

สมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วม

A simple equation for predicting the hot water temperature produced from a solar photovoltaic-thermal hybrid system

สรวิศ สอนสารี^{1*}, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์²

Sorawit Sonsaree^{1*}, Somchai Jiajitsawat¹

Received: 5 February 2021 ; Revised: 2 April 2021 ; Accepted: 19 April 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาสมการอย่างง่ายของการผลิตน้ำร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้มาตรฐาน ASHRAE 93-77 ในการศึกษาได้ดำเนินการออกแบบและสร้างชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM—345PE15H ที่ทำด้วยท่อทองแดงขนาด 3/8" ที่มีความยาว 1,185 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 3 ท่อ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η) ของชุดระบายความร้อนที่ได้ถูกติดตั้งหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน ($F_R(\tau\alpha)_o$) อยู่ที่ร้อยละ 19.85 และพลังงานที่สูญเสีย ($X: F_R U_L$) เท่ากับ $5.24 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ หรือสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วม คือ $\eta = -5.24X + 19.85$

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, มาตรฐาน ASHRAE 93-77

Abstract

The purpose of this research was to find a simple equation for predicting the hot water temperature produced from solar photovoltaic-thermal hybrid system. A multicrystalline solar cell of Trinasolar model TSM—345PE15H was used in combination with a water cooling system installed under the solar panel. The cooling system consisted of 6 copper pipes, 3/8" diameter with a length of 1,185 mm. It is connected with 2 manifolds, 7/8" diameter with a length of 799 mm. It was found that, thermal efficiency (η) of the cooling system and the absorber coefficient ($F_R(\tau\alpha)_o$) was 19.85% and the heat loss coefficient ($X: F_R U_L$) was equal to $5.24 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$. The result can be written as a simple equation for predicting the hot water temperature produced from a solar photovoltaic-thermal system: $\eta = -5.24X + 19.85$

Keywords: Solar Photovoltaic-thermal Hybrid System, ASHRAE Standard 93-77.

^{1*} อาจารย์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก 65000

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

¹ Lecturers, Major of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok Province, 65000

² Assistant Professor, Energy Research and Promotion Center, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok Province, 65000

* Corresponding author Tel.: 063-3344448, E-mail address: sorawitsonsaree@gmail.com

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์รายวันค่อนข้างสูงประมาณ 17.6 MJ/m²-day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในส่วนของรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรงจะพบว่าประเทศไทยมีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ชนิดรังสีตรงค่อนข้างต่ำ (Sonsaree *et al.*, 2018 ; Thawongamyingsakul and Kiatsiriroat, 2012) จึงทำให้การเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์มาอยู่ในรูปของความร้อนอุณหภูมิสูงเพื่อผลิตไฟฟ้าไม่ได้รับความสนใจ ดังนั้นการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานจึงมักจะอยู่ในรูปของความร้อนอุณหภูมิต่ำถึงอุณหภูมิปานกลาง อาทิ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heating system) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying system) เป็นต้น (Sonsaree *et al.*, 2018) สำหรับการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์มาอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้านั้นประเทศไทยได้ให้ความสนใจไปที่เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) ดังจะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018) ที่ได้กำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สูงถึง 12,139 MW (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) ทั้งนี้ก็เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด และไม่มีค่าใช้จ่ายทางด้านต้นทุนพลังงาน (Mahmud *et al.*, 2018) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการใช้พลังงานในอาคารต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น บ้านพักอาศัย โรงแรม โรงพยาบาล และอพาร์ทเมนท์ มักจะมีการใช้พลังงานทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า จึงทำให้การติดตั้งเทคโนโลยีอย่างใดอย่างหนึ่ง อาทิ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่สามารถตอบโจทย์ความต้องการในการลดการใช้พลังงานของอาคารได้ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาชุดระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการลดอุณหภูมิหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kaldellis *et al.*, 2014 ; Skoplaki & Palyvos, 2009) ยังจะสามารถนำเอาพลังงานความร้อนในรูปแบบของน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ซึ่งปกติไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีประกอบไปด้วย Pang *et al.* (2017) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งและไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงจะช่วยให้ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่ม

สูงขึ้น ที่ซึ่งส่งผลต่อระบบที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้น และช่วยให้ระยะเวลาคืนทุนของระบบมีแนวโน้มลดลง (Prakash, 1994) เมื่อใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าการใช้อากาศในการระบายความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบระบายความร้อน พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งระบบระบายความร้อนจะมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่า Herrando *et al.*, (2019) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการระบายความร้อนด้วยน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญในการเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การเพิ่มจำนวนท่อน้ำ Nizetić *et al.* (2016) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสเปรย์น้ำเพื่อลดอุณหภูมิเหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และการสเปรย์น้ำเพื่อลดอุณหภูมิเหนือและใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ปริมาณรังสีอาทิตย์มีปริมาณที่สูง ผลการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ที่ร้อยละ 16.3 ในกรณีสเปรย์น้ำเหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะอยู่ที่ร้อยละ 14.1 เมื่อสเปรย์น้ำเหนือและใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงที่ปริมาณรังสีอาทิตย์มีปริมาณสูง C. (Duck *et al.*, 2018) ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ และสภาพภูมิอากาศของสถานที่ติดตั้ง เช่น ศักยภาพรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อมและความเร็วลม Huide *et al.* (2017) ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Hybrid photovoltaic/thermal) เป็นเทคโนโลยีที่เข้ามาช่วยแก้ไขข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ติดตั้งได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน Kasaeian *et al.* (2017) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยอากาศจากการพาแบบบังคับ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบจะมีค่าประมาณร้อยละ 15-31 เมื่อซีแผงระบายความร้อนมีความสูง 5 mm และอัตราการไหลของมวลอากาศอยู่ในช่วง 0.018-0.060 kg/s ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าประมาณร้อยละ 12.0-12.4 สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย อนุรัตน์ เทวตา และ ยุธนา ศรีอุดม (2018) ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แบบ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่

ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนจะช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงานจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดร้อยละ 11.8 โดยที่มีอุณหภูมิผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 49.2 °C

จากผลการศึกษางานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้โดยการลดหรือการระบายอุณหภูมิความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาข้างต้นยังไม่มีการศึกษาถึงการหาสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายหาอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การหาสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้มาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) ASHRAE 93-77

การทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASHRAE 93-77

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอามาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ASHRAE 93-77 (Jenkins & Hill, 1980) มาใช้ในการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งนี้เนื่องจากมาตรฐานดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate solar collectors) ทั่วไปที่มีจำหน่ายอยู่ตามท้องตลาด หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบจะถูกทดสอบภายใต้มาตรฐานดังกล่าวที่ซึ่งยึดถือเป็นมาตรฐานเดียวกันก่อนจัดทำหมาย สำหรับงานวิจัยนี้ชุดระบายความร้อน คือ ท่อทองแดงที่ภายในบรรจุน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการรับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ดำเนินการออกแบบนั้นในส่วนของชุดระบายความร้อนจะทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั่นเอง โดยวิธีการดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดระบายความร้อนที่ได้รับการออกแบบ และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาเรื่องของการแลกเปลี่ยนความร้อนและรวมถึงเรื่องของการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบได้

วิธีการทดสอบชุดระบายความร้อน

การทดสอบชุดระบายความร้อนซึ่งทำการทดสอบกลางแจ้งเพื่อหาประสิทธิภาพโดยการประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-77 (Parthiban *et al.*, 2020) แสดงดัง Figure 1 โดยรังสีอาทิตย์จะตกกระทบบนระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในแนวตั้งฉากตลอดเวลาการทดสอบและมีข้อกำหนดดังนี้

- (1) อัตราการไหลของของไหลมีค่าคงที่เท่ากับ 0.02 kg/s ต่อ 1 m² ของพื้นที่เก็บรังสีอาทิตย์ (สำหรับงานวิจัยนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีพื้นที่ 2 m² ดังนั้น อัตราการไหลของของไหลจึงเท่ากับ 0.04 kg/s)
- (2) ทดสอบที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ไม่น้อยกว่า 790 W/m²
- (3) อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม
- (4) สำหรับงานวิจัยนี้ไม่คิดผลที่เกิดจากความเร็วลม เนื่องจากเป็นการทดสอบแบบกลางแจ้ง

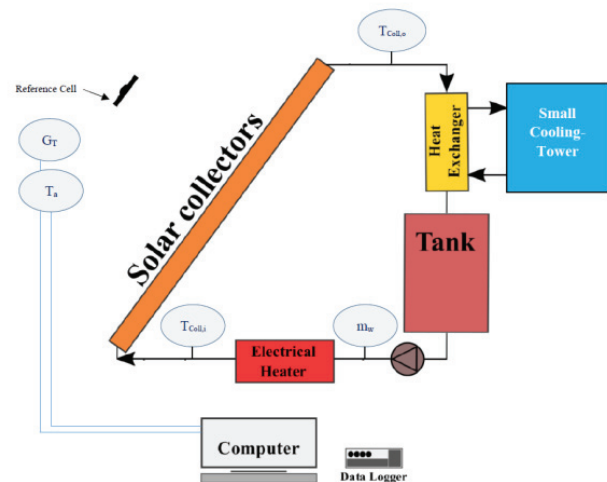


Figure 1 A simple diagram for experiment (Reference ASHRAE STANDARD)

โดยก่อนเริ่มดำเนินการทดสอบให้ทำความสะอาดระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนการทดสอบทุกครั้ง จากนั้นให้เริ่มดำเนินการทดสอบและบันทึกข้อมูลต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิแวดล้อม (T_{Amb}) อุณหภูมิน้ำเข้า ($T_{w,in}$) และอุณหภูมิน้ำออก ($T_{w,out}$) ของชุดระบายความร้อน ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (I_T) และอัตราการไหลของน้ำ (m_w) ทั้งนี้ในการเก็บข้อมูลจะเป็นการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 10.00-14.00 น. ซึ่งจะเป็นการทดสอบแบบระยะสั้นเพื่อนำผลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดระบายความร้อนต่อไป

ทฤษฎีสำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (หรือชุดระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือในงานวิจัยนี้คือชุดระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับของไหลภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำให้ของไหลดังกล่าวมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เมื่อกำหนดให้ F_R เป็นแฟคเตอร์ในการดึงความร้อนมาใช้งาน ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากรังสีดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [S - U_L (T_{w,in} - T_{Amb})] \tag{1}$$

เมื่อ S คือ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนด้วยแผ่นดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2) (สำหรับงานวิจัยนี้คือเซลล์แสงอาทิตย์) ซึ่งอาจเขียนได้เป็น $G_T(\tau\alpha)_e$ เมื่อ $(\tau\alpha)_e$ คือ Angular-dependent คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) $T_{w,in}$ คือ อุณหภูมิของไหลที่ไหลเข้าสู่ตัวรับรังสีอาทิตย์ ($^\circ C$) ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนขณะใดขณะหนึ่ง จึงสามารถหาได้จากสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (4)

$$\eta_{Coll} = \frac{\dot{Q}_u}{A_c I_T} \tag{2}$$

$$\eta_{Coll} = F_R(\tau\alpha)_e - \frac{F_R U_L (T_{w,in} - T_{Amb})}{I_T} \tag{3}$$

$$\eta_{Coll} = \frac{\dot{m}_w c_p (T_{w,out} - T_{w,in})}{A_c I_T} \tag{4}$$

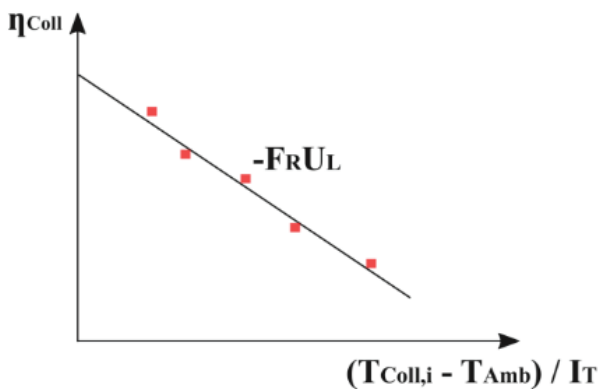


Figure 2 Graph of a relationship between η_{Coll} with $(T_{w,in} - T_{Amb})/I_T$

เมื่อ $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_R U_L$ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายถึงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ว่าทำงานอย่างไร เมื่อ $F_R(\tau\alpha)_e$ เป็นตัวที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ถูกดูดกลืน และ $F_R U_L$ เป็นเทอมที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สูญเสีย ซึ่งการเขียนกราฟของ η_{Coll} กับ $(T_{w,in} - T_{Amb})/I_T$ จะเป็นเส้นตรงตัดแกน Y ที่ $F_R(\tau\alpha)_e$ และมีความชันเท่ากับ $-F_R U_L$ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการหาสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H แสดงดัง Figure 3 (งานวิจัยนี้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline เป็นแผงเซลล์ที่หาง่ายตามท้องตลาด และเป็นที่ยอมรับนำมาใช้งาน) ได้ถูกนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัย โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีรายละเอียดของคุณลักษณะดังนี้ Maximum power (P_{max}) $345 \pm 2.5\%$ Maximum power voltage (V_{mp}) $37.7V$ Maximum power current (I_{mp}) $9.15A$ Short circuit current (I_{sc}) $9.62A \pm 4\%$ และ Open circuit voltage (V_{oc}) $46.4V \pm 4\%$ โดยมีขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ $2,024 \times 959$ mm

ชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับในงานวิจัยนี้ชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อถูกนำไปติดตั้งร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ซึ่งจะสามารถผลิตได้ทั้งพลังงานความร้อน (น้ำร้อน) และพลังงานไฟฟ้า โดยชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่รับและถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับน้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนใช้งาน ในการดำเนินงานวิจัยได้ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ (ขนาดของท่อดังกล่าวจะเป็นขนาดเดียวกับท่อที่ถูกใช้ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ซึ่งมีจัดจำหน่ายโดยทั่วไปตามท้องตลาด) แผงท่อทองแดงจะถูกวางยึดติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะวางอยู่กึ่งกลางของเซลล์แสงอาทิตย์ และจะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนชนิดแผ่นยี่ห้อ AeroFlex ที่มีความหนา 3/8" และชั้นสุดท้ายจะถูกปิดด้วยแผ่นไม้อัดที่มีความหนา 6 mm ซึ่งลักษณะการวางตำแหน่งของชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดัง Figure 4 และ Figure 5

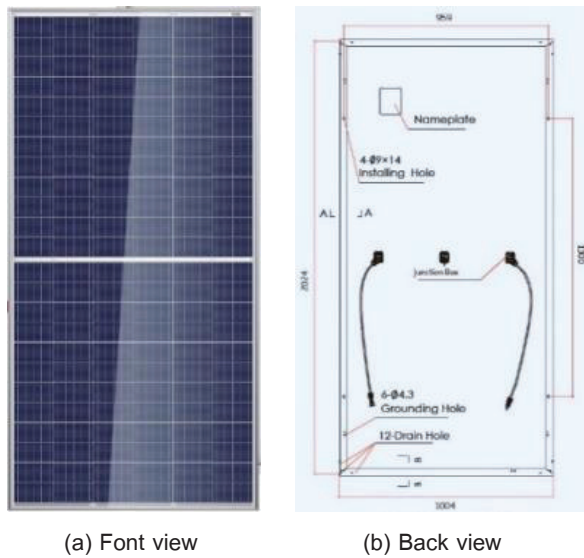


Figure 3 A multicrystalline solar cell of Trinasolar model TSM—345PE15H

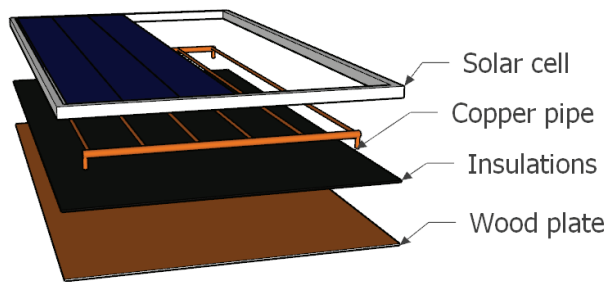


Figure 4 Heat sink under solar cell (Design)



Figure 5 Heat sink under solar cell (Fabricated)

การดำเนินการทดสอบ

ระบบทดสอบขนาดเล็กเพื่อใช้ในการหาสมการอย่างง่ายสำหรับใช้คำนวณหาพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ (1) ถังน้ำร้อนขนาด 50 L (2) ซีตเตอร์ขนาด 1,500 Watt สำหรับใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดก่อนป้อนให้กับชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (3) ปั้มน้ำยี่ห้อ MIZUMA Model: YDQ-60 0.37kW/0.5HP (4) แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H ที่ได้ติดตั้งชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ตั้งหัวข้อ 3.2) (5) อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ ยี่ห้อ SUOER รุ่น PWMST-W1230 30A 12V/24V (6) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ SUOER รุ่น SDB-1000A (7) แบตเตอรี่ ยี่ห้อ FB Battery รุ่น ProHero NS60L ต่ออนุกรมจำนวน 2 ลูก และ (8) หลอดไส้ขนาด 20 W จำนวน 8 หลอด ทำหน้าที่เป็นโหลดจำลองสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทดสอบ เพื่อหาสมการอย่างง่ายสำหรับใช้คำนวณหาพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถทำได้

ในส่วนของการดำเนินการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนั้น อุปกรณ์สำคัญจะประกอบไปด้วย (1) เซลล์อ้างอิง (Reference cell) สำหรับตรวจวัดปริมาณรังสีอาทิตย์ (I_p) (2) สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ชนิด Type K สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อม (T_{Amb}) อุณหภูมิน้ำเข้า ($T_{w,in}$) และอุณหภูมิน้ำออก ($T_{w,out}$) จากนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8431-20 ทุกๆ 1 นาที โดยในขณะที่ทดสอบชุดทดสอบจะหันหน้าไปทางทิศใต้ และมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะวางมุมเอียงประมาณ 16° (องศา) (เมื่อเทียบกับแนวระดับ) ซึ่งเป็นมุมเดียวกับตำแหน่งละติจูดของจังหวัดพิษณุโลก (ละติจูด 16° 55' 0" N และลองจิจูด 100° 30' 0" E) โดยแผนภาพอย่างง่ายของระบบทดสอบ และตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้งแสดงดัง Figure 6 และ Figure 7 ตามลำดับ

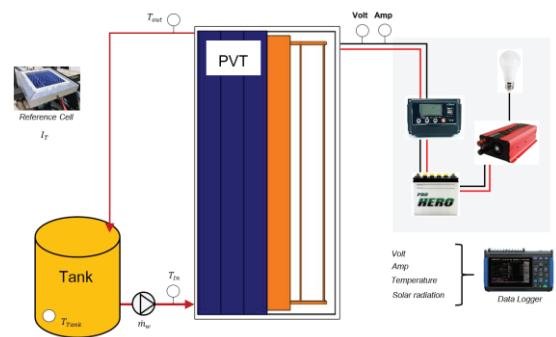


Figure 6 A simple diagram of the equipment under this research

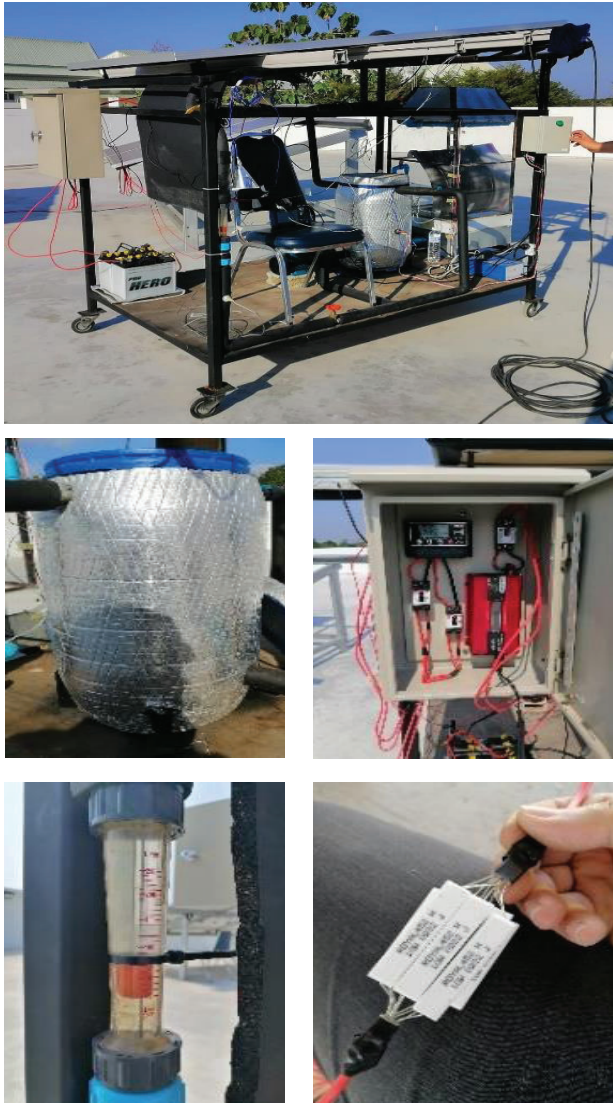


Figure 7 Examples of installed tools

ผลการศึกษา และวิจารณ์ผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในการทดสอบได้กำหนดให้ชุดระบายความร้อนที่ทำงานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ จึงสามารถนำเอาหลักการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 มาใช้ในการดำเนินการทดสอบได้ โดยผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังนี้

ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีมีและไม่มี ชุดระบายความร้อน

การทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ คือ (1) กรณีที่ไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน (PV) ในวันที่ 25 มกราคม 2564 และ (2) ในกรณีที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน (PVT) ในวันที่ 13 มกราคม 2564 เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPM (ลิตรต่อนาที) โดยผลการศึกษาเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ดัง Table 1

Table 1 Solar cell efficiency (%) when with and without the water cooling system

	PV	PVT
Total solar radiation (kW)	645.63	633.77
Electricity (kWh)	10.64	11.37
Solar cell efficiency (%)	11.54	12.55

จาก Table 1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่มีการติดตั้งและไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน ในช่วงเวลา 9.00-15.00 น. พบว่า ในกรณีที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนประสิทธิภาพโดยรวมของแผงเซลล์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 12.55 ในขณะที่ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 11.54 จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดระบายความร้อนดังกล่าวด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงปริมาณความร้อน และรวมถึงอุณหภูมิน้ำร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดระบายความร้อน

โดยในการดำเนินการทดสอบได้กำหนดให้อุณหภูมิน้ำเข้ามีอุณหภูมิแตกต่างกัน 5 ช่วงอุณหภูมิ และแต่ละช่วงอุณหภูมิจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม คือ 40.0, 45.0, 50.0, 55.0 และ 60.0 °C (ทั้งนี้ที่ 60.0 °C ชุดระบายความร้อนไม่สามารถเพิ่มคุณภาพความร้อนได้ จึงไม่มีผลการทดสอบในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว) ผลการทดสอบในช่วงวันที่ 16-22 มกราคม 2564 ที่อุณหภูมิน้ำเข้ามีสภาวะคงตัว (Steady state) และปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบมีค่ามากกว่า 790 W/m² แสดงดัง Table 2 และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากการทดสอบระหว่าง η_{coll} กับ $(T_{w,in} - T_{Amb})/T$ Figure 8 ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η) ของชุดระบายความร้อนที่ได้ถูกติดตั้งหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน ($F_R(T\alpha)_c$) อยู่ที่ร้อยละ 19.85 และพลังงานที่สูญเสีย ($X: -F_R U_L$) เท่ากับ 5.24 W/m²-°C หรือสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คือ $\eta = -5.24X + 19.85$ ทั้งนี้ สมการดังกล่าวจะสามารถใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ดำเนินการออกแบบในงานวิจัยนี้เท่านั้น

ซึ่งผลการศึกษาที่ข้างต้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพของชุดระบายความร้อนหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ถูกออกแบบมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 19.85 ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพที่ไม่ได้สูงมาก เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ ผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่หากเพียงการเพิ่มชุดระบายความร้อนเข้าไปที่หลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้ได้พลังงานความร้อน (น้ำร้อน) มาใช้งานเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหาก

พิจารณาในแง่ของการนำเอาความร้อนเหลือทิ้ง (ความร้อนหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์) ที่โดยปกติไม่ได้ใช้ประโยชน์มาก่อนให้เกิดการใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การอุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) หรือใช้ผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับอาคารต่าง เช่น โรงแรม โรงพยาบาล เป็นต้น (IEA-ETSAP, 2015) ก็จะก่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า

Table 2 Results of relationship between η_{Coll} with $(T_{w,in} - T_{Amb})/I_T$ when inlet hot water temperature constant at 40.0, 45.0, 50.0, and 55.0 °C

$T_{w,in}$	$T_{w,out}$	T_{Amb}	I_T	Q_u	η_{Coll}	$(T_{w,in} - T_{Amb})/I_T$
39.2	41.1	37.4	812.1	1.92	321.0	19.8
39.2	41.1	37.3	810.1	1.92	321.0	19.8
39.2	41.1	37.3	811.1	1.92	321.0	19.8
39.2	41.1	37.4	810.1	1.92	321.0	19.8
39.2	41.1	37.4	808.1	1.92	321.0	19.9
46.1	48.1	38.9	825.5	1.96	327.7	19.8
46.1	48.1	38.8	825.2	1.96	327.7	19.9
46.1	48.1	38.9	824.8	1.96	327.7	19.9
46.1	48.1	38.9	825.8	1.96	327.7	19.8
46.1	48.1	39.2	826.8	1.96	327.7	19.8
51.3	53.2	39.9	837.4	1.98	331.1	19.8
51.2	53.2	39.9	838.2	1.98	331.1	19.7
51.2	53.2	40.0	838.0	1.98	331.1	19.8
51.2	53.2	39.8	838.2	1.98	331.1	19.7
51.2	53.2	39.9	838.0	1.98	331.1	19.8
54.8	56.9	35.4	856.4	2.02	337.7	19.7
55.0	57.0	35.4	856.0	2.02	337.7	19.7
55.0	57.0	35.4	856.0	2.02	337.7	19.7
55.0	57.0	35.4	856.7	2.02	337.7	19.7
55.0	57.0	35.4	856.4	2.02	337.7	19.7

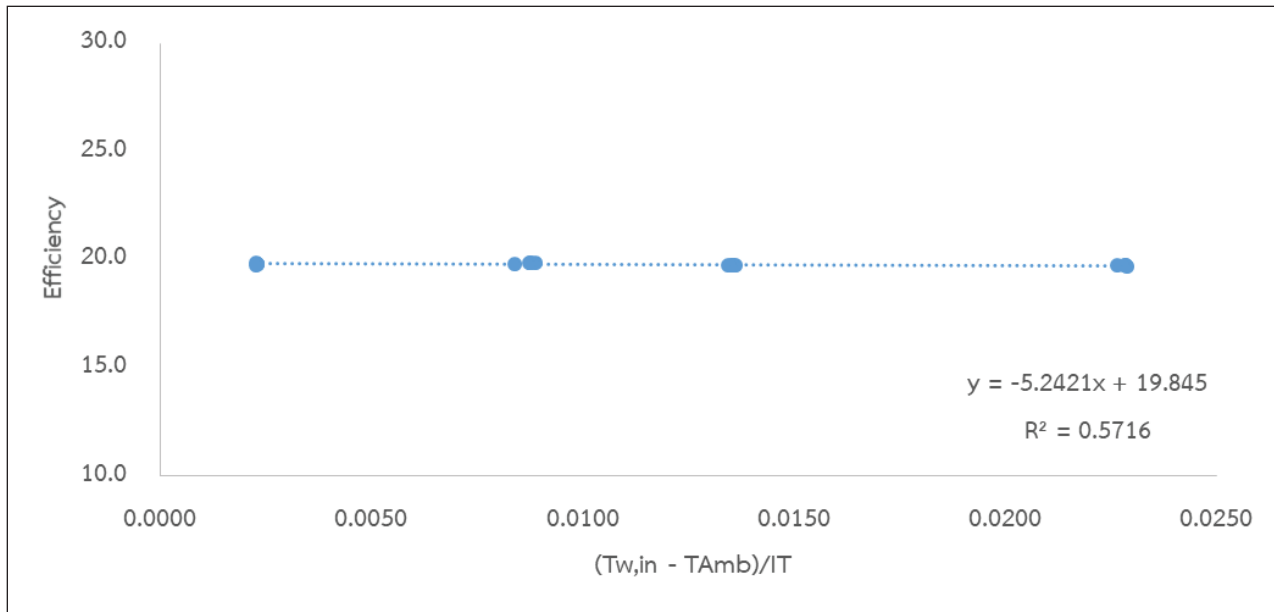


Figure 8 Results of relationship between η_{Coll} with $(T_{w,in} - T_{Amb})/IT$

Table 3 Average diary solar radiation (H, MJ/m²-day) and Maximum ($T_{Amb,max}$) and Minimum ($T_{Amb,min}$) ambient temperature (°C) (Sonsaree *et al.*, 2018)

Month	Day	H	$T_{Amb,min}$	$T_{Amb,max}$
Jan	17	17.82	18.50	35.70
Feb	47	20.38	20.40	40.50
Mar	75	21.74	22.80	42.10
Apr	105	22.68	24.20	39.80
May	135	20.41	24.30	35.70
Jun	162	18.18	23.70	32.20
Jul	198	17.53	23.40	31.90
Aug	228	16.78	23.10	31.50
Sep	258	16.96	22.60	31.60
Oct	288	16.67	20.90	30.70
Nov	318	17.06	18.50	30.40
Dec	344	17.32	17.10	31.30

ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำและพลังงานความร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สมการอย่างง่ายที่ได้กล่าวในหัวข้อข้างต้นได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนและพลังงานความร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 แผง ที่ได้ถูก

ติดตั้ง ณ จังหวัดพิษณุโลก (ละติจูด 16° 55' 0" N และลองจิจูด 100° 30' 0" E) ทั้งนี้ในแบบจำลองได้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำงานร่วมกับถังน้ำร้อน (ไม่คิดการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากถังน้ำร้อน) ขนาด 50 L และอัตราการไหลของน้ำ 0.04 kg/s โดยปริมาณรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ย (H) และอุณหภูมิแวดล้อม (°C) ที่เป็นตัวแทนของวันในแต่ละเดือน

ของจังหวัดพิษณุโลกแสดงดัง Table 3 ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการป้อนเข้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์ (แสดงดัง Figure 8) และอุณหภูมิแวดล้อม (แสดงดัง Figure 9) (Chaichana *et al.*, 2010 ; Duffie & Beckman, 1974 ; Sonsaree *et al.*, 2017) ในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวัน

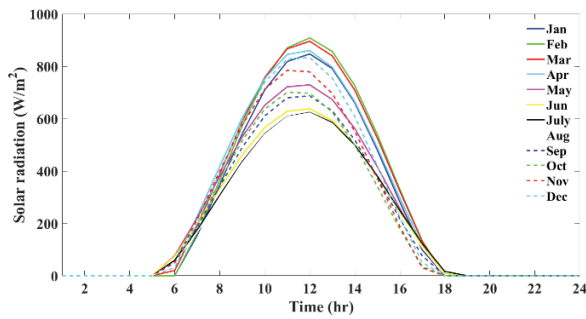


Figure 8 Total solar radiation (I_t) in Phitsanuloke province (Chaichana *et al.*, 2010)

โดยผลการศึกษาที่ได้จากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดัง Table 4 และ Figure 10 ถึง Figure 12 พบว่า อุณหภูมิสะสมของน้ำระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลาระหว่างวัน หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิสะสมของน้ำระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง โดยอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนสะสมเฉลี่ยสูงที่สุดประมาณ 56.9 °C ในเดือนมีนาคม แสดงดัง Figure 10

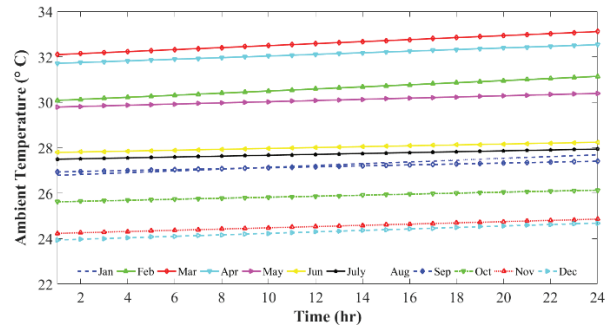


Figure 9 Ambient temperature (T_{Amb}) in Phitsanulok province

Table 4 Thermal energy useful (Q) from heat sink under solar cell

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Q (kW _{th})	32.86	32.40	35.66	33.30	28.48	23.36	23.30	23.01	25.14	26.38	29.20	32.48	245.56

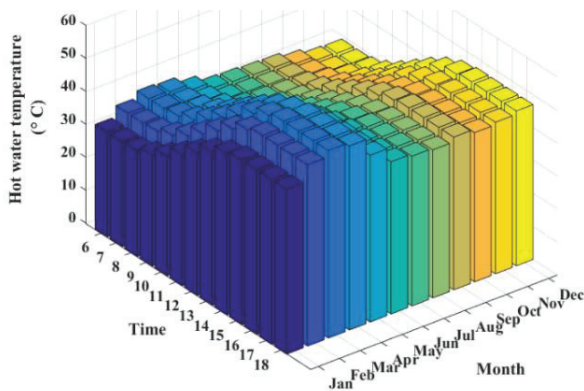


Figure 10 Hot water temperature (°C) in each month

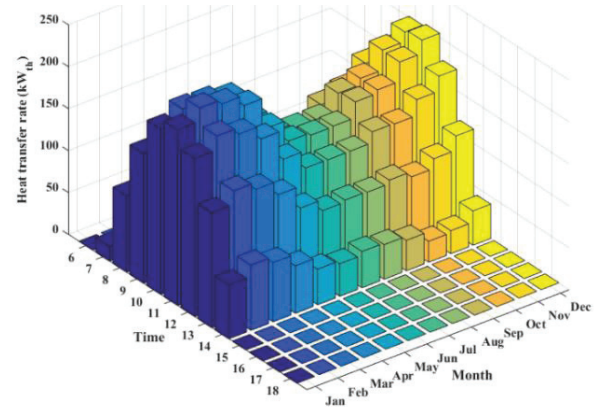


Figure 11 Average thermal energy useful (kW_{th}) in each month

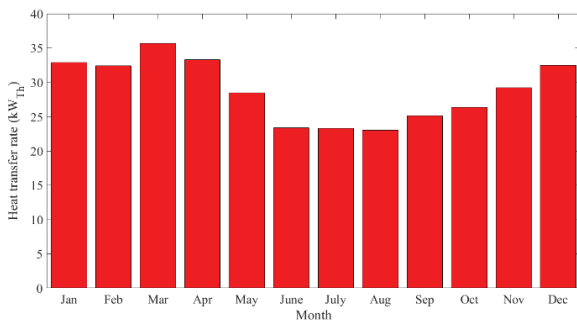


Figure 12 Total thermal energy useful (kW_{th}) in each month

Figure 11 แสดงพลังงานความร้อนรายวันเฉลี่ย (kW_{th}) ของแต่ละเดือน โดยปริมาณพลังงานความร้อนรายวันเฉลี่ยของแต่ละเดือนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณรังสีอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและจะลดลงเมื่อปริมาณรังสีอาทิตย์มีแนวโน้มลดลง โดยชุดระบายความร้อนจะสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้สูงที่สุดในเดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ 225.45 kW_{th} นอกจากนี้ หากนำเอาพลังงานความร้อนรายวันเฉลี่ยของแต่ละเดือนที่ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนรายวันเฉลี่ยที่คำนวณได้จากจำนวนวันในแต่ละเดือนจะสามารถคำนวณพลังงานความร้อนรวมในแต่ละเดือนตลอดทั้งปีได้ โดยผลการศึกษาแสดงดัง Table 4 และ Figure 12 พบว่า ระบบจะสามารถผลิตพลังงานความร้อนรวมได้สูงสุด 36.66 kW_{th} ในเดือนมีนาคม และต่ำที่สุด 23.01 kW_{th} ในเดือนกันยายน หรือระบบจะสามารถผลิตพลังงานความร้อนเฉลี่ยได้เท่ากับ 28.80 kW_{th}/เดือน หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ตลอดทั้งปี เท่ากับ 345.56 kW_{th} ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนดังกล่าว สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เรื่องของพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตเพิ่มได้นอกจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อีกด้วย

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาสมการอย่างง่ายเพื่อนำมาใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้มาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ASHRAE 93-77 โดยการศึกษาจะเป็นการออกแบบและสร้างชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM—345PE15H ซึ่งชุดระบายความร้อนใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ที่มีความยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อรวมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ ที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η) ของชุดระบายความร้อนที่ได้ถูกติดตั้งหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน ($F_R(\tau\alpha)_0$)

อยู่ที่ร้อยละ 19.85 และพลังงานที่สูญเสีย ($X: F_{R,U_L}$) เท่ากับ 5.24 W/m²·°C หรือสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คือ $\eta = -5.24X + 19.85$

โดยสมการดังกล่าวจะสามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิน้ำร้อนที่แผงระบายความร้อนสามารถผลิตได้และรวมถึงเพื่อให้ทราบถึงพลังงานความร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดยปกติไม่ได้นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในจากการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีต่างๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.): งบประมาณปกติประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการจัดซื้อเครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม และหน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก สำหรับสถานที่ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2560). *โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (ปี 2560)*.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018)*.
- อนุรัตน์ เทวตา และ ยุธนา ศรีอุดม. (2018). การศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนแบบแบน. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร*, 12(2), 83-94.
- Chaichana,nC., Kiatsiriroat, T. & Nuntaphan, g. (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*, 31(5), 419-429.
- Duck, B. C., Fell, C. J., Anderson, K. F., Sacchetta,eC.,uD., Yanping and Zhu,gY. (2018). Determining the value of cooling in photovoltaics for enhanced energy yield. *Solar energy*, 159, 337-345.

- Duffie, J.A. & Beckman, W. A. (1974). *Solar energy thermal processes*: University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory
- Herrando, R., Alba, Z., & Markides, C. N. (2019). A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PVT-water collectors. *Applied Energy*, 235, 1583-1602.
- Huide, X., Zhao, L. Ma, Tao, Zg, Qixing, Wu & Hongyuan, n. (2017). A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems. *Energy conversion and management*, 140, 1-13.
- IEA-ETSAP. (2015). *Solar Heat for Industrial Processes Technology Brief*: International Energy Agency (IEA) and Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP).
- Jenkins, P. & Hill, J. E. (1980). *Testing flat-plate water heating solar collectors in accordance with the BSE and ASHRAE procedures*. Final Report National Bureau of Standards.
- Kaldellis, John K, Kapsali, Marina and Kavadias, Kosmas 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.
- Kasaeian, A., Khanjari, Yasamin, Golzari, Soudabeh, Mahian, Omid and Somchai, W. (2017). Effects of forced convection on the performance of a photovoltaic thermal system: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 85, 13-21.
- Mahmud, M.A., Huda, Nazmul, Farjana, Shahjadi Hisan & Candace, L. (2018). Environmental impacts of solar-photovoltaic and solar-thermal systems with life-cycle assessment. *Energies*, 11(9), 2346.
- Nižetić, S., Čoko, D., Yadav, A. & Grubišić-Čabo, P. (2016). Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. *Energy conversion and management*, 108, 287-296.
- Parthiban, Anandhi, Reddy, K.S., Pesala, Bala & Mallick, T.K. (2020). Effects of operational and environmental parameters on the performance of a solar photovoltaic-thermal collector. *Energy conversion and management*, 205, 112428.
- Peng, Z., Herfatmanesh, M. R & Liu, G. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy conversion and management*, 150, 949-955.
- Prakash, I. (1994). Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy conversion and management*, 35(11), 967-972.
- Skoplaki, E. & John P. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguirre, H. & Tanaka, I. (2017). VCHP-ORC power generation from low-grade industrial waste heat combined with solar water heating system: Power generation and CO₂ emission in industrial estate of Thailand. *Cogent Engineering*, 4(1), 1359397.
- Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguirre, H. & Tanaka, I. (2018). A small-scale solar organic rankine cycle power plant in Thailand: three types of non-concentrating solar collectors. *Solar energy*, 162, 541-560.
- Thawongamyingsakul, C. & Kiatsiroat, T. (2012). Potential of a solar organic rankine cycle with evacuated-tube solar collectors as heat source for power generation in Thailand. *Energy Science and Technology*, 4(2), 25-35.