



การทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์

ภายใต้การทำงานจริง

Performance Prediction of Poly-Crystalline Solar Cell Module under Real Practice

อรรถกร อาสนคำ อิศระพงศ์ กันธิยะ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

Attakorn Asanakham, Itsarapong Kantiya and Tanongkiat Kiatsiriroat

ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Chiang Mai University

E-mail: attakorn_asanakham@hotmail.com, โทรศัพท์: 092-4590550, โทรสาร: 053-944144

บทคัดย่อ

บทความนี้ เสนอวิธีทำนายอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบของโมดูล เพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ วิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาทดสอบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ขนาด 0.99 m x 1.96 m ภายใต้การทำงานจริงโดยโมดูลหันหน้าไปทางทิศใต้ และเอียงทำมุม 18° จากแนวระดับ ซึ่งผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิโมดูลที่ลดลง เทคนิคดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณความสามารถในการผลิตไฟฟ้าตลอดปีของโมดูล ดังกล่าว ภายใต้สภาพภูมิอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดปี มีค่า 150.32 kWh และมีต้นทุน 7.2 Baht/kWh (0.224 USD/kWh) และ 9.8 Baht/kWh (0.306 USD/kWh) ที่อัตราดอกเบี้ย เท่ากับ 4% (ตามอัตราเงินเฟ้อ) และ 7% ตามลำดับ

คำสำคัญ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์, การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ, การผลิตกระแสไฟฟ้า, ราคาต่อหน่วย

ABSTRACT

In this paper, a method to predict performance on power generation of solar cell module under Real Practice was carried out. The method could predict the module temperature and with the solar radiation incident on the module, the generated electrical power could be estimated. A trial was performed with a 0.99 m x 1.96 m polycrystalline module. The module was facing south with 18° inclination. The simulated results agreed well with those of the experimental data. The generated power increased with the increase of the solar radiation level and the decrease of the module temperature. The generated annual energy from the module under Chiang Mai climate was also evaluated. The value was about 150.32 kWh/y with the unit cost of 7.2 Baht/kWh (0.306 USD/kWh), and 9.8 Baht/kWh (0.306 USD/kWh) at interest rates of 4% (Inflation) and 7%, respectively.

Keywords: Solar cell module, Performance analysis, Power generation, Unit cost.

บทความนี้ได้แก้ไขปรับปรุงจากบทความเรื่อง “วิธีการอย่างง่ายในการทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11

1. บทนำ

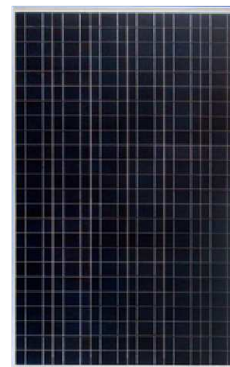
การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะนิยมใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในปัจจุบัน วัสดุและอุปกรณ์มีราคาที่ถูกลง รวมถึงการที่รัฐบาล มีนโยบายในการส่งเสริมให้มีการทำธุรกิจฟาร์มโซล่าเซลล์ และการนำไปผลิตไฟฟ้าตามบ้านเรือน เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่สายส่ง ทั้งนี้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิโมดูล เป็นต้น โดยปกติแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดตามมาตรฐานสากล ที่กำหนดไว้ตามแผงโมดูลซึ่งจะกำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ไว้ที่ $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิโมดูล 25°C แต่เมื่อมีการนำไปใช้งานในสภาพการทำงานจริง อุณหภูมิโมดูลจะสูงขึ้นทำให้การผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะของแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงจากการศึกษาของ Skoplakiet al. (2008) [1] และ Skoplaki and Palyvos (2009) [2] พบว่าอุณหภูมิมีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิโมดูลมีค่าสูงขึ้น จะทำให้ค่าของประสิทธิภาพลดลง เช่นเดียวกับ Kaldellis et al. (2014) [3] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วลมที่มีต่อประสิทธิภาพของแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดย อุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และเมื่อสามารถลดอุณหภูมิของแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้เหมือนจิต (2552) [4] ได้ทดสอบสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิโมดูล จะอยู่ใน $P_e = a.I_T - b.(T_m - T_a)^2$ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในลักษณะนี้ยังไม่มีรายงานมากนักสำหรับประเทศไทย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

สำหรับในงานวิจัยนี้จะศึกษาสมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยจะพัฒนาวิธีการในการคำนวณอุณหภูมิของโมดูล เมื่อได้รับรังสีอาทิตย์ และประเมินกำลังไฟฟ้าที่ผลิต

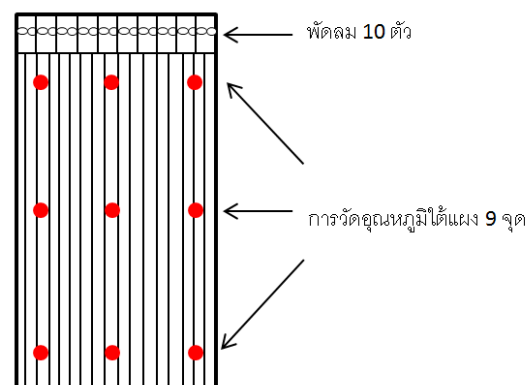
ได้ วิธีการดังกล่าวจะช่วยทำนายสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้า รวมถึงการออกแบบระบบระบายความร้อนในโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้า

2. การวิเคราะห์สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

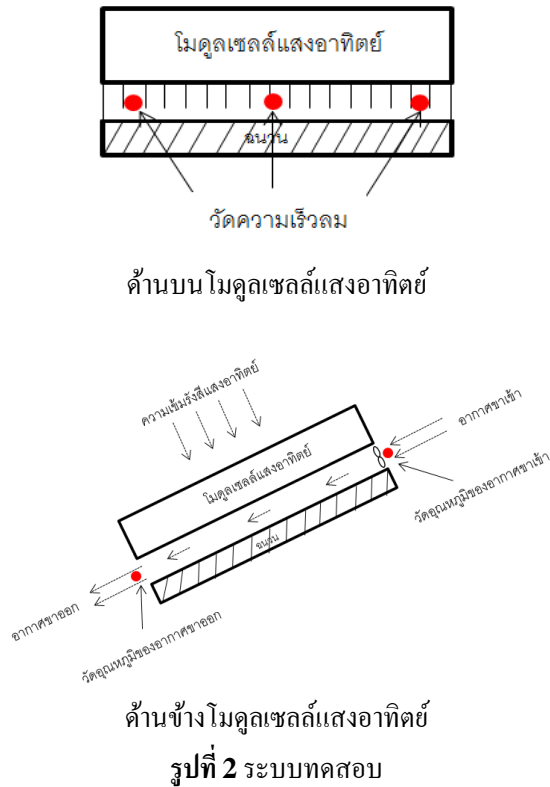
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยมีขนาด $0.99 \text{ m} \times 1.96 \text{ m}$ แสดงในรูปที่ 1 โดยกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด ตามค่าทดสอบมาตรฐานสากล มีค่า 250 W_p ในการทดสอบจะมีหลอดไฟฟ้าขนาด 150 W จำนวน 2 หลอด เป็นภาระทางไฟฟ้า ให้แก่โมดูล โมดูลจะหันหน้าทางทิศใต้ และเอียงทำมุม 18° จากแนวระดับ โดยระบบในการทำการทดสอบแสดงได้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ



ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์



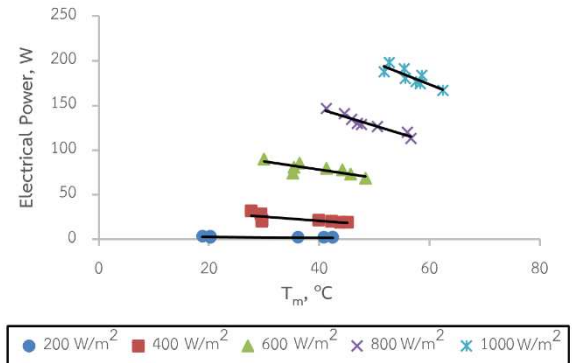
อุณหภูมิได้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 9 จุด และด้านบนอีก 3 จุด รวมถึงอุณหภูมิอากาศรอบๆ จะทำการวัดด้วย thermocouple type T (ความผิดพลาด $\pm 1.0^\circ\text{C}$) ซึ่งจะต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล data logger ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะอ่านค่าด้วย Pyranometer (Calibration uncertainty $<1.8\%$) ที่วางในระนาบเดียวกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้า เมื่อมีรังสีอาทิตย์มาตกกระทบบนแผ่นโมดูล ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิของโมดูล โดย

$$P_e = f[I_T, T_m] \quad (1)$$

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นเดียวกัน พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรผันตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ที่ตกบนระนาบโมดูล และแปรผกผันกับอุณหภูมิโมดูล ดังแสดงในรูปที่ 3 (ในส่วนนี้จะใช้พหุคูณช่วยระบายความร้อน ทางด้านหลังของโมดูล เพื่อให้อุณหภูมิโมดูลมีค่ากระจายในช่วงต่างๆ)

มีข้อสังเกตว่าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำกว่า 200 W/m^2 โมดูลแทบไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ กับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับอุณหภูมิแผงโมดูล และความเข้มรังสีอาทิตย์ จะอยู่ในรูป

$$P_e = a + bI_T + cI_T^2 + dT_m + eI_T T_m + fI_T^2 T_m \quad (2)$$

โดย $a = -15.5729$, $b = 0.038256$, $c = 0.000298$, $d = 0.119225$, $e = -0.00043$ และ $f = -2.1 \times 10^{-6}$

ในรูปที่ 3 ถ้าสามารถทำนายอุณหภูมิโมดูล และกำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ จะสามารถประเมินกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูล

อุณหภูมิโมดูล สามารถหาได้จากสมดุลความร้อนภายใต้สมมุติฐานว่า อุณหภูมิโมดูลมีค่าสม่ำเสมอ และไม่คิดพลังงานความร้อนสะสมในโมดูล สมดุลพลังงานที่โมดูลจะอยู่ในรูป

$$I_T(\tau\alpha)A_C = h_T A_C(T_m - T_a) + h_B A_C(T_m - T_a) \quad (3)$$

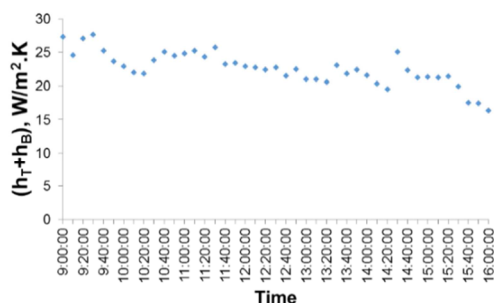
$$\text{หรือ } T_m = I_T(\tau\alpha)/(h_T + h_B) + T_a \quad (4)$$

เมื่อ A_C คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของโมดูล, m^2 , h_T, h_B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านหน้าและด้านหลังแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับ, $\text{W/m}^2\text{K}$, I_T คือความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบโมดูล, W/m^2

P_e คือ กำลังไฟฟ้า, WT_a, T_m คือ อุณหภูมิอากาศ และ อุณหภูมิโมดูลตามลำดับ, $^{\circ}\text{C}$ และ $\tau\alpha$ คือ ผลคูณค่าการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของโมดูล

ในสมการ (3) เทอมแรกและเทอมที่สอง ทางขวามือคืออัตราการสูญเสียความร้อนทางด้านหน้า และด้านหลังตามลำดับ h_T และ h_B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ ค่า $(\tau\alpha)$ คือ ผลคูณค่าการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของโมดูล ซึ่งจากการทดสอบของอิสระพงศ์ และคณะ (2558) [5] มีค่า 0.64

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($h_T + h_B$) จากการทดสอบ ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ 4 โดยใช้ค่าตัวแปรในสมการ ที่ได้จากการทดสอบแทนค่าเพื่อหา ($h_T + h_B$) พบว่าการถ่ายเทความร้อนรวมที่เกิดขึ้นตลอดวัน มีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 20-30 $\text{W/m}^2\text{K}$ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 25 $\text{W/m}^2\text{K}$ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งในการจำลองการทำงานของโมดูล จะใช้ค่าดังกล่าวในการคำนวณ



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($h_T + h_B$)

จากสมการ (4) ถ้ากำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศรอบๆ จะสามารถคำนวณอุณหภูมิของโมดูลซึ่งสามารถนำไปคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในสมการ (2)

สำหรับสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าคือ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า η_e จะสามารถหาได้จาก

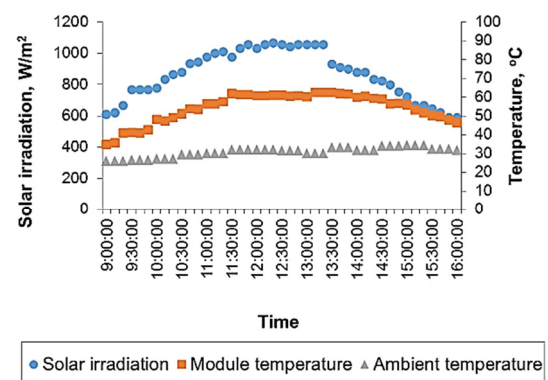
$$\eta_e = \frac{P_e}{I_T A_C} \quad (5)$$

เมื่อ η_e คือ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและ P_e คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้, W

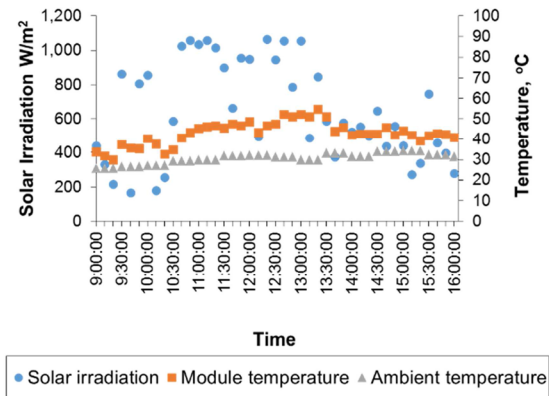
3. ผลการทดสอบ

การทดสอบได้ดำเนินการที่จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส จากรูปที่ 5 พบว่า อุณหภูมิแผงโมดูลที่ด้านหน้าและด้านหลังใกล้เคียงกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1°C โดยอุณหภูมิแผงโมดูลเฉลี่ยมีค่าสูงสุดประมาณ 61°C และ 52°C ตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ จะขึ้นกับความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรผันตามค่าความเข้มรังสี แต่ถ้าอุณหภูมิโมดูลเพิ่มขึ้น ที่ค่าความเข้มรังสีเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ได้จะลดลง ดังเช่นในคอนบ่ายที่อุณหภูมิแผงโมดูลจะสูงกว่าในตอนเช้า เนื่องจากอุณหภูมิอากาศตอนบ่ายที่สูงกว่า ดังผลแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 183 W ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 250 W ที่สภาวะตามมาตรฐาน สำหรับวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะกระจายตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์

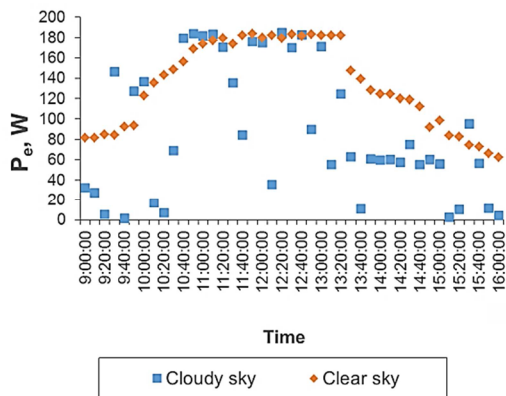


ก. วันที่ท้องฟ้าแจ่มใส



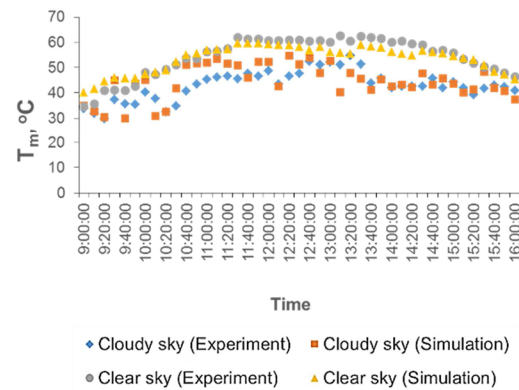
ข. วันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส

รูปที่ 5 อุณหภูมิโมดูลที่เวลาต่างๆ ในวันที่ทำการทดสอบ

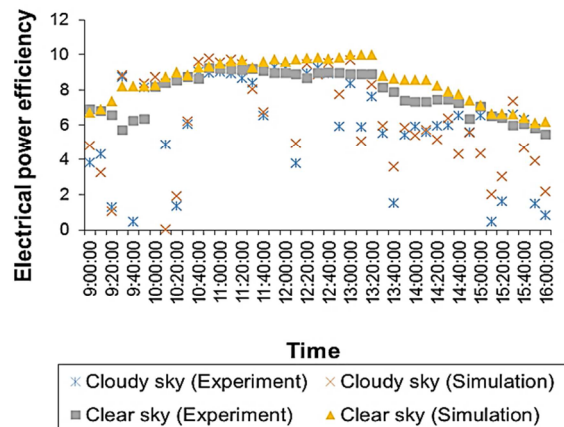


รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

อุณหภูมิของแผงโมดูล และประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในกรณีวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและกรณีวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส จะแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ รวมถึงผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งผลที่ได้จากโมเดลจะใกล้เคียงกับผลการทดลองได้ดี ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และก่อนข้างคี่ในวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส

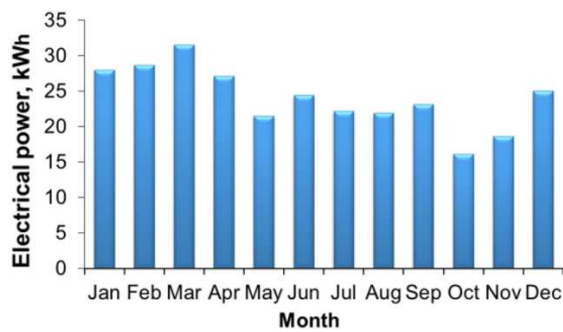


รูปที่ 7 อุณหภูมิของโมดูลแสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบจริงเทียบกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ตามช่วงเวลาทำการทดสอบ



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโมดูลแสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบจริงเทียบกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ตามช่วงเวลาทำการทดสอบ

วิธีการข้างต้น ได้ถูกนำไปใช้คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโมดูล ตลอดทั้งปี ภายใต้สภาพภูมิอากาศของเชียงใหม่ [6, 7] ซึ่งผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละเดือน แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งผลปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุดคือเดือน มีนาคม ที่ประมาณ 31.79 kWh และเดือนที่มีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยที่สุดคือ ตุลาคม ที่ประมาณ 16.16 kWh ต่อกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก 1 แผงโมดูล และจากการคำนวณความสามารถในการผลิตไฟฟ้าตลอดปีของโมดูลดังกล่าว จะมีค่า 289.19 kWh



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละเดือน
ภายใต้สภาพภูมิอากาศของเชียงใหม่

ในการพิจารณาต้นทุนทั้งหมดที่ใช้ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ในลักษณะของโซลาร์ฟาร์ม โดยไม่รวมค่าที่ดินและการปรับพื้นที่ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดราคาลงทุน 70 Baht/W_p [ข้อมูลการติดตั้งของบริษัทที่จำหน่ายโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์] ซึ่งเป็นค่ากลางที่ใช้ในการติดตั้งทั่วไปในประเทศอาชญาการใช้งานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 25 ปี และเมื่อพิจารณาต้นทุนรายปีที่อัตราส่วนลด (Discount rate) เท่ากับ 4% (ตามอัตราเงินเฟ้อ) และ 7% จะได้ราคาต้นทุนเท่ากับ 3.7 Baht/kWh และ 5.1 Baht/kWh ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้จะต้องมีสมรรถนะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบของโมดูลและอุณหภูมิโมดูลวิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาเทียบกับผลการทดสอบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ขนาด 0.99 m x 1.96 m ซึ่งผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิโมดูลที่ลดลง และเมื่อนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณปริมาณไฟฟ้าตลอดปีจากโมดูลดังกล่าว ภายใต้สภาพภูมิอากาศของจังหวัดเชียงใหม่พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดปี มีค่า 289.19 kWh และมีต้นทุน 3.7 และ 5.1 Baht/kWh ที่อัตราส่วนลดเท่ากับ 4% (ตามอัตราเงินเฟ้อ) และ 7% ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานหมุนเวียนมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (COE) และศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานสะอาดและการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติที่ยั่งยืนมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภายใต้การสนับสนุนงบประมาณวิจัยโดย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (NRU) รวมไปถึง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Skoplaki, E., Boudouvis, A.G. and Palyvos, J.A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2008; 92: 1393– 1402.
- [2] Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 2009; 34: 23–29.
- [3] John, K.K., Marina, K. and Kosmas, A.K. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. *Renewable Energy*, 2014; 66: 612-624.
- [4] เหมือนจิต แจ่มศิลป์. การจัดการวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีฐานกิจกรรม. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551

- [5] อิศระพงศ์ กันธิยะ อรรถกร อาสนคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทดสอบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของโมดูลโซลาร์เซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีครีบบระบายความร้อน ด้วยอากาศ. *การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 14 เรื่อง การถ่ายทอดพลังงาน ความร้อน และมวลในอุปกรณ์ทางความร้อนและกระบวนการ*, ณ ฮอไรซันวิลเลจแอนด์รีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทิพย์ อ.คอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่, วันที่ 19-20 มีนาคม 2558.
- [6] Pratinthong, N. Long-Term Simulation of Concrete Solar Collector. Master thesis, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, 1996.
- [7] Duffie, J.A., Beckmen, W.A. Solar engineering of thermal processes. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.