

อัตราการไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ
การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
COOLING WATER FLOW RATE AFFECTING THE EFFICIENCY OF
A SOLAR PHOTOVOLTAIC-THERMAL HYBRID SYSTEM

สรวิศ สอนสารี¹ สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์² และ สหัตยา ทองสารี³

¹อาจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล จังหวัดพิษณุโลก 65000, sorawitsonsaree@psru.ac.th

²อาจารย์, หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ จังหวัดพิษณุโลก 65000, somchajj@nu.ac.th

³อาจารย์, วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ จังหวัดพิษณุโลก 65000, sahatayal@nu.ac.th

Sorawit Sonsaree¹, Somchai Jiajitsawat² and Sahataya Thongsan³

¹Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,
156 Mu 5 Plaichumpol Sub-district, Phitsanulok 65000, sorawitsonsaree@psru.ac.th

²Lecturer, Energy Research and Promotion Center, Faculty of Science, Naresuan
University, 99 Mu 9 Tha Pho Sub-district, Phitsanulok 65000, somchajj@nu.ac.th

³Lecturer, School of Renewable Energy and Smart Grid Technology (SGtech), Naresuan
University, 99 Mu 9 Tha Pho Sub-district, Phitsanulok 65000, sahatayal@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราการไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า และน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในการศึกษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H ได้ถูกนำมาใช้ทดสอบผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ติดตั้งได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบระบายความร้อนประกอบไปด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ที่มีความยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ ผลการทดสอบเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหลระหว่าง 25 ถึง 250 LPH (ลิตรต่อชั่วโมง) พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงสุด 12.55% เมื่อน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหล

100 LPH (ลิตรต่อชั่วโมง) และระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 29.10°C เป็นอุณหภูมิสุดท้าย 51.29°C หรือคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 3894.41 kJ และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 11.37 kWh

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the cooling water flow rate affecting the performance of the solar photovoltaic-thermal hybrid system. A multicrystalline solar cell of Trinasolar model TSM-345PE15H was used to test the power generation in combination with a cooling water system installed under the solar panel. The cooling system consists of 6 copper pipes, 3/8" diameter with a length of 1,815 mm It is connected with 2 manifolds, 7/8" diameter with a length of 799 mm. The results found that, as the cooling water flow rate between 25 and 250 LPH, the solar cell efficiency tends to increase as the flow rate increases. The solar panel has a maximum efficiency of 12.55% when cooled water has a flow rate of 100 LPH and the system can increase the hot water temperature from 29.10°C to 51.29°C . Moreover, amount of heat produced was 3894.41 kJ and the amount of electricity produced was 11.37 kWh .

KEYWORDS: Performance, Solar Photovoltaic-Thermal Hybrid System

1. บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีถึงการประยุกต์นำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของพลังงานความร้อน อาทิ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar hot water) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) เป็นต้น และในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า เช่น การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) เป็นต้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง โดยมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี เท่ากับ $17.6\text{ MJ/m}^2\text{-day}$ [1] ประกอบกับการที่ภาครัฐให้การสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก ดังจะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018) [2] ที่ได้กำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สูงถึง $12,139\text{ MW}$ อย่างไรก็ตามจากข้อมูลดังกล่าวเมื่อพิจารณาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ชนิดรังสีตรงค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อผลิตไฟฟ้าจากพลังงาน

ความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating Solar Power (CSP) Plant) จึงยังไม่ได้รับความนิยม [3, 4] ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยส่วนใหญ่หันมาใช้เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) แทน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อให้ความสนใจในเรื่องของการติดตั้ง โดยเฉพาะพื้นที่ในการติดตั้งบนหลังคาของอาคารต่าง ๆ เช่น โรงแรม โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งบ้านพักอาศัยนั้นจะมีพื้นที่ในการติดตั้งที่จำกัด จึงส่งผลให้ตัวอาคารเมื่อมีการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แล้วจะไม่สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ หรือเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะไม่สามารถติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ จึงนับได้ว่าเป็นอีกหนึ่งข้อด้อยของเทคโนโลยีดังกล่าว เนื่องจากในบางครั้ง และ/หรือ บางกิจกรรมมีความต้องการใช้และลดการใช้ทั้งในส่วน of พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าจากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น จึงมักจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้า คือ เมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง [5, 6] โดยจะลดลงประมาณร้อยละ 0.4 ถึง 0.5 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก ๆ 1.0 °C [7, 8] จะเห็นได้ว่าหากสามารถแก้ปัญหาเรื่องของพื้นที่ในการติดตั้งประกอบกับหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพพร้อมกับผลิตน้ำร้อนจากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ก็จะสามารถเพิ่มขีดความสามารถและลดข้อจำกัดของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกทางหนึ่ง

Kerdsangsuriyong et al. [9] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการระบายความร้อนด้วยน้ำร่วมกับรางรวมแสงรูปประกอบพาราโบลา (Compound Parabolic Concentrator (CPC)) ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง และการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลาที่อัตราการไหล 2 LPM (ลิตรต่อนาที) จะช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุด Sichamnan et al. [10] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งท่อความร้อนติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดงจะสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนประมาณร้อยละ 9.21 Pootong et al. [11] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จากการลดอุณหภูมิโดยการพ่นละอองน้ำที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงที่ปริมาณรังสีอาทิตย์มีความเข้มสูงกว่า 1,000 W/m² การพ่นละอองน้ำที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์ได้ โดยจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

ร้อยละ 13.79 และปริมาณน้ำที่ใช้ 11.92 LPH Tewata and Sriudom [12] ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในการทดลองได้เปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แบบ คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงานในระบบ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้ R11 เป็นสารทำงานในระบบ ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งท่อระบายความร้อนหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แบบ พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้ R11 เป็นสารทำงานในระบบ จะช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด Pang et al. [13] ศึกษาผลของความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่มีการระบายความร้อนและไม่มีการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า หากสามารถลดความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ที่ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาคืนทุนที่สั้นลงของระบบผลิตไฟฟ้าอันเนื่องมาจากระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงขึ้น ประกอบกับเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิลดลงอายุการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอายุการทำงานที่นานขึ้น Prakash [14] ได้ดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ และในกรณีที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยน้ำ ผลการศึกษาพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยน้ำจะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ Spertino et al. [15] ได้ดำเนินการทดสอบเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการระบายความร้อนออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยน้ำ และวิเคราะห์ผลของพลังงานที่ได้ด้วยหลักการของสมดุลพลังงาน Herrando et al. [16] ได้ดำเนินการเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการระบายความร้อนด้วยน้ำ พบว่า การเพิ่มขนาด และ/หรือ ลดขนาดของท่อน้ำที่ใช้ระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ใช่ปัจจัยหลักสำคัญของการผลิตพลังงานความร้อนที่ได้จากการลดความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจัยสำคัญในการเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การเพิ่มจำนวนท่อน้ำ นอกจากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ในปัจจุบันยังมีการศึกษาเทคนิคในการลดความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการผสมวัสดุนาโน (Nano materials) ลงไปในน้ำเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อน Al-Waeli et al. [17] เปรียบเทียบวัสดุนาโน 3 ชนิด ที่ถูกนำมาผสมกับน้ำเพื่อใช้ระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบไปด้วย Al_2O_3 (Aluminium oxide) CuO (Copper oxide) และ SiC (Silicon carbide) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำวัสดุนาโนมาผสมกับน้ำเพื่อ

ใช้ในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงานในการระบายความร้อน

ดังจะเห็นได้ว่า หากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ/หรือ หากสามารถนำเอาความร้อนที่เกิดจากการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ก็จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังช่วยก่อให้เกิดการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนผ่านท่อทองแดงที่ได้ถูกนำไปติดตั้งเพื่อระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในการศึกษาจะเป็นการหาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ดีที่สุด ที่สามารถช่วยให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด และมีประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด ทั้งนี้นอกจากจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ยังสามารถนำเอาความร้อนเหลือทิ้งจากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ดำเนินการออกแบบ [18] 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 (kg)
C_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K)
t	คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (วินาที)
T_{Final}	คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (°C)
T_{End}	คือ อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย (°C)

2.2 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [19] แสดงดังสมการที่ (2)

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

$$P_{PV} = I \times V \tag{3}$$

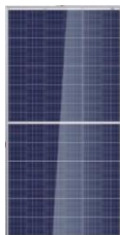
- เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
- I_T คือ ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2)
- A คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2)
- I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)
- V คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt)
- P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้า (Watt)
- P_{Pump} คือ กำลังไฟฟ้าของปั๊มน้ำ (Watt)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

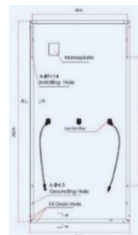
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยท่อทองแดงที่ใช้น้ำเป็นของไหลในระบบระบายความร้อน หรือใช้น้ำไหลผ่านเพื่อดึงเอาความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในการศึกษาจะเป็นการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับโครงการวิจัยนี้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H ได้ถูกนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้ Maximum Power (P_{max}) 345W±2.5% Maximum Power Voltage (V_{mp}) 37.7V Maximum Power Current (I_{mp}) 9.15A Open Circuit Voltage (V_{oc}) 46.4V±3% และ Short Circuit Current (I_{sc}) 9.62A±4% โดยมีขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ 2,024 × 959 mm แสดงดังรูปที่ 1



(ก) มุมมองด้านหน้า

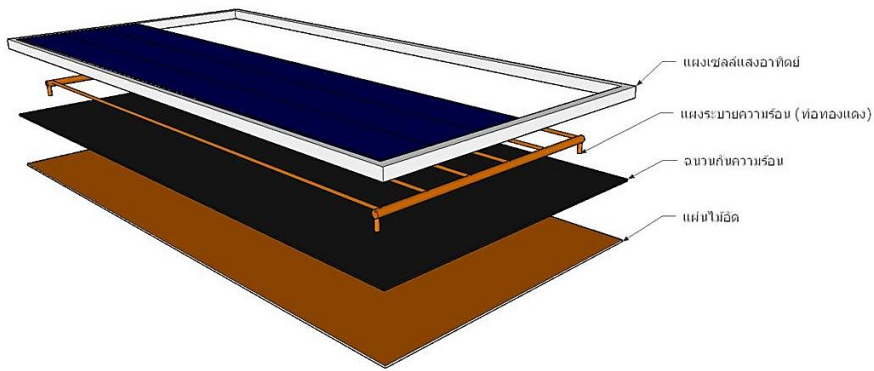


(ข) มุมมองด้านหลัง

รูปที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H

3.2 ชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

ชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับน้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบท่อระบายน้ำภายในแผงที่ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อร่วม (ท่อ Header) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ (ด้านบนและด้านล่าง) แผงท่อทองแดงดังกล่าวจะถูกวางยึดติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนชนิดแผ่นยี่ห้อ AeroFlex ที่มีความหนา 3/8" และชั้นสุดท้ายจะถูกปิดด้วยแผ่นไม้อัดที่มีความหนา 6 mm ลักษณะการวางตำแหน่งของชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 2 ชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ออกแบบ)



รูปที่ 3 ชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (สร้างจริง)

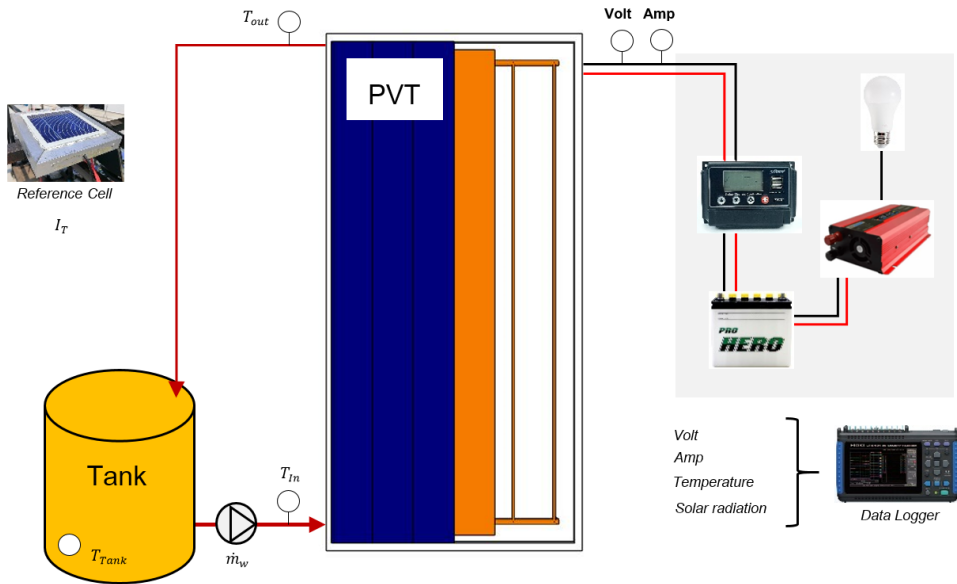
3.3 การดำเนินการทดสอบ

ระบบทดสอบขนาดเล็กได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำร้อนที่เหมาะสม ระบบประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้ (1) ถังน้ำร้อนขนาด 50 L (2) ปั๊มน้ำยี่ห้อ MIZUMA Model: YDQ-60 0.37kW/0.5HP (2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H ที่ได้ติดตั้งชุดระบายความร้อนหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (3) อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ ยี่ห้อ SUOER รุ่น PWMST-W1230 30A 12V/24V (4) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ SUOER รุ่น SDB-1000A (5) แบตเตอรี่ ยี่ห้อ FB แบตเตอรี่รุ่น ProHero NS60L ขนาด 12 V ต่ออนุกรมจำนวน 2 ลูก เพื่อให้มีแรงดันรวม 24 V (เนื่องจากแรงดันที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 24 V) (6) หลอดไส้ขนาด 20 W ที่ทำหน้าที่เป็นโหลดไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ และ (7) เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ Durable plastic tube type flow meter LS-E/ G Series ที่มีย่านการวัด 25 - 250 LPH (ลิตรต่อชั่วโมง) และความคลาดเคลื่อน $\pm 4\%$

การดำเนินการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ อุปกรณ์สำคัญจะประกอบไปด้วย (1) เซลล์อ้างอิง (Reference cell) สำหรับตรวจวัดปริมาณรังสีอาทิตย์ (I_T) (2) สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) แบบ Type K สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเข้า (T_{in}) อุณหภูมิน้ำออก (T_{out}) และอุณหภูมิน้ำในถังน้ำร้อน (T_{Tank}) (3) แรงดันไฟฟ้า (Volt) และ (4) กระแสไฟฟ้า (Amp) ที่ได้จากการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานขนาด 0.02 Ohm ต่อขนานกันจำนวน 10 ตัว จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ยี่ห้อ HIOKO รุ่น LR8431-20 ทุก ๆ 1 นาที โดยในขณะที่ทดสอบชุดทดสอบจะหันหน้าไปทางทิศใต้ และมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะวางมุมเอียงประมาณ 16 องศา (เมื่อเทียบกับแนวระดับ) ซึ่งเป็นมุมเดียวกับตำแหน่งละติจูดของจังหวัดพิษณุโลก แผนภาพอย่างง่ายของระบบทดสอบ และตัวอย่างของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งท่อระบายความร้อนแสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่

4. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ น้ำระบายความร้อนที่มีอัตราการไหลระหว่าง 25 ถึง 250 LPH ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำร้อน ($^{\circ}\text{C}$) ปริมาณความร้อน (kJ) พลังงานไฟฟ้า (kWh) และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (%) โดยผลการศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งที่ระบายความร้อน



รูปที่ 5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งที่ระบายความร้อน

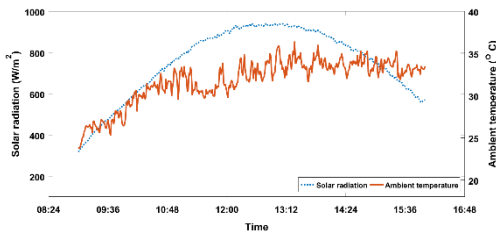
4.1 อุณหภูมิน้ำร้อน และปริมาณความร้อนที่ผลิตได้

ผลการศึกษาจากการทดสอบในช่วงเวลา 8.30-16.30 น. แสดงดังตารางที่ 1 รูปที่ 6 และรูปที่ 8 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนต่ำสุด 25 LPH ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 26.53 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 54.45 °C เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 635.13 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ 4,901.04 kJ กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 50 LPH ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 29.15 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 55.49 °C เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 610.22 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ 4,623.46 kJ กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPH ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 29.10 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 51.29 °C เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 633.77 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ 3,894.81 kJ กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 29.64 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 58.84 °C เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 652.78 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ 4,423.95 kJ กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 200 LPH ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 30.53 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 54.35 °C เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 638.65 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ 4,181.07 kJ และที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนสูงสุด 250 LPH ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 31.42 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 56.18 °C เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 650.66 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ 4345.89 kJ

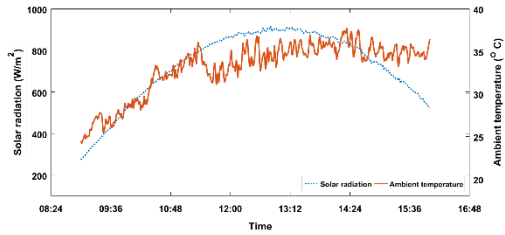
จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่ระบบผลิตได้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 54 °C ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการซักล้างในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุ่นน้ำร้อนก่อนป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) น้ำร้อนสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) และการทำความร้อนสำหรับกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เป็นต้น [20] หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้ความร้อนเหลือทิ้งที่ซึ่งเป็นความร้อนที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์มาก่อนให้เกิดประโยชน์ได้

ตารางที่ 1 อุณหภูมิน้ำร้อน ปริมาณความร้อน พลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

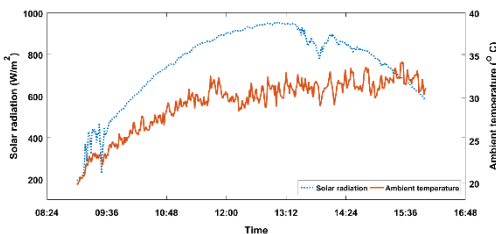
อัตราการไหล (LPH)	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	ปริมาณรังสีอาทิตย์ (kW)	ปริมาณความร้อน (kJ)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
25	26.53	54.45	635.13	4,901.04	9.53	10.50
50	29.15	55.49	610.22	4,623.46	10.09	11.57
100	29.10	51.29	633.77	3,894.81	11.37	12.55
150	29.64	54.84	652.78	4,423.95	10.83	11.62
200	30.53	54.35	638.65	4,181.07	10.45	11.46
250	31.42	56.18	650.66	4,345.89	10.56	11.36



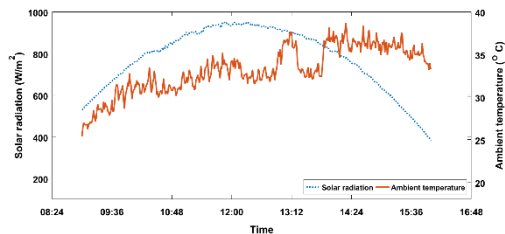
(ก) 25 LPH (วันที่ 20 มกราคม 2564)



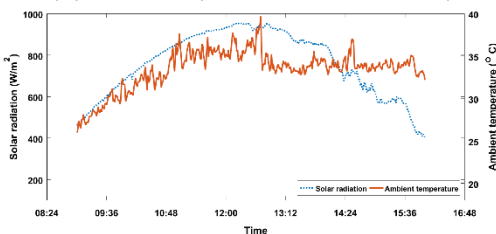
(ข) 50 LPH (วันที่ 21 มกราคม 2564)



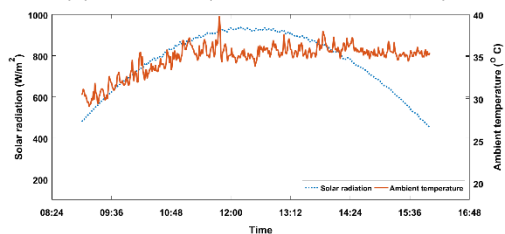
(ค) 100 LPH (วันที่ 13 มกราคม 2564)



(ง) 150 LPH (วันที่ 3 มกราคม 2564)



(จ) 200 LPH (วันที่ 4 มกราคม 2564)

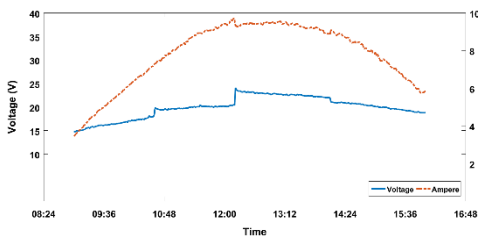


(ฉ) 250 LPH (วันที่ 5 มกราคม 2564)

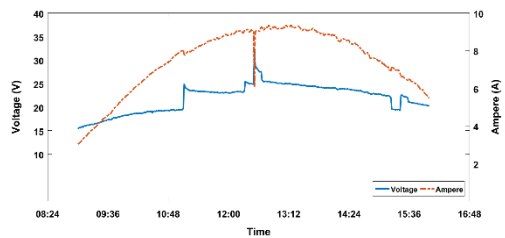
รูปที่ 6 ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$) ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

4.2 พลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

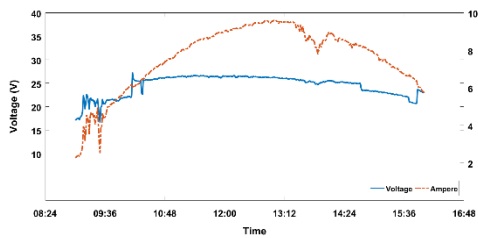
ผลการศึกษาจากผลการทดสอบในช่วงเวลา 8.30-16.30 น. แสดงดังตารางที่ 1 รูปที่ 7 และรูปที่ 8 พบว่า กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน และเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังพบอีกว่า อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อระบบมีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่เหมาะสม จากนั้น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหลที่สูงขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนสู่น้ำที่ไหลอยู่ภายในท่อทองแดงได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนสะสมและส่งผลให้อุณหภูมิใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



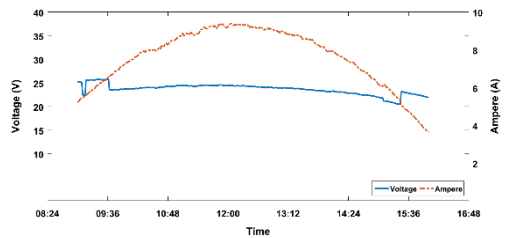
(ก) 25 LPH (วันที่ 20 มกราคม 2564)



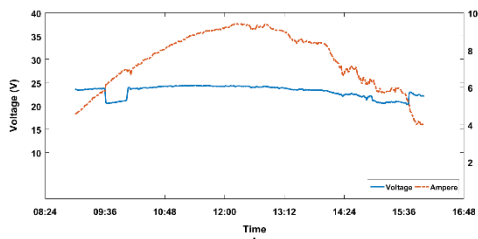
(ข) 50 LPH (วันที่ 21 มกราคม 2564)



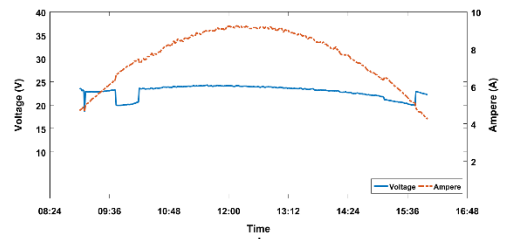
(ค) 100 LPH (วันที่ 13 มกราคม 2564)



(ง) 150 LPH (วันที่ 3 มกราคม 2564)

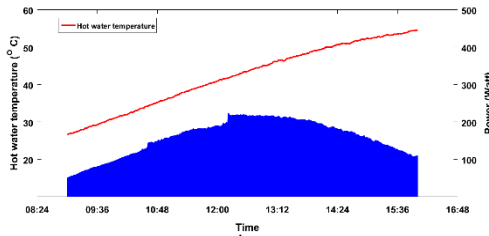


(จ) 200 LPH (วันที่ 4 มกราคม 2564)

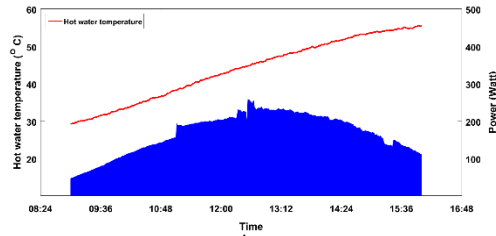


(ฉ) 250 LPH (วันที่ 5 มกราคม 2564)

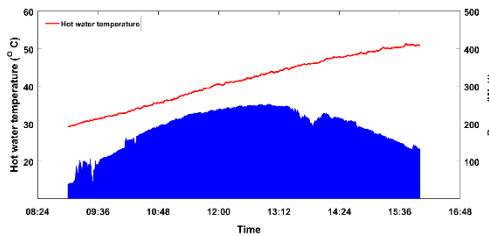
รูปที่ 7 แรงดัน (Volt) และกระแส (Amp) ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น



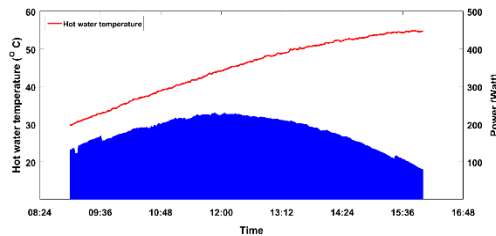
(ก) 25 LPH (วันที่ 20 มกราคม 2564)



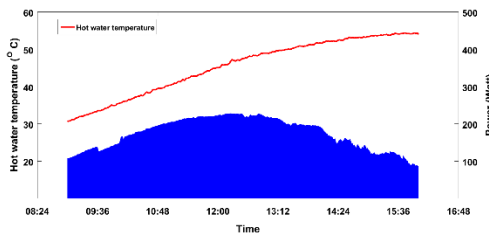
(ข) 50 LPH (วันที่ 21 มกราคม 2564)



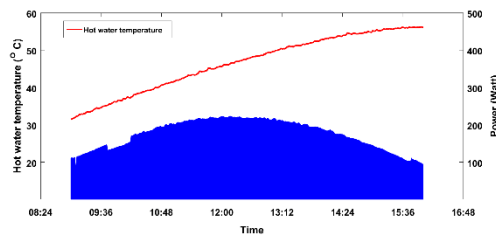
(ค) 100 LPH (วันที่ 13 มกราคม 2564)



(ง) 150 LPH (วันที่ 3 มกราคม 2564)



(จ) 200 LPH (วันที่ 4 มกราคม 2564)



(ช) 250 LPH (วันที่ 5 มกราคม 2564)

รูปที่ 8 อุณหภูมิน้ำร้อน (°C) และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh) ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

โดยผลการศึกษาเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 25 LPH เป็น 250 LPH สามารถแสดงได้ดังนี้ กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนต่ำสุด 25 LPH ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน 635.13 kW ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 9.53 kWh และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 10.50% กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 50 LPH ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน 610.22 kW ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 10.09 kWh และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 11.57% กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPH ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน 633.77 kW ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 11.37 kWh และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 12.55% กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน 652.78 kW ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 10.83 kWh และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 11.62% กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความ

ร้อน 200 LPH ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน 638.65 kW ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 10.45 kWh และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 11.46% และที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนสูงสุด 250 LPH ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน 650.66 kW ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 10.56 kWh และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 11.36%

จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่า อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 150 LPH และที่อัตราการไหล 100 LPH จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุด คือ 12.55%

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H ได้ถูกนำมาใช้ในการดำเนินการทดสอบผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อรวม (ท่อ Header) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ ที่มีน้ำซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการนำความร้อนไหลอยู่ภายในท่อ โดยผลการทดสอบเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหลระหว่าง 25 ถึง 250 LPH พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหล 100 LPH โดยระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 11.37 kWh และมีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 12.55% นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนที่ระบบผลิตได้ พบว่า ระบบสามารถผลิตอุณหภูมิน้ำร้อนสุดท้ายเฉลี่ยได้ 54.0 °C จากอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นเฉลี่ย 30.0 °C

ดังจะเห็นได้ว่าชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แล้วยังช่วยให้สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งที่ปกติไม่ถูกนำมาใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (Overall system efficiency) และรวมถึงศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ของชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.): งบประมาณปกติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการจัดซื้อเครื่องมือต่าง ๆ และขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม และหน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก สำหรับสถานที่ทำวิจัย

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. Project to improve solar energy potential map from satellite imagery for Thailand [Internet]. 2017. [cited 2021 March 19]. Available from: https://www.dede.go.th/download/OpenBigData/Solar_Map_1_2560.pdf
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. Alternative energy development plan 2018 – 2037 (AEDP2018) [Internet]. 2018. [cited 2021 March 19]. Available from: https://www.dede.go.th/download/Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf
- [3] Thawonngamyingsakul C, Kiatsiriroat T. Potential of a solar organic rankine cycle with evacuated-tube solar collectors as heat source for power generation in Thailand. *Energy Science and Technology* 2012;4(2):25-35.
- [4] Sonsaree S, Asaoka T, Jiajitsawat S, Aguirre H, Tanaka K. A small-scale solar Organic Rankine Cycle power plant in Thailand: Three types of non-concentrating solar collectors. *Solar energy* 2018;162:541-60.
- [5] Duck BC, Fell CJ, Anderson KF, Sacchetta C, Du Y, Zhu Y. Determining the value of cooling in photovoltaics for enhanced energy yield. *Solar Energy* 2018;159:337-45.
- [6] Aldossary A, Mahmoud S, Al-Dadah R. Technical feasibility study of passive and active cooling for concentrator PV in harsh environment. *Applied thermal engineering* 2016;100:490-500.
- [7] Skoplaki E, Palyvos JA. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy* 2009;83(5):614-24.

- [8] Kaldellis JK, Kapsali M, Kavadias KA. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. *Renewable Energy* 2014;66:612-24.
- [9] Kerdsangsuriyong P, Thepa S, Tunlasakun K, Songprakop R. An improvement of photovoltaic thermal using cooled water with compound parabolic concentrator. The 10th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference; 2013. p. 292-9. (In Thai)
- [10] Sichamnan S, Chompookham T, Sampan R. Efficiency enhancement of solar panels using copper mesh wick heat pipe. *UBU Engineering Journal* 2016;9(1):11-22. (In Thai)
- [11] Pootong S, Vimanjan V, Chantawong P. Improvement of photovoltaic cell efficiency by using water mist to reduce photovoltaic cell temperature. Graduate School Conference; 2018. p. 867-75. (In Thai)
- [12] Tewata A, Sriudom Y. An experimental study on increasing efficiency of solar cell modules by flat heat pipe cooling. *RMUTP Research Journal* 2018;12(2):83-94. (In Thai)
- [13] Peng Z, Herfatmanesh MR, Liu Y. Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy Conversion and Management* 2017;150:949-55.
- [14] Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy Conversion and Management*. 1994;35(11):967-72.
- [15] Spertino F, D'angola A, Enescu D, Di Leo P, Fracastoro GV, Zaffina R. Thermal–electrical model for energy estimation of a water cooled photovoltaic module. *Solar Energy* 2016;133:119-40.
- [16] Herrando M, Ramos A, Zabalza I, Markides CN. A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PVT-water collectors. *Applied energy* 2019;235:1583-602.
- [17] Al-Waeli AH, Chaichan MT, Kazem HA, Sopian K. Comparative study to use nano- (Al_2O_3 , CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors. *Energy Conversion and Management* 2017;148:963-73.
- [18] Rittidej S. Heat pipe technology. Mahasarakham: Mahasarakham University Press; 2011. (In Thai)
- [19] Sun V, Asanakham A, Deethayat T, Kiatsiriroat T. Increase of power generation from solar cell module by controlling its module temperature with phase change material. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2020;34:2609-18.

[20] IEA-ETSAP. Solar heat for industrial processes technology brief. International Energy Agency (IEA) and Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) [Internet]. 2015 [cited 2021 March 19]. Available from: <http://www.inship.eu/docs/sh5.pdf>

ประวัติผู้เขียนบทความ



สรวิศ สอนสารี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล จังหวัดพิษณุโลก 65000, sorawitsonsaree@gmail.com ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์



สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์ หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000, somchai@nu.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน แบตเตอรี่ และการทดสอบแบตเตอรี่



สัทธยา ทองสาร วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกิตตเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000, sahataya@nu.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน Smart Grid และ Smart City

Article History:

Received: February 15, 2021

Revised: April 20, 2021

Accepted: April 23, 2021