

การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้า และความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ FEASIBILITY STUDY OF GENERATING ELECTRICITY AND HEAT FROM A SOLAR CELL

สรวิศ สอนสารี^{1*}, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์²

Sorawit Sonsaree^{1*}, Somchai Jiajitsawat²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹ Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

² Faculty of Science, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: sorawitsonsaree@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 7 พฤศจิกายน 2567

วันที่แก้ไขบทความ 21 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 22 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการศึกษาจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 W และมีการติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2" ยาว 1,050 mm. จำนวน 12 ท่อต่อร่วมกับท่อร่วม หรือ ท่อ Header ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8" ที่มีความยาว 800 mm. จำนวน 2 ท่อ (ด้านบนและด้านล่าง) ผลการทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำ ระบายความร้อนแตกต่างกัน 3 ค่า 50, 100 และ 150 LPH พบว่า การติดตั้งชุดระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระบบสามารถนำเอาน้ำร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ซึ่งโดยปกติไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อระบบมีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเท่ากับ 150 LPH และระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 27.5 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 41.4 °C โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 10,684.08 kJ

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, เซลล์แสงอาทิตย์, ความร้อนเหลือทิ้ง

Abstract

This research investigates the generation of electricity and heat using a solar cell power generation system with a maximum installed capacity of no more than 500 W. A cooling system consists of 12 copper pipes, each with a 1/2" diameter and a length of 1,050 mm connected (at both the upper and lower sides) to two manifold or header pipes with a 5/8" diameter and a length of 800 mm to enhance system performance. By physically separating the heat sink from the solar panels, the system was able to capture and utilize the waste heat generated during the cooling process. Experimental data collected at cooling water flow rates of 50, 100, and 150 LPH indicated a significant increase in overall power generation efficiency compared to a traditional integrated configuration. An increase in cooling water flow rate resulted in a corresponding increase in solar cell efficiency. The optimal performance was observed at a flow rate of 150 LPH, where the system was capable of absorbing 10,684.08 kJ of heat energy, leading to a temperature rise of 13.9 °C from 27.5 °C to 41.4 °C.

Keywords: Efficiency, Solar cell, Waste heat

1. บทนำ

จากเป้าหมาย (ร่าง) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2567 – 2580 หรือ AEDP 2024 (สถาบันวิทยาการพลังงาน, 2567) พบว่า ประเทศไทยมีแผนที่จะเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกร้อยละ 36 ภายในปี พ.ศ. 2580 และมีเป้าหมายในการผลิตและใช้งานพลังงานทดแทนให้บรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 ด้วยเหตุนี้เองประเทศไทยจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ให้เหมาะสมกับศักยภาพพลังงานทดแทนในด้านต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับกันว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานทดแทนโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีศักยภาพพลังงานค่อนข้างสูง โดยมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 17.5 MJ/m²-day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2565) จึงทำให้ในปัจจุบันภาครัฐได้ให้การสนับสนุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก ประกอบกับราคาค่าใช้จ่ายของเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มที่ถูกลง จึงทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทำให้ภาครัฐเร็ววันสามารถที่จะเข้าถึงเทคโนโลยีดังกล่าวได้ ซึ่งจะส่งผลให้เป้าหมายของแผน AEDP 2024 ของประเทศไทยประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้ได้

อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม มักจะมีการใช้พลังงานทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน และจากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นเป็นที่ทราบกันดีว่าเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพียงอย่างเดียว แต่หากต้องการพลังงานความร้อน (น้ำร้อน) เพื่อนำมาใช้งานมักจะนำเอาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไปป้อนให้กับเครื่องทำน้ำร้อนหรือระบบทำความร้อนอื่นๆ ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า โดยกระบวนการดังกล่าวเปรียบเสมือนการลดคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน (น้ำร้อน) ที่เรียกว่า แผงรับความร้อนแบบ PV-thermal (PVT) (Herez *et al.*, 2020) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมที่มีสัดส่วนการใช้พลังงานในภาพรวมของประเทศในระดับสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ให้ความสำคัญไปที่การศึกษาการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยการติดตั้งชุดระบายความร้อนจากท่อทองแดงที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไปในประเทศ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา บรรณพงศ์ (2562) อุณหภูมิส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้ศึกษาการระบายความร้อนด้วยการระเหยน้ำเปียกบนแผ่นเรียบเพื่อประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า สามารถใช้ผ้าชุมน้ำติดตั้งไว้ด้านหลังแผงเพื่อช่วยลดอุณหภูมิได้ โดยผ้าที่ใช้ควรเป็นผ้าที่หนาหรือผ้าที่มีความพรุนมากเพื่อยืดระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ (นเรศ และปราโมทย์, 2565) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานเป็นเวลานานจะเกิดความร้อนขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง จึงได้ออกแบบระบบระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 330 W ขึ้น ประกอบด้วย (1) ติดตั้งพัดลมชนิด StormTech รุ่น STM001-002 จำนวน 10 ตัว และใช้ไม้อัดปิดพื้นที่ด้านหลัง (2) ติดตั้งชุดสายพ่นน้ำสเปรย์ไปยังด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยติดตั้งห่างจากแผงเป็นระยะ 10 cm กระจายทั่วแผง 25 จุด ผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยอากาศและระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ จะสามารถเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 7.52 และ 6.02 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน (ขจรเดช และพัฒน์พงษ์, 2560) เปรียบเทียบระบบระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 6 วิธี ประกอบไปด้วย (1) ระบายความร้อนออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกสู่สภาพแวดล้อมโดยตรง (2) ระบายความร้อนโดยใช้พัดลมระบายความร้อน (3) ระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน (4) ระบายความร้อนโดยใช้ครีระบายความร้อน (5) ระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับครีระบายความร้อน และ (6) ระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับครีระบายความร้อนและพัดลมระบายความร้อน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของระบบระบายความร้อนของระบบที่ 1 ถึงระบบที่ 6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.49, 50.00, 53.06, 60.42, 69.96 และ 91.82 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบระบายความร้อน (6) ประกอบไปด้วยเซลล์

เทอร์โมอิเล็กทริก ครีบบระบายความร้อนและพัฒนาระบบระบายความร้อนมีความสามารถในการระบายความร้อนออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุด (สิทธิพัฒน์ และคณะ, 2561) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งชุดการพ่นละอองน้ำที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ระบบจะช่วยลดอุณหภูมิเฉลี่ยด้านหน้าและด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 19.90 °C และ 24.90 °C ตามลำดับ โดยคิดเป็นประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.79 (ธนกฤต, 2564) เพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบฮีทไปป์คู่ลิ่งที่ทำจากท่อทองแดงกลมมีเกลียวภายในที่ทำหน้าที่เป็นวิก ท่อฮีทไปป์จำนวน 7 ท่อ ที่ใช้น้ำกลั่นเป็นของไหลทำงาน จะถูกติดตั้งด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งระบบฮีทไปป์จะสามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 1.44 °C หรือคิดเป็นร้อยละ 2.70 และสามารถผลิตพลังงานต่อปีมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งได้เท่ากับ 22.60 kWh หรือคิดเป็นร้อยละ 11.30 (ยุธนา, 2565; อนุรัตน์ และยุธนา, 2561) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อน ผลการศึกษาเปรียบเทียบ (1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตั้งท่อความร้อน (2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน และ (3) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้ R-11 เป็นสารทำงาน ผลการศึกษาพบว่า กรณีสูดความร้อน (ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.00 mm บีบให้มีขนาด 20.00 mm และรัศมี 2.60 mm ภายในติดตั้งวัสดุพรมแบบตาข่ายทองแดงขนาด 100 Mesh) ที่ใช้ R-11 เป็นสารทำงานจะช่วยให้การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 49.20 °C และมีประสิทธิภาพร้อยละ 11.80

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในการผลิตไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยภายในประเทศยังพบอีกว่า มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาถึงเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการลดความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ยกตัวอย่างเช่น การติดตั้งท่อความร้อน การติดตั้งพัฒนาระบบระบายความร้อน และการติดตั้งชุดสเปร์น้ำลดความร้อน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อนและนำความร้อนดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ประกอบกับผลงานวิจัยของทีมผู้วิจัยโดย Sorawit & Somchai (2021); ขจิตร และคณะ (2566); พงศธร และคณะ (2564); สรวิต และสมชาย (2564); สรวิต และคณะ (2564) ที่ได้ดำเนินการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือ การระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งชุดระบายความร้อนอย่างง่ายที่ได้ดำเนินในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ได้มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนและแผ่นไม้อัด ที่ทำหน้าที่เสมือนกรอบป้องกันไม่ให้ความร้อนสามารถระบายออกจากหลังแผง

เซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดความร้อนสะสม ส่งผลให้การระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ดี (ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง (Kaldellis *et al.*, 2014; Skoplaki & Palyvos, 2009)) ถึงแม้จะสามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับงานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการสะสมความร้อนที่เกิดขึ้นหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการนำเอาฉนวนกันความร้อนและแผ่นไม้ที่ทำหน้าที่เสมือนกรอบป้องกันความร้อนออก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการติดตั้งชุดท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง อีกทั้งในการศึกษายังเพิ่มจำนวนท่อทองแดงเป็น 2 ท่อ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการระบายความร้อนว่าดีขึ้นหรือไม่

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการระบายความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการติดตั้งท่อน้ำที่ทำจากท่อทองแดงแบบท่อนคู่

2.2 เพื่อทดสอบสภาวะการทำงานจริงของการทำงานร่วมกันระหว่างชุดระบายความร้อนที่ถูกติดตั้งร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งบริเวณหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (สรวีศ สอนสารี และคณะ, 2564) แสดงดังสมการที่ (1)

$$\dot{Q}_{System} = \frac{Mc_p}{t} (T_{Final} - T_{Initial}) \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{System}$ คือ ปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (kW), M คือ ปริมาณของน้ำในถังน้ำ (Liter), c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K), t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (วินาที), $T_{Initial}$ คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (°C) และ T_{Final} คือ อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย (°C)

3.2 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Sun, V. *et al.*, 2020) แสดงดังสมการที่ (2) (งานวิจัยนี้ไม่คิดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับปั้มน้ำระบายความร้อน)

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{I_T \times A} \quad (2)$$

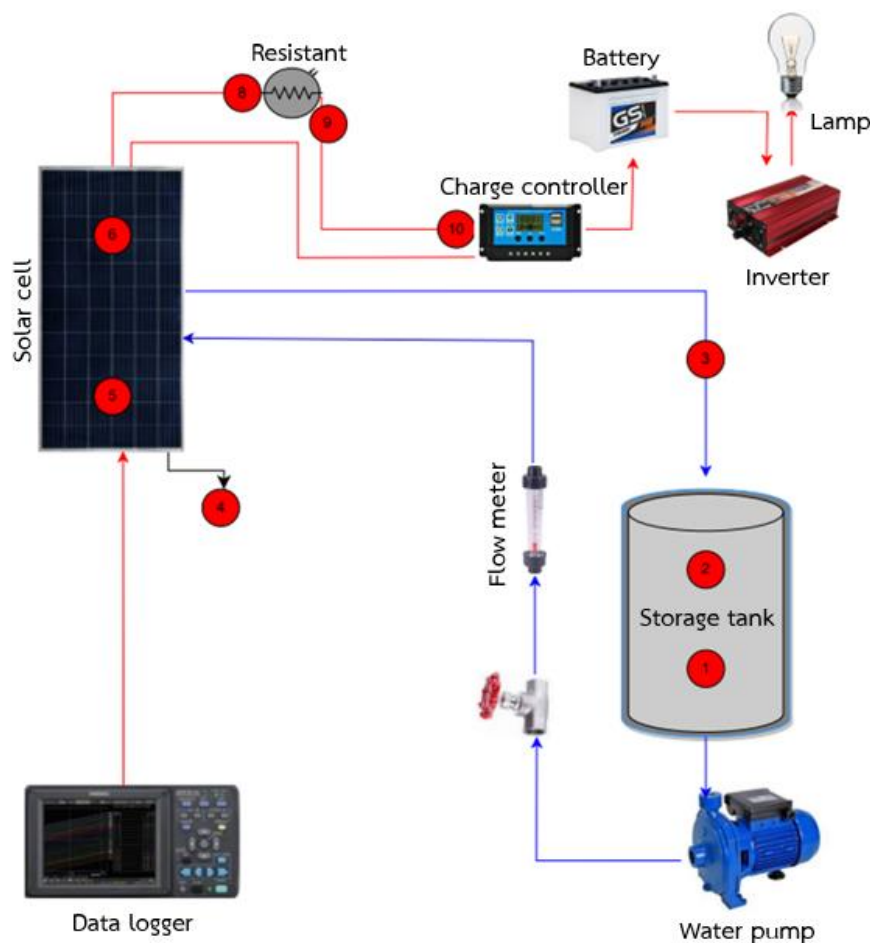
$$P_{PV} = I \times V \quad (3)$$

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%), I_T คือ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ (W/m^2), A คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2), I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp), V คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt), P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้า (Watt)

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระบบแสดงดังภาพที่ 1 มีหลักการทำงานคือ ระยะเวลาระหว่างวันระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) จะทำการผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง และพลังงานไฟฟ้าง่ายจะถูกลำเลียงไปยังเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้า (Charge controller) เพื่อควบคุมการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ ในช่วงระยะเวลาว่างวันไฟฟ้าที่ถูกบรรจุในแบตเตอรี่จะถูกดึงมาใช้งานผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) จากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับภาระโหลด (Load) (ในงานวิจัยนี้ใช้หลอดไฟแบบหลอดไส้เป็นโหลดในการดึงพลังงานไฟฟ้าออกจากระบบ) ในขณะเดียวกันปั้มน้ำจะปั้มน้ำอุณหภูมิต่ำจากถังเก็บสะสมความร้อนมารับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ซึ่งมีการติดตั้งท่อทองแดงไว้ใต้แผงเพื่อระบายความร้อน แสดงดังภาพที่ 2 โดยในการศึกษาได้ดำเนินการสร้างและทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVT) ที่มีกำลังการผลิตติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกิน 500 W โดยอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

4.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H โดยมีรายละเอียดของแผงเซลล์ดังนี้ Maximum power (P_{max}) 345 Wp $\pm$ 2.5%, Maximum power voltage (V_{mp}) 37.7 V, Maximum power current (I_{mp}) 9.15 A, Open circuit voltage (V_{oc}) 46.4V $\pm$ 3%, Short circuit current (I_{sc}) 9.62A $\pm$ 4% และขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์กว้าง $\times$ ยาว 2,024 $\times$ 959 mm

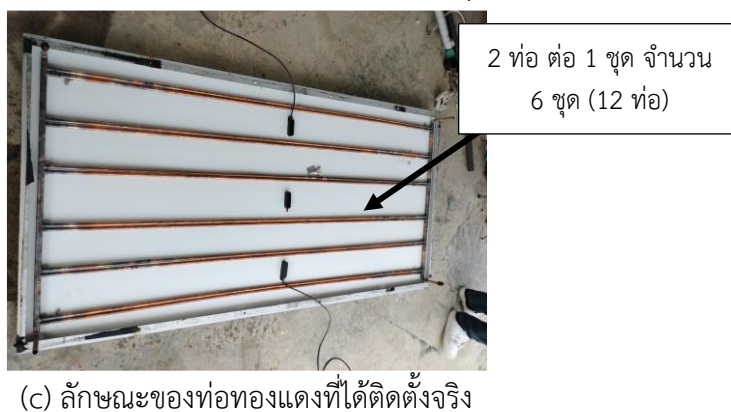
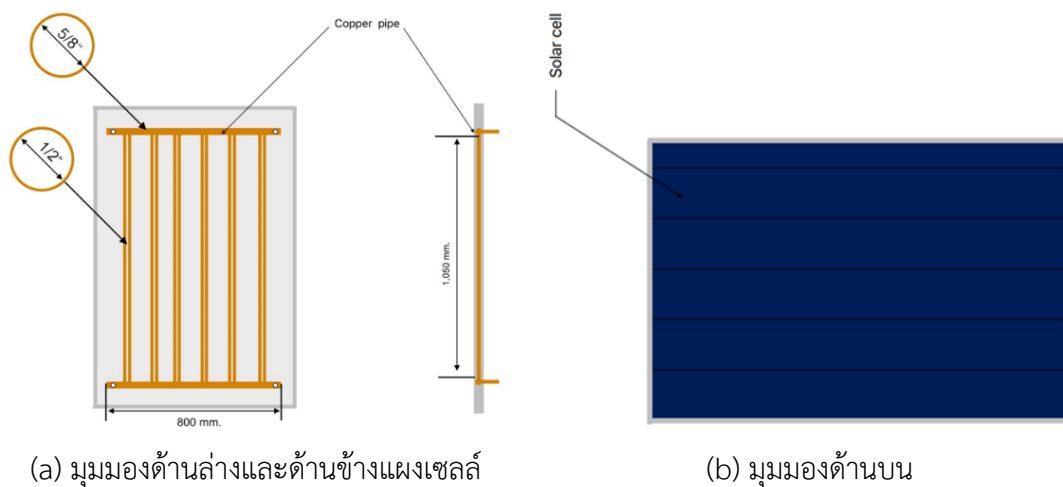


ภาพที่ 1 ไดอะแกรมอย่างง่ายการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน

4.2 ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2" ยาว 1,050 mm จำนวน 12 ท่อ (2 ท่อต่อ 1 ชุด จำนวน 6 ชุด) ต่อร่วมกับท่อร่วม (ท่อ Header) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8" ที่มีความยาว 800 mm จำนวน 2 ท่อ (ด้านบนและด้านล่าง) แผงท่อทองแดงดังกล่าวจะถูกวางยึดติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะการวางตำแหน่งของชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 3

4.3 ถังน้ำร้อน (Storage tank) (แสดงดังภาพที่ 3 (a)) ขนาด 200 L (บรรจุน้ำ 180 L) เก็บสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.4 ป้อนน้ำหมุนเวียนในระบบ ยี่ห้อ MINUMA Model YDQ-60 (แสดงดังภาพที่ 3 (b)) ใช้สำหรับป้อนน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำจากถังน้ำร้อนไปยังระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVT) จากนั้นน้ำร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนถูกส่งไปเก็บยังถังน้ำร้อน



ภาพที่ 2 แสดงการติดตั้งชุดระบายความร้อนแบบท่อคู่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.5 อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ ยี่ห้อ SUOER รุ่น PWMST-W1230 30A 12V/24V (แสดงดังภาพที่ 3(c)) ทำหน้าที่ประจุไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงในแบตเตอรี่จนเต็ม และควบคุมไม่ให้ประจุไฟฟ้ามากเกินไปเมื่อมีการประจุไฟฟ้าเต็ม

4.6 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า หรือ Inverter ยี่ห้อ SUOER รุ่น SDB-1000A (แสดงดังภาพที่ 3(d)) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากแบตเตอรี่หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ก่อนนำไปใช้งาน

4.7 แบตเตอรี่ ยี่ห้อ Focus รุ่น Turbo ขนาด 12 V (แสดงดังภาพที่ 3(e)) ต่อกันจำนวน 2 ลูก (เนื่องจากแรงดันที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 24 V)

4.8 หลอดไส้ขนาด 20 W (แสดงดังภาพที่ 3(f)) สำหรับเป็นโหลดไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

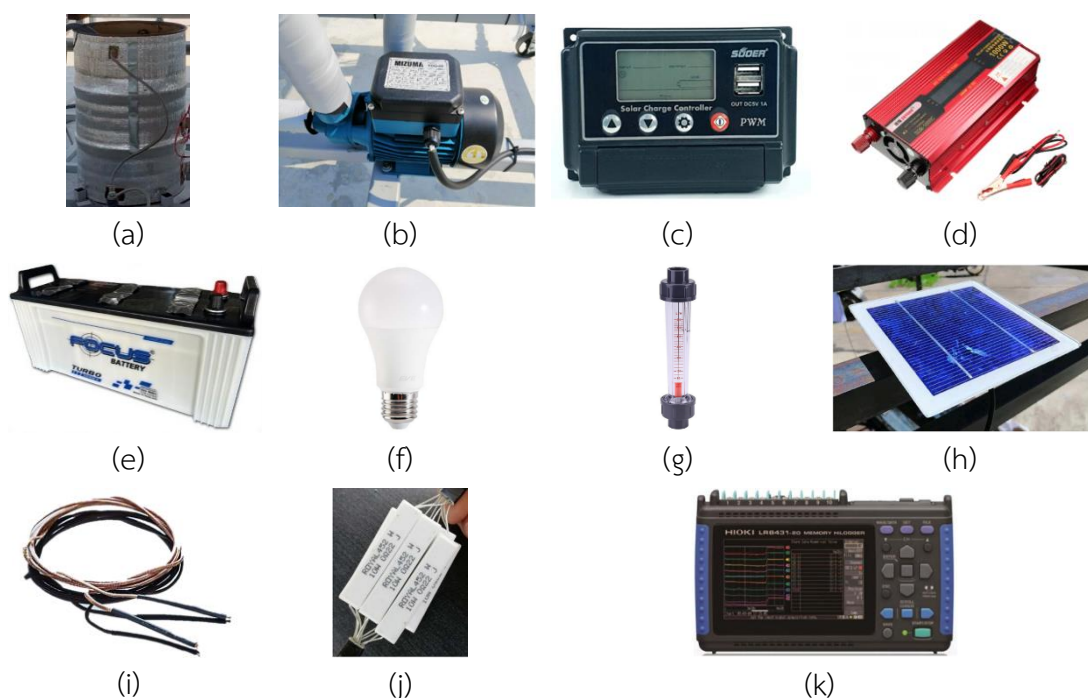
4.9 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ยี่ห้อ Durable plastic tube type flow meter LS-E/ G Series ที่มีย่านการวัด 25 – 250 LPH และความคลาดเคลื่อน +4% (แสดงดังภาพที่ 3(g))

4.10 เซลล์อ้างอิง (Reference cell) (แสดงดังภาพที่ 3(h)) ใช้สำหรับวัดปริมาณรังสีอาทิตย์ในหน่วย mV (มิลลิโวลต์)

4.11 Thermocouple type K (แสดงดังภาพที่ 3(i)) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ

4.12 ตัวต้านทานขนาด 0.02 Ohm ต่อขนานจำนวน 10 ตัว ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้า (Amp) ที่ได้จากการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (แสดงดังภาพที่ 3(j))

4.13 เครื่องบันทึกข้อมูลลอแกนประสงค์ LR8431 ยี่ห้อ HIOKI (แสดงดังภาพที่ 3(k)) ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลผลการทดสอบแบบอัตโนมัติ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณรังสีอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบ

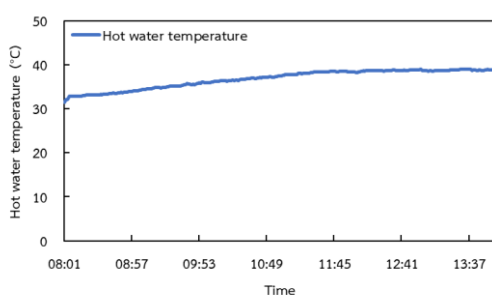
5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งท่อทองแดงที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงานเพื่อดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น (1) ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งท่อทองแดงกับชุดทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อน และ (2) การหาอัตราการไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการศึกษาจากการทดสอบในช่วงเวลา 8.00 – 14.00 น. เมื่ออัตราการไหล

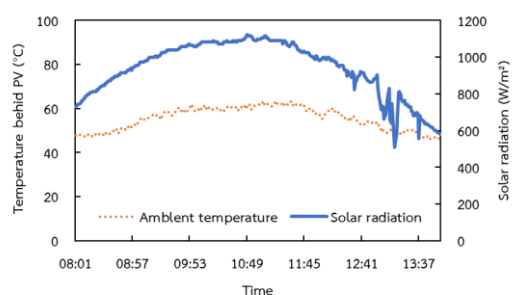
ของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 50 LPH

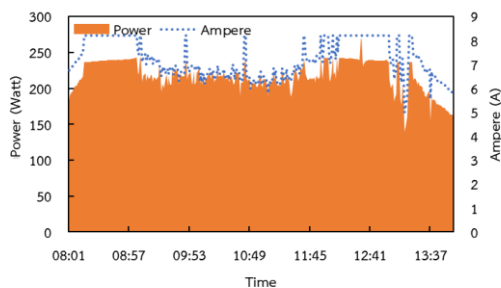
ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 31.50 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 38.90 °C ($\Delta T = 7.40$ °C) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 935.55 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 5,567.76 kJ (แสดงดังภาพที่ 4)



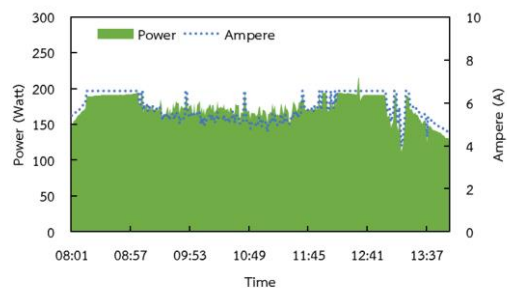
(a) ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม (°C)



(b) อุณหภูมิน้ำร้อน (°C) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์



(c) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

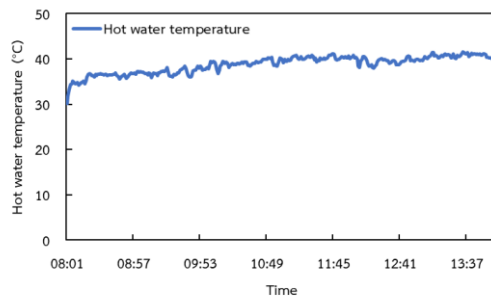


(d) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

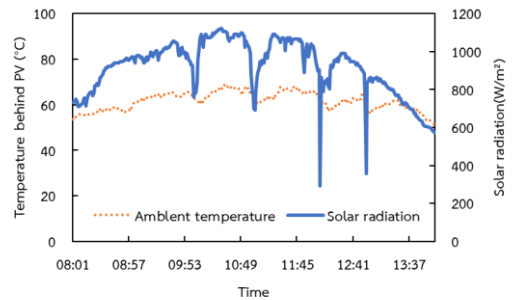
ภาพที่ 4 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน
กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 50 LPH

5.2 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPH

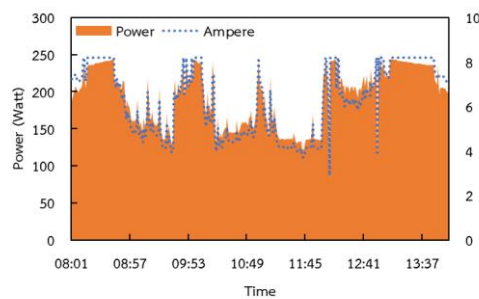
ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 30.10 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 40.30 °C ($\Delta T = 10.20$ °C) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 852.70 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 7,674.48 kJ (แสดงดังภาพที่ 5)



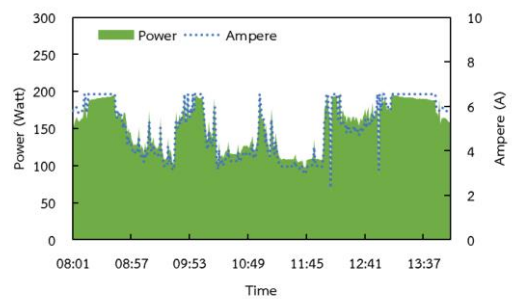
(a) ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$)



(b) อุณหภูมิน้ำร้อน ($^{\circ}C$) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์



(c) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

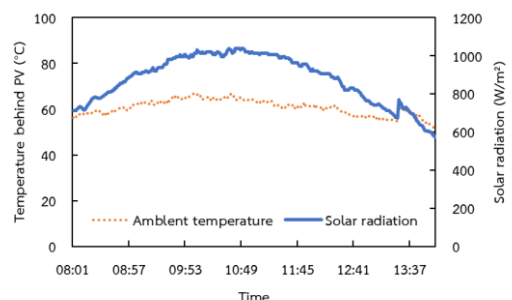
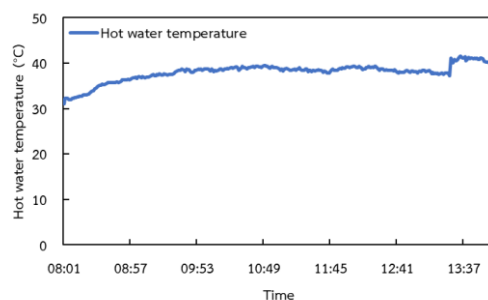


(d) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

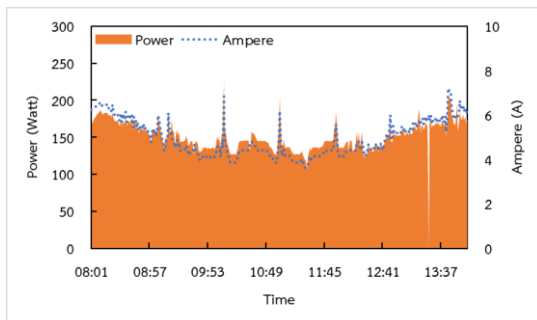
ภาพที่ 5 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน
กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPH

5.3 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH

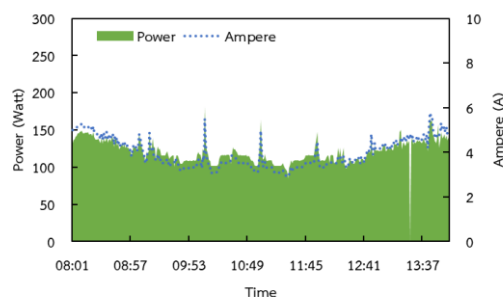
ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น $27.50^{\circ}C$ ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย $41.40^{\circ}C$ ($\Delta T = 13.90^{\circ}C$) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย $874.87 kW$ โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ $10,684.08 kJ$ (แสดงดังภาพที่ 6)



(a) ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)



(b) อุณหภูมิน้ำร้อน ($^{\circ}\text{C}$) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์



(c) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

(d) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

ภาพที่ 6 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน (50, 100 และ 150 LPH)

Flow rate (LPH)	T_{Initial} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{Final} ($^{\circ}\text{C}$)	Thermal Energy (kJ)	With cooling		Without cooling	
				Power (W)	η_{PV} (%)	Power (W)	η_{PV} (%)
50	31.5	38.9	5,567.76	217.32	21	173.85	18
100	30.1	40.3	7,674.48	196.67	22	154.13	20
150	27.5	41.7	10,684.08	193.30	28	154.64	26

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการติดตั้งท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อน เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีค่าแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล 50, 100 และ 150 LPH แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ผลการทดสอบในช่วงเวลา 8.00 – 14.00 น. กระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน และเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังพบอีกว่า อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อระบบ

มีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH นอกจากนี้ผลการศึกษายังถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สรวิศ และคณะ (2564) ที่มีการติดตั้งระบบระบายความร้อนที่ประกอบไปด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ความยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ พบว่า ผลการพัฒนาปรับปรุงเมื่อเพิ่มจำนวนท่อจาก 1 ท่อ เป็น 2 ท่อ ที่อัตราการไหลของน้ำภายในชุดระบายความร้อนใกล้เคียงกันเมื่อมีท่อทองแดงเพิ่มเป็น 2 ท่อ และไม่มีฉนวนกันความร้อนหุ้มอยู่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากไม่มีความร้อนสะสมจากการติดตั้งฉนวนกันความร้อน และการเพิ่มท่อทองแดงเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตามจำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลการทดสอบระยะยาวเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์เพื่อนำไปตัดสินใจต่อไป

ดังจะเห็นได้ว่าการติดตั้งชุดระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการตัดสินใจเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบกับสามารถนำน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานต่อได้ และการลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถยืดอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเทียบกับแผงเซลล์ที่ไม่มี การติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ประสิทธิภาพน้อยกว่า

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 W ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ผลการทดสอบเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่มีอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล 50, 100 และ 150 LPH พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหล 150 LPH โดยที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 28

6.2 พลังงานความร้อนที่ผลิตได้ พบว่า ระบบสามารถผลิตอุณหภูมิสุดท้ายได้ 41.70 °C จากอุณหภูมิเริ่มต้น 27.50 °C ดังจะเห็นได้ว่าชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แล้วยังจะช่วยให้สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งในรูปแบบน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้งานได้

อย่างไรก็ตามควรมีการเก็บผลการทดสอบในระยะยาว ทั้งนี้ก็เพื่อให้ทราบถึง จุดเด่น จุดด้อย ที่จะสามารถต่อยอดทางด้านวิศวกรรมได้ ประกอบกับควรมีการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ทราบถึงสภาวะการทำงานที่ดีที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณด้าน ววน. ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับสถานที่ทำงานวิจัย ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือต่างๆ ที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2565). รายงานฉบับสมบูรณ์ พัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 1 ระบบ
- บรรณพงศ์ กลีบประทุม. (2562). การพัฒนาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของการระบายความร้อนด้วยการระเหยผ้าเปียกบนแผ่นเรียบเพื่อประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์. (วิทยานิพนธ์). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ขจรเดช เวียงสงค์, และพัฒน์พงษ์ จำรัสประเสริฐ. (2560). ผลของการระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ใช้ร่วมกับระบบรวมแสง. การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ.
- ขจิตร ไชยมงคล, อีรพงษ์ แรตทอง, พงศกร เสือผึ้ง, และสรวิศ สอนสารี. (2566, ธันวาคม). การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพลังงานความร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนทิ้งของเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชภัฏกรุงเก่า" ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, อยุธยา.
- นเรศ สิริวรารุ, และปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์. (2565). การศึกษาและเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและจุดคุ้มทุนของการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ, 18, 38-49.

- พงษ์ธร เต็มชำนาญ, ธนภัทร เขียวหวาน, ธวัชชัย ไพระคำนาม, วัชรพงษ์ สุขประเสริฐ, สรวิศ สอนสารี, และสมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์. (2564, กรกฎาคม). **การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งชุดระบายความร้อนอย่างง่าย**. นเรศวรวิจัยและนวัตกรรม ครั้งที่ 17 Resilience for Never Normal Era, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- ยุธนา ศรีอุดม, สังคม สัพโส, ชัยณรงค์ แสนเปา, และวิศิษฐ์ ชัดสาย. (2565). การเปรียบเทียบผลของสารทำงานภายในท่อความร้อนที่มีผลต่อการระบายความร้อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ท**, 3(3), 92-108.
- สถาบันวิทยาการพลังงาน (Thailand Energy Academy). (2567). นโยบายด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย. ค้นจาก <https://www.thailand-energy-academy.org/assets/upload/coursedocument/file/01%20คุณวัฒน์พงษ์%20คู่มือวาท%20Panel%20วพ.19%20v.1.pdf>
- สรวิศ สอนสารี, และสมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์. (2564). สมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายอุณหภูมิความร้อนที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วม. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**, 40(3), 285-295.
- สรวิศ สอนสารี, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์, และสหัสยา ทองสาร. (2564). อัตราการไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 11(1), 74-90.
- ธนกฤต ลาภภูมิพจน์. (2564). **การเพิ่มประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยระบบฮีทไปป์คูลิ่ง**. (วิทยานิพนธ์), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สิทธิพัฒน์ ภูทอง, วิชาญ วิมานจันทร์, และปรีดา จันทวงษ์. (2561, พฤศจิกายน). **การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ละอองน้ำลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์**. การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ.
- อนุรัตน์ เทวตา, และยุธนา ศรีอุดม. (2561). การศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนแบบแบน. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร**, 12(2), 83-94.
- Herez, A., El Hage, H., Lemenand, T., Ramadan, M., & Khaled, M. (2020). Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems. **Solar energy**, 207, 1321-1347.



- Sorawit, S., & Somchai, J. (2021). Paper presented at the The 11th SOLARIS 2021, International Symposium on Solar Energy and Efficient Energy Usage, Tokyo, Japan.
- Kaldellis, J. K., Kapsali, M., & Kavadias, K. A. (2014). Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. **Experience obtained from outdoor measurements in Greece. Renewable energy**, 66, 612-624.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar energy**, 83(5), 614-624.
- Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T., & Kiatsiriroat, T. (2020). Increase of power generation from solar cell module by controlling its module temperature with phase change material. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 34, 2609-2618.