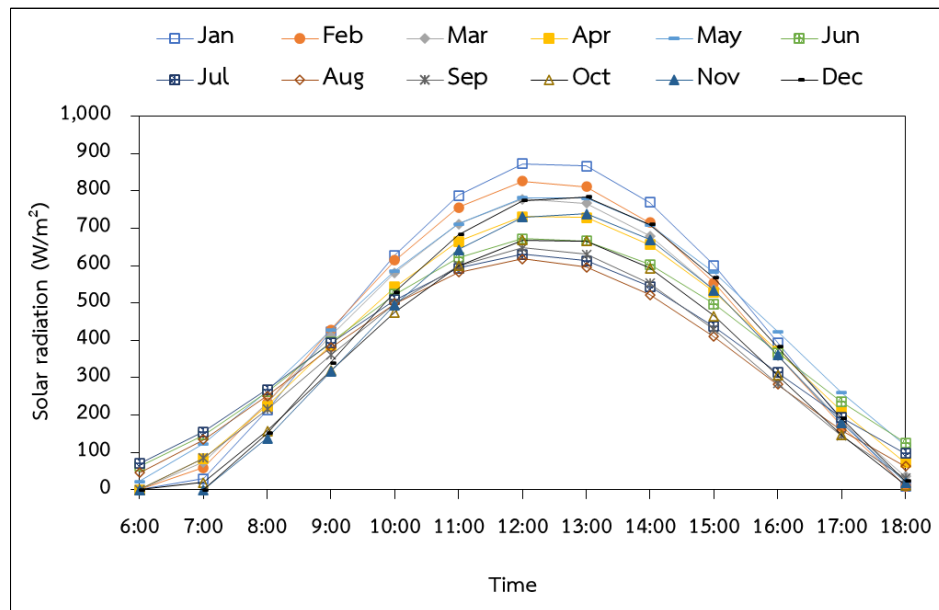


ภาพที่ 49 การจำลองการติดตั้งบนหลังคาอาคาร

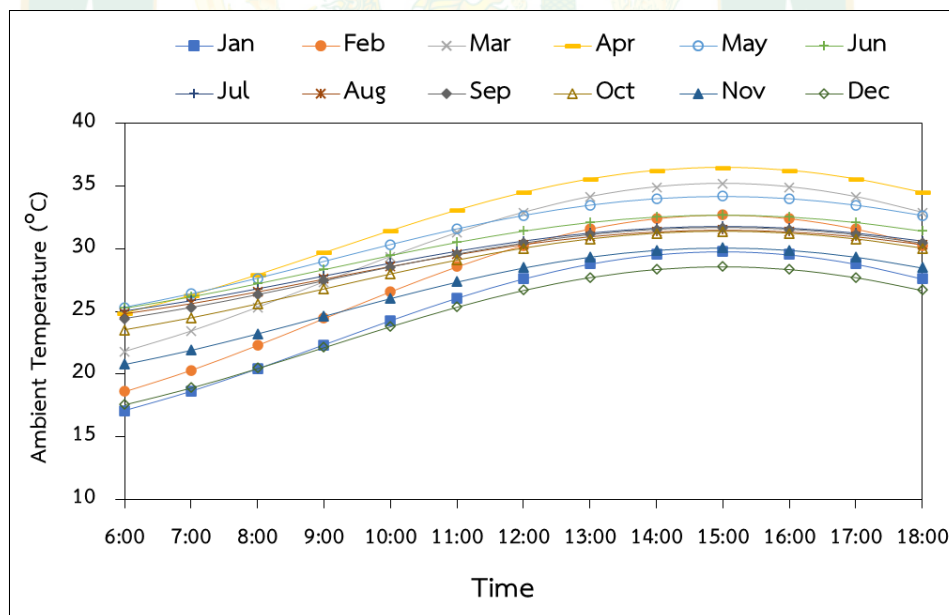


ภาพที่ 50 ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: นัฐพร, (2562)



ภาพที่ 51 ค่ารังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ที่มุม 15°

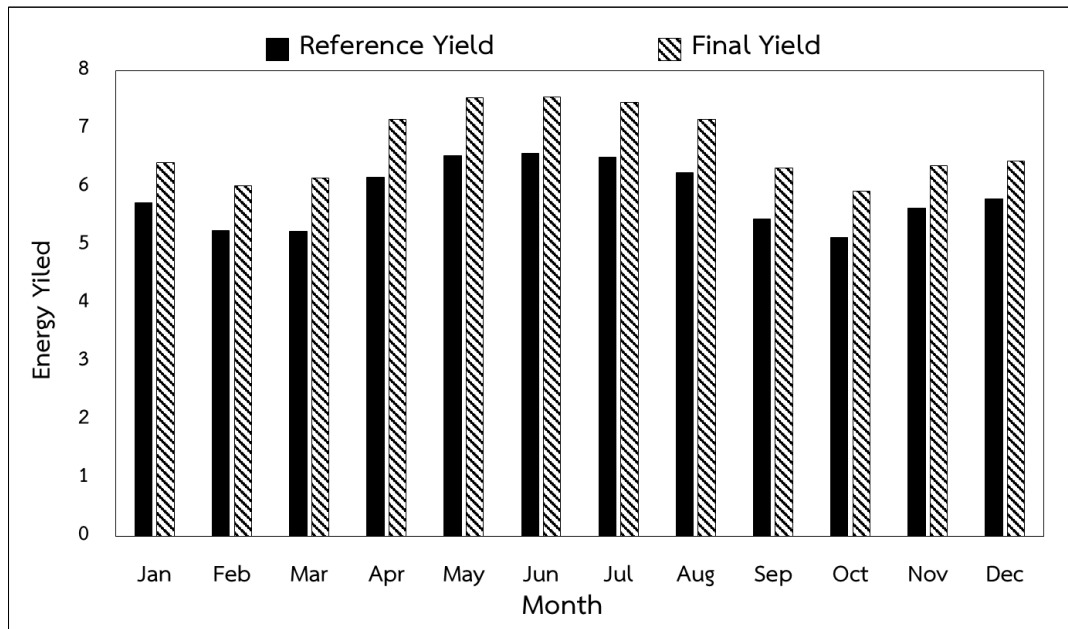


ภาพที่ 52 ค่าอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: Chaichana, (2010), กรมอุตุนิยมวิทยา, (2565)

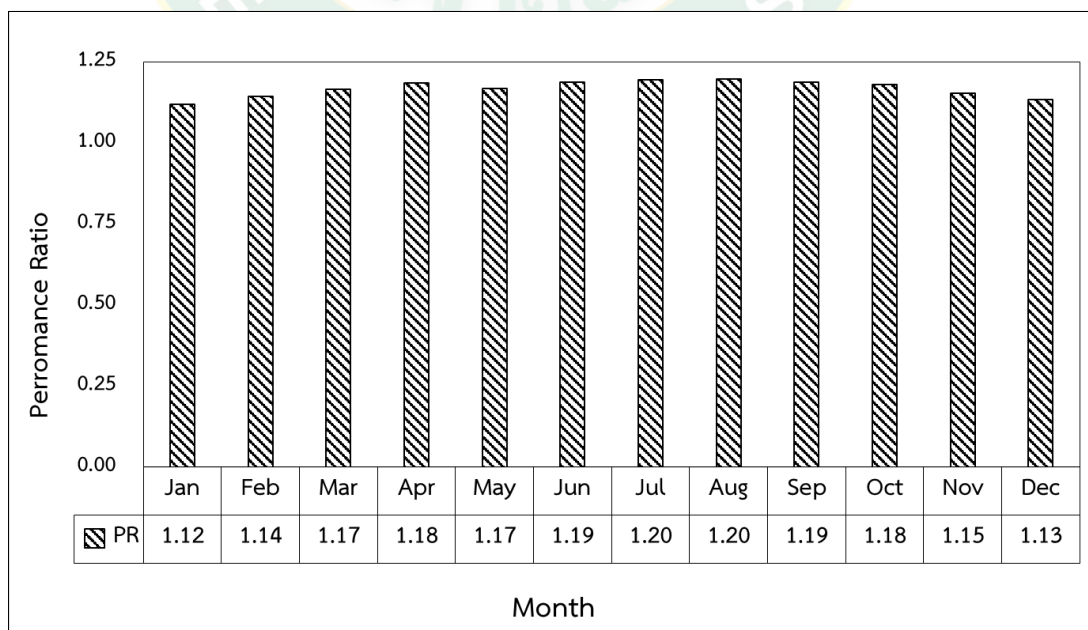
จากภาพที่ 53 การประเมินด้วยสมการทำนายและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่า Y_r ซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎีนั้น กำลังไฟฟ้าติดตั้ง

ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านที่ระบุตาม Nameplate ไม่ได้รวมกำลังไฟฟ้าที่ได้จากด้านหลังของแผงทำให้ค่า Y_r มีค่าต่ำกว่า Y_f



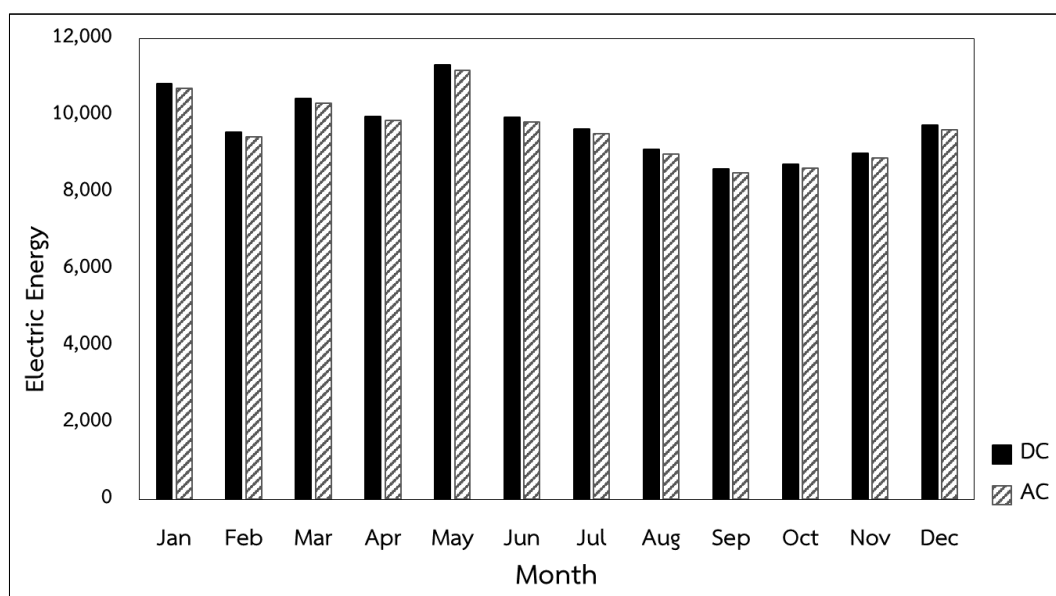
ภาพที่ 53 ค่า Energy Yield (Reference Yield (Y_r), Final Yield (Y_f))

จากภาพที่ 54 จะแสดงให้เห็นว่าค่า PR ของระบบจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.13– 1.19 ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละเดือน



ภาพที่ 54 ค่าสมรรถนะของระบบ Performance Ratio ในแต่ละเดือน

และเมื่อใช้สมการทำนายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปีเพื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าที่ทำนายได้เป็นรายเดือน ในระยะเวลา 1 ปี แสดงในภาพที่ 54 ค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน DC มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ 9,742.10 kWh คิดเป็น 116,905.19 kWh/year และค่ากำลังไฟฟ้าด้าน AC มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ 9,624.19 kWh คิดเป็น 115,502.33 kWh/year ที่ประสิทธิภาพ Inverter 98.8%



ภาพที่ 55 การทำนายค่าพลังงานเป็นรายเดือนตลอดทั้งปี

จากการประเมินเบื้องต้นจะใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 1,890,699.50 บาท โดยเป็นการประมาณในการจัดซื้ออุปกรณ์ เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบปรับแสงสองด้าน (Bifacial PV), Inverter, สายไฟ อุปกรณ์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้ง ค่าแรงงาน รวมไปถึงการทาสีพื้นผิวคอนกรีตบนหลังคาอาคาร และประมาณการเกี่ยวกับการซ่อมบำรุง เช่น การเปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเสื่อมสภาพหรือชำรุด การเปลี่ยน Inverter หรือการทาสีพื้นผิวใหม่ เป็นต้น ซึ่งสามารถคิดผลประหยัดจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า 422,738.52 บาท/ปี ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนที่ 4.47 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,035,092.81 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อยู่ที่ 12.90%

ตารางที่ 12 รายละเอียดการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

| รายละเอียด | | หน่วย | ราคา |
|--------------------------------|--------------|----------|------------|
| พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ | 115,502.33 | kWh/year | |
| ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย | 3.66 | Baht/kWh | |
| ค่าไฟฟ้าที่ประหยัด | 422,738.52 | Baht/kWh | |
| เงินลงทุน รวม | 1,890,699.50 | Baht | |
| งานโครงสร้างรับแผงโซลาร์เซลล์ | 56,935 | Baht | |
| งานติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ | 1,792,112.50 | Baht | |
| - Bifacial PV | 124 | แผง | 494,760 |
| - Inverter 36 kW 3 phase | 2 | เครื่อง | 354,200 |
| - งานเดินสายไฟฟ้าและระบบ ไฟฟ้า | 1 | งาน | 943,152.50 |
| การทำสีพื้นผิว | 1 | งาน | 41,652 |
| ระยะคืนทุน | 4.47 | year | |
| NPV | 1,035,092.81 | Baht | |
| IRR | 12.90 | % | |

หมายเหตุ ดอกเบี้ย = 6.22% (ธนาคารกรุงไทย, 2564) อายุโครงการ = 20 ปี, ค่าไฟฟ้า = 3.66 Baht/kWh (มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2563) การทำสีพื้นผิว (กระทรวงศึกษาธิการ, 2565)

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน ซึ่งการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบพื้นผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน จำนวน 4 พื้นผิว ได้แก่ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า ตามลำดับ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $31-37^{\circ}\text{C}$ จากการทดสอบพบว่า อัตราการสะท้อนแสงหรือ Albedo ของ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า มีค่าเท่ากับ 0.22 0.53, 0.26, และ 0.30 ตามลำดับ พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวมีค่าอัลบีโดสูงสุดส่งผลทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 354.67 W และมีค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 20.51% สำหรับพื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวหญ้า และพื้นผิวดิน แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้ 319.08 W , 308.75 W , และ 304.00 W ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 18.12%, 18.35%, 18.57% ตามลำดับ

ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบมุม และความสูงจากพื้นผิวถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน จากการผลการทดสอบมุมติดตั้งที่ 15° , 18° , 21° เมื่อติดตั้งที่ความสูง 0.50 m, 1.00 m, 1.50 m ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m มุม 15° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 329.16 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 20.92% มุม 18° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 327.10 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 19.86% มุม 21° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 335.20 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 19.41% ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m มุม 15° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 354.00 Wp ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 21.05% มุม 18° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 350.11 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 20.85% มุม 21° ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านสูงสุดอยู่ที่ 354.00 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 20.68% ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m มุม 15° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 361.29 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 21.82% มุม 18° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 365.19 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 21.40% มุม 21° ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 376.92 W ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 20.84% โดยการทดสอบ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน ที่ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง $723.79 - 831.05\text{ W/m}^2$ และ ค่ารังสีสะท้อนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $383.74 - 498.65\text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ

สภาพแวดล้อมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $26.9 - 29.1^{\circ}\text{C}$ และเมื่อพิจารณาความสูง มุมในการติดตั้งที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ มุม 15° ที่ความสูง 1.50 m ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สามารถรับแสงได้ดีที่สุดในการทดสอบ

เมื่อพิจารณาแล้วปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมากที่สุดคือรังสีสะท้อนจากพื้นผิวที่มีอัตราการสะท้อนแสง (Albedo) สูง และความสูงจากพื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านที่มีผลต่อปริมาณการรับรังสีสะท้อน รวมถึงความชันของมุมเอียงที่ก่อให้เกิดเงาต่อพื้นที่สะท้อนแสง

หลังจากนั้นเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้า และจำลองระบบ ซึ่งจากผลการทดสอบในส่วนที่ 2 สามารถสร้างสมการทำนายซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการทำนายกำลังไฟฟ้า โดยค่าพลังงานไฟฟ้าคำนวณได้จาก $P_{PV,Sim} = 1.0152 \times (I_T^{0.7781}) \times (T_a^{0.0333}) \times (T_M^{0.1559})$ และ อุณหภูมิของแผงคำนวณได้จาก $T_{M,Sim} = 0.2122 \times (I_T^{0.5132}) \times (T_a^{0.5996})$ เพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่าพลังงานรายปีต่อไป

เมื่อได้ค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นรายปีแล้วสามารถนำมาวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการใช้พลังงานตลอดทั้งปี สามารถทำนายค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน DC ที่มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ $9,742.10\text{ kWh}$ คิดเป็น $116,905.15\text{ kWh/year}$ และค่ากำลังไฟฟ้าด้าน AC มีค่าเฉลี่ยรายเดือนประมาณ $9,264.19\text{ kWh}$ คิดเป็น $115,502.33\text{ kWh/year}$ ที่ประสิทธิภาพ Inverter 98.8% โดยใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น $1,890,699.50\text{ Baht}$ และสามารถคิดผลประหยัดจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า $422,738.53\text{ Baht/year}$ โดยคิดค่าไฟฟ้าที่ 3.66 Baht/kWh ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 4.47 year มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) $1,035,092.81\text{ Baht}$ และ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อยู่ที่ 12.90%

ข้อเสนอแนะ

1. การติดตั้งที่ความสูงมากกว่า 1.50 m. อาจต้องคำนึงถึงแรงลมปะทะในกรณีติดตั้งบนหลังคาอาคารที่มีความสูงมาก ๆ
2. กรณีพื้นผิวที่เป็นสีขาวควรล้างทำความสะอาดอย่างน้อยเดือนละครั้ง เพื่ออัตราการสะท้อนแสงจะยังคงสูงกว่า และควรทาสีใหม่อย่างน้อย 2 ปี/ครั้ง
3. โครงสร้างรับแผงควรเป็นโครงสร้างที่ไม่บังแสงอาทิตย์บริเวณด้านหลังแผง



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). หลักสูตรเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โครงการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). สารานุกรมพลังงานทดแทน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท มีเดีย เอกซ์เพอร์ทีส อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด. 27-28.
- กระทรวงศึกษาธิการ. กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง. สำนักงานอำนวยการสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. (2565). บัญชีค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรง ประจำปีพ.ศ. 2565. 47-49
- กาญจนศิษฐ์ เวชการ. (2560). การวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ แบบลอยน้ำพิกัด 50 kWp. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.tmd.go.th/province_weather_stat.php?StationNumber=48327 สืบค้นเมื่อ 31/3/2565
- คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2562). ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง ประกาศเชิญชวนรับซื้อไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา สำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านที่อยู่อาศัย ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2563.
- ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ระบบแรงดัน 115 kV. (2563). มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- ดวงพร นพคุณ. (2536). ภูมิอากาศวิทยา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- นเรนทร์ฤทธิ์ กันทะ., สราวุธ พลวงษ์ศรี., อัครินทร์ อินทนิเวศ., สุลักษณ์ มงคล. (2564). สภาพพื้นที่ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน., Renewable Energy for Community Conference งานประชุมวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนประเทศไทย ครั้งที่ 14 (TREC-14) ประจำปี พ.ศ. 2564 (หน้า 518-524). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้. <https://trec.mju.ac.th/>
- นัฐพร ไชยญาติ. 2562. เทคโนโลยีพลังงานทดแทนด้วยความร้อน. วิทยาลัยพลังงานทดแทน. มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- นิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์, วสันต์ พลาสัย. (2563). ผลการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะการทดสอบกลางแจ้ง. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. 12 (2), 113-123.

- พิระวุฒิ ชินวรรังสี., ศศิวิมล ทรงไตร., ญัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ., ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์., อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง., ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์., จรัญ ศรีธาราธิคุณ., กอบศักดิ์ ศรีประภา. (2558). การประเมินสมรรถนะ และความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์หลายเทคโนโลยีที่ติดตั้งบนหลังคาประเทศไทย. วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2558. (หน้า 21)
- รายงานสถานภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย พ.ศ. 2559-2560. (2561). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ธนาคารกรุงไทย. 2564. อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://krungthai.com/th/rates/viewdetail/4> (30 กันยายน 2565)
- วิชุดา กุ่ยมาเมือง. 2562. การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เสริม จันทร์ฉาย. (2560). รังสีอาทิตย์. พิมพ์ครั้งที่ 2. นครปฐม : เพชรเกษมพริ้นติ้ง กรุ๊ป. 42-62.
- อัครินทร์ อินทนิเวศน์. 2560. Solar Energy Application.
- Ahmer A.B. Baloch., Maher Armoush., Basel Hindi., Abdelkader Bouselham., Nouar Tabet. (2017). Performance Assessment of Stand Alone Bifacial Solar Panel Under Real Time Conditions. IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 44th.
- Chaichana, C., Kiatsirirot, T. and Nuntaphan, A. (2010). Comparison of conventional flat-plate solar collector and solar boosted heat pump using unglazed collector for hot water production in small slaughterhouse. Heat Transfer Engineering, vol. 31(5). (pp. 419–429).
- HUAWEI. (2019). SUN2000-36KTL-M3. Brochure. Author. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.solar.huaweic.com> (สืบค้นเมื่อ 23 กันยายน 2565)
- IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME IEA PVPS Task 13. (2021). Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems. Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications. Report IEA-PVPS T13-14:2021. April 2021. ISBN 978-3-907281-03-1. แหล่งที่มา https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-hotovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf (สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2565)

- Isamail Shoukry., Joris Libal., Radovan Kopecek., Eckard Wefringhaus. and Werner, Jürgen. 2016. Modelling of bifacial gain for stand-alone and in-field installed bifacial PV modules. *Energy Procedia*, 92 (600-608.)
- Jai Prakash SINGH., Timothy M WAKSH. (2012). PERFORMANCE INVESTIGATION OF BIFACIAL PV MODULES IN THE TROPICS. *Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*. Vol 27.
- Johan Peura. and Jessica Torssell. (2018). Evaluation of simulation methods and optimal installation conditions for bifacial PV modules A case study on Swedish PV installations. Linköping University. Department of Management and Engineering. Master thesis 30 hp. Energy- and Environmental Engineering. Spring 2018.
- John Byrne., Joseph Nyangon Steven S., Hegedus Michael J., Chajes Job Taminiu., Nuha Ahmed., Nicholas DiNardo., Pengyu Li., Jing xuF. (2019). Feasibility of City-Scale Solar Power Plants Using Public Buildings: Case Studies of Newark and Wilmington Delaware with Early Investigations of Bifacial Solar Modules and Dual Orientation Racking as Tools for City-Scale Solar Development. *SSRN Electronic Journal*. June 2019. DOI:10.2139/ssrn.3397772
- LG Electronics Inc. (2017). *Bifacial Design Guide*. Brochure. Seoul. Korea : Author.
- M. Tahir Patel, M. Ryyan Khan, Xingshu Sun, Muhammad A. Alam. 2019. A worldwide cost-based design and optimization of tilted bifacial solar farms. *Applied Energy*, 247(467-479)
- SolarWorld. WHITE PAPER. (2016). CALCULATING THE ADDITIONAL ENERGY YIELD OF BIFACIAL SOLAR MODULES. (แหล่งที่มา <https://solaren-ower.com/pdf/Calculating-Additional-Energy-Yield-Through-Bifacial-Solar-Technology.pdf>)
- Th. Katsaounis., K. Kotsovos., I. Gereige., A. Basaheeh., M. Abdullah., A. Khayat., E. Alhabshi., A. Al-Saggaf. and Tzavaras., A.E. 2019. Performance assessment of bifacial c-Si PV modules through device simulations and outdoor measurements. *Renewable Energy* 143 (1285-1298.)

- Ufuk Alper Yusufoglu., Tae Hun Lee., Tobias Markus Pletzer., Andreas Halm, Lejo Joseph Koduvelikulathu., Corrado Comparotto., Radovan Kopecek. and Kurz, Heinrich. 2014. Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection. Energy Procedia, 55 (389-395.)
- Wenbo Gu a, b, Senji Li a, b, Xing Liu b, Zhenwu Chen b, Xiaochun Zhang b, Tao Ma a. (2021). Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions. Renewable Energy Vol 173. 1111-11122.
- Wenbo Gu., Tao Ma., Meng Li., Lu Shen., Yijie Zhang. (2020). A coupled optical-electrical-thermal model of the bifacial photovoltaic module. Applied Energy, 258. 114075.
- Sun X., Mohammad K., Deline C. and A., Mohammad. 2018. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. Applied Energy, 212 (1601-1610)
- Y. Kotak BEng MSc, M. S. Gul BEng PhD, T. Muneer PhD and PhD, S.M. Ivanova. 2015. Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ก.1 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบ ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของการทดสอบ ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m มุมเอียง 15° พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว ณ เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่า $I_T = 912 \text{ W/m}^2$ $I_R = 594 \text{ W/m}^2$ $T_a = 27.7 \text{ C}^{\circ}$ $I_{\text{max}} = 11.54 \text{ A}$, $V_{\text{max}} = 36.16 \text{ V}$ พื้นที่รับแสงของแผง (A) 2.1732 m^2

$$P_{\text{max}} = I_{\text{max}} \times V_{\text{max}}$$

$$P_{\text{max}} = 11.54 \times 36.16$$

$$P_{\text{max}} = 417.28$$

การคำนวณประสิทธิภาพตามสมการที่ 8

$$\eta (\%) = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{sun}}} \times 100$$

$$P_{\text{sun}} = H \times A$$

$$H = 912$$

$$A = 2.1732$$

$$P_{\text{sun}} = 1,981.95$$

$$417.28$$

$$\frac{\quad}{1,981.95} \times 100$$

$$\eta (\%) = 21.05 \%$$

ภาคผนวก ก.1 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบ ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของการทดสอบ ที่ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m มุมเอียง 15° พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว ณ เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่า $I_T = 912 \text{ W/m}^2$ $I_R = 594 \text{ W/m}^2$ $T_a = 27.7 \text{ C}^\circ$ $I_{\max} = 11.54 \text{ A}$, $V_{\max} = 36.16 \text{ V}$ พื้นที่รับแสงของแผง (A) 2.1732 m^2

การคำนวณประสิทธิภาพตามสมการที่ 21

$$\eta (\%) = \frac{P_{\text{bPVdt}}}{A(I_T+I_R)dt} \times 100$$

$$P_{\text{bPVdt}} = I_{\max} \times V_{\max}$$

$$P_{\text{bPVdt}} = 11.54 \times 36.16$$

$$P_{\text{bPVdt}} = 417.28$$

$$A(I_T+I_R)dt =$$

$$H = 912+594$$

$$A = 2.1732$$

$$P_{\text{sun}} = 2,202.88$$

$$\frac{417.28}{2,202.88} \times 100$$

$$\eta (\%) = 18.94 \%$$

ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานที่ได้ โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของเดือน ธันวาคม ณ เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่า $I_T = 881 \text{ W/m}^2$ $T_a = 26.7 \text{ C}^\circ$

1.การทำนายอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

$$\begin{aligned} T_{p,Sim} &= 0.2122 \times (I_T^{0.5132}) \times (T_a^{0.5996}) \\ &= 0.2122 \times (881^{0.5132}) \times (26.7^{0.5996}) \\ &= 49.4 \text{ C}^\circ \end{aligned}$$

2.การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน

$$\begin{aligned} P_{PV,Sim} &= 1.0152 \times (I_T^{0.7781}) \times (T_a^{0.0333}) \times (T_M^{0.1559}) \\ &= 1.0152 \times (881^{0.7781}) \times (26.7^{0.0333}) \times (49.4^{0.1559}) \\ &= 407.2 \text{ W} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าสมรรถนะของระบบ (Performance Ratio : PR)

ตัวอย่างการคำนวณค่าสมรรถนะของระบบเป็นรายเดือน โดยใช้ข้อมูลเดือน ธันวาคม ใช้ค่ากำลังไฟฟ้า AC = 310.47 kWh/Day, DC = 314.24 kWh/Day กำลังการผลิตติดตั้งแผง 53.32 kW ค่ารังสีอาทิตย์รวม 5.13 W/m² ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ STC = 1 kW/m²

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield)

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_O}$$

$$Y_f = \frac{310.47 \text{ kWh/Day}}{53.32 \text{ kW}} = 5.82$$

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Reference Yield)

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}}$$

$$Y_r = \frac{5.13 \text{ kW}}{1 \text{ kW}} = 5.13$$

สมรรถนะของระบบ (Performance Ratio : PR)

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

$$PR = \frac{5.82}{5.13} = 1.13$$

ภาคผนวก ก.2 ตัวอย่างการ คำนวณทางเศรษฐศาสตร์

กรณีติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ในพื้นที่ 542 m² และทำนายผลประหยัดรายปี

| | | |
|---------------------|---|-----------------------------|
| พลังงานที่ได้ | = | 2.81 kWh/DAY/Panel |
| พลังงานที่ใช้งาน | = | 348.44 kWh/DAY |
| กำลังการผลิตติดตั้ง | = | 53.32 kW (124 แผง x 430 Wp) |
| พลังงานที่ได้ /ปี | = | 115,502.33 kWh/Year |
| ค่าไฟฟ้า | = | 3.66 Bath/kWh |
| เงินลงทุน | = | 1,890,699.50 Bath |

$$\begin{aligned}
 \text{PB (ระยะเวลาคืนทุน)} &= \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \\
 &= \frac{1,890,699.50}{422,738.52} \\
 &= 4.47 \text{ ปี}
 \end{aligned}$$

NPV มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิของโครงการ คิดที่ดอกเบี้ย 6.22%

$$\begin{aligned}
 \text{NPV} &= \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - \text{TIC} \\
 &= \frac{120,000}{(1+0.622)} + \frac{161,652}{(1+0.622)^2} + \frac{120,000}{(1+0.622)^3} + \dots + \frac{161,652}{(1+0.622)^{20}} + -1,890,699.50 \\
 &= 1,035,092.81 \text{ Baht}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{IRR} &= \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+\text{IRR})^n} - \text{TIC} = 0 \\
 &= \frac{120,000}{(1+0.622)} + \frac{161,652}{(1+0.622)^2} + \frac{120,000}{(1+0.622)^3} + \dots + \frac{161,652}{(1+0.622)^{20}} + -1,890,699.50 \\
 &= 12.90\%
 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ข.
ข้อมูลการทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการสะท้อนแสงของพื้นผิว Concrete (19 เมษายน 2564)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 598 | 101 | 26.5 | 42 | 6.24 | 36.73 | 229.1 |
| 9:05 | 616 | 103 | 26.3 | 42.6 | 6.46 | 36.53 | 236.1 |
| 9:10 | 638 | 107 | 26.5 | 43.5 | 6.70 | 36.64 | 245.7 |
| 9:15 | 600 | 101 | 26.7 | 43.9 | 6.11 | 36.66 | 223.9 |
| 9:20 | 624 | 104 | 26.9 | 44 | 6.61 | 36.35 | 240.2 |
| 9:25 | 671 | 111 | 27.2 | 44.9 | 7.13 | 36.25 | 258.6 |
| 9:30 | 692 | 114 | 27.4 | 45.8 | 7.36 | 36.11 | 265.8 |
| 9:35 | 708 | 116 | 27.5 | 46.8 | 7.54 | 36.02 | 271.4 |
| 9:40 | 720 | 116 | 27.7 | 47.1 | 7.62 | 36.13 | 275.1 |
| 9:45 | 734 | 118 | 28 | 47.8 | 7.73 | 36.24 | 280.3 |
| 9:50 | 755 | 120 | 27.9 | 47.9 | 8.12 | 35.65 | 289.5 |
| 9:55 | 792 | 127 | 28.5 | 48.2 | 8.50 | 35.74 | 303.9 |
| 10:00 | 784 | 125 | 29.2 | 49.4 | 8.47 | 35.39 | 299.8 |
| 10:05 | 794 | 128 | 28.3 | 49.8 | 8.60 | 35.38 | 304.4 |
| 10:10 | 833 | 135 | 28.7 | 49.6 | 8.88 | 35.78 | 317.6 |
| 10:15 | 848 | 137 | 29 | 48.5 | 9.21 | 35.56 | 327.5 |
| 10:20 | 833 | 135 | 29.6 | 50.1 | 9.04 | 35.44 | 320.4 |
| 10:25 | 847 | 138 | 28.7 | 50.2 | 9.19 | 35.38 | 325 |
| 10:30 | 858 | 140 | 29 | 52.1 | 9.38 | 34.99 | 328.2 |
| 10:35 | 865 | 143 | 29.1 | 51.3 | 9.44 | 35.18 | 331.9 |
| 10:40 | 875 | 146 | 29 | 51.3 | 9.58 | 35.19 | 337.2 |
| 10:45 | 894 | 149 | 29.6 | 52.7 | 9.81 | 34.88 | 342.3 |
| 10:50 | 913 | 153 | 28.7 | 53 | 10.00 | 34.75 | 347.6 |
| 10:55 | 937 | 158 | 29.8 | 54 | 10.22 | 34.79 | 355.8 |
| 11:00 | 927 | 157 | 30.8 | 54.5 | 10.21 | 34.57 | 353.1 |
| 11:05 | 919 | 157 | 30.9 | 55.5 | 10.13 | 34.44 | 348.9 |
| 11:10 | 928 | 161 | 30.6 | 55.1 | 10.26 | 34.58 | 354.9 |
| 11:15 | 937 | 164 | 30.2 | 54.2 | 10.34 | 34.73 | 359.5 |

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 945 | 166 | 30.3 | 54.8 | 10.49 | 34.49 | 361.8 |
| 11:25 | 948 | 169 | 30.1 | 55 | 10.58 | 34.31 | 363.1 |
| 11:30 | 955 | 172 | 30.9 | 55.6 | 10.59 | 34.51 | 365.8 |
| 11:35 | 960 | 173 | 31.6 | 57.2 | 10.71 | 34.11 | 365.6 |
| 11:40 | 956 | 174 | 31.4 | 57.5 | 10.74 | 33.92 | 364.5 |
| 11:45 | 964 | 177 | 31.9 | 58.3 | 10.79 | 33.92 | 366.2 |
| 11:50 | 964 | 179 | 31.4 | 57.8 | 10.76 | 34.11 | 367.2 |
| 11:55 | 948 | 178 | 30.6 | 57.1 | 10.54 | 34.24 | 361.2 |
| 12:00 | 969 | 184 | 31.3 | 57.8 | 10.86 | 34.04 | 369.8 |
| 12:05 | 970 | 187 | 30.9 | 57 | 10.90 | 34.16 | 372.7 |
| 12:10 | 965 | 188 | 30.9 | 57.4 | 10.82 | 34.15 | 369.8 |
| 12:15 | 963 | 189 | 31.3 | 57.4 | 10.85 | 34.22 | 371.6 |
| 12:20 | 983 | 195 | 32.3 | 59.1 | 11.11 | 33.85 | 376.4 |
| 12:25 | 967 | 194 | 32.6 | 59.6 | 10.95 | 33.86 | 371 |
| 12:30 | 957 | 194 | 31.6 | 59 | 10.82 | 34.34 | 368.5 |
| 12:35 | 947 | 194 | 32.3 | 58.3 | 10.70 | 34.19 | 366 |
| 12:40 | 844 | 176 | 32.5 | 56.9 | 9.19 | 34.85 | 320.2 |
| 12:45 | 975 | 205 | 32.6 | 58.3 | 11.11 | 33.90 | 376.8 |
| 12:50 | 964 | 205 | 32.4 | 59 | 11.02 | 33.77 | 372.4 |
| 12:55 | 939 | 201 | 32.6 | 60.1 | 10.81 | 33.81 | 365.5 |
| 13:00 | 954 | 206 | 32.6 | 59.2 | 10.94 | 33.84 | 370.4 |
| 13:05 | 950 | 206 | 33.1 | 60.7 | 10.81 | 33.95 | 367.2 |
| 13:10 | 938 | 205 | 33.5 | 60.4 | 10.80 | 33.73 | 364.3 |
| 13:15 | 926 | 205 | 33.7 | 60.7 | 10.68 | 33.72 | 360.3 |
| 13:20 | 920 | 206 | 32.9 | 58.6 | 10.62 | 34.00 | 361.2 |
| 13:25 | 910 | 206 | 33 | 58.3 | 10.53 | 33.98 | 357.9 |
| 13:30 | 908 | 208 | 33.9 | 58.7 | 10.53 | 33.95 | 357.6 |
| 13:35 | 898 | 207 | 33.7 | 59.3 | 10.43 | 33.89 | 353.7 |

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 886 | 207 | 33.4 | 59.1 | 10.32 | 33.91 | 350.1 |
| 13:45 | 875 | 206 | 34.1 | 59.6 | 10.20 | 33.90 | 346 |
| 13:50 | 868 | 206 | 33.9 | 60 | 10.20 | 33.68 | 343.8 |
| 13:55 | 858 | 207 | 33.6 | 57.5 | 10.04 | 34.32 | 344.8 |
| 14:00 | 843 | 206 | 34.1 | 56.6 | 9.93 | 34.31 | 340.6 |
| 14:05 | 830 | 205 | 34.1 | 56.9 | 9.78 | 34.42 | 336.5 |
| 14:10 | 821 | 206 | 33.9 | 55.9 | 9.70 | 34.51 | 334.6 |
| 14:15 | 805 | 204 | 34.2 | 57.2 | 9.57 | 34.27 | 327.9 |
| 14:20 | 790 | 203 | 34.8 | 56.3 | 9.42 | 34.38 | 324 |
| 14:25 | 776 | 202 | 34.4 | 55.3 | 9.21 | 34.69 | 319.4 |
| 14:30 | 761 | 200 | 34 | 54.4 | 9.06 | 34.77 | 315 |
| 14:35 | 745 | 198 | 34.1 | 55.6 | 8.90 | 34.67 | 308.5 |
| 14:40 | 735 | 197 | 34.3 | 54.9 | 8.76 | 34.88 | 305.6 |
| 14:45 | 719 | 194 | 34 | 54.1 | 8.58 | 34.96 | 299.9 |
| 14:50 | 702 | 192 | 34.2 | 53.4 | 8.46 | 34.82 | 294.7 |
| 14:55 | 686 | 190 | 34.2 | 52.8 | 8.23 | 34.97 | 287.9 |
| 15:00 | 692 | 193 | 34.3 | 50.6 | 8.16 | 34.63 | 290.8 |
| 15:05 | 698 | 196 | 33.9 | 48.6 | 8.09 | 36.30 | 293.7 |
| 15:10 | 684 | 194 | 34.3 | 48.9 | 8.28 | 35.74 | 295.8 |
| 15:15 | 656 | 188 | 34.4 | 50.3 | 7.92 | 35.45 | 280.6 |
| 15:20 | 590 | 173 | 34.7 | 51.1 | 7.19 | 35.59 | 255.9 |
| 15:25 | 584 | 173 | 34.2 | 50.5 | 7.16 | 35.33 | 252.9 |
| 15:30 | 573 | 172 | 34.3 | 49.9 | 7.01 | 35.48 | 248.5 |
| 15:35 | 559 | 170 | 34.9 | 50 | 6.86 | 35.51 | 243.5 |
| 15:40 | 536 | 166 | 34.5 | 49.2 | 6.58 | 35.68 | 234.7 |
| 15:45 | 518 | 163 | 35.2 | 49 | 6.32 | 35.92 | 226.9 |
| 15:50 | 492 | 158 | 34.4 | 47.9 | 6.01 | 36.14 | 217.3 |
| 16:00 | 486 | 157 | 34.9 | 47 | 5.99 | 36.20 | 216.8 |

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบการสะท้อนแสงของพื้นผิว Concrete white paint (7 พฤษภาคม 2564)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 573 | 328 | 28.8 | 43.2 | 7.98 | 36.85 | 294.2 |
| 9:05 | 599 | 343 | 28.5 | 44.6 | 7.76 | 36.59 | 283.7 |
| 9:10 | 617 | 349 | 28.7 | 45.6 | 7.93 | 36.31 | 287.9 |
| 9:15 | 631 | 359 | 29 | 47.6 | 8.23 | 36.02 | 296.3 |
| 9:20 | 649 | 363 | 29.2 | 48.6 | 8.36 | 35.75 | 298.8 |
| 9:25 | 664 | 371 | 29.5 | 48.5 | 8.65 | 35.68 | 308.5 |
| 9:30 | 673 | 374 | 29.6 | 49.8 | 8.81 | 35.56 | 313.5 |
| 9:35 | 690 | 379 | 30 | 51.4 | 9.01 | 35.27 | 317.8 |
| 9:40 | 700 | 383 | 29.5 | 51.5 | 9.18 | 35.17 | 322.8 |
| 9:45 | 718 | 387 | 30.5 | 53.6 | 9.34 | 35.02 | 327.2 |
| 9:50 | 732 | 391 | 30.6 | 53.6 | 9.50 | 34.97 | 332.3 |
| 9:55 | 745 | 396 | 30.5 | 53.9 | 9.67 | 34.84 | 336.8 |
| 10:00 | 758 | 401 | 30.9 | 55.3 | 9.83 | 34.55 | 339.6 |
| 10:05 | 771 | 405 | 31.3 | 55.5 | 9.92 | 34.72 | 344.6 |
| 10:10 | 783 | 409 | 30.9 | 56 | 10.21 | 34.45 | 351.9 |
| 10:15 | 797 | 414 | 31 | 55.4 | 10.35 | 34.60 | 358.4 |
| 10:20 | 799 | 412 | 31.7 | 56.3 | 10.38 | 34.38 | 356.9 |
| 10:25 | 818 | 420 | 31.9 | 56.1 | 10.62 | 34.35 | 364.9 |
| 10:30 | 828 | 422 | 31.5 | 56.3 | 10.73 | 34.21 | 367.1 |
| 10:35 | 839 | 426 | 32.5 | 57.4 | 10.78 | 34.30 | 370.1 |
| 10:40 | 845 | 428 | 31.6 | 56.8 | 10.96 | 34.15 | 374.3 |
| 10:45 | 855 | 431 | 32.3 | 55.7 | 11.04 | 34.51 | 381.1 |
| 10:50 | 864 | 434 | 32.2 | 57.5 | 11.15 | 34.34 | 383.1 |
| 10:55 | 879 | 439 | 32.2 | 58.6 | 11.34 | 33.87 | 384.3 |
| 11:00 | 910 | 454 | 32.3 | 58.1 | 11.67 | 33.94 | 396.1 |
| 11:05 | 908 | 450 | 32 | 58.8 | 11.80 | 33.76 | 398.5 |
| 11:10 | 902 | 441 | 33.4 | 61.3 | 11.66 | 33.48 | 390.7 |
| 11:15 | 905 | 446 | 33.3 | 59 | 11.68 | 33.93 | 396.4 |

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 906 | 438 | 32.7 | 58.5 | 11.68 | 33.91 | 396.3 |
| 11:25 | 917 | 449 | 33.1 | 60 | 11.77 | 33.95 | 399.8 |
| 11:30 | 925 | 452 | 33.2 | 61 | 11.81 | 33.80 | 398.3 |
| 11:35 | 923 | 446 | 32.6 | 60.4 | 11.84 | 33.65 | 396.8 |
| 11:40 | 926 | 451 | 33.6 | 61.5 | 11.83 | 33.62 | 396.9 |
| 11:45 | 932 | 454 | 33.1 | 62 | 11.99 | 33.28 | 398.2 |
| 11:50 | 929 | 452 | 33.5 | 63.3 | 11.99 | 33.14 | 396.7 |
| 11:55 | 937 | 456 | 33.9 | 62.7 | 11.99 | 32.95 | 394.4 |
| 12:00 | 942 | 458 | 34.1 | 63.6 | 12.00 | 33.23 | 398.7 |
| 12:05 | 942 | 458 | 34.5 | 62.6 | 12.00 | 33.21 | 398.5 |
| 12:10 | 943 | 457 | 34.4 | 62.6 | 12.00 | 33.70 | 404.4 |
| 12:15 | 946 | 459 | 34 | 62.4 | 12.00 | 33.58 | 402.2 |
| 12:20 | 949 | 460 | 34 | 63.2 | 12.00 | 33.61 | 403.4 |
| 12:25 | 952 | 459 | 35.2 | 65 | 12.00 | 33.51 | 402.1 |
| 12:30 | 947 | 462 | 34.3 | 63.7 | 12.00 | 33.63 | 403.6 |
| 12:35 | 942 | 461 | 34.5 | 63 | 12.00 | 33.60 | 403.2 |
| 12:40 | 938 | 459 | 34.8 | 64.1 | 12.00 | 33.40 | 400.8 |
| 12:45 | 937 | 460 | 33.9 | 63.2 | 12.00 | 33.25 | 399.1 |
| 12:50 | 933 | 459 | 35 | 63.8 | 11.99 | 33.21 | 396.9 |
| 12:55 | 926 | 457 | 34.9 | 63.2 | 11.95 | 33.04 | 393.9 |
| 13:00 | 924 | 456 | 35.4 | 62.6 | 11.84 | 33.28 | 393.4 |
| 13:05 | 916 | 455 | 35.2 | 63.3 | 11.83 | 33.47 | 394.9 |
| 13:10 | 914 | 454 | 35.7 | 63.5 | 11.85 | 33.10 | 391.4 |
| 13:15 | 908 | 453 | 36 | 63.4 | 11.76 | 33.24 | 389.8 |
| 13:20 | 902 | 453 | 35.5 | 61.7 | 11.74 | 33.29 | 390 |
| 13:25 | 898 | 444 | 35.9 | 62.4 | 11.68 | 33.45 | 389.6 |
| 13:30 | 886 | 450 | 36.3 | 62.2 | 11.60 | 33.37 | 386.5 |
| 13:35 | 892 | 455 | 36.6 | 62 | 11.48 | 33.72 | 386.3 |

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 877 | 450 | 36.5 | 61.4 | 11.78 | 33.58 | 391.3 |
| 13:45 | 888 | 456 | 36.1 | 62.1 | 11.55 | 33.58 | 386.9 |
| 13:50 | 885 | 457 | 36.7 | 64.3 | 11.61 | 33.40 | 387.3 |
| 13:55 | 866 | 451 | 36.3 | 64.5 | 11.33 | 33.18 | 375.2 |
| 14:00 | 857 | 449 | 37 | 64.9 | 11.26 | 33.18 | 372.8 |
| 14:05 | 860 | 455 | 36.3 | 63.6 | 11.28 | 33.45 | 367.7 |
| 14:10 | 861 | 459 | 36.3 | 63.7 | 11.24 | 33.30 | 374.5 |
| 14:15 | 847 | 455 | 36.5 | 64.1 | 11.14 | 33.34 | 371.7 |
| 14:20 | 823 | 447 | 36 | 63.6 | 10.90 | 33.60 | 366.5 |
| 14:25 | 816 | 442 | 37 | 64.7 | 10.78 | 33.41 | 360.2 |
| 14:30 | 786 | 436 | 37.1 | 62.5 | 10.45 | 33.56 | 350.8 |
| 14:35 | 776 | 436 | 37 | 62.1 | 10.31 | 33.69 | 347.4 |
| 14:40 | 662 | 374 | 37.3 | 62.3 | 10.24 | 33.75 | 345.7 |
| 14:45 | 749 | 431 | 36.7 | 59.5 | 7.78 | 35.00 | 272.4 |
| 14:50 | 563 | 327 | 36.6 | 57.1 | 9.44 | 36.29 | 342.7 |
| 14:55 | 745 | 439 | 36.7 | 55.5 | 8.92 | 36.90 | 329.3 |
| 15:00 | 680 | 262 | 37 | 57.2 | 9.41 | 34.50 | 324.8 |
| 15:05 | 655 | 392 | 36.5 | 57.5 | 9.03 | 34.47 | 311.4 |
| 15:10 | 632 | 384 | 36.8 | 57.8 | 8.88 | 34.40 | 305.5 |
| 15:15 | 615 | 378 | 37.2 | 56.9 | 8.55 | 34.60 | 295.9 |
| 15:20 | 604 | 376 | 36.7 | 56.5 | 8.50 | 34.62 | 294.4 |
| 15:25 | 590 | 373 | 37.6 | 56.1 | 8.28 | 34.92 | 289.3 |
| 15:30 | 569 | 365 | 37.8 | 56.5 | 8.01 | 34.74 | 278.1 |
| 15:35 | 553 | 358 | 37.7 | 55.3 | 7.84 | 34.92 | 273.6 |
| 15:40 | 542 | 355 | 37.7 | 54.5 | 7.60 | 35.05 | 266.4 |
| 15:45 | 515 | 342 | 38.1 | 53.4 | 7.35 | 35.19 | 258.6 |
| 15:50 | 493 | 333 | 37.2 | 53 | 7.02 | 35.54 | 249.6 |
| 16:00 | 458 | 318 | 37.7 | 52.4 | 6.50 | 35.52 | 230.8 |

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบการสะท้อนแสงของพื้นผิว Soil (15 พฤษภาคม 2564)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 546 | 154 | 32.1 | 47.8 | 6.39 | 35.87 | 229.2 |
| 9:05 | 575 | 157 | 31.7 | 47.8 | 6.63 | 35.61 | 236 |
| 9:10 | 596 | 162 | 32.4 | 48.7 | 6.82 | 35.61 | 242.8 |
| 9:15 | 610 | 165 | 32.5 | 49.9 | 7.04 | 35.32 | 248.7 |
| 9:20 | 623 | 168 | 32.1 | 49.9 | 7.19 | 35.31 | 253.8 |
| 9:25 | 642 | 171 | 32.9 | 50.7 | 7.40 | 35.28 | 261 |
| 9:30 | 641 | 170 | 32.9 | 51.9 | 7.42 | 35.10 | 260.3 |
| 9:35 | 666 | 175 | 33.2 | 51 | 7.69 | 35.24 | 271 |
| 9:40 | 682 | 178 | 33.6 | 52.3 | 7.89 | 35.04 | 276.5 |
| 9:45 | 696 | 181 | 33.4 | 52.8 | 8.07 | 34.97 | 282 |
| 9:50 | 696 | 179 | 33.7 | 54.3 | 8.04 | 34.84 | 280.2 |
| 9:55 | 709 | 182 | 34.4 | 55 | 8.19 | 34.51 | 282.8 |
| 10:00 | 721 | 184 | 33.7 | 54.6 | 8.36 | 34.59 | 289.2 |
| 10:05 | 730 | 185 | 33.8 | 54.8 | 8.52 | 34.35 | 292.7 |
| 10:10 | 727 | 184 | 34.1 | 54.5 | 8.49 | 34.61 | 293.8 |
| 10:15 | 713 | 179 | 33.8 | 54.4 | 8.26 | 34.69 | 286.5 |
| 10:20 | 753 | 188 | 33.9 | 53.2 | 8.70 | 34.93 | 303.8 |
| 10:25 | 770 | 192 | 34.2 | 54.9 | 8.95 | 34.70 | 310.6 |
| 10:30 | 765 | 189 | 34.5 | 56.5 | 8.95 | 34.44 | 308.3 |
| 10:35 | 794 | 196 | 34.6 | 56.5 | 9.24 | 34.31 | 316.9 |
| 10:40 | 798 | 197 | 34.5 | 57.1 | 9.23 | 34.28 | 316.4 |
| 10:45 | 807 | 198 | 34.9 | 58.2 | 9.41 | 33.98 | 319.7 |
| 10:50 | 824 | 202 | 35.2 | 59.4 | 9.61 | 33.84 | 325 |
| 10:55 | 846 | 206 | 35.4 | 59.3 | 9.82 | 33.82 | 332.1 |
| 11:00 | 858 | 209 | 35.8 | 59.8 | 9.95 | 33.94 | 337.8 |
| 11:05 | 869 | 211 | 35.9 | 60 | 10.11 | 33.71 | 340.9 |
| 11:10 | 869 | 211 | 35.2 | 58.4 | 10.16 | 33.86 | 344.2 |
| 11:15 | 866 | 210 | 35.5 | 57.6 | 10.16 | 33.91 | 344.8 |

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 867 | 211 | 35.1 | 59 | 10.14 | 33.77 | 342.5 |
| 11:25 | 880 | 214 | 36 | 60.3 | 10.19 | 33.84 | 345.1 |
| 11:30 | 879 | 214 | 35.5 | 61 | 10.28 | 33.55 | 344.9 |
| 11:35 | 874 | 213 | 36.5 | 61.8 | 10.17 | 33.38 | 339.7 |
| 11:40 | 875 | 212 | 36.7 | 62 | 10.21 | 33.29 | 340 |
| 11:45 | 848 | 206 | 37 | 62.7 | 10.18 | 33.26 | 338.6 |
| 11:50 | 871 | 212 | 36.3 | 61.7 | 10.13 | 33.58 | 340.4 |
| 11:55 | 886 | 215 | 36.3 | 61.7 | 10.43 | 33.42 | 348.8 |
| 12:00 | 869 | 212 | 36.4 | 62.1 | 10.23 | 33.38 | 341.5 |
| 12:05 | 887 | 216 | 37.6 | 63.3 | 10.32 | 33.29 | 343.6 |
| 12:10 | 894 | 217 | 37.5 | 63.4 | 10.46 | 33.17 | 347 |
| 12:15 | 899 | 218 | 37 | 63 | 10.50 | 33.26 | 349.4 |
| 12:20 | 905 | 220 | 37.2 | 61.9 | 10.62 | 33.32 | 354.2 |
| 12:25 | 898 | 217 | 37.5 | 61.4 | 10.49 | 33.43 | 351 |
| 12:30 | 889 | 216 | 37.4 | 60.9 | 10.27 | 33.36 | 342.6 |
| 12:35 | 884 | 216 | 36.9 | 61 | 10.29 | 33.45 | 344.3 |
| 12:40 | 870 | 213 | 37 | 60.9 | 10.22 | 33.40 | 341.6 |
| 12:45 | 893 | 219 | 37.2 | 61.2 | 10.43 | 33.43 | 349 |
| 12:50 | 928 | 228 | 37.3 | 61 | 10.81 | 33.55 | 362.9 |
| 12:55 | 952 | 236 | 37 | 62.3 | 11.13 | 33.23 | 370 |
| 13:00 | 789 | 196 | 37.4 | 63.3 | 8.92 | 35.47 | 316.4 |
| 13:05 | 935 | 232 | 37.5 | 62.5 | 10.85 | 33.19 | 360.4 |
| 13:10 | 1007 | 249 | 37.7 | 63 | 11.74 | 32.86 | 385.8 |
| 13:15 | 932 | 231 | 37.6 | 63.7 | 10.99 | 32.94 | 362.2 |
| 13:20 | 885 | 222 | 37.8 | 63 | 10.39 | 33.16 | 344.8 |
| 13:25 | 863 | 217 | 37.9 | 60.7 | 10.09 | 33.52 | 338.4 |
| 13:30 | 855 | 215 | 37.3 | 60.6 | 10.08 | 33.54 | 338.3 |
| 13:35 | 846 | 214 | 37.2 | 60.5 | 9.94 | 33.68 | 334.6 |

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 826 | 210 | 37.7 | 61.4 | 9.74 | 33.49 | 326.2 |
| 13:45 | 817 | 209 | 37.8 | 60 | 9.67 | 33.70 | 325.8 |
| 13:50 | 809 | 208 | 37.7 | 61 | 9.60 | 33.49 | 321.6 |
| 13:55 | 806 | 208 | 38 | 60.2 | 9.52 | 33.71 | 321 |
| 14:00 | 796 | 207 | 37 | 59.5 | 9.40 | 33.89 | 318.5 |
| 14:05 | 797 | 208 | 37.7 | 60.1 | 9.31 | 33.95 | 316 |
| 14:10 | 794 | 209 | 38.1 | 60 | 9.45 | 33.83 | 319.6 |
| 14:15 | 787 | 209 | 39 | 59.7 | 9.23 | 33.97 | 313.5 |
| 14:20 | 774 | 207 | 38.3 | 60.3 | 9.29 | 33.83 | 314.2 |
| 14:25 | 788 | 211 | 38.5 | 60.7 | 9.38 | 33.54 | 314.6 |
| 14:30 | 740 | 201 | 39.1 | 60.6 | 8.88 | 33.64 | 298.5 |
| 14:35 | 744 | 203 | 39.6 | 59.8 | 8.83 | 34.00 | 300.2 |
| 14:40 | 727 | 200 | 38.8 | 58.6 | 8.64 | 34.10 | 294.7 |
| 14:45 | 697 | 194 | 38.8 | 59.7 | 8.32 | 33.98 | 282.6 |
| 14:50 | 680 | 192 | 39.1 | 59.7 | 8.12 | 33.92 | 275.3 |
| 14:55 | 663 | 189 | 38.6 | 59.7 | 7.90 | 34.07 | 269.2 |
| 15:00 | 644 | 193 | 39.3 | 58 | 7.72 | 34.33 | 264.8 |
| 15:05 | 624 | 183 | 38.5 | 57.3 | 7.44 | 34.29 | 255 |
| 15:10 | 627 | 186 | 39.1 | 57.4 | 7.59 | 34.18 | 259.5 |
| 15:15 | 617 | 186 | 38.8 | 56 | 7.32 | 34.66 | 253.5 |
| 15:20 | 619 | 189 | 39.4 | 56.7 | 7.34 | 34.67 | 254.4 |
| 15:25 | 608 | 186 | 39 | 55.1 | 7.20 | 34.98 | 251.7 |
| 15:30 | 560 | 168 | 38.7 | 54.9 | 6.68 | 34.71 | 231.8 |
| 15:35 | 543 | 164 | 38.3 | 53.9 | 6.49 | 34.88 | 226.3 |
| 15:40 | 522 | 160 | 38.5 | 54.1 | 6.23 | 35.04 | 218.4 |
| 15:45 | 511 | 159 | 38.4 | 53.6 | 6.09 | 35.00 | 213 |
| 15:50 | 500 | 158 | 38.3 | 53.4 | 5.93 | 35.02 | 207.6 |
| 16:00 | 476 | 153 | 38 | 53.4 | 5.71 | 34.94 | 199.6 |

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบการสะท้อนแสงของพื้นผิว Grass (16 พฤษภาคม 2564)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 546 | 184 | 32.1 | 45.8 | 6.27 | 36.07 | 226.3 |
| 9:05 | 556 | 187 | 32.9 | 47.3 | 6.39 | 35.88 | 229.3 |
| 9:10 | 574 | 191 | 33.2 | 47.8 | 6.64 | 35.63 | 236.5 |
| 9:15 | 583 | 193 | 33.7 | 48 | 6.77 | 35.66 | 241.3 |
| 9:20 | 605 | 199 | 33.2 | 48.4 | 7.00 | 35.75 | 250.1 |
| 9:25 | 624 | 203 | 33.3 | 48.7 | 7.20 | 35.80 | 257.9 |
| 9:30 | 634 | 205 | 33.9 | 50.1 | 7.38 | 35.43 | 261.4 |
| 9:35 | 643 | 206 | 33.6 | 50.4 | 7.48 | 35.38 | 264.6 |
| 9:40 | 654 | 208 | 33.7 | 51.3 | 7.63 | 35.32 | 269.4 |
| 9:45 | 675 | 212 | 33.9 | 51.9 | 7.88 | 35.06 | 276.1 |
| 9:50 | 693 | 216 | 34.2 | 51.3 | 8.07 | 35.25 | 284.4 |
| 9:55 | 698 | 216 | 34.5 | 51.7 | 8.19 | 35.00 | 286.7 |
| 10:00 | 715 | 219 | 34.5 | 52.1 | 8.39 | 34.97 | 293.5 |
| 10:05 | 723 | 220 | 34.7 | 52.1 | 8.41 | 35.17 | 295.8 |
| 10:10 | 733 | 221 | 34.3 | 53 | 8.58 | 34.82 | 298.8 |
| 10:15 | 749 | 224 | 34.4 | 53.1 | 8.74 | 34.88 | 305 |
| 10:20 | 763 | 226 | 34.7 | 53.4 | 8.89 | 34.97 | 311 |
| 10:25 | 770 | 227 | 34.3 | 54.2 | 8.97 | 34.73 | 311.4 |
| 10:30 | 780 | 228 | 35.3 | 54.9 | 9.08 | 34.70 | 314.9 |
| 10:35 | 786 | 229 | 35.7 | 56.3 | 9.19 | 34.44 | 316.5 |
| 10:40 | 797 | 230 | 36.1 | 56.6 | 9.29 | 34.48 | 320.4 |
| 10:45 | 806 | 231 | 36.3 | 57 | 9.42 | 34.22 | 322.4 |
| 10:50 | 827 | 235 | 36.2 | 56.9 | 9.61 | 34.33 | 330 |
| 10:55 | 827 | 235 | 36.2 | 56.6 | 9.67 | 34.36 | 332.3 |
| 11:00 | 836 | 236 | 36.2 | 57.2 | 9.73 | 34.28 | 333.3 |
| 11:05 | 840 | 236 | 36.3 | 58.3 | 9.84 | 34.05 | 334.9 |
| 11:10 | 844 | 236 | 36.4 | 59.2 | 9.83 | 33.98 | 334.1 |
| 11:15 | 859 | 239 | 36.6 | 57.9 | 10.07 | 34.02 | 342.6 |

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 858 | 239 | 36.2 | 58 | 10.06 | 33.93 | 341.4 |
| 11:25 | 868 | 240 | 36.5 | 59.9 | 10.12 | 33.91 | 343.2 |
| 11:30 | 866 | 239 | 36.8 | 60.1 | 10.08 | 33.83 | 341.2 |
| 11:35 | 873 | 240 | 36.7 | 59.8 | 10.23 | 33.70 | 345 |
| 11:40 | 886 | 243 | 36.8 | 59.7 | 10.36 | 33.66 | 348.8 |
| 11:45 | 891 | 244 | 37.2 | 59.7 | 10.35 | 33.95 | 351.4 |
| 11:50 | 886 | 242 | 37.2 | 59.5 | 10.34 | 33.82 | 349.8 |
| 11:55 | 882 | 242 | 37.6 | 60.4 | 10.25 | 33.89 | 347.4 |
| 12:00 | 891 | 243 | 37.8 | 61.3 | 10.39 | 33.73 | 350.6 |
| 12:05 | 898 | 245 | 38.1 | 62.1 | 10.49 | 33.55 | 352.3 |
| 12:10 | 894 | 243 | 37.7 | 61.4 | 10.44 | 33.53 | 350.3 |
| 12:15 | 904 | 246 | 38.5 | 61.5 | 10.58 | 33.34 | 352.8 |
| 12:20 | 899 | 244 | 37.5 | 61.4 | 10.47 | 33.54 | 351.3 |
| 12:25 | 908 | 247 | 37.9 | 62.4 | 10.61 | 33.29 | 353.5 |
| 12:30 | 897 | 245 | 38.5 | 61.7 | 10.51 | 33.38 | 351.1 |
| 12:35 | 905 | 248 | 37.9 | 61.4 | 10.58 | 33.54 | 355.1 |
| 12:40 | 901 | 248 | 38.1 | 61.8 | 10.54 | 33.45 | 352.7 |
| 12:45 | 901 | 248 | 38.4 | 62.3 | 10.51 | 33.41 | 351.4 |
| 12:50 | 894 | 247 | 39 | 61.4 | 10.44 | 33.70 | 352.1 |
| 12:55 | 899 | 249 | 39.3 | 62.6 | 10.54 | 33.46 | 352.8 |
| 13:00 | 888 | 247 | 38.9 | 61.5 | 10.42 | 33.43 | 348.5 |
| 13:05 | 894 | 250 | 39.7 | 63.2 | 10.44 | 33.38 | 348.5 |
| 13:10 | 894 | 251 | 39 | 62.2 | 10.55 | 33.11 | 349.6 |
| 13:15 | 895 | 253 | 39.3 | 62.4 | 10.55 | 33.25 | 350.8 |
| 13:20 | 891 | 252 | 39.3 | 62.5 | 10.43 | 33.37 | 348.1 |
| 13:25 | 898 | 257 | 39.5 | 63.7 | 10.56 | 33.24 | 351.1 |
| 13:30 | 902 | 259 | 39.3 | 62.9 | 10.59 | 33.27 | 352.5 |
| 13:35 | 904 | 261 | 40.2 | 63.8 | 10.62 | 33.25 | 353.1 |

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 910 | 265 | 39.3 | 63.8 | 10.74 | 33.02 | 355 |
| 13:45 | 916 | 269 | 39.3 | 62.2 | 10.81 | 33.32 | 360.4 |
| 13:50 | 899 | 266 | 40 | 63.2 | 10.66 | 33.29 | 355 |
| 13:55 | 877 | 262 | 40.1 | 63.3 | 10.36 | 33.26 | 344.7 |
| 14:00 | 824 | 249 | 40.3 | 62.9 | 9.83 | 33.41 | 328.5 |
| 14:05 | 720 | 220 | 40.5 | 61.8 | 8.58 | 33.62 | 288.4 |
| 14:10 | 802 | 241 | 38.8 | 60.3 | 9.58 | 33.97 | 325.5 |
| 14:15 | 787 | 239 | 39.6 | 61.4 | 9.45 | 33.88 | 320.3 |
| 14:20 | 775 | 238 | 39.3 | 59.6 | 9.34 | 33.97 | 317.1 |
| 14:25 | 761 | 236 | 39.1 | 59.8 | 9.21 | 33.81 | 311.5 |
| 14:30 | 753 | 237 | 38.8 | 58.8 | 9.03 | 34.11 | 308.1 |
| 14:35 | 745 | 237 | 39.3 | 59.6 | 8.99 | 33.92 | 305 |
| 14:40 | 729 | 235 | 39.5 | 59.5 | 8.87 | 34.01 | 301.8 |
| 14:45 | 710 | 232 | 40 | 59.1 | 8.73 | 34.06 | 297.3 |
| 14:50 | 697 | 231 | 39.9 | 58.3 | 8.48 | 34.25 | 290.3 |
| 14:55 | 678 | 227 | 39.7 | 58.5 | 8.34 | 34.32 | 286.2 |
| 15:00 | 653 | 199 | 39.9 | 58.6 | 8.16 | 34.10 | 278.3 |
| 15:05 | 632 | 218 | 39.5 | 57.7 | 7.86 | 34.40 | 270.3 |
| 15:10 | 633 | 221 | 40 | 58.6 | 7.63 | 34.25 | 261.3 |
| 15:15 | 627 | 222 | 39.6 | 57.1 | 7.65 | 34.41 | 263.1 |
| 15:20 | 599 | 216 | 39 | 56 | 7.61 | 34.50 | 262.5 |
| 15:25 | 580 | 212 | 39.5 | 56.2 | 7.26 | 34.66 | 251.6 |
| 15:30 | 561 | 208 | 40.4 | 56.6 | 7.03 | 34.54 | 242.9 |
| 15:35 | 550 | 208 | 40.5 | 55.4 | 6.80 | 34.81 | 236.7 |
| 15:40 | 537 | 206 | 40.5 | 54.8 | 6.72 | 34.79 | 233.8 |
| 15:45 | 514 | 201 | 40.3 | 54.7 | 6.54 | 34.90 | 228.4 |
| 15:50 | 507 | 201 | 40.1 | 54.4 | 6.22 | 35.17 | 218.6 |
| 16:00 | 484 | 196 | 39.8 | 53.8 | 6.20 | 35.04 | 217.1 |

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบที่ มุม 15° ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m (3 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 472 | 185 | 21.3 | 30.2 | 41.33 | 4.77 | 197.1 |
| 9:05 | 490 | 202 | 22.5 | 31.4 | 41.18 | 5.14 | 211.7 |
| 9:10 | 509 | 217 | 21.8 | 32.7 | 40.57 | 5.64 | 228.8 |
| 9:15 | 527 | 233 | 22.2 | 33.9 | 40.75 | 5.67 | 231.1 |
| 9:20 | 544 | 248 | 21.6 | 35.1 | 40.15 | 6.12 | 245.7 |
| 9:25 | 561 | 262 | 23.1 | 36.3 | 40.10 | 6.24 | 250.2 |
| 9:30 | 577 | 275 | 22.8 | 36.9 | 39.90 | 6.55 | 261.3 |
| 9:35 | 593 | 287 | 23.5 | 38 | 39.84 | 6.74 | 268.5 |
| 9:40 | 608 | 298 | 24.7 | 38.9 | 40.06 | 6.72 | 269.2 |
| 9:45 | 624 | 309 | 24.9 | 40.2 | 39.64 | 7.16 | 283.8 |
| 9:50 | 637 | 319 | 25.2 | 41.1 | 39.22 | 7.37 | 289.1 |
| 9:55 | 648 | 329 | 24.8 | 42 | 38.97 | 7.67 | 298.9 |
| 10:00 | 668 | 341 | 26.2 | 42.8 | 39.25 | 7.59 | 297.9 |
| 10:05 | 680 | 350 | 26.8 | 43.6 | 38.69 | 7.99 | 309.1 |
| 10:10 | 696 | 359 | 24.7 | 43.6 | 38.52 | 8.26 | 318.2 |
| 10:15 | 704 | 364 | 25.6 | 44.5 | 38.86 | 8.12 | 315.5 |
| 10:20 | 715 | 371 | 25.1 | 45.6 | 38.44 | 8.33 | 320.2 |
| 10:25 | 728 | 378 | 25.9 | 46 | 38.31 | 8.57 | 328.3 |
| 10:30 | 742 | 384 | 25.6 | 46.3 | 38.46 | 8.63 | 331.9 |
| 10:35 | 752 | 381 | 25.8 | 47 | 38.41 | 8.73 | 335.3 |
| 10:40 | 766 | 372 | 25.4 | 46.9 | 37.97 | 9.02 | 342.5 |
| 10:45 | 775 | 360 | 27.4 | 48.3 | 37.69 | 9.19 | 346.4 |
| 10:50 | 783 | 377 | 27.4 | 48.8 | 37.80 | 9.21 | 348.1 |
| 10:55 | 791 | 406 | 26.2 | 48.7 | 37.66 | 9.32 | 351.0 |
| 11:00 | 800 | 425 | 27.4 | 49.6 | 37.54 | 9.55 | 358.5 |
| 11:05 | 809 | 431 | 27 | 50.4 | 37.41 | 9.63 | 360.3 |
| 11:10 | 815 | 435 | 26.7 | 50 | 37.68 | 9.61 | 362.1 |
| 11:15 | 821 | 441 | 27.3 | 50.2 | 37.69 | 9.63 | 363.0 |

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 829 | 445 | 27.9 | 50.8 | 37.67 | 9.66 | 363.9 |
| 11:25 | 838 | 451 | 28.9 | 52.5 | 37.27 | 9.87 | 367.9 |
| 11:30 | 852 | 459 | 28.4 | 52.2 | 37.17 | 9.99 | 371.3 |
| 11:35 | 853 | 460 | 27.6 | 52.9 | 37.16 | 10.01 | 372.0 |
| 11:40 | 865 | 466 | 28.7 | 54.3 | 36.97 | 10.30 | 380.8 |
| 11:45 | 868 | 468 | 29 | 53.9 | 37.30 | 10.06 | 375.2 |
| 11:50 | 870 | 470 | 30.3 | 53.1 | 36.79 | 10.41 | 383.0 |
| 11:55 | 871 | 471 | 29.3 | 53.1 | 36.53 | 10.58 | 386.5 |
| 12:00 | 873 | 472 | 28.8 | 53.4 | 36.59 | 10.59 | 387.5 |
| 12:05 | 870 | 471 | 30.1 | 52.4 | 36.72 | 10.63 | 390.3 |
| 12:10 | 877 | 476 | 30.3 | 52.6 | 36.80 | 10.63 | 391.2 |
| 12:15 | 875 | 476 | 29.1 | 53.5 | 36.67 | 10.50 | 385.0 |
| 12:20 | 865 | 471 | 30.7 | 53.9 | 37.08 | 10.26 | 380.4 |
| 12:25 | 877 | 478 | 29.4 | 53.4 | 36.93 | 10.49 | 387.4 |
| 12:30 | 878 | 481 | 29.9 | 54.5 | 36.67 | 10.51 | 385.4 |
| 12:35 | 872 | 477 | 31.3 | 55.3 | 36.90 | 10.24 | 377.9 |
| 12:40 | 874 | 479 | 29.9 | 55.3 | 36.58 | 10.41 | 380.8 |
| 12:45 | 877 | 479 | 30 | 54.7 | 36.54 | 10.61 | 387.7 |
| 12:50 | 867 | 475 | 30.6 | 54.9 | 36.40 | 10.64 | 387.3 |
| 12:55 | 861 | 471 | 31.3 | 54.9 | 36.78 | 10.35 | 380.7 |
| 13:00 | 867 | 474 | 31.6 | 53.6 | 37.05 | 10.27 | 380.5 |
| 13:05 | 863 | 472 | 31.2 | 54.6 | 36.34 | 10.66 | 387.4 |
| 13:10 | 854 | 468 | 30.1 | 54.6 | 36.51 | 10.45 | 381.5 |
| 13:15 | 841 | 463 | 31.1 | 54.6 | 36.18 | 10.40 | 376.3 |
| 13:20 | 838 | 461 | 30.2 | 53.4 | 36.77 | 10.35 | 380.6 |
| 13:25 | 840 | 463 | 31.6 | 53.1 | 36.66 | 10.31 | 378.0 |
| 13:30 | 830 | 459 | 32.1 | 53.5 | 36.51 | 10.36 | 378.2 |
| 13:35 | 824 | 456 | 32.3 | 53.9 | 36.61 | 10.20 | 373.4 |

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 820 | 455 | 31.4 | 54.2 | 36.62 | 10.16 | 372.1 |
| 13:45 | 809 | 449 | 31.3 | 53.3 | 37.00 | 9.88 | 365.6 |
| 13:50 | 799 | 444 | 32.4 | 52.5 | 37.17 | 9.81 | 364.6 |
| 13:55 | 783 | 436 | 31.8 | 52.9 | 36.98 | 9.67 | 357.6 |
| 14:00 | 775 | 433 | 32.1 | 51.9 | 37.10 | 9.60 | 356.2 |
| 14:05 | 764 | 427 | 31.7 | 52.2 | 37.15 | 9.57 | 355.5 |
| 14:10 | 755 | 423 | 32.3 | 52.5 | 37.21 | 9.27 | 344.9 |
| 14:15 | 746 | 419 | 32.2 | 52.1 | 37.34 | 9.27 | 346.1 |
| 14:20 | 731 | 411 | 32.2 | 52.2 | 36.92 | 9.32 | 344.1 |
| 14:25 | 723 | 408 | 32.1 | 52.9 | 37.17 | 9.04 | 336.0 |
| 14:30 | 712 | 401 | 32.4 | 52.7 | 36.90 | 9.15 | 337.6 |
| 14:35 | 697 | 394 | 31.8 | 52.1 | 37.09 | 8.98 | 333.1 |
| 14:40 | 683 | 386 | 33.1 | 51.6 | 37.40 | 8.67 | 324.3 |
| 14:45 | 667 | 378 | 32.9 | 51.5 | 37.52 | 8.44 | 316.7 |
| 14:50 | 654 | 371 | 32.3 | 51.3 | 37.78 | 8.21 | 310.2 |
| 14:55 | 640 | 363 | 32.6 | 49.9 | 37.77 | 8.18 | 309.0 |
| 15:00 | 627 | 356 | 32.2 | 49.3 | 37.89 | 8.08 | 306.2 |
| 15:05 | 609 | 348 | 33.1 | 49.4 | 38.39 | 7.67 | 294.5 |
| 15:10 | 597 | 341 | 32 | 48.6 | 38.41 | 7.47 | 286.9 |
| 15:15 | 583 | 333 | 31.8 | 48.7 | 38.11 | 7.57 | 288.5 |
| 15:20 | 568 | 325 | 33.7 | 48.9 | 38.24 | 7.32 | 279.9 |
| 15:25 | 549 | 315 | 32.6 | 47.2 | 38.23 | 7.24 | 276.8 |
| 15:30 | 534 | 308 | 31.9 | 47 | 38.78 | 6.73 | 261.0 |
| 15:35 | 518 | 299 | 33.7 | 46.7 | 38.33 | 6.86 | 262.9 |
| 15:40 | 499 | 289 | 32.4 | 46.3 | 38.31 | 6.66 | 255.1 |
| 15:45 | 476 | 276 | 31.9 | 46.2 | 38.14 | 6.49 | 247.5 |
| 15:50 | 454 | 265 | 32.3 | 46 | 38.67 | 6.08 | 235.1 |
| 16:00 | 438 | 256 | 32.5 | 46 | 39.09 | 5.74 | 224.4 |

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบที่ มุม 15° ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m (28 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 481 | 187 | 19.8 | 24.6 | 41.74 | 5.18 | 216.2 |
| 9:05 | 501 | 214 | 20.2 | 26.2 | 41.35 | 5.56 | 229.9 |
| 9:10 | 520 | 235 | 19.6 | 26.8 | 41.23 | 5.84 | 240.8 |
| 9:15 | 538 | 252 | 20.3 | 28.7 | 40.95 | 6.13 | 251.0 |
| 9:20 | 556 | 271 | 19.8 | 30.4 | 40.66 | 6.36 | 258.6 |
| 9:25 | 574 | 289 | 20.6 | 32.1 | 40.35 | 6.75 | 272.4 |
| 9:30 | 591 | 308 | 21.8 | 33.7 | 39.87 | 7.10 | 283.1 |
| 9:35 | 608 | 324 | 21.6 | 35.1 | 39.44 | 7.37 | 290.7 |
| 9:40 | 620 | 337 | 21.7 | 36.5 | 39.39 | 7.53 | 296.6 |
| 9:45 | 641 | 354 | 22.5 | 37.8 | 39.40 | 7.69 | 303.0 |
| 9:50 | 658 | 368 | 21.8 | 39 | 38.99 | 8.04 | 313.5 |
| 9:55 | 672 | 379 | 22.8 | 39.4 | 38.87 | 8.18 | 318.0 |
| 10:00 | 688 | 391 | 23.4 | 40.4 | 39.02 | 8.26 | 322.3 |
| 10:05 | 700 | 401 | 23.6 | 40.9 | 38.83 | 8.44 | 327.7 |
| 10:10 | 717 | 411 | 23.8 | 41.7 | 38.77 | 8.67 | 336.1 |
| 10:15 | 732 | 421 | 23.4 | 41.8 | 38.37 | 9.05 | 347.2 |
| 10:20 | 744 | 429 | 23.9 | 42.9 | 38.11 | 9.24 | 352.1 |
| 10:25 | 758 | 438 | 24.9 | 44.1 | 38.37 | 9.07 | 348.0 |
| 10:30 | 766 | 443 | 24.6 | 44.4 | 37.84 | 9.51 | 359.9 |
| 10:35 | 783 | 454 | 24.1 | 44.9 | 37.92 | 9.60 | 364.0 |
| 10:40 | 794 | 460 | 26.5 | 46.3 | 37.45 | 9.90 | 370.8 |
| 10:45 | 805 | 465 | 25.4 | 46.3 | 37.73 | 9.83 | 370.9 |
| 10:50 | 814 | 470 | 24.9 | 46.4 | 37.34 | 10.07 | 376.0 |
| 10:55 | 823 | 476 | 25.1 | 47.5 | 37.34 | 10.10 | 377.1 |
| 11:00 | 835 | 483 | 26.3 | 48.4 | 37.35 | 10.19 | 380.6 |
| 11:05 | 847 | 489 | 26.3 | 49 | 36.96 | 10.46 | 386.6 |
| 11:10 | 851 | 492 | 26.5 | 49.7 | 36.80 | 10.59 | 389.7 |
| 11:15 | 863 | 499 | 27.4 | 51.1 | 36.58 | 10.71 | 391.8 |

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 871 | 503 | 26.9 | 51.5 | 36.96 | 10.55 | 389.9 |
| 11:25 | 873 | 506 | 27.4 | 52.2 | 36.57 | 10.73 | 392.4 |
| 11:30 | 885 | 512 | 28 | 52.4 | 36.34 | 10.99 | 399.4 |
| 11:35 | 891 | 515 | 27.5 | 52.4 | 36.29 | 11.01 | 399.6 |
| 11:40 | 894 | 517 | 27.2 | 53.1 | 36.22 | 11.08 | 401.3 |
| 11:45 | 900 | 521 | 28.7 | 53.7 | 35.86 | 11.37 | 407.7 |
| 11:50 | 906 | 524 | 28.5 | 54.3 | 36.21 | 11.10 | 401.9 |
| 11:55 | 910 | 527 | 28.8 | 54.6 | 36.27 | 11.09 | 402.2 |
| 12:00 | 913 | 529 | 27.9 | 53.9 | 36.23 | 11.23 | 406.9 |
| 12:05 | 920 | 534 | 29.2 | 53.8 | 36.36 | 11.17 | 406.1 |
| 12:10 | 916 | 533 | 28.3 | 53.7 | 36.11 | 11.39 | 411.3 |
| 12:15 | 920 | 537 | 28 | 53.6 | 36.37 | 11.27 | 409.9 |
| 12:20 | 924 | 539 | 28.2 | 54 | 36.34 | 11.34 | 412.1 |
| 12:25 | 928 | 542 | 28.3 | 53.3 | 36.13 | 11.54 | 416.9 |
| 12:30 | 932 | 546 | 28.2 | 53.6 | 35.95 | 11.65 | 418.8 |
| 12:35 | 926 | 543 | 30 | 53.5 | 36.01 | 11.54 | 415.6 |
| 12:40 | 931 | 545 | 29 | 53 | 36.07 | 11.64 | 419.9 |
| 12:45 | 925 | 542 | 29.3 | 53.7 | 36.00 | 11.58 | 416.9 |
| 12:50 | 923 | 541 | 30 | 53.7 | 35.63 | 11.71 | 417.2 |
| 12:55 | 921 | 541 | 31.6 | 54.2 | 35.99 | 11.48 | 413.2 |
| 13:00 | 920 | 541 | 30.3 | 55.4 | 36.11 | 11.34 | 409.5 |
| 13:05 | 917 | 539 | 29.3 | 54 | 36.10 | 11.38 | 410.8 |
| 13:10 | 911 | 537 | 29.7 | 53.9 | 36.02 | 11.38 | 409.9 |
| 13:15 | 901 | 532 | 29.6 | 53.2 | 36.34 | 11.22 | 407.7 |
| 13:20 | 901 | 533 | 30.8 | 53.1 | 36.20 | 11.33 | 410.1 |
| 13:25 | 892 | 531 | 31.3 | 53.4 | 36.20 | 11.13 | 402.9 |
| 13:30 | 884 | 527 | 31.6 | 54.1 | 36.07 | 11.09 | 400.0 |
| 13:35 | 877 | 524 | 30.8 | 53.7 | 35.94 | 11.15 | 400.7 |

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 877 | 526 | 31.6 | 54.9 | 35.45 | 11.28 | 399.9 |
| 13:45 | 858 | 516 | 31.9 | 54.7 | 36.40 | 10.54 | 383.7 |
| 13:50 | 855 | 516 | 32.1 | 54.2 | 36.53 | 10.54 | 385.0 |
| 13:55 | 840 | 510 | 31.4 | 54 | 36.39 | 10.51 | 382.5 |
| 14:00 | 837 | 511 | 32.9 | 55.1 | 36.10 | 10.60 | 382.7 |
| 14:05 | 826 | 505 | 31.2 | 53.5 | 36.01 | 10.70 | 385.3 |
| 14:10 | 810 | 498 | 31.3 | 53.2 | 36.74 | 10.12 | 371.8 |
| 14:15 | 792 | 490 | 32.8 | 53.7 | 35.97 | 10.36 | 372.6 |
| 14:20 | 784 | 487 | 31.3 | 52.7 | 36.46 | 10.12 | 369.0 |
| 14:25 | 772 | 481 | 31.4 | 52.8 | 36.50 | 9.90 | 361.4 |
| 14:30 | 763 | 477 | 32.2 | 52.6 | 36.80 | 9.72 | 357.7 |
| 14:35 | 746 | 469 | 33.1 | 52.7 | 37.14 | 9.20 | 341.7 |
| 14:40 | 737 | 465 | 32.7 | 52.1 | 36.85 | 9.38 | 345.7 |
| 14:45 | 716 | 455 | 33.1 | 51.4 | 36.63 | 9.38 | 343.6 |
| 14:50 | 709 | 452 | 33.1 | 51 | 36.89 | 9.32 | 343.8 |
| 14:55 | 693 | 443 | 33.7 | 50.8 | 37.51 | 8.79 | 329.7 |
| 15:00 | 686 | 441 | 33.2 | 50.3 | 37.66 | 8.61 | 324.3 |
| 15:05 | 667 | 430 | 33.8 | 49.4 | 37.51 | 8.66 | 324.8 |
| 15:10 | 654 | 424 | 33.5 | 49.3 | 37.76 | 8.41 | 317.6 |
| 15:15 | 644 | 419 | 33.5 | 49 | 37.80 | 8.29 | 313.4 |
| 15:20 | 622 | 406 | 34.4 | 49.8 | 37.85 | 7.98 | 302.0 |
| 15:25 | 602 | 389 | 34.3 | 50 | 37.93 | 7.61 | 288.6 |
| 15:30 | 587 | 385 | 33.6 | 49.3 | 37.72 | 7.71 | 290.8 |
| 15:35 | 572 | 376 | 33.9 | 48.5 | 38.12 | 7.30 | 278.3 |
| 15:40 | 564 | 372 | 33.6 | 47.6 | 38.33 | 7.19 | 275.6 |
| 15:45 | 549 | 364 | 33.6 | 47.6 | 38.16 | 7.18 | 274.0 |
| 15:50 | 535 | 355 | 33.4 | 46.7 | 38.43 | 6.93 | 266.3 |
| 16:00 | 517 | 345 | 34.1 | 46.1 | 38.75 | 6.56 | 254.2 |

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบที่ มุม 15° ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m (30 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 466 | 212 | 20.6 | 25.7 | 41.77 | 4.98 | 208.0 |
| 9:05 | 488 | 239 | 20.5 | 27.2 | 41.17 | 5.42 | 223.1 |
| 9:10 | 506 | 259 | 21 | 29.4 | 41.22 | 5.63 | 232.1 |
| 9:15 | 524 | 277 | 22 | 31.7 | 40.36 | 6.13 | 247.4 |
| 9:20 | 545 | 296 | 22.4 | 33.7 | 39.99 | 6.42 | 256.7 |
| 9:25 | 559 | 312 | 21.5 | 34.9 | 40.16 | 6.52 | 261.8 |
| 9:30 | 571 | 328 | 21.2 | 36.1 | 39.89 | 6.81 | 271.7 |
| 9:35 | 591 | 347 | 22.5 | 37.1 | 39.35 | 7.24 | 284.9 |
| 9:40 | 608 | 361 | 22.2 | 38.5 | 39.20 | 7.36 | 288.5 |
| 9:45 | 626 | 377 | 22 | 39.4 | 39.23 | 7.58 | 297.4 |
| 9:50 | 643 | 392 | 23.3 | 40.3 | 38.82 | 7.92 | 307.5 |
| 9:55 | 664 | 407 | 23.5 | 41.4 | 38.72 | 8.22 | 318.3 |
| 10:00 | 680 | 421 | 23.4 | 42.1 | 38.45 | 8.47 | 325.7 |
| 10:05 | 694 | 433 | 24.1 | 42.9 | 38.47 | 8.53 | 328.1 |
| 10:10 | 709 | 445 | 23.8 | 43.1 | 38.33 | 8.83 | 338.5 |
| 10:15 | 728 | 458 | 24.5 | 43.9 | 38.09 | 9.14 | 348.1 |
| 10:20 | 740 | 467 | 24.1 | 44.2 | 38.12 | 9.17 | 349.6 |
| 10:25 | 754 | 477 | 24.6 | 44.6 | 38.01 | 9.45 | 359.2 |
| 10:30 | 769 | 488 | 25.3 | 45.6 | 37.81 | 9.66 | 365.2 |
| 10:35 | 777 | 495 | 24.6 | 45.8 | 37.75 | 9.67 | 365.0 |
| 10:40 | 791 | 504 | 25.6 | 45.7 | 37.41 | 10.12 | 378.6 |
| 10:45 | 804 | 513 | 26 | 46.6 | 37.41 | 10.12 | 378.6 |
| 10:50 | 812 | 519 | 25.5 | 47.5 | 37.64 | 10.10 | 380.2 |
| 10:55 | 820 | 526 | 25.6 | 46.5 | 37.41 | 10.32 | 386.1 |
| 11:00 | 832 | 536 | 26.7 | 46.8 | 37.09 | 10.69 | 396.5 |
| 11:05 | 844 | 544 | 26.2 | 47 | 37.30 | 10.73 | 400.2 |
| 11:10 | 851 | 549 | 26.1 | 47.6 | 36.83 | 10.90 | 401.4 |
| 11:15 | 855 | 554 | 26.3 | 48.2 | 36.91 | 10.94 | 403.8 |

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 864 | 560 | 27 | 48.4 | 36.78 | 11.19 | 411.6 |
| 11:25 | 875 | 568 | 26 | 48.7 | 37.05 | 10.92 | 404.6 |
| 11:30 | 885 | 575 | 27.1 | 49 | 37.11 | 11.10 | 411.9 |
| 11:35 | 880 | 572 | 27 | 49.1 | 36.66 | 11.32 | 415.0 |
| 11:40 | 885 | 574 | 28 | 49.5 | 36.54 | 11.40 | 416.6 |
| 11:45 | 898 | 585 | 28.2 | 51 | 36.41 | 11.39 | 414.7 |
| 11:50 | 904 | 588 | 27 | 51.7 | 36.48 | 11.37 | 414.8 |
| 11:55 | 907 | 590 | 28.1 | 52 | 36.05 | 11.73 | 422.9 |
| 12:00 | 912 | 594 | 27.7 | 52.4 | 36.16 | 11.54 | 417.3 |
| 12:05 | 910 | 595 | 28.2 | 51.8 | 36.43 | 11.58 | 421.9 |
| 12:10 | 909 | 593 | 27.8 | 51.4 | 36.32 | 11.67 | 423.9 |
| 12:15 | 917 | 600 | 28.1 | 52.3 | 36.54 | 11.40 | 416.6 |
| 12:20 | 915 | 601 | 28.8 | 52.7 | 36.37 | 11.61 | 422.3 |
| 12:25 | 915 | 601 | 29.2 | 53.8 | 35.73 | 11.85 | 423.4 |
| 12:30 | 919 | 604 | 29.5 | 53.2 | 36.05 | 11.73 | 422.9 |
| 12:35 | 920 | 605 | 29.7 | 52.7 | 36.30 | 11.64 | 422.5 |
| 12:40 | 911 | 599 | 29.6 | 52.7 | 36.45 | 11.39 | 415.2 |
| 12:45 | 918 | 603 | 28.2 | 51.7 | 36.16 | 11.75 | 424.9 |
| 12:50 | 919 | 604 | 28.3 | 52.4 | 36.27 | 11.67 | 423.3 |
| 12:55 | 911 | 599 | 28.6 | 51.9 | 36.54 | 11.53 | 421.3 |
| 13:00 | 908 | 598 | 29.9 | 53.2 | 36.14 | 11.61 | 419.6 |
| 13:05 | 905 | 597 | 29.2 | 52.9 | 35.66 | 11.86 | 422.9 |
| 13:10 | 903 | 597 | 29.6 | 53.5 | 36.07 | 11.50 | 414.8 |
| 13:15 | 895 | 592 | 30.4 | 53.6 | 35.99 | 11.56 | 416.0 |
| 13:20 | 891 | 591 | 29.6 | 52.8 | 36.48 | 11.31 | 412.6 |
| 13:25 | 882 | 586 | 30 | 51.8 | 36.55 | 11.28 | 412.3 |
| 13:30 | 879 | 586 | 30.2 | 51.6 | 36.36 | 11.33 | 412.0 |
| 13:35 | 875 | 584 | 30.2 | 50.8 | 36.74 | 11.12 | 408.5 |

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 868 | 581 | 30.6 | 51.3 | 36.48 | 11.21 | 408.9 |
| 13:45 | 865 | 580 | 30.1 | 51 | 36.73 | 10.99 | 403.7 |
| 13:50 | 851 | 573 | 30.4 | 51.6 | 36.58 | 11.03 | 403.5 |
| 13:55 | 841 | 567 | 30.5 | 50.8 | 36.52 | 11.08 | 404.6 |
| 14:00 | 833 | 564 | 31.1 | 51.3 | 36.62 | 10.77 | 394.4 |
| 14:05 | 825 | 560 | 31.1 | 51.1 | 36.81 | 10.60 | 390.2 |
| 14:10 | 813 | 553 | 30.5 | 51.1 | 36.79 | 10.51 | 386.7 |
| 14:15 | 801 | 547 | 30.6 | 51.8 | 36.85 | 10.33 | 380.7 |
| 14:20 | 789 | 542 | 31 | 51.5 | 36.76 | 10.33 | 379.7 |
| 14:25 | 780 | 537 | 31.3 | 50.7 | 36.83 | 10.26 | 377.9 |
| 14:30 | 765 | 528 | 30.5 | 49.7 | 36.62 | 10.20 | 373.5 |
| 14:35 | 748 | 517 | 31.1 | 49.9 | 37.36 | 9.60 | 358.7 |
| 14:40 | 738 | 511 | 31.6 | 49.3 | 37.22 | 9.64 | 358.8 |
| 14:45 | 724 | 503 | 31.4 | 48.9 | 37.43 | 9.47 | 354.5 |
| 14:50 | 713 | 498 | 31.8 | 49.4 | 36.80 | 9.61 | 353.6 |
| 14:55 | 699 | 489 | 31.3 | 48.9 | 37.30 | 9.23 | 344.3 |
| 15:00 | 685 | 480 | 31.5 | 48.7 | 37.29 | 9.17 | 341.9 |
| 15:05 | 668 | 470 | 31.1 | 48.1 | 37.41 | 8.89 | 332.6 |
| 15:10 | 650 | 459 | 32.6 | 47.5 | 37.79 | 8.54 | 322.7 |
| 15:15 | 637 | 451 | 31.3 | 47.1 | 37.91 | 8.35 | 316.5 |
| 15:20 | 617 | 440 | 31.8 | 47 | 38.23 | 8.07 | 308.5 |
| 15:25 | 606 | 433 | 31.5 | 46 | 38.08 | 8.06 | 306.9 |
| 15:30 | 590 | 424 | 31.9 | 44.9 | 38.42 | 7.77 | 298.5 |
| 15:35 | 570 | 411 | 31.9 | 44.9 | 38.65 | 7.44 | 287.6 |
| 15:40 | 555 | 401 | 32.2 | 44.7 | 38.08 | 7.46 | 284.1 |
| 15:45 | 541 | 391 | 32.2 | 44.6 | 38.24 | 7.26 | 277.6 |
| 15:50 | 525 | 380 | 32.3 | 45.1 | 38.58 | 6.93 | 267.4 |
| 16:00 | 505 | 365 | 31.6 | 43.7 | 38.84 | 6.57 | 255.2 |

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบที่ มุม 18° ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m (5 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 475 | 180 | 20.1 | 29.6 | 40.61 | 5.16 | 209.5 |
| 9:05 | 495 | 200 | 22 | 31.3 | 40.97 | 5.25 | 215.1 |
| 9:10 | 513 | 214 | 20.8 | 31.9 | 40.39 | 5.68 | 229.4 |
| 9:15 | 534 | 230 | 21.7 | 33.4 | 40.67 | 5.75 | 233.9 |
| 9:20 | 553 | 245 | 21.9 | 34.2 | 40.77 | 5.87 | 239.3 |
| 9:25 | 568 | 259 | 22.3 | 35.2 | 40.46 | 6.22 | 251.7 |
| 9:30 | 585 | 272 | 22.6 | 36.7 | 39.74 | 6.64 | 263.9 |
| 9:35 | 605 | 285 | 23.1 | 38.1 | 39.75 | 6.68 | 265.5 |
| 9:40 | 619 | 296 | 23.5 | 39.1 | 39.46 | 6.94 | 273.9 |
| 9:45 | 630 | 304 | 22.4 | 39.2 | 39.19 | 7.25 | 284.1 |
| 9:50 | 649 | 316 | 24.4 | 40.8 | 39.33 | 7.36 | 289.5 |
| 9:55 | 664 | 326 | 22.8 | 40.6 | 38.78 | 7.71 | 299.0 |
| 10:00 | 677 | 336 | 23.9 | 42.3 | 39.07 | 7.58 | 296.2 |
| 10:05 | 693 | 345 | 23.5 | 42.7 | 38.90 | 7.92 | 308.1 |
| 10:10 | 708 | 353 | 23.5 | 43.2 | 38.53 | 8.15 | 314.0 |
| 10:15 | 720 | 361 | 23.7 | 43.6 | 38.84 | 8.03 | 311.9 |
| 10:20 | 734 | 369 | 23.9 | 44.2 | 38.70 | 8.28 | 320.4 |
| 10:25 | 744 | 374 | 24.8 | 44.9 | 38.69 | 8.29 | 320.7 |
| 10:30 | 758 | 381 | 25.7 | 45.5 | 38.57 | 8.54 | 329.4 |
| 10:35 | 771 | 383 | 25.2 | 45.7 | 38.16 | 8.80 | 335.8 |
| 10:40 | 786 | 375 | 25.7 | 47 | 38.03 | 8.84 | 336.2 |
| 10:45 | 798 | 369 | 26 | 47.6 | 38.03 | 9.06 | 344.6 |
| 10:50 | 807 | 378 | 26.8 | 48.9 | 38.18 | 9.03 | 344.8 |
| 10:55 | 820 | 402 | 26.5 | 48.5 | 37.72 | 9.32 | 351.6 |
| 11:00 | 831 | 422 | 26.4 | 49.2 | 37.92 | 9.35 | 354.6 |
| 11:05 | 840 | 430 | 26.6 | 48.9 | 37.66 | 9.47 | 356.6 |
| 11:10 | 850 | 436 | 26.8 | 50.3 | 37.66 | 9.51 | 358.1 |
| 11:15 | 858 | 442 | 26.2 | 50.2 | 37.54 | 9.58 | 359.6 |

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 866 | 445 | 27.9 | 51.2 | 37.80 | 9.58 | 362.1 |
| 11:25 | 874 | 450 | 28.7 | 51.6 | 37.40 | 9.64 | 360.5 |
| 11:30 | 877 | 451 | 27.6 | 51.5 | 37.14 | 9.93 | 368.8 |
| 11:35 | 883 | 453 | 28.5 | 51.4 | 37.55 | 9.85 | 369.9 |
| 11:40 | 892 | 458 | 27.9 | 51.9 | 36.77 | 10.19 | 374.7 |
| 11:45 | 898 | 461 | 29.3 | 53 | 37.02 | 10.17 | 376.5 |
| 11:50 | 912 | 468 | 28.3 | 52.3 | 36.79 | 10.45 | 384.5 |
| 11:55 | 900 | 462 | 27.7 | 52.1 | 36.91 | 10.36 | 382.4 |
| 12:00 | 907 | 466 | 29.5 | 53.1 | 37.03 | 10.21 | 378.1 |
| 12:05 | 913 | 469 | 29.2 | 51.7 | 36.66 | 10.55 | 386.8 |
| 12:10 | 910 | 468 | 30 | 52.2 | 36.78 | 10.43 | 383.6 |
| 12:15 | 913 | 471 | 29.2 | 50 | 37.20 | 10.40 | 386.9 |
| 12:20 | 908 | 468 | 30.5 | 51.8 | 36.91 | 10.40 | 383.9 |
| 12:25 | 911 | 471 | 29.7 | 52.2 | 36.91 | 10.48 | 386.8 |
| 12:30 | 915 | 474 | 28.5 | 52.4 | 36.91 | 10.39 | 383.5 |
| 12:35 | 918 | 475 | 30.1 | 51.7 | 36.67 | 10.63 | 389.8 |
| 12:40 | 909 | 469 | 29.7 | 51.8 | 37.05 | 10.41 | 385.7 |
| 12:45 | 910 | 469 | 31.1 | 52.1 | 36.78 | 10.53 | 387.3 |
| 12:50 | 907 | 467 | 30.1 | 53.2 | 36.52 | 10.43 | 380.9 |
| 12:55 | 900 | 463 | 30.4 | 51.8 | 36.78 | 10.48 | 385.5 |
| 13:00 | 904 | 465 | 31.3 | 52.3 | 36.56 | 10.46 | 382.4 |
| 13:05 | 904 | 465 | 31.3 | 52.5 | 36.52 | 10.51 | 383.8 |
| 13:10 | 898 | 462 | 30.9 | 52.3 | 37.02 | 10.16 | 376.1 |
| 13:15 | 888 | 458 | 30.4 | 53.1 | 36.61 | 10.21 | 373.8 |
| 13:20 | 891 | 460 | 30.8 | 53.5 | 36.54 | 10.29 | 376.0 |
| 13:25 | 882 | 456 | 30.5 | 53.2 | 36.87 | 10.08 | 371.6 |
| 13:30 | 876 | 454 | 31.6 | 52.3 | 36.87 | 10.09 | 372.0 |
| 13:35 | 870 | 451 | 31.2 | 53.1 | 36.86 | 10.01 | 369.0 |

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 865 | 447 | 31 | 53.4 | 36.71 | 9.92 | 364.2 |
| 13:45 | 862 | 446 | 31.9 | 53.4 | 36.98 | 9.86 | 364.6 |
| 13:50 | 852 | 442 | 32.4 | 52.4 | 37.23 | 9.66 | 359.6 |
| 13:55 | 839 | 436 | 33 | 52.4 | 37.09 | 9.64 | 357.5 |
| 14:00 | 837 | 435 | 32.3 | 53.8 | 37.08 | 9.57 | 354.9 |
| 14:05 | 810 | 422 | 32.9 | 53.1 | 37.18 | 9.21 | 342.4 |
| 14:10 | 814 | 424 | 31.7 | 51.4 | 37.46 | 9.22 | 345.4 |
| 14:15 | 798 | 416 | 31.1 | 50.5 | 37.00 | 9.53 | 352.6 |
| 14:20 | 783 | 408 | 33.3 | 51.8 | 36.98 | 9.24 | 341.7 |
| 14:25 | 770 | 401 | 33.4 | 52.5 | 37.41 | 8.81 | 329.6 |
| 14:30 | 751 | 392 | 31.9 | 49.8 | 37.41 | 8.82 | 330.0 |
| 14:35 | 737 | 384 | 32.1 | 50.7 | 37.12 | 8.80 | 326.7 |
| 14:40 | 727 | 380 | 31.8 | 51 | 37.24 | 8.62 | 321.0 |
| 14:45 | 712 | 372 | 32.4 | 50.8 | 37.36 | 8.40 | 313.8 |
| 14:50 | 696 | 362 | 33.4 | 49.9 | 37.21 | 8.38 | 311.8 |
| 14:55 | 685 | 357 | 32.3 | 48.3 | 38.17 | 8.02 | 306.1 |
| 15:00 | 666 | 346 | 32.1 | 47.9 | 37.88 | 7.86 | 297.7 |
| 15:05 | 652 | 339 | 33.1 | 47.7 | 37.85 | 7.78 | 294.5 |
| 15:10 | 635 | 330 | 32.4 | 47.2 | 38.11 | 7.57 | 288.5 |
| 15:15 | 624 | 323 | 32.7 | 47.3 | 38.22 | 7.29 | 278.6 |
| 15:20 | 604 | 313 | 32.9 | 46.1 | 38.60 | 7.05 | 272.1 |
| 15:25 | 590 | 306 | 31.9 | 45.2 | 38.91 | 6.82 | 265.4 |
| 15:30 | 578 | 300 | 33.8 | 45.8 | 38.90 | 6.63 | 257.9 |
| 15:35 | 563 | 292 | 31.5 | 44.5 | 38.82 | 6.58 | 255.4 |
| 15:40 | 547 | 284 | 32.1 | 44.8 | 39.23 | 6.33 | 248.3 |
| 15:45 | 525 | 273 | 31.9 | 44.6 | 38.26 | 6.43 | 246.0 |
| 15:50 | 504 | 262 | 32.3 | 44.4 | 38.80 | 5.99 | 232.4 |
| 16:00 | 486 | 252 | 32.1 | 43.9 | 38.42 | 5.96 | 229.0 |

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบที่ มุม 18° ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m (24 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 486 | 177 | 17.8 | 24 | 41.88 | 5.17 | 216.5 |
| 9:05 | 507 | 201 | 17.9 | 24.5 | 41.59 | 5.59 | 232.5 |
| 9:10 | 529 | 219 | 18.1 | 25.4 | 41.62 | 5.70 | 237.2 |
| 9:15 | 547 | 235 | 18.5 | 26.7 | 41.01 | 6.02 | 246.9 |
| 9:20 | 564 | 252 | 18.7 | 29.2 | 40.85 | 6.33 | 258.6 |
| 9:25 | 581 | 268 | 20.7 | 31.6 | 40.56 | 6.50 | 263.6 |
| 9:30 | 597 | 285 | 20.2 | 33.5 | 40.26 | 6.79 | 273.4 |
| 9:35 | 617 | 302 | 20.8 | 34.8 | 39.38 | 7.35 | 289.4 |
| 9:40 | 635 | 317 | 21.5 | 36.4 | 39.61 | 7.32 | 289.9 |
| 9:45 | 648 | 328 | 21.3 | 37.7 | 39.33 | 7.60 | 298.9 |
| 9:50 | 664 | 340 | 21.4 | 38.5 | 39.28 | 7.77 | 305.2 |
| 9:55 | 679 | 351 | 23.1 | 39.8 | 39.00 | 7.96 | 310.4 |
| 10:00 | 692 | 361 | 21.3 | 40.1 | 38.52 | 8.32 | 320.5 |
| 10:05 | 710 | 373 | 22.2 | 41.6 | 39.03 | 8.28 | 323.2 |
| 10:10 | 726 | 383 | 21.1 | 42.2 | 38.74 | 8.45 | 327.4 |
| 10:15 | 737 | 390 | 22.1 | 42.1 | 38.36 | 8.86 | 339.9 |
| 10:20 | 752 | 400 | 22.1 | 42.6 | 38.12 | 9.03 | 344.2 |
| 10:25 | 764 | 407 | 21.6 | 43.1 | 38.10 | 9.16 | 349.0 |
| 10:30 | 776 | 415 | 22.5 | 44.4 | 38.38 | 9.05 | 347.3 |
| 10:35 | 792 | 423 | 24 | 46.1 | 37.73 | 9.54 | 359.9 |
| 10:40 | 801 | 428 | 23.5 | 46.4 | 37.71 | 9.57 | 360.9 |
| 10:45 | 812 | 435 | 23.6 | 46.4 | 37.47 | 9.89 | 370.6 |
| 10:50 | 823 | 440 | 24.2 | 47 | 37.48 | 9.97 | 373.7 |
| 10:55 | 832 | 446 | 24.5 | 48.4 | 37.21 | 10.11 | 376.2 |
| 11:00 | 845 | 452 | 24.9 | 48.5 | 37.22 | 10.19 | 379.3 |
| 11:05 | 854 | 458 | 24.3 | 48.9 | 37.22 | 10.21 | 380.0 |
| 11:10 | 863 | 464 | 25.1 | 49.4 | 36.89 | 10.40 | 383.7 |
| 11:15 | 869 | 468 | 24.1 | 48.1 | 37.25 | 10.47 | 390.0 |

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 876 | 473 | 25.4 | 49 | 37.05 | 10.56 | 391.2 |
| 11:25 | 886 | 478 | 25.6 | 48.8 | 36.93 | 10.70 | 395.2 |
| 11:30 | 894 | 483 | 25.7 | 49.2 | 36.74 | 10.89 | 400.1 |
| 11:35 | 900 | 486 | 25.4 | 49.5 | 36.75 | 10.98 | 403.5 |
| 11:40 | 909 | 491 | 25.8 | 50.5 | 36.61 | 10.95 | 400.9 |
| 11:45 | 913 | 494 | 27.2 | 50.6 | 36.63 | 11.10 | 406.6 |
| 11:50 | 919 | 497 | 25.8 | 51.9 | 36.14 | 11.32 | 409.1 |
| 11:55 | 920 | 499 | 25.9 | 51.7 | 36.49 | 11.09 | 404.7 |
| 12:00 | 926 | 503 | 26.5 | 52.3 | 36.36 | 11.13 | 404.7 |
| 12:05 | 928 | 506 | 27.2 | 53 | 36.37 | 11.20 | 407.3 |
| 12:10 | 930 | 507 | 27.6 | 54 | 35.99 | 11.30 | 406.7 |
| 12:15 | 933 | 510 | 27.7 | 53.3 | 36.50 | 11.15 | 407.0 |
| 12:20 | 937 | 513 | 27.4 | 53.9 | 36.12 | 11.36 | 410.3 |
| 12:25 | 935 | 513 | 27.9 | 54.2 | 36.29 | 11.18 | 405.7 |
| 12:30 | 935 | 513 | 28 | 53.3 | 36.39 | 11.16 | 406.1 |
| 12:35 | 934 | 513 | 28.3 | 53.9 | 36.61 | 11.03 | 403.8 |
| 12:40 | 937 | 515 | 29 | 54.6 | 35.87 | 11.40 | 408.9 |
| 12:45 | 933 | 513 | 28.5 | 54.8 | 36.23 | 11.22 | 406.5 |
| 12:50 | 927 | 511 | 27.9 | 53.8 | 36.32 | 11.27 | 409.3 |
| 12:55 | 926 | 511 | 29 | 54.3 | 36.15 | 11.19 | 404.5 |
| 13:00 | 920 | 508 | 29.6 | 54.9 | 36.08 | 11.23 | 405.2 |
| 13:05 | 918 | 507 | 29.1 | 54.7 | 36.34 | 11.01 | 400.1 |
| 13:10 | 914 | 505 | 28 | 54.5 | 35.83 | 11.18 | 400.6 |
| 13:15 | 909 | 504 | 29.3 | 53.9 | 35.96 | 11.24 | 404.2 |
| 13:20 | 905 | 503 | 29.3 | 53.6 | 35.72 | 11.38 | 406.5 |
| 13:25 | 893 | 498 | 29.8 | 54 | 35.95 | 11.13 | 400.1 |
| 13:30 | 887 | 496 | 29.3 | 52.7 | 35.89 | 11.23 | 403.0 |
| 13:35 | 883 | 495 | 29.9 | 53.5 | 35.82 | 11.12 | 398.3 |

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 878 | 494 | 29.7 | 53.2 | 36.25 | 10.88 | 394.4 |
| 13:45 | 867 | 490 | 30.5 | 53.6 | 36.17 | 10.80 | 390.6 |
| 13:50 | 859 | 488 | 30.6 | 54.5 | 36.28 | 10.54 | 382.4 |
| 13:55 | 854 | 486 | 30.9 | 55 | 36.37 | 10.52 | 382.6 |
| 14:00 | 843 | 482 | 30.1 | 54.8 | 36.63 | 10.16 | 372.2 |
| 14:05 | 830 | 477 | 30.3 | 54.3 | 36.32 | 10.27 | 373.0 |
| 14:10 | 820 | 473 | 31.3 | 55 | 35.99 | 10.47 | 376.8 |
| 14:15 | 807 | 467 | 31.4 | 54.3 | 36.09 | 10.14 | 366.0 |
| 14:20 | 798 | 464 | 30.2 | 53.3 | 36.61 | 9.88 | 361.7 |
| 14:25 | 786 | 460 | 30.9 | 52.2 | 36.99 | 9.76 | 361.0 |
| 14:30 | 770 | 451 | 30.9 | 52.1 | 37.07 | 9.55 | 354.0 |
| 14:35 | 755 | 444 | 31 | 51.8 | 36.82 | 9.59 | 353.1 |
| 14:40 | 748 | 443 | 31.2 | 50.5 | 37.41 | 9.23 | 345.3 |
| 14:45 | 717 | 427 | 31.4 | 50 | 37.46 | 9.08 | 340.1 |
| 14:50 | 720 | 430 | 32 | 51 | 37.24 | 9.09 | 338.5 |
| 14:55 | 688 | 413 | 31.3 | 50.7 | 37.15 | 8.90 | 330.6 |
| 15:00 | 692 | 416 | 32 | 49.9 | 37.48 | 8.72 | 326.8 |
| 15:05 | 664 | 402 | 32.1 | 49.6 | 37.51 | 8.37 | 314.0 |
| 15:10 | 652 | 397 | 31.1 | 48.7 | 37.85 | 8.26 | 312.6 |
| 15:15 | 640 | 390 | 32.1 | 48.1 | 37.63 | 8.28 | 311.6 |
| 15:20 | 620 | 379 | 32.3 | 47.8 | 37.73 | 8.00 | 301.8 |
| 15:25 | 601 | 369 | 32 | 47.8 | 37.99 | 7.69 | 292.1 |
| 15:30 | 583 | 358 | 31.4 | 46.7 | 38.39 | 7.41 | 284.5 |
| 15:35 | 568 | 350 | 31.6 | 46 | 38.51 | 7.09 | 273.0 |
| 15:40 | 550 | 340 | 31.4 | 45.5 | 38.91 | 6.81 | 265.0 |
| 15:45 | 530 | 328 | 30.8 | 44.5 | 38.75 | 6.76 | 262.0 |
| 15:50 | 516 | 320 | 31.9 | 44.6 | 38.95 | 6.53 | 254.3 |
| 16:00 | 495 | 308 | 31.3 | 43.8 | 38.99 | 6.29 | 245.2 |

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบที่ มุม 18° ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m (2 กุมภาพันธ์ 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 499 | 221 | 18.2 | 28.7 | 40.70 | 5.65 | 230.0 |
| 9:05 | 514 | 240 | 18.9 | 30.4 | 40.96 | 5.75 | 235.5 |
| 9:10 | 533 | 258 | 19.3 | 31.7 | 41.19 | 5.64 | 232.3 |
| 9:15 | 554 | 277 | 18.9 | 32.6 | 40.45 | 6.17 | 249.6 |
| 9:20 | 571 | 293 | 20 | 34.2 | 40.32 | 6.45 | 260.1 |
| 9:25 | 589 | 310 | 22 | 35.5 | 40.35 | 6.53 | 263.5 |
| 9:30 | 609 | 330 | 21.7 | 36 | 39.69 | 7.02 | 278.6 |
| 9:35 | 621 | 342 | 21.9 | 36.9 | 39.80 | 7.21 | 287.0 |
| 9:40 | 639 | 359 | 21.5 | 36.9 | 39.51 | 7.41 | 292.8 |
| 9:45 | 658 | 375 | 21.8 | 37.5 | 39.41 | 7.78 | 306.6 |
| 9:50 | 677 | 389 | 21.5 | 38.1 | 39.14 | 8.11 | 317.4 |
| 9:55 | 688 | 400 | 22.5 | 39 | 39.31 | 8.18 | 321.6 |
| 10:00 | 703 | 413 | 22.3 | 39.3 | 39.17 | 8.30 | 325.1 |
| 10:05 | 713 | 421 | 22.6 | 40.5 | 39.19 | 8.43 | 330.4 |
| 10:10 | 729 | 434 | 23.3 | 41.1 | 38.62 | 8.83 | 341.0 |
| 10:15 | 747 | 446 | 24.6 | 42.8 | 38.22 | 9.16 | 350.1 |
| 10:20 | 762 | 458 | 23.9 | 43.2 | 38.01 | 9.27 | 352.4 |
| 10:25 | 779 | 468 | 24.5 | 43.1 | 38.25 | 9.39 | 359.2 |
| 10:30 | 790 | 477 | 23.8 | 42.8 | 38.56 | 9.36 | 360.9 |
| 10:35 | 802 | 485 | 24.1 | 42.4 | 38.02 | 9.89 | 376.0 |
| 10:40 | 815 | 494 | 25.1 | 43.8 | 38.04 | 10.05 | 382.3 |
| 10:45 | 824 | 501 | 24.9 | 44.6 | 37.51 | 10.37 | 389.0 |
| 10:50 | 840 | 509 | 25.3 | 44.8 | 37.72 | 10.26 | 387.0 |
| 10:55 | 846 | 514 | 25 | 45.4 | 37.66 | 10.47 | 394.3 |
| 11:00 | 860 | 524 | 25.6 | 46.4 | 37.66 | 10.48 | 394.7 |
| 11:05 | 869 | 531 | 27 | 46.9 | 37.40 | 10.66 | 398.7 |
| 11:10 | 869 | 533 | 27.3 | 47.7 | 37.28 | 10.85 | 404.5 |
| 11:15 | 877 | 538 | 26.2 | 47.8 | 36.50 | 11.24 | 410.3 |

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 886 | 544 | 26.9 | 48.1 | 36.82 | 11.12 | 409.4 |
| 11:25 | 894 | 548 | 26.7 | 47.6 | 36.96 | 11.14 | 411.7 |
| 11:30 | 899 | 553 | 27.7 | 48.4 | 37.24 | 11.09 | 413.0 |
| 11:35 | 906 | 557 | 27.7 | 50.1 | 36.66 | 11.45 | 419.8 |
| 11:40 | 911 | 560 | 26.9 | 49.8 | 36.52 | 11.44 | 417.8 |
| 11:45 | 921 | 567 | 27 | 50.2 | 36.90 | 11.19 | 412.9 |
| 11:50 | 926 | 570 | 27.4 | 51.1 | 36.17 | 11.77 | 425.7 |
| 11:55 | 937 | 577 | 28.5 | 51.2 | 36.54 | 11.57 | 422.8 |
| 12:00 | 945 | 583 | 28.8 | 51.4 | 36.49 | 11.72 | 427.7 |
| 12:05 | 950 | 586 | 29.3 | 52.3 | 36.44 | 11.80 | 430.0 |
| 12:10 | 950 | 587 | 29.3 | 52.2 | 36.42 | 11.68 | 425.4 |
| 12:15 | 952 | 590 | 28.3 | 52.4 | 36.25 | 11.95 | 433.2 |
| 12:20 | 949 | 590 | 29.2 | 53.6 | 35.94 | 12.00 | 431.3 |
| 12:25 | 948 | 590 | 28.5 | 53.9 | 36.52 | 11.61 | 424.0 |
| 12:30 | 942 | 587 | 29 | 53.2 | 36.15 | 11.75 | 424.8 |
| 12:35 | 949 | 592 | 29 | 52.8 | 36.28 | 11.73 | 425.6 |
| 12:40 | 944 | 588 | 29.2 | 53.2 | 36.29 | 11.77 | 427.1 |
| 12:45 | 941 | 588 | 29.4 | 52.8 | 36.03 | 11.85 | 427.0 |
| 12:50 | 940 | 588 | 30.8 | 53.1 | 36.16 | 11.92 | 431.0 |
| 12:55 | 936 | 585 | 31.1 | 53.3 | 36.50 | 11.52 | 420.5 |
| 13:00 | 939 | 588 | 29.4 | 53.9 | 35.91 | 12.02 | 431.6 |
| 13:05 | 936 | 587 | 31.3 | 54 | 35.96 | 11.88 | 427.2 |
| 13:10 | 928 | 583 | 31.2 | 53.7 | 36.03 | 11.79 | 424.8 |
| 13:15 | 924 | 581 | 30.8 | 53 | 35.90 | 11.84 | 425.1 |
| 13:20 | 925 | 583 | 31.8 | 53.4 | 36.03 | 11.79 | 424.8 |
| 13:25 | 914 | 578 | 31.3 | 53.9 | 36.26 | 11.62 | 421.3 |
| 13:30 | 901 | 572 | 31.6 | 53.6 | 36.06 | 11.64 | 419.7 |
| 13:35 | 898 | 570 | 31.4 | 53.1 | 36.34 | 11.25 | 408.8 |

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 894 | 569 | 31.6 | 53.5 | 36.60 | 11.12 | 407.0 |
| 13:45 | 878 | 560 | 31.2 | 52.2 | 36.22 | 11.28 | 408.6 |
| 13:50 | 867 | 556 | 30.9 | 51.6 | 36.59 | 10.95 | 400.7 |
| 13:55 | 859 | 551 | 31.5 | 52.8 | 36.97 | 10.75 | 397.4 |
| 14:00 | 850 | 548 | 31.5 | 53.1 | 36.44 | 10.97 | 399.7 |
| 14:05 | 845 | 547 | 31.8 | 53 | 36.66 | 10.63 | 389.7 |
| 14:10 | 830 | 538 | 32.6 | 53.5 | 36.56 | 10.70 | 391.2 |
| 14:15 | 806 | 525 | 32.6 | 54.2 | 36.39 | 10.56 | 384.3 |
| 14:20 | 802 | 524 | 33.1 | 53.9 | 36.48 | 10.26 | 374.3 |
| 14:25 | 797 | 522 | 33.1 | 54 | 36.74 | 10.08 | 370.3 |
| 14:30 | 780 | 513 | 34.4 | 55.1 | 36.47 | 10.24 | 373.5 |
| 14:35 | 764 | 504 | 32.8 | 54.2 | 36.44 | 9.93 | 361.8 |
| 14:40 | 748 | 494 | 33.3 | 54 | 36.69 | 9.69 | 355.5 |
| 14:45 | 726 | 482 | 32.9 | 53.9 | 37.04 | 9.25 | 342.6 |
| 14:50 | 727 | 483 | 32.6 | 52.4 | 36.75 | 9.26 | 340.3 |
| 14:55 | 708 | 472 | 33.4 | 52.9 | 37.29 | 9.21 | 343.4 |
| 15:00 | 705 | 471 | 33.6 | 52.8 | 36.63 | 9.43 | 345.4 |
| 15:05 | 679 | 456 | 33.5 | 51.9 | 37.00 | 9.01 | 333.4 |
| 15:10 | 663 | 445 | 33.6 | 52.1 | 36.85 | 8.90 | 328.0 |
| 15:15 | 648 | 438 | 33.4 | 51.5 | 37.60 | 8.31 | 312.5 |
| 15:20 | 645 | 438 | 33.3 | 50.4 | 37.34 | 8.38 | 312.9 |
| 15:25 | 618 | 420 | 33 | 50 | 37.52 | 8.27 | 310.3 |
| 15:30 | 599 | 410 | 32.9 | 49.6 | 37.72 | 8.07 | 304.4 |
| 15:35 | 592 | 406 | 33.4 | 49.2 | 37.55 | 7.84 | 294.4 |
| 15:40 | 583 | 402 | 34.1 | 49.4 | 37.84 | 7.70 | 291.4 |
| 15:45 | 563 | 389 | 34.2 | 49.6 | 37.66 | 7.71 | 290.4 |
| 15:50 | 549 | 380 | 34.3 | 49.2 | 37.61 | 7.39 | 277.9 |
| 16:00 | 525 | 364 | 33.7 | 48.9 | 38.00 | 7.13 | 270.9 |

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบที่ มุม 21° ความสูงจากพื้นผิว 0.50 m (6 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 509 | 190 | 20.5 | 30.3 | 41.02 | 5.20 | 213.3 |
| 9:05 | 527 | 210 | 21.2 | 31.7 | 40.71 | 5.59 | 227.6 |
| 9:10 | 545 | 223 | 20.2 | 32 | 40.53 | 5.88 | 238.3 |
| 9:15 | 563 | 237 | 21 | 32.9 | 40.48 | 6.16 | 249.4 |
| 9:20 | 582 | 251 | 20.3 | 33.6 | 40.12 | 6.35 | 254.8 |
| 9:25 | 598 | 265 | 21.7 | 35.1 | 40.21 | 6.53 | 262.6 |
| 9:30 | 617 | 278 | 21.9 | 36.4 | 39.61 | 6.92 | 274.1 |
| 9:35 | 632 | 290 | 22 | 37.2 | 39.82 | 6.94 | 276.4 |
| 9:40 | 648 | 300 | 22.3 | 38.6 | 39.39 | 7.29 | 287.2 |
| 9:45 | 663 | 310 | 22.3 | 39 | 39.42 | 7.40 | 291.7 |
| 9:50 | 680 | 321 | 22.4 | 39.4 | 39.61 | 7.38 | 292.3 |
| 9:55 | 697 | 332 | 22.7 | 40.5 | 39.04 | 7.89 | 308.0 |
| 10:00 | 712 | 341 | 23.9 | 41.2 | 38.97 | 8.00 | 311.8 |
| 10:05 | 728 | 350 | 23.6 | 42.9 | 38.98 | 8.07 | 314.6 |
| 10:10 | 743 | 359 | 24.7 | 43.1 | 38.28 | 8.54 | 326.9 |
| 10:15 | 758 | 367 | 24 | 44 | 38.64 | 8.43 | 325.7 |
| 10:20 | 771 | 374 | 24.4 | 44.8 | 38.58 | 8.54 | 329.5 |
| 10:25 | 785 | 380 | 25 | 45.7 | 38.17 | 8.92 | 340.5 |
| 10:30 | 792 | 385 | 25.7 | 46.6 | 38.18 | 8.81 | 336.4 |
| 10:35 | 805 | 386 | 24.7 | 46.6 | 38.05 | 9.07 | 345.1 |
| 10:40 | 812 | 379 | 26.3 | 47.7 | 37.77 | 9.19 | 347.1 |
| 10:45 | 813 | 367 | 26.9 | 48.2 | 38.03 | 8.98 | 341.5 |
| 10:50 | 824 | 372 | 26.9 | 48.1 | 37.63 | 9.27 | 348.8 |
| 10:55 | 832 | 397 | 27.5 | 49.5 | 37.49 | 9.22 | 345.7 |
| 11:00 | 839 | 412 | 26.7 | 49.5 | 37.39 | 9.57 | 357.8 |
| 11:05 | 851 | 419 | 26.4 | 49.2 | 37.66 | 9.49 | 357.4 |
| 11:10 | 864 | 427 | 26.6 | 49.5 | 37.14 | 9.89 | 367.3 |
| 11:15 | 878 | 433 | 26.4 | 49.5 | 37.55 | 9.74 | 365.7 |

ตารางที่ ข.11 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 886 | 437 | 27.6 | 50.4 | 37.55 | 9.72 | 365.0 |
| 11:25 | 894 | 441 | 27.8 | 50.4 | 37.18 | 10.11 | 375.9 |
| 11:30 | 906 | 446 | 27 | 51.5 | 37.30 | 10.01 | 373.4 |
| 11:35 | 916 | 451 | 28 | 51.8 | 36.79 | 10.49 | 385.9 |
| 11:40 | 921 | 454 | 28.2 | 51.7 | 36.78 | 10.41 | 382.9 |
| 11:45 | 929 | 456 | 28 | 52.4 | 36.93 | 10.40 | 384.1 |
| 11:50 | 936 | 460 | 27.7 | 52.3 | 36.67 | 10.55 | 386.9 |
| 11:55 | 930 | 458 | 28.5 | 53 | 36.80 | 10.53 | 387.5 |
| 12:00 | 945 | 464 | 27.5 | 51.9 | 36.68 | 10.61 | 389.2 |
| 12:05 | 942 | 462 | 29.8 | 53.4 | 36.93 | 10.43 | 385.2 |
| 12:10 | 942 | 464 | 29.2 | 52.1 | 36.81 | 10.59 | 389.8 |
| 12:15 | 952 | 468 | 29.6 | 53.3 | 36.80 | 10.55 | 388.2 |
| 12:20 | 952 | 470 | 29.5 | 53 | 36.81 | 10.58 | 389.4 |
| 12:25 | 957 | 473 | 30.3 | 54.3 | 36.43 | 10.79 | 393.1 |
| 12:30 | 959 | 475 | 30.2 | 54.3 | 36.59 | 10.53 | 385.3 |
| 12:35 | 953 | 473 | 30.3 | 55.1 | 36.09 | 10.91 | 393.7 |
| 12:40 | 959 | 474 | 30.5 | 54.9 | 36.29 | 10.76 | 390.5 |
| 12:45 | 957 | 472 | 30.5 | 54.8 | 36.10 | 10.93 | 394.6 |
| 12:50 | 955 | 470 | 30.8 | 55.1 | 36.28 | 10.77 | 390.7 |
| 12:55 | 952 | 467 | 29.3 | 53.9 | 36.53 | 10.56 | 385.8 |
| 13:00 | 946 | 465 | 30.8 | 54.2 | 36.66 | 10.46 | 383.5 |
| 13:05 | 945 | 465 | 30.5 | 54.6 | 36.46 | 10.57 | 385.4 |
| 13:10 | 942 | 464 | 31 | 54.9 | 36.40 | 10.75 | 391.3 |
| 13:15 | 934 | 462 | 30.5 | 55.3 | 36.06 | 10.71 | 386.2 |
| 13:20 | 931 | 460 | 31.1 | 55.3 | 36.50 | 10.46 | 381.8 |
| 13:25 | 923 | 457 | 30.5 | 54.5 | 36.75 | 10.24 | 376.3 |
| 13:30 | 912 | 453 | 33.3 | 54.9 | 36.17 | 10.33 | 373.6 |
| 13:35 | 910 | 452 | 31.4 | 54.8 | 36.23 | 10.35 | 375.0 |

ตารางที่ ข.11 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 905 | 450 | 31 | 54.8 | 36.74 | 10.09 | 370.7 |
| 13:45 | 898 | 449 | 32.8 | 55.2 | 36.66 | 10.04 | 368.1 |
| 13:50 | 886 | 443 | 32.5 | 53.6 | 36.74 | 10.03 | 368.5 |
| 13:55 | 877 | 438 | 31.8 | 54.1 | 36.97 | 9.77 | 361.2 |
| 14:00 | 867 | 435 | 31.4 | 54.9 | 36.20 | 10.16 | 367.8 |
| 14:05 | 860 | 432 | 32.6 | 55.1 | 36.36 | 10.03 | 364.7 |
| 14:10 | 853 | 429 | 32.4 | 54.4 | 36.43 | 9.84 | 358.5 |
| 14:15 | 847 | 426 | 33.2 | 55.2 | 36.55 | 9.77 | 357.1 |
| 14:20 | 831 | 418 | 33.4 | 54.9 | 36.67 | 9.51 | 348.7 |
| 14:25 | 826 | 415 | 34.4 | 55.4 | 36.78 | 9.41 | 346.1 |
| 14:30 | 812 | 408 | 33.7 | 54.1 | 36.89 | 9.29 | 342.7 |
| 14:35 | 799 | 402 | 33.9 | 53.4 | 36.89 | 9.32 | 343.8 |
| 14:40 | 780 | 393 | 32.8 | 52.9 | 36.88 | 9.12 | 336.3 |
| 14:45 | 765 | 385 | 32.7 | 52.8 | 37.12 | 8.81 | 327.0 |
| 14:50 | 746 | 374 | 33.6 | 52.7 | 37.37 | 8.54 | 319.1 |
| 14:55 | 733 | 368 | 33.1 | 52.4 | 36.89 | 8.70 | 320.9 |
| 15:00 | 722 | 363 | 33.9 | 50.8 | 37.55 | 8.26 | 310.2 |
| 15:05 | 704 | 353 | 34.8 | 50.9 | 37.34 | 8.30 | 309.9 |
| 15:10 | 684 | 344 | 34.3 | 50.4 | 37.85 | 7.77 | 294.1 |
| 15:15 | 663 | 333 | 34.4 | 51.2 | 37.68 | 7.68 | 289.4 |
| 15:20 | 650 | 327 | 33.4 | 49.9 | 37.95 | 7.45 | 282.7 |
| 15:25 | 635 | 319 | 33.6 | 49.4 | 37.85 | 7.35 | 278.2 |
| 15:30 | 614 | 309 | 34.1 | 48.4 | 38.10 | 7.06 | 269.0 |
| 15:35 | 594 | 300 | 32.6 | 47.9 | 38.57 | 6.67 | 257.3 |
| 15:40 | 578 | 292 | 33 | 47.9 | 38.28 | 6.67 | 255.3 |
| 15:45 | 567 | 286 | 33.2 | 47.5 | 38.40 | 6.42 | 246.5 |
| 15:50 | 543 | 275 | 34.2 | 47.8 | 38.66 | 6.19 | 239.3 |
| 16:00 | 527 | 267 | 33.9 | 46.7 | 38.92 | 5.88 | 228.8 |

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบที่ มุม 21° ความสูงจากพื้นผิว 1.00 m (27 มกราคม 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 522 | 181 | 21.2 | 26.6 | 41.39 | 5.65 | 233.9 |
| 9:05 | 542 | 209 | 20.7 | 27.4 | 41.14 | 5.86 | 241.1 |
| 9:10 | 560 | 228 | 20.3 | 28.3 | 40.96 | 6.12 | 250.7 |
| 9:15 | 577 | 244 | 20.8 | 30.3 | 40.81 | 6.26 | 255.5 |
| 9:20 | 598 | 263 | 21.9 | 32.9 | 39.82 | 6.85 | 272.8 |
| 9:25 | 616 | 281 | 22.3 | 35.4 | 39.32 | 7.20 | 283.1 |
| 9:30 | 634 | 298 | 21.7 | 36.8 | 39.22 | 7.41 | 290.6 |
| 9:35 | 652 | 315 | 22.3 | 38.6 | 39.38 | 7.47 | 294.2 |
| 9:40 | 667 | 329 | 22.3 | 40 | 38.82 | 7.89 | 306.3 |
| 9:45 | 685 | 343 | 21.6 | 40.4 | 38.70 | 8.13 | 314.6 |
| 9:50 | 700 | 355 | 22.7 | 41 | 39.08 | 8.08 | 315.8 |
| 9:55 | 716 | 367 | 22.8 | 41.3 | 39.02 | 8.26 | 322.3 |
| 10:00 | 733 | 378 | 24.1 | 42.3 | 38.33 | 8.77 | 336.2 |
| 10:05 | 747 | 387 | 23.4 | 43.7 | 38.06 | 8.90 | 338.7 |
| 10:10 | 762 | 397 | 23.3 | 44.6 | 38.07 | 9.05 | 344.5 |
| 10:15 | 777 | 405 | 24.4 | 45.6 | 37.97 | 9.15 | 347.4 |
| 10:20 | 790 | 414 | 24.3 | 46.6 | 37.56 | 9.53 | 357.9 |
| 10:25 | 803 | 422 | 24.7 | 47.3 | 37.67 | 9.47 | 356.7 |
| 10:30 | 819 | 430 | 25.9 | 47.4 | 37.18 | 9.86 | 366.6 |
| 10:35 | 831 | 436 | 25.6 | 47.8 | 37.45 | 9.89 | 370.4 |
| 10:40 | 841 | 442 | 25.4 | 49.4 | 37.19 | 9.96 | 370.4 |
| 10:45 | 854 | 448 | 26.2 | 50.1 | 37.20 | 10.12 | 376.5 |
| 10:50 | 866 | 454 | 24.9 | 50.4 | 36.76 | 10.42 | 383.0 |
| 10:55 | 871 | 458 | 25.5 | 49.6 | 36.97 | 10.51 | 388.6 |
| 11:00 | 884 | 466 | 25.7 | 50.2 | 36.97 | 10.53 | 389.3 |
| 11:05 | 895 | 472 | 26.4 | 51.5 | 36.65 | 10.71 | 392.5 |
| 11:10 | 906 | 479 | 27.2 | 51.9 | 36.28 | 11.10 | 402.7 |
| 11:15 | 917 | 486 | 27.4 | 52.1 | 36.46 | 11.10 | 404.7 |

ตารางที่ ข.12 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 920 | 487 | 26.9 | 52.3 | 36.35 | 11.11 | 403.8 |
| 11:25 | 924 | 489 | 26.8 | 51.7 | 36.17 | 11.21 | 405.5 |
| 11:30 | 927 | 492 | 26.4 | 52.1 | 36.23 | 11.25 | 407.6 |
| 11:35 | 938 | 497 | 27.1 | 52.8 | 36.42 | 11.23 | 409.0 |
| 11:40 | 948 | 504 | 27.5 | 53.3 | 36.55 | 11.21 | 409.7 |
| 11:45 | 951 | 506 | 27 | 53 | 36.01 | 11.62 | 418.4 |
| 11:50 | 956 | 509 | 27.4 | 53.5 | 36.50 | 11.25 | 410.6 |
| 11:55 | 953 | 509 | 27.4 | 52.8 | 35.89 | 11.71 | 420.3 |
| 12:00 | 960 | 513 | 28.8 | 54 | 35.64 | 11.78 | 419.8 |
| 12:05 | 973 | 520 | 28.3 | 53.3 | 36.21 | 11.70 | 423.7 |
| 12:10 | 974 | 522 | 28.3 | 53.1 | 35.91 | 11.89 | 427.0 |
| 12:15 | 976 | 524 | 28.3 | 53.7 | 36.03 | 11.82 | 425.9 |
| 12:20 | 975 | 526 | 28.1 | 53.7 | 36.15 | 11.69 | 422.6 |
| 12:25 | 980 | 529 | 28.8 | 54 | 36.03 | 11.82 | 425.9 |
| 12:30 | 977 | 529 | 28.3 | 52.5 | 36.16 | 11.90 | 430.3 |
| 12:35 | 976 | 528 | 28.8 | 53.2 | 36.09 | 11.84 | 427.3 |
| 12:40 | 964 | 522 | 29.6 | 53.4 | 36.33 | 11.60 | 421.4 |
| 12:45 | 967 | 524 | 29.2 | 53.6 | 36.14 | 11.67 | 421.8 |
| 12:50 | 965 | 525 | 29.5 | 53.7 | 36.51 | 11.39 | 415.8 |
| 12:55 | 956 | 520 | 30 | 53.6 | 35.89 | 11.78 | 422.8 |
| 13:00 | 955 | 519 | 29.5 | 53.6 | 36.01 | 11.77 | 423.8 |
| 13:05 | 953 | 519 | 30 | 53.5 | 35.95 | 11.75 | 422.4 |
| 13:10 | 948 | 517 | 29.3 | 53.1 | 35.94 | 11.83 | 425.2 |
| 13:15 | 947 | 517 | 30.1 | 53 | 36.27 | 11.56 | 419.3 |
| 13:20 | 934 | 512 | 30.6 | 54 | 36.53 | 11.11 | 405.8 |
| 13:25 | 936 | 514 | 31.3 | 54.8 | 36.10 | 11.31 | 408.3 |
| 13:30 | 927 | 511 | 31.4 | 54.3 | 36.10 | 11.26 | 406.5 |
| 13:35 | 919 | 507 | 31.6 | 54.3 | 36.21 | 11.21 | 405.9 |

ตารางที่ ข.12 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 908 | 504 | 31.3 | 53.1 | 36.14 | 11.23 | 405.9 |
| 13:45 | 900 | 501 | 32.2 | 52.8 | 36.45 | 11.02 | 401.7 |
| 13:50 | 894 | 500 | 32.2 | 54 | 36.43 | 10.76 | 392.0 |
| 13:55 | 886 | 497 | 31.3 | 54.3 | 36.45 | 10.67 | 388.9 |
| 14:00 | 874 | 493 | 31.8 | 54.2 | 36.17 | 10.76 | 389.2 |
| 14:05 | 869 | 491 | 31.9 | 55 | 36.22 | 10.73 | 388.6 |
| 14:10 | 856 | 485 | 31.3 | 54.2 | 36.32 | 10.59 | 384.6 |
| 14:15 | 844 | 481 | 32.2 | 54.5 | 35.88 | 10.74 | 385.4 |
| 14:20 | 838 | 480 | 31.2 | 52.4 | 36.51 | 10.50 | 383.4 |
| 14:25 | 823 | 473 | 31.4 | 53.4 | 36.55 | 10.22 | 373.5 |
| 14:30 | 812 | 469 | 32.6 | 53.1 | 36.48 | 10.14 | 369.9 |
| 14:35 | 797 | 462 | 32.3 | 52.2 | 36.59 | 10.11 | 369.9 |
| 14:40 | 786 | 457 | 31.3 | 51.5 | 37.23 | 9.75 | 363.0 |
| 14:45 | 769 | 449 | 31.6 | 51.2 | 36.96 | 9.72 | 359.3 |
| 14:50 | 754 | 442 | 31.8 | 51 | 37.07 | 9.56 | 354.4 |
| 14:55 | 737 | 434 | 31.9 | 49.6 | 37.58 | 9.23 | 346.9 |
| 15:00 | 724 | 427 | 32 | 49.3 | 37.17 | 9.22 | 342.7 |
| 15:05 | 706 | 419 | 31.8 | 49.3 | 37.36 | 9.00 | 336.2 |
| 15:10 | 694 | 413 | 32.2 | 49.9 | 37.00 | 9.04 | 334.5 |
| 15:15 | 676 | 404 | 31.9 | 48.5 | 37.46 | 8.64 | 323.7 |
| 15:20 | 662 | 397 | 31.9 | 47.9 | 37.64 | 8.52 | 320.7 |
| 15:25 | 645 | 388 | 32.1 | 48.2 | 37.97 | 8.17 | 310.2 |
| 15:30 | 627 | 378 | 32.2 | 47.8 | 38.00 | 7.95 | 302.1 |
| 15:35 | 611 | 369 | 31.1 | 47 | 38.05 | 7.79 | 296.4 |
| 15:40 | 591 | 358 | 32.1 | 46.1 | 37.70 | 7.85 | 295.9 |
| 15:45 | 571 | 348 | 33 | 46.1 | 38.48 | 7.24 | 278.6 |
| 15:50 | 554 | 338 | 33.2 | 46 | 38.31 | 7.11 | 272.4 |
| 16:00 | 534 | 326 | 32 | 46 | 38.79 | 6.67 | 258.7 |

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบที่ มุม 21° ความสูงจากพื้นผิว 1.50 m (3 กุมภาพันธ์ 2565)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 9:00 | 540 | 223 | 18.2 | 27.5 | 40.69 | 6.13 | 249.4 |
| 9:05 | 557 | 242 | 19.7 | 29 | 40.87 | 6.27 | 256.3 |
| 9:10 | 574 | 260 | 19.7 | 30.9 | 40.97 | 6.29 | 257.7 |
| 9:15 | 594 | 277 | 19.3 | 31.5 | 40.32 | 6.86 | 276.6 |
| 9:20 | 611 | 294 | 19.4 | 32.1 | 40.04 | 7.17 | 287.1 |
| 9:25 | 628 | 312 | 19.7 | 32.6 | 39.94 | 7.46 | 298.0 |
| 9:30 | 646 | 330 | 20.4 | 33.9 | 39.78 | 7.69 | 305.9 |
| 9:35 | 667 | 348 | 20.7 | 35.4 | 39.96 | 7.73 | 308.9 |
| 9:40 | 683 | 362 | 20.8 | 35.8 | 39.55 | 8.22 | 325.1 |
| 9:45 | 699 | 377 | 20.8 | 36.2 | 39.16 | 8.46 | 331.3 |
| 9:50 | 718 | 391 | 21.2 | 37.2 | 38.86 | 8.80 | 342.0 |
| 9:55 | 734 | 405 | 21.8 | 37.8 | 39.03 | 8.91 | 347.8 |
| 10:00 | 747 | 417 | 22.6 | 39.6 | 39.10 | 8.95 | 349.9 |
| 10:05 | 765 | 430 | 23.1 | 41.7 | 38.32 | 9.32 | 357.1 |
| 10:10 | 781 | 441 | 22.7 | 42.6 | 37.92 | 9.63 | 365.2 |
| 10:15 | 790 | 450 | 23.3 | 43.1 | 38.15 | 9.67 | 368.9 |
| 10:20 | 807 | 461 | 23.3 | 43 | 38.23 | 9.77 | 373.5 |
| 10:25 | 821 | 469 | 23.6 | 44.3 | 38.10 | 9.89 | 376.8 |
| 10:30 | 834 | 478 | 24.1 | 45.5 | 38.10 | 9.90 | 377.2 |
| 10:35 | 846 | 487 | 24.7 | 46.3 | 37.57 | 10.35 | 388.8 |
| 10:40 | 859 | 495 | 24.9 | 46.9 | 37.05 | 10.68 | 395.7 |
| 10:45 | 871 | 503 | 25.5 | 47.4 | 37.58 | 10.44 | 392.3 |
| 10:50 | 882 | 510 | 24.3 | 48.8 | 37.05 | 10.76 | 398.7 |
| 10:55 | 892 | 516 | 25.6 | 49.1 | 36.94 | 10.96 | 404.9 |
| 11:00 | 904 | 524 | 26.2 | 50.1 | 36.88 | 10.99 | 405.3 |
| 11:05 | 913 | 530 | 25.6 | 51 | 36.31 | 11.36 | 412.5 |
| 11:10 | 921 | 536 | 25.8 | 51.1 | 36.83 | 11.14 | 410.3 |
| 11:15 | 933 | 544 | 26.4 | 51.1 | 36.59 | 11.41 | 417.5 |

ตารางที่ ข.13 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 11:20 | 940 | 549 | 27.5 | 53 | 36.32 | 11.48 | 417.0 |
| 11:25 | 948 | 553 | 27.5 | 53.7 | 36.07 | 11.63 | 419.5 |
| 11:30 | 952 | 557 | 29.1 | 54.5 | 35.95 | 11.62 | 417.7 |
| 11:35 | 958 | 560 | 28.3 | 53.7 | 35.96 | 11.84 | 425.8 |
| 11:40 | 959 | 562 | 27.3 | 53.8 | 36.33 | 11.64 | 422.9 |
| 11:45 | 963 | 565 | 27.9 | 54.8 | 35.96 | 11.94 | 429.4 |
| 11:50 | 975 | 572 | 29 | 54.2 | 35.97 | 11.92 | 428.8 |
| 11:55 | 975 | 573 | 28.5 | 54.2 | 35.74 | 12.15 | 434.2 |
| 12:00 | 981 | 577 | 29.3 | 55.3 | 35.85 | 11.98 | 429.5 |
| 12:05 | 981 | 578 | 29.5 | 55.1 | 35.97 | 12.00 | 431.6 |
| 12:10 | 988 | 582 | 28.5 | 56.5 | 35.95 | 11.90 | 427.8 |
| 12:15 | 991 | 587 | 29.5 | 56.8 | 35.84 | 11.95 | 428.3 |
| 12:20 | 991 | 588 | 30.5 | 57.8 | 35.48 | 12.18 | 432.1 |
| 12:25 | 989 | 588 | 29.3 | 57 | 35.60 | 12.16 | 432.9 |
| 12:30 | 989 | 587 | 30 | 57.8 | 35.53 | 12.05 | 428.1 |
| 12:35 | 987 | 588 | 30.1 | 58.3 | 35.35 | 12.11 | 428.1 |
| 12:40 | 990 | 590 | 30.5 | 59 | 35.41 | 12.17 | 430.9 |
| 12:45 | 989 | 589 | 29.8 | 58.4 | 35.29 | 12.21 | 430.9 |
| 12:50 | 991 | 591 | 30.4 | 57.8 | 35.37 | 12.29 | 434.7 |
| 12:55 | 992 | 592 | 30.4 | 58.1 | 35.37 | 12.28 | 434.3 |
| 13:00 | 983 | 588 | 30.8 | 56.8 | 35.25 | 12.31 | 433.9 |
| 13:05 | 984 | 589 | 31.6 | 56.7 | 35.49 | 12.25 | 434.8 |
| 13:10 | 977 | 585 | 30.6 | 56.6 | 35.29 | 12.10 | 427.0 |
| 13:15 | 975 | 585 | 31.3 | 57.2 | 35.58 | 11.96 | 425.5 |
| 13:20 | 975 | 586 | 30.7 | 56.9 | 35.76 | 11.98 | 428.4 |
| 13:25 | 961 | 579 | 31.4 | 57.5 | 35.45 | 11.98 | 424.7 |
| 13:30 | 957 | 579 | 31.7 | 58.8 | 35.49 | 11.78 | 418.1 |
| 13:35 | 950 | 575 | 31.9 | 58.6 | 35.31 | 11.86 | 418.8 |

ตารางที่ ข.13 (ต่อ)

| Time | I_T (W/m ²) | | T_a (C°) | T_p (C°) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Power (W) |
|-------|---------------------------|------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| | Front | Back | | | | | |
| 13:40 | 936 | 569 | 31.8 | 58.2 | 35.47 | 11.59 | 411.1 |
| 13:45 | 928 | 567 | 32.8 | 59.1 | 35.75 | 11.28 | 403.3 |
| 13:50 | 923 | 565 | 32.2 | 56.5 | 36.02 | 11.35 | 408.8 |
| 13:55 | 920 | 565 | 32.2 | 56.8 | 36.02 | 11.35 | 408.8 |
| 14:00 | 910 | 560 | 31.3 | 56.5 | 35.57 | 11.46 | 407.6 |
| 14:05 | 894 | 551 | 31.9 | 56.5 | 35.39 | 11.48 | 406.3 |
| 14:10 | 885 | 548 | 33.2 | 57.8 | 35.07 | 11.55 | 405.1 |
| 14:15 | 874 | 542 | 32.5 | 57.9 | 35.58 | 11.11 | 395.3 |
| 14:20 | 856 | 534 | 31.4 | 55.9 | 35.83 | 10.91 | 390.9 |
| 14:25 | 841 | 528 | 31.7 | 55.6 | 36.18 | 10.64 | 385.0 |
| 14:30 | 826 | 520 | 31.9 | 54.5 | 36.06 | 10.68 | 385.1 |
| 14:35 | 811 | 512 | 33.4 | 55.4 | 35.97 | 10.44 | 375.5 |
| 14:40 | 797 | 504 | 33.1 | 54.5 | 36.26 | 10.22 | 370.6 |
| 14:45 | 784 | 496 | 33.4 | 54.9 | 36.12 | 10.12 | 365.5 |
| 14:50 | 769 | 488 | 32.1 | 54.6 | 35.98 | 10.06 | 362.0 |
| 14:55 | 760 | 484 | 33.8 | 54.7 | 36.46 | 9.80 | 357.3 |
| 15:00 | 744 | 475 | 32.8 | 53.6 | 36.39 | 9.75 | 354.8 |
| 15:05 | 733 | 470 | 32.5 | 52.5 | 36.96 | 9.34 | 345.2 |
| 15:10 | 720 | 463 | 32.8 | 51.6 | 37.34 | 9.05 | 337.9 |
| 15:15 | 705 | 454 | 32.3 | 51.4 | 37.33 | 8.87 | 331.1 |
| 15:20 | 688 | 446 | 32.8 | 51.3 | 37.44 | 8.77 | 328.3 |
| 15:25 | 670 | 435 | 32.6 | 51.1 | 37.29 | 8.66 | 322.9 |
| 15:30 | 649 | 423 | 33.1 | 50.7 | 37.00 | 8.55 | 316.4 |
| 15:35 | 633 | 414 | 33.5 | 50.8 | 37.37 | 8.29 | 309.8 |
| 15:40 | 614 | 403 | 33.7 | 50.8 | 37.39 | 7.93 | 296.5 |
| 15:45 | 597 | 391 | 33.7 | 50.8 | 37.44 | 7.76 | 290.5 |
| 15:50 | 576 | 380 | 33.5 | 49.6 | 37.80 | 7.42 | 280.5 |
| 16:00 | 555 | 368 | 33.5 | 48.3 | 37.73 | 7.23 | 272.8 |



ภาคผนวก ค.

ผลงาน และการเผยแพร่ งานวิจัย



ที่ อว 69.17/ว268

วิทยาลัยพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4
ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย
จังหวัดเชียงใหม่ 50290

21 กันยายน 2564

เรื่อง แจ้งตอบรับการนำเสนอบทความทางวิชาการ ในการประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทน
สู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 (TREC 14)

เรียน นเรนทร์ฤทธิ กันทะ, สราวุธ พลวงษ์ศรี, อัครินทร์ อินทนิเวศน์, สุกฤษณา มงคล

ตามที่ท่านได้ส่งบทความทางวิชาการเรื่อง สภาพพื้นที่นวิวสะท้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิต
ไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน เพื่อนำเสนอผลงานในการประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 (TREC-14) Smart Energy Smart Agriculture Smart
Community ในระหว่างวันที่ 10 - 12 พฤศจิกายน 2564 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
นั้น

ในการนี้ คณะกรรมการฝ่ายวิชาการคัดเลือกบทความและตรวจทานเอกสารได้พิจารณา
บทความทางวิชาการเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงขอแจ้งให้ท่านทราบว่า บทความวิจัยของท่าน “ผ่าน”
การพิจารณาให้นำเสนอผลงานในรูปแบบ “การบรรยาย Oral presentation” จากผู้ทรงคุณวุฒิด้าน
วิชาการเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้ ขอให้ท่านเตรียมการนำเสนอโดยมีระยะเวลาในการบรรยาย 10-15 นาที
และเวลาในการตอบคำถาม 5 นาที หากท่านไม่มานำเสนอบทความตามเวลาที่กำหนดทางผู้จัดจะ “ถอน”
บทความของท่านออกจากเล่ม “รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ (Proceedings)”

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนศ ไชยชนะ)

ประธานคณะกรรมการพิจารณาและตรวจสอบบทความวิชาการ

ฝ่ายจัดการประชุมวิชาการฯ

โทรศัพท์ 08 1540 6768 เมล์ (Tanatecha@Gmail.com)

งานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 (TREC-14)



สารบัญ

| บทความที่ | รหัสนำเสนอบทความ | ชื่อเรื่อง | ผู้แต่ง | หน้าที่ |
|-----------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 66 | EI-15 | Analysis of the hybrid power generation of 15 kW floating solar cell and wind turbine | สิริศักดิ์ ปางวุฒินิษฐ์, วิรัชย์ โยรินรินทร์ , บุญยัง ปลั่งกลาง, สุเทพ สีมาลา | 460-468 |
| 67 | EI-16 | การพัฒนากับตักแสงไฟนอนเงาเจาะเมล็ดทุเรียนพลังงานแสงอาทิตย์ ต้นทุนต่ำร่วมกับระบบตรวจสอบสภาพแวดล้อมด้วยเทคโนโลยี IoT พื้นที่อำเภอเจาะไอร้อง จังหวัดนราธิวาส | พลากร พรหมเมศร์, หาญรงค์ บัวทอง, วรางคณา เทพนมิตร | ได้รับคัดเลือกให้ลงวารสาร |
| 68 | EI-17 | การพัฒนาเครื่องปรับอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบแยกส่วนสำหรับห้องขนาดเล็กตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2134-2553 | เจริญศักดิ์ เขียวเล่ง, พลากร พรหมเมศร์, ปรุฬห์ มະຍະເນີຍ | 476-481 |
| 69 | EI-18 | การพัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์อัจฉริยะที่ตรวจรู้สภาพแวดล้อมและการทำงานด้วยตนเอง | ศุภวิชญ์ อติชัยศักดิ์, พลากร พรหมเมศร์, ปรุฬห์ มະຍະເນີຍ | ได้รับคัดเลือกให้ลงวารสาร |
| 70 | EI-19 | การออกแบบและพัฒนาระบบไฮโดรโปรนิกส์แบบกระษะน้ำวนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ | อัษฎางค์ บุญศรี, จิตรกร สัมมานุช , พายุ สุขน้อย , เทพ เกื้อทวีกุล | 489-495 |
| 71 | EI-20 | การออกแบบและสร้างชุดควบคุมการปรับแรงดันแบบ PWM สำหรับการรค่น้ำทางการเกษตร ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ | อัษฎางค์ บุญศรี, ปฎิภาณ บรรทัด, ณัฐพงษ์ ชาตะรูป, นิวดี คลังสีดา, อธิธิพล เหลาพรม, อานนท์ วงษ์มณี | 496-502 |
| 72 | EI-21 | การออกแบบและพัฒนาตู้อบลมร้อนร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับครัวเรือน | รัชนิวรรณ อังกรบุตร, สุทธินันท์ ศรีรัตยาวงค์ | ได้รับคัดเลือกให้ลงวารสาร |
| 73 | EI-22 | การออกแบบและติดตั้งระบบออนกริด (On Grid) ขนาด 3.3 กิโลวัตต์สำหรับการเพาะปลูกเมล่อนแบบไฮโดรโปรนิกส์ | อัษฎางค์ บุญศรี, อัษฎา คล่องใจ, ฉัตรชัย อินกราด, เทพ เกื้อทวีกุล, นิวดี คลังสีดา | 512-517 |
| 74 | EI-23 | สภาพพื้นผิวสะท้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน | นเรนทร์ฤทธิ์ กันทะ, สราวุธ พลวงษ์ศรี, อัครินทร์ อินทนิเวศน์, สุลักษณ์ มงคล | 518-524 |
| 75 | EI-24 | ระบบรายงานค่าสภาพน้ำของโรงเรือนเมล่อนแบบไฮโดรโปรนิกส์ด้วยสมาร์ตโฟน | อัษฎางค์ บุญศรี, จักรกฤษณ์ มั่นเทศ, ยุทธพงศ์ จรรย์ม , เทพ เกื้อทวีกุล | 525-530 |

สภาพพื้นผิวสะท้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน
The effect of reflective surface on bifacial photovoltaic efficiency

นเรนทร์ฤทธิ์ กันทะ¹ สราวุธ พลวงษ์ศรี* อัครินทร์ อินทนิเวศน์¹ และสุลักษณา มงคล¹
Narenrit Kantha¹ Sarawut Ponvongsri* Akarin Intaniwet¹ and Sulaksana Mongkon¹

¹ สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50210

Abstract

This paper presents the surface testing that affects power generation efficiency of a half cut monocrystalline bifacial solar panel with a power of 430 W_p. The panel was mounted at tilt angle of 18°, facing to the south and the height above the floor to the lower edge panel of 1.00 m. Data was recorded from 9:00 a.m. to 4:00 p.m. at School of Renewable Energy Maejo University. There were four surfaces which use in this study such as the concrete surface, the white painted concrete surface, the soil surface and the grass surface, respectively. From the test, it was found that the reflectance rate or albedo of concrete surface, the white painted concrete surface, the soil surface, grass surface was 0.22, 0.53, 0.26, and 0.30 respectively. The white painted concrete surface had the highest albedo value, so the power generation resulted in a maximum value of 404.1 W and a peak electricity generation efficiency of 20.51%. For the concrete surface, grass surface and soil surface could produce of 376.8 W, 360.4 W, and 385.8 W, respectively. The power generation efficiency was 18.12%, 18.35. %, and 18.57%, respectively.

Keywords: Bifacial Photovoltaic Panel, Albedo, Surface, Electricity Generation

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบพื้นผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน ชนิด Monocrystalline แบบ half cut cell พิกัดกำลังไฟฟ้า 430 Wp ทำการติดตั้งแผงมุมเอียง 18° หันไปทางทิศใต้ และมีความสูงจากพื้นถึงขอบล่างของแผงเท่ากับ 1 m ข้อมูลในการทดลองถูกบันทึกตั้งแต่ 9.00 น. – 16.00 น. ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พื้นผิวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 4 พื้นผิว ได้แก่ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า อัตราการสะท้อนแสงหรือค่าอัลบีโดของ พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า มีค่าเท่ากับ 0.22 0.53 0.26 และ 0.30 ตามลำดับ จากที่พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาวมีค่าอัลบีโดสูงสุดส่งผลทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 404.1 W และมีค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 20.51% สำหรับพื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวหญ้า และพื้นผิวดิน สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 376.8 W, 360.4 W, และ 385.8 W ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 18.12%, 18.35%, 18.57% ตามลำดับ

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน, อัลบีโด, พื้นผิว, การผลิตไฟฟ้า

บทนำ

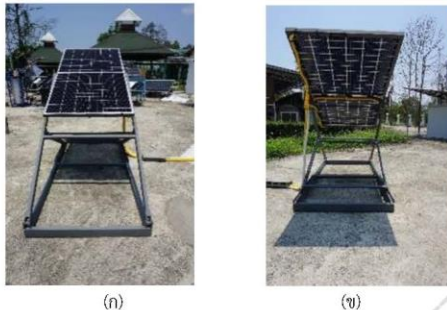
ในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้งานทั่วไปเป็นแบบรับแสงเพียงด้านเดียว (Monofacial PV) มีอยู่หลายชนิด เช่น Mono crystalline Poly crystalline Amorphous เรียกโดยภาพรวมว่า Conventional ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าทำงานโดยรับแสงจากด้านหน้าเพียงด้านเดียว แต่เทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างมากเพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพของแผงมากยิ่งขึ้น เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่รับแสงได้สองด้าน (Bifacial PV) ซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานต่อแผงสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบอื่น ๆ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าจากการรับแสงอาทิตย์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผง ในต่างประเทศมีการนำมาใช้กันแพร่หลายมากขึ้น เช่น Baloch [7] ได้ประเมินประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ภายใต้สภาพภูมิอากาศที่ประเทศการ์ตา ทำการประเมินผลกระทบจากสภาพความสกปรกของแผง และ albedo ใน 2 จุด โดยพบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในเดือนมิถุนายน สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1.44 kWh และในเดือนธันวาคม เพิ่มขึ้นเป็น 1.72 kWh ในส่วนของ albedo นั้น เมื่อเปลี่ยนจากคอนกรีตเป็นแผ่นสีขาว สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 4.3% และสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น 29% จากการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ทุกวัน Jai Prakash SINGH [9] ได้ศึกษาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ bifacial ในสิงคโปร์ (ภูมิอากาศแบบเขตร้อน) ที่ติดตั้งบนหลังคาทรงแบน (Flat Slab) ของมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ โดยติดตั้งด้วยความสูงจากพื้นหลังคา 100 cm หันหน้าไปทางทิศใต้ จากผลการทดลองประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ bifacial เพิ่มขึ้นเกือบ 10% เมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Monofacial โดยที่ไม่ต้องปรับปรุงหลังคา (การสะท้อนแสง < 20%) หากปรับปรุงหลังคาให้มีการสะท้อนแสงมากขึ้น (การทาสีขาว หรือ เคลือบหลังคาด้วยวัสดุที่สะท้อนแสง) จะทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ bifacial สามารถทำงานได้ดีเมื่อการกระจายรังสีสูง และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในแนวตั้งและหันหน้าไปทางตะวันออก - ตะวันตก มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเทียบกับการติดตั้งด้วยมุมเอียงประมาณ 10° โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ (เข้าหาเส้นศูนย์สูตร)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial PV มีปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ที่เป็นตัวแปรในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผง เช่น ความสูงของโมดูล มุม และพื้นผิวก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเฉพาะการติดตั้งในประเทศไทย หากมีการนำมาใช้ในพื้นที่ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ย่อมส่งผลแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการศึกษาค้นคว้าที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการประกอบการตัดสินใจในการติดตั้งต่อไป

วิธีการวิจัย

ในการทดลอง จะทดสอบอัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน โดยพื้นผิวที่จะทำการทดสอบประกอบไปด้วย พื้นคอนกรีต(เก่า) พื้นคอนกรีตทาสีขาว พื้นดิน และพื้นหญ้า โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความสูงจากพื้นถึงขอบล่างของแผง 1.00 m ที่มุมเอียง 18° ทิศทางของแผงหันไปทางทิศใต้ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยพื้นผิวที่ทำการทดสอบ (พื้นคอนกรีตทาสีขาว พื้นดิน พื้นหญ้า) มีขนาด 4.10x5.00 m รวมพื้นที่ 20.50 m² โดยจัดวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ห่างจากขอบพื้นผิวด้านละ 1.50 m แผงที่ใช้ทดสอบเป็นแผง Bifacial PV แบบ half cut cell ยี่ห้อ LONGi ที่กักกำลังไฟฟ้า 430 Wp ขนาด 2,094x1,038x35 mm น้ำหนักแผง 27.5 kg ทดสอบในช่วงเดือนเมษายน - พฤษภาคม 2564 เวลา 9.00 - 16.00 น. บันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาที โดยตัวแปรที่เก็บข้อมูลได้แก่ ค่ารังสีอาทิตย์ อัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิว อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่อง PV module analyzer เป็นเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ภาพที่ 1 การติดตั้งแผงแบบ Bifacial PV ด้านหน้า (ก) และด้านหลัง (ข)

การวัดค่ารังสีอาทิตย์ และ รังสีสะท้อนของพื้นผิวใช้เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์รวม ยี่ห้อ Apogee จำนวน 3 ตัว ในการตรวจวัด โดยตัวที่ 1 ติดตั้งบริเวณตรงกลางด้านข้างแผง ขนานในระนาบเดียวกับองศาของแผง เพื่อตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) ตัวที่ 2 ติดด้านหลังแผงบริเวณด้านล่างกึ่งกลางแผง ($I_{b, \text{Bottom}}$) และ ตัวที่ 3 ติดตั้งด้านหลังแผงบริเวณด้านบนกึ่งกลางแผง ($I_{b, \text{Top}}$) เพื่อตรวจวัดค่ารังสีสะท้อนของพื้นผิว และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย (I_R) เพื่อนำมาคำนวณอัตราการสะท้อนแสง หรือ Albedo ซึ่งคำนวณได้จาก [10]

$$\text{Albedo} = \frac{\text{Reflected Light}}{\text{Incident Light}} \quad (1)$$

เมื่อ $\text{Reflected Light} =$ รังสีที่สะท้อนกลับ
 $\text{Incident Light} =$ รังสีที่ดวงอาทิตย์แผ่ลงมา

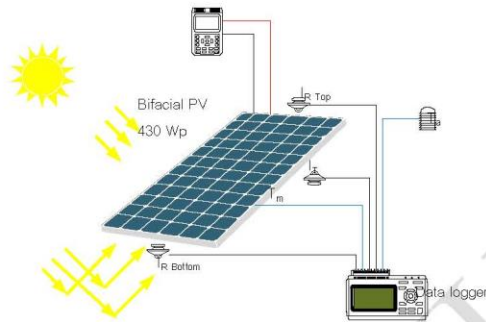
การหาประสิทธิภาพคำนวณได้จาก

$$\eta_{\text{bPV}} = \frac{E_{\text{bPV}} = P_{\text{PV}} \Delta t}{E_{\text{sun}} A I_T \Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ $E_{\text{sun}} =$ พลังงานจากดวงอาทิตย์ (kWh)
 $E_{\text{bPV}} =$ พลังงานที่ไฟฟ้าผลิตได้ (kWh)
 $P_{\text{PV}} =$ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (W)
 $A =$ พื้นที่รับแสง (m^2)
 $I_T =$ รังสีอาทิตย์ด้านหน้า (W/m^2)
 $\Delta t =$ เวลา (minute)

พร้อมทั้งตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อม (T_a) และ อุณหภูมิแผง (T_m) โดยใช้สาย Thermocouple Type k ติดบริเวณด้านหลังตรงกลางแผงในส่วนที่ไม่มีเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิแผง เก็บข้อมูลผ่าน Data logger ยี่ห้อ Graphtech ดังแสดงในภาพที่ 2

PV module analyzer

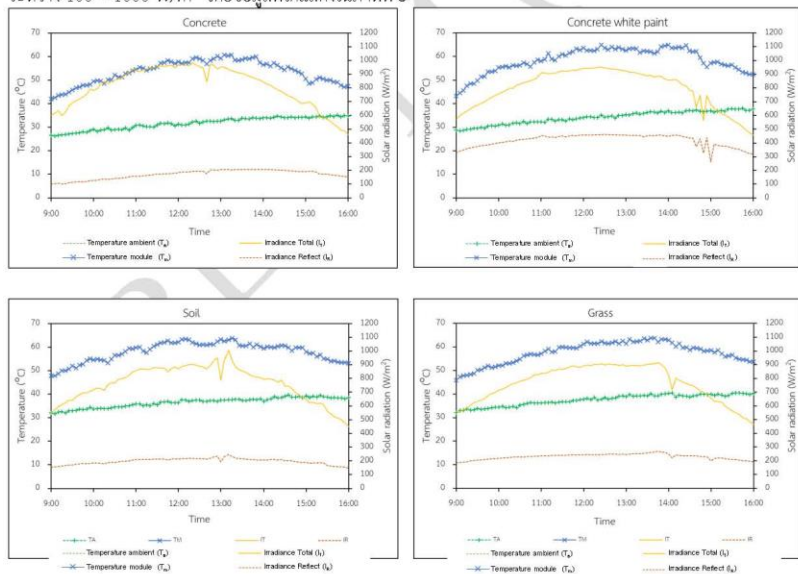


ภาพที่ 2 จุดติดตั้งเครื่อง มือที่ใช้ในการตรวจวัด

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. อัตราการสะท้อนแสงของแต่ละสภาพพื้นผิว

จากการทดสอบเก็บข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิวในช่วงเดือน เมษายน - พฤษภาคม 2564 ใน 4 พื้นผิว ซึ่งได้แก่ คอนกรีต(เก่า) คอนกรีตทาสีขาว ดิน และ หญ้า โดยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่ารังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง 100 - 1000 W/m² โดยข้อมูลที่ได้นำแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสะท้อน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละพื้นผิว

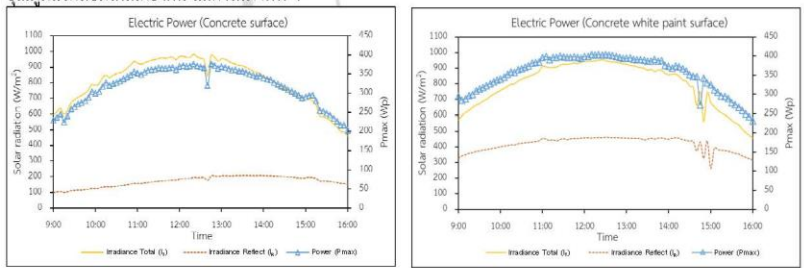
จากภาพที่ 3 แสดงข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า (I_n) ค่ารังสีอาทิตย์ด้านหลัง (I_b) อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิแผง (T_m) ซึ่งพบว่ามีสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบใกล้เคียงกัน โดย อุณหภูมิแวดล้อมในการทดสอบ กรณี พื้นผิวคอนกรีต(เก่า) พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า มีค่า 31.6 °C, 34.1 °C, 36.5 °C, 37.5 °C ในขณะที่ค่ารังสีอาทิตย์ที่ ตกกระทบด้านหน้ามีค่าเฉลี่ย 810.10 W/m² (สะสม 20.66 MJ/m²-day) 795.61 W/m² (สะสม 20.28 MJ/m²-day) 762.36 W/m² (สะสม 19.44 MJ/m²-day) 765.11 W/m² (สะสม 19.50 MJ/m²-day) ตามลำดับ ในขณะที่ค่ารังสีสะท้อนมีค่า 170.49 W/m² (สะสม 4.34 MJ/m²-day) 417.70 W/m² (สะสม 10.65 MJ/m²-day) 197.40 W/m² (สะสม 5.03 MJ/m²-day) 230.45 W/m² (สะสม 5.87 MJ/m²-day) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจาก อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) พบว่าเมื่อ ค่ารังสีอาทิตย์ด้านหน้า (I_n) สูง อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) จะสูงตามไปด้วย และเมื่อนำค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้มากคำนวณหาอัตราการสะท้อนแสง หรือ Albedo ตามสมการที่ (1) พื้นผิวคอนกรีต(เก่า) พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน และพื้นผิวหญ้า มีค่า Albedo อยู่ที่ 0.22 0.53 0.26 และ 0.30 ตามลำดับ ซึ่งค่า Albedo ที่สูงจะทำให้ค่ารังสีที่สะท้อนตกกระทบบริเวณพื้นหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

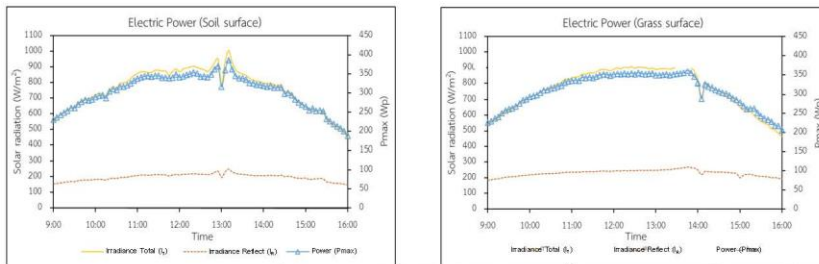
ตารางที่ 1 ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ทดสอบในแต่ละชนิด

| Type of surface | Concrete | Concrete white paint | Soil | Grass |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Picture |  |  |  |  |
| Albedo | 0.22 | 0.53 | 0.26 | 0.30 |

2. ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านในแต่ละพื้นผิว

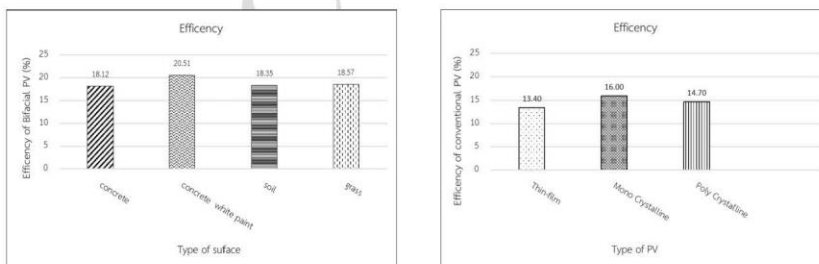
จากผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน ในแต่ละพื้นผิว ในสภาวะที่อุณหภูมิแวดล้อมใกล้เคียงกัน แสดงในภาพที่ 4





ภาพที่ 4 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละสภาพพื้นผิว

จากภาพที่ 4 กราฟแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวกอนกรีต มีกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ 203 Wp ในช่วงเวลา 16.00 น. ที่อุณหภูมิแสง 47.5 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 376.8 Wp ในช่วงเวลา 12.20 น. ที่อุณหภูมิแสง 58.3 °C ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.26 kWh/day พื้นผิวดินมีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ 187.9 Wp ในช่วงเวลา 16.00 น. ที่อุณหภูมิแสง 53.1 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 385.8 Wp ในช่วงเวลา 13.10 น. ที่อุณหภูมิแสง 63 °C ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.15 kWh/day พื้นผิวหญ้ามีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ 206.7 Wp ในช่วงเวลา 16.00 น. ที่อุณหภูมิแสง 53.7 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 360.4 Wp ในช่วงเวลา 13.45 น. ที่อุณหภูมิแสง 62.2 °C ให้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.18 kWh/day และพื้นผิวกอนกรีตทาสีขาวมีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ 230.8 Wp ในช่วงเวลา 16.00 น. ที่อุณหภูมิแสง 52.4 °C และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 404.1 Wp ในช่วงเวลา 12.10 น. ที่อุณหภูมิแสง 62.6 °C ให้ค่าพลังงานไฟฟ้าไฟฟ้า 2.51 kWh/day โดยอุณหภูมิของแผงมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ระหว่าง 60-65 °C ในช่วงเวลา 11.30-13.30 น. ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านที่ติดตั้งบนพื้นผิวกอนกรีตทาสีขาวจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับพื้นผิวนิรติอื่น เนื่องจาก พื้นผิวกอนกรีตทาสีขาว มีอัตราการสะท้อนแสงหรือค่า Albedo ที่สูง ส่งผลให้รังสีสะท้อนตกกระทบบริเวณด้านหลังแผงมาก ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น



ภาพที่ 5 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของแต่ละพื้นผิว และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Conventional

จากภาพที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 4 พื้นผิว โดยนำมาหาประสิทธิภาพจากสมการที่ (2) พื้นผิวกอนกรีตทาสีขาวให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่ 20.51% รองลงมาเป็นพื้นผิวหญ้า พื้นผิวดิน และคอนกรีตเก่าที่ 18.57%, 18.35% และ 18.12% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจาก พื้นผิวสีขาวที่มี Albedo สูง ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงกว่า พื้นผิวนิรติอื่น และเมื่อเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้าน กับ ประสิทธิภาพแผง conventional [3] พบว่า แผง bifacial มีประสิทธิภาพสูงกว่าทุกรณี

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาพื้นผิวที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ในช่วงเวลา 9.00 น. - 16.00 น.พบว่า พื้นผิวคอนกรีต(เก่า) พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว พื้นผิวดิน พื้นผิวหญ้า มีอัตราการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ (Albedo) อยู่ที่ 0.22, 0.53, 0.26 และ 0.30 กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial PV สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 2.26 kWh/day, 2.51 kWh/day, 2.15 kWh/day, 2.18 kWh/day คิดเป็น 18.12%, 20.51%, 18.35% และ 18.57% ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าว พื้นผิวคอนกรีตทาสีขาว ซึ่งมีอัตราการสะท้อนของรังสีอาทิตย์สูง ทำให้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial PV สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงตามไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ สถานที่ สำหรับการทำการวิจัย รวมถึงทุนสนับสนุนโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2562 และ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำ ขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ และขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโทในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). **หลักสูตรเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โครงการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- [2] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). **สารานุกรมพลังงานทดแทน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท มีเดีย เอกซ์เพอร์ทีส อินเทอร์เน็ตในซันแนล (ประเทศไทย) จำกัด. 27-28.
- [3] นิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์, วสันต์ พลาสัย. (2563). **ผลการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะการทดสอบกลางแจ้ง**. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏวราวุฒวิทยา. 12 (2), 113-123.
- [4] รายงานสถานภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย พ.ศ. 2559-2560. (2561). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [5] ดวงพร นพคุณ. (2536). **ภูมิอากาศวิทยา**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- [6] เสริม จันทร์ฉาย. (2560). **รังสีอาทิตย์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. นครปฐม : เพชรเกษมพรินติ้ง กรุ๊ป. 42-62.
- [7] Ahmer A.B. Baloch., Maher Armoush., Basel Hindi., Abdelkader Bousseham., Nouar Tabet. (2017). **Performance Assessment of Stand Alone Bifacial Solar Panel Under Real Time Conditions**. IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 44th.
- [8] Johan Peura., Jessica Torsell. (2018). **Evaluation of simulation methods and optimal installation conditions for bifacial PV modules**. Doctoral Dissertation. Linköping University.
- [9] Jai Prakash SINGH., Timothy M WAKSH. (2012). **PERFORMANCE INVESTIGATION OF BIFACIAL PV MODULES IN THE TROPICS**. Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC). Vol 27.
- [10] LG Electronics Inc. (2017). **Bifacial Design Guide**. Brochure. Seoul, Korea : Author.
- [11] Wenbo Gu a, b, Senji Li a, b, Xing Liu b, Zhenwu Chen b, Xiaochun Zhang b, Tao Ma a. (2021). **Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions**. Renewable Energy Vol 173. 1111-11122.



ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

นเรนทร์ฤทธิ กันทะ สรวาฐ พลวงษ์ศรี อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และสุภัทษณา มงคล

บทความเรื่อง

สภาพพื้นผิวสะท้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบปรับแสงสองด้าน

งานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14
วันที่ 10 – 12 พฤศจิกายน 2564 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

(ดร.อำพล อภาานนกร)

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนประเทศไทย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิกราน หอมดวง)

คณบดีวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

นเรนทร์ฤทธิ กันทะ สรวาฐ พลวงษ์ศรี อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และสุภัทษณา มงคล

ได้รับรางวัลการนำเสนอผลงานวิจัยภาคบรรยาย ระดับ **ชมเชย**

เรื่อง สภาพพื้นผิวสะท้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบปรับแสงสองด้าน

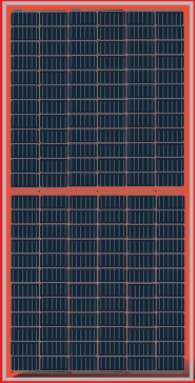
งานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14
วันที่ 10 – 12 พฤศจิกายน 2564 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

(ดร.อำพล อภาานนกร)

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนประเทศไทย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิกราน หอมดวง)

คณบดีวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



LR4-72HBD 415~435M

Hi-M04

**High Efficiency
Low LID Bifacial PERC with
Half-cut Technology**

10-year Warranty for Materials and Processing;
30-year Warranty for Extra Linear Power Output

Complete System and Product Certifications

IEC 61215, IEC61730, UL1703
 ISO 9001:2008: ISO Quality Management System
 ISO 14001: 2004: ISO Environment Management System
 TS62941: Guideline for module design qualification and type approval
 OHSAS 18001: 2007 Occupational Health and Safety



* Specifications subject to technical changes and tests. LONGi Solar reserves the right of interpretation.

Front side performance equivalent to conventional low LID mono PERC:

- High module conversion efficiency (up to 19.4%)
- Better energy yield with excellent low irradiance performance and temperature coefficient
- First year power degradation <2%

Bifacial technology enables additional energy harvesting from rear side (up to 25%)

Glass/glass lamination ensures 30 year product lifetime, with annual power degradation < 0.45%, 1500V compatible to reduce BOS cost

Solid PID resistance ensured by solar cell process optimization and careful module BOM selection

Reduced resistive loss with lower operating current

Higher energy yield with lower operating temperature

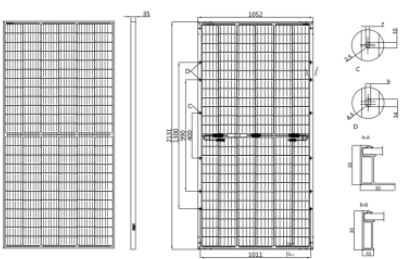
Reduced hot spot risk with optimized electrical design and lower operating current



Room 801, Tower 3, Lujiazui Financial Plaza, No.826 Century Avenue, Pudong Shanghai, 200120, China
 Tel: +86-21-80162606 E-mail: module@longi-silicon.com Facebook: www.facebook.com/LONGi Solar

Note: Due to continuous technical innovation, R&D and improvement, technical data above mentioned may be of modification accordingly. LONGi Solar have the sole right to make such modification at anytime without further notice; Demanding party shall request for the latest datasheet for such as contract need, and make it a consisting and binding part of lawful documentation duly signed by both parties.

LR4-72HBD 415~435M

| Design (mm) | Mechanical Parameters | Operating Parameters |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Cell Orientation: 144 (6×24) Junction Box: IP68, three diodes Output Cable: 4mm², 300mm in length, length can be customized Glass: Dual glass 2.0mm tempered glass Frame: Anodized aluminum alloy frame Weight: 29.5kg Dimension: 2131×1052×35mm Packaging: 30pcs per pallet 150pcs per 20'GP 600pcs per 40'HC</p> | <p>Operational Temperature: -40 C ~ +85 C Power Output Tolerance: 0 ~ +5 W Voc and Isc Tolerance: ±3% Maximum System Voltage: DC1500V (IEC/UL) Maximum Series Fuse Rating: 20A Nominal Operating Cell Temperature: 45±2 C Safety Class: Class II Fire Rating: UL type 3 Bifaciality: Glazing≥70%</p> |

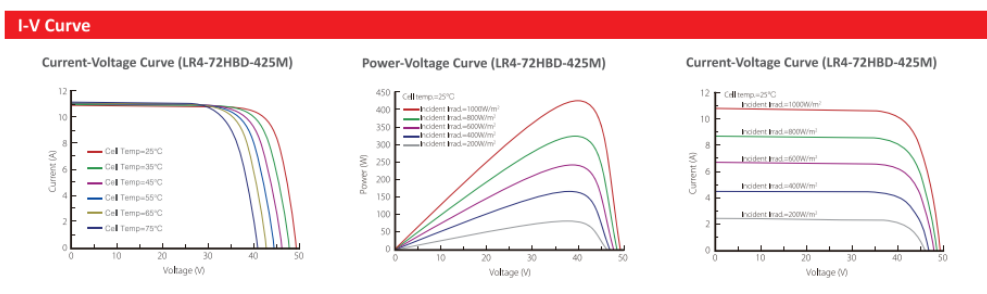
| Electrical Characteristics | | | | | | | Test uncertainty for Pmax: ±3% | | | |
|----------------------------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|--------------------------------|-------|----------------|-------|
| Model Number | LR4-72HBD-415M | | LR4-72HBD-420M | | LR4-72HBD-425M | | LR4-72HBD-430M | | LR4-72HBD-435M | |
| Testing Condition | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT |
| Maximum Power (Pmax/W) | 415 | 308.6 | 420 | 312.3 | 425 | 316.0 | 430 | 319.7 | 435 | 323.5 |
| Open Circuit Voltage (Voc/V) | 49.0 | 45.6 | 49.2 | 45.8 | 49.4 | 46.0 | 49.6 | 46.2 | 49.8 | 46.4 |
| Short Circuit Current (Isc/A) | 10.89 | 8.82 | 10.96 | 8.87 | 11.02 | 8.93 | 11.09 | 8.98 | 11.16 | 9.04 |
| Voltage at Maximum Power (Vmp/V) | 40.6 | 37.7 | 40.8 | 37.9 | 41.0 | 38.1 | 41.2 | 38.2 | 41.4 | 38.4 |
| Current at Maximum Power (Imp/A) | 10.23 | 8.19 | 10.30 | 8.25 | 10.37 | 8.30 | 10.44 | 8.36 | 10.51 | 8.42 |
| Module Efficiency(%) | 18.5 | | 18.7 | | 19.0 | | 19.2 | | 19.4 | |

STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25 C, Spectra at AM1.5
 NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20 C, Spectra at AM1.5, Wind at 1m/s

Electrical characteristics with different rear side power gain (reference to 425W front)

| Pmax /W | Voc/V | Isc /A | Vmp/V | Imp /A | Pmax gain |
|---------|-------|--------|-------|--------|-----------|
| 446 | 49.4 | 11.58 | 41.0 | 10.88 | 5% |
| 468 | 49.4 | 12.13 | 41.0 | 11.40 | 10% |
| 489 | 49.5 | 12.68 | 41.1 | 11.92 | 15% |
| 510 | 49.5 | 13.23 | 41.1 | 12.44 | 20% |
| 531 | 49.5 | 13.78 | 41.1 | 12.96 | 25% |

| Temperature Ratings (STC) | | Mechanical Loading | |
|---------------------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Temperature Coefficient of Isc | +0.060%/ C | Front Side Maximum Static Loading | 5400Pa |
| Temperature Coefficient of Voc | -0.300%/ C | Rear Side Maximum Static Loading | 2400Pa |
| Temperature Coefficient of Pmax | -0.370%/ C | Hailstone Test | 25mm Hailstone at the speed of 23m/s |



LONGI Room 801, Tower 3, Lujiazui Financial Plaza, No.826 Century Avenue, Pudong Shanghai, 200120, China
 Tel: +86-21-80162606 E-mail: module@longi-silicon.com Facebook: www.facebook.com/LONGI Solar

Note: Due to continuous technical innovation, R&D and improvement, technical data above mentioned may be of modification accordingly. LONGI Solar have the sole right to make such modification at anytime without further notice; Demanding party shall request for the latest datasheet for such as contract need, and make it a consisting and binding part of lawful documentation duly signed by both parties.

V10

ประวัติผู้วิจัย

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล | นายนเรนทร์ฤทธิ กันทะ |
| เกิดเมื่อ | 17 มิถุนายน 2523 |
| ประวัติการศึกษา | ระดับอุดมศึกษา การบริหารทรัพยากรมนุษย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ เชียงใหม่ |
| ประวัติการทำงาน | 2550-2553 หน่วยแผนงาน ฝ่ายวิศวกรรม แขวงทางหลวงเชียงใหม่ที่ 2 2554-ปัจจุบัน สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานประจำเขต 1 (เชียงใหม่) |

