



ขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่เหมาะสม สำหรับการผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์

Size and Type Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Assisted Heat Pump in Slaughterhouse

นฤพนธ์ วันชูเพลา และ สราวุธ พลวงษ์ศรี*

Narupon Wanchupela and Sarawut Polvongsri*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, 63 Moo 4 Nongharn, Sansai, Chiang Mai, 50290, Thailand

*E-mail: saravooth@hotmail.com Tel.: +66 5387 5593, Fax: +66 5333 31 94

บทคัดย่อ

ในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าเพื่อผลิตน้ำร้อนประมาณ 2,500 L/day ที่อุณหภูมิ 65°C เพื่อใช้ในกระบวนการลวกและชุบขนสุกร ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการเลือกชนิดและขนาดของแผง Solar PV/T ชนิด mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การศึกษาแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ทำนายสมรรถนะของแผง Solar PV/T และสมรรถนะของปั๊มความร้อน จากการศึกษาพบว่ากรณีแผง Solar PV/T ชนิด mono-Si มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ F_{RUL} เท่ากับ 0.328 และ 7.2997 W/m²·K ตามลำดับ ในขณะที่แผง poly-Si PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ F_{RUL} เท่ากับ 0.275 และ 8.4743 W/m²·K ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของปั๊มความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.38 W_{th}/W_e ในการศึกษาส่วนที่สองเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายความเหมาะสมของระบบ พบว่า การใช้แผง Solar PV/T ชนิด mono-Si ขนาด 295 W_p จำนวน 16 แผง ร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวและสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ 31,465.06 kWh/year หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับการใช้งานขดลวดไฟฟ้า 142,536.72 Baht/year ระบบต้องใช้เงินลงทุนเท่ากับ 888,314.00 Baht และมีระยะเวลาคืนทุน 6.23 Year

คำสำคัญ: แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์; ปั๊มความร้อน; สมรรถนะ; น้ำร้อน; โรงฆ่าสัตว์

ABSTRACT

In Chiang Dao Municipality slaughterhouse, the electric heater was used to produce hot water of 2,500 liters at 65°C for the scalding and scraping of pigs processes which ensued a lot of electricity. Therefore, this research aims to use solar photovoltaic thermal hybrid assisted heat pump to reduce electricity consumption. The mathematical model was developed for selection appropriate type and size of Solar PV/T both mono-Si PV/T and poly-Si PV/T based on economic analysis.

The study divided into two parts. The first part was a test to establish the mathematical equations to predict the solar PV/T panel and the heat pump performances. From the study, it was found that the mono-Si PV/T panels had $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ with 0.328 and 7.2997 W/m²·K respectively, while $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ of poly-Si PV/T panels were 0.275 and 8.4743 W/m²·K, respectively, and the average energy efficiency ratio (EER) of the heat pump was equal to 2.38 W_{th}/W_e. In the second part of the study, the mathematical models were used to predict the appropriate system sizes. It was found that the mono-Si PV/T of 295 W_p 16 panels combined with the 17.8 kW_{th} heat pump was the most suitable for producing hot water in Chiang Dao Municipality slaughterhouses. The electrical energy from the gridline could be decreased by 31,465.06 kWh/year or about 142,536.72 Baht/year. The system required an investment cost of 888,314.00 Baht and the payback period was 6.23 year.

Keywords: Solar PV/T; Heat pump; Performance; Hot water; Slaughterhouse

1. บทนำ

การผลิตเนื้อสุกรของกิจการโรงฆ่าสัตว์มีการใช้พลังงานปริมาณมากในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนสำหรับลวกเพื่อขูดขนสุกร โดยทั่วไปนิยมใช้ขดลวดไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่น้ำซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากทำให้โรงฆ่าสัตว์ต้องแบกรับต้นทุนค่าไฟฟ้า โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่เป็นโรงฆ่าสัตว์ที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้าประมาณ 15 kW ในการต้มเนื้อ และใช้เวลาในการต้มเนื้อประมาณ 7.5 h เพื่อลวกสุกรที่เวลาประมาณ 19.00 น. โรงฆ่าสัตว์มีปัญหาขาดทุนในรอบปี พ.ศ. 2561 โดยมีรายจ่ายรวมทั้งปี 2,181,104.75 Baht ขณะที่มียาได้รวมทั้งปี 1,469,880.00 Baht ปัญหาส่วนหนึ่งมาจากการแบกรับต้นทุนค่าไฟฟ้าจากการใช้ขดลวดไฟฟ้า

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเข้ามาประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตรมากขึ้น เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับแผนพัฒนา

พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP 2015) [1] พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้กับภาคการเกษตร จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับสูง ด้วยค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปี 17.6 MJ/m²-day จึงเหมาะสำหรับการผลิตพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [2] ด้วยศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยทำให้มีการศึกษาการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น สวัสดิ์ และวิจิตร [3] ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเอง โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ คอรีเยาะ และคณะ [4] ออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าใช้หลักการเทอร์โมไซฟอนโดยการไหลเวียนตามธรรมชาติ วิทยา และธรรณ [5]

เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบท่อฮีตไปป์

การผลิตความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่อาจสร้างเสถียรภาพในการใช้พลังงานได้ โดยเฉพาะในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆหรือฝนตก ดังนั้นการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตความร้อนอื่น เพื่อให้ระบบสามารถผลิตความร้อนได้อย่างต่อเนื่องและลดต้นทุนการติดตั้งเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ บั้มความร้อนเป็นอุปกรณ์ผลิตความร้อนที่มีสมรรถนะสูง จากการศึกษาของ อาทิตย์ และคณะ [6] ที่ทำการออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั้มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-22 สำหรับบ้านพักอาศัย พบว่าเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั้มความร้อนสามารถประหยัดไฟฟ้าได้ประมาณ 50% ของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า ปั้มความร้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่นำมาผลิตความร้อนร่วมกับเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ได้ และได้มีการศึกษาการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั้มความร้อน เช่น มารุต และคณะ [7] ได้พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะการทำงานของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้ปั้มความร้อนเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริมแก่ระบบ ซึ่งปั้มความร้อนจะใช้ R-134a เป็นสารทำงาน สราวุธ และทองเกียรติ [8] ทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่ใช้ปั้มความร้อนซึ่งใช้ R-134a เป็นสารทำงาน เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม โดยเปรียบเทียบระบบที่ใช้ของไหลที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2 ชนิด คือ น้ำและสารละลายเงินนาโน Sun et al. [9] ทำการเปรียบเทียบระบบผลิตน้ำร้อนจากปั้มความร้อนกับระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ร่วมกับปั้มความร้อนที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

หากระบบสามารถผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน จะสามารถลดภาระการทำงานของปั้มความร้อนและลดต้นทุนค่าไฟฟ้าลงได้ เช่น การใช้แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic thermal panel, Solar PV/T) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อน และเป็น

เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในการศึกษา เช่น งานวิจัยของ He et al. [10] ที่ศึกษาการทำงานของแผง Solar PV/T ใช้น้ำเป็นสารทำงานเพื่อเพิ่มสมรรถนะทางพลังงาน โดยระบบหมุนเวียนน้ำผ่านแผงจะเป็นระบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ Aste et al. [11] ทำการศึกษาค้นคว้าของกระจกครอบด้านหน้าของแผง Solar PV/T โดยเปรียบเทียบการทำงานของแผง Solar PV/T ที่มีและไม่มีกระจกครอบด้านหน้า Yang et al. [12] นำสารเปลี่ยนสถานะ (Phase change materials, PCM) มาติดตั้งในแผง Solar PV/T เพื่อใช้ในการเพิ่มสมรรถนะทางพลังงานให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเลือกขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั้มความร้อน (Solar photovoltaic thermal hybrid assisted heat pump) เพื่อใช้ทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบจำนวนของแผง Solar PV/T ที่มีกระจกครอบชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon PV/T, mono-Si PV/T) และชนิดซิลิคอนผลึกรวม (polycrystalline silicon PV/T, poly-Si PV/T) ที่ทำงานร่วมกับปั้มความร้อน เพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำร้อนให้แก่โรงฆ่าสัตว์และมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด

2. วิธีการศึกษา

เดิมโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 15 kW ในการผลิตน้ำร้อน 2,500 L ให้มีอุณหภูมิประมาณ 65°C เพื่อใช้ในขั้นตอนลวกเพื่อชูดุนสุกร ซึ่งใช้ระยะเวลาในการผลิตน้ำร้อนประมาณ 7.5 h คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 112.50 kWh/day ผู้วิจัยมีความต้องการที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั้มความร้อนมาใช้ทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า โดยมีการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั้มความร้อนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T เพื่อให้ได้สมการทำนายกำลังไฟฟ้า โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ให้มีค่า $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$

และปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 75 L/m² ทดสอบตั้งแต่เวลา 8.00-16.00 น. ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนเพื่อให้ได้สมการทำนายอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) โดยใช้ปั๊มความร้อนที่มีอัตราการผลิตความร้อน 17.8 kW_{th} เริ่มที่เวลา 9.00 น. เพื่อผลิตน้ำร้อน 2,500 L จากอุณหภูมิ 30°C ให้ได้อุณหภูมิ 65°C สมการทำนายทั้งหมดจะถูกใช้ในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวันเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบโดยใช้ข้อมูลทางสภาพแวดล้อมของเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุด และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปีโดยอาศัยข้อมูลทางสภาพแวดล้อมของวันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนของจังหวัดเชียงใหม่เพื่อวิเคราะห์การทำงานของระบบตลอดปีโดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์จาก กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [13] คำนวนจาก Duffie and Beckman [14] และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจาก ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ [15] คำนวนจาก Chaichana et al. [16] อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T เท่ากับ 0.02 kg/s·m² น้ำในถังเก็บน้ำร้อน 2,500 L ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนแสดงดังรูปที่ 1

อัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ได้รับ คำนวนได้จากสมการดังนี้

$$Q_{PV/T} = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (1)$$

$$Q_{PV/T} = A_{PV/T} [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (2)$$

เมื่อ $Q_{PV/T}$ คือ อัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ได้รับ (W) $\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลผ่านแผง

(kg/s) C_{p_f} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg·K) $T_{f,o}$ และ $T_{f,i}$ คือ อุณหภูมิของน้ำที่ออกและเข้าแผง (°C) $A_{PV/T}$ คือ พื้นที่ของแผง (m²) I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m²) $F_R(\tau\alpha)_e$ คือ ความสามารถในการส่องผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และ $F_R U_L$ คือ ค่าการสูญเสียความร้อนรวมของแผง (W/m²·K)

อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_{f,o} = T_{f,i} + \frac{Q_{PV/T}}{\dot{m}_f C_{p_f}} \quad (3)$$

แผง Solar PV/T จะทำงานก็ต่อเมื่อค่ารังสีอาทิตย์จริงมีค่ามากกว่าค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติ ซึ่งค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติเป็นค่ารังสีอาทิตย์ที่ทำให้ความสามารถการดูดกลืนความร้อนของแผงมีค่าเท่ากับการสูญเสียความร้อน คำนวนได้จากสมการต่อไปนี้

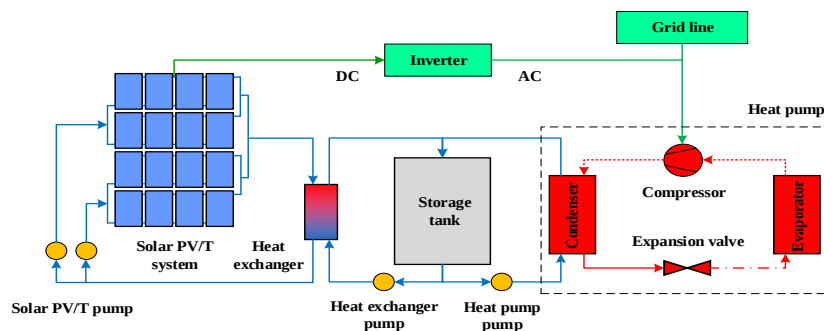
$$I_{Tc} = \frac{F_R U_L (T_{f,i} - T_a)}{F_R(\tau\alpha)_e} \quad (4)$$

เมื่อ I_{Tc} คือ ค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติ (W/m²)

น้ำร้อนที่ได้จากแผง Solar PV/T จะถ่ายเทความร้อนให้น้ำจากถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) คำนวนได้จากสมการนี้

$$Q_{HX} = \varepsilon_{HX} Q_{PV/T} \quad (5)$$

เมื่อ Q_{HX} คือ อัตราความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้รับ (W) และ ε_{HX} คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

ในส่วนของการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน สารทำงานที่เครื่องระเหย (Evaporator) จะได้รับความร้อนจากอากาศแวดล้อมและถูกอัดตัวด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น ถ่ายเทความร้อนให้น้ำจากถังเก็บน้ำร้อนผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) จากนั้นสารทำงานจะถูกลดความดันผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) เพื่อไปรับความร้อนต่อไป อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนหาได้จากสมการดังนี้

$$EER = \frac{Q_c}{P_{Comp}} \quad (6)$$

เมื่อ Q_c คือ อัตราความร้อนที่ได้จากเครื่องควบแน่น (W_{th}) และ P_{Comp} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ (W_e)

ถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวนกันความร้อน หากไม่คิดการสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำร้อน สามารถคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_{ST}^{t+\Delta t} = T_{ST}^t + \frac{(Q_{HX} + Q_c) \Delta t}{M_{ST} C_{p_f}} \quad (7)$$

เมื่อ $T_{ST}^{t+\Delta t}$ คือ อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}C$) T_{ST}^t คือ อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนในเวลาที่พิจารณา ($^{\circ}C$) Δt คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา (s) และ M_{ST} คือ มวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (L)

ประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta_{Net,PV/T} = \frac{Q_{PV/T} + P_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad (8)$$

เมื่อ $\eta_{Net,PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T และ $P_{PV/T}$ คือ กำลังไฟฟ้าจาก Solar PV/T (W)

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) คำนวณได้จากสมการนี้

$$PB = \frac{C_{Inv}}{C_{Saving}} \quad (9)$$

เมื่อ PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (Year) C_{Inv} คือ มูลค่าของการลงทุนเริ่มต้น (Baht) และ C_{Saving} คือ ผลประหยัดสุทธิรายปี (Baht/Year)

ระบบจะใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ยี่ห้อ KONNEN รุ่น HT7P-E7 ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน ชนิดและสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T จะใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Narupon and Sarawut [17] คือ แผง Solar PV/T ชนิด mono-Si และ poly-Si PV/T อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลผ่านแผงจะใช้ค่ามาตรฐานที่ใช้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือ 0.02 kg/s·m² ข้อมูลอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน

รายการ	ข้อมูล
Solar PV/T	
mono-Si PV/T	
1. พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ ($A_{PV/T}$) [m ²]	1.698
2. $F_R(\tau\alpha)_e$	0.328
3. สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($F_R U_L$) [W/m ² ·K]	7.2997
4. กำลังไฟฟ้าสูงสุด ($P_{PV/T}$) [W _p]	295
5. ราคา [Baht]	18,200
poly-Si PV/T	
1. พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ ($A_{PV/T}$) [m ²]	1.624
2. $F_R(\tau\alpha)_e$	0.275
3. สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($F_R U_L$) [W/m ² ·K]	8.4743
4. กำลังไฟฟ้าสูงสุด ($P_{PV/T}$) [W _p]	270
5. ราคา [Baht]	31,860
Heat pump	
1. อัตราความร้อนที่ผลิตได้เฉลี่ย (Q_c) [kW]	17.80
2. กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องอัดไอ (P_{Comp}) [kW]	5.26
3. ราคา [Baht]	40,093.42

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการกำหนดตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 2 โดยกำหนดให้ปั๊มความร้อนเริ่มทำงานที่เวลา 9.00 น. และระบบจะหยุดทำงานทุกวันพระ

ตารางที่ 2 ตัวแปรในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

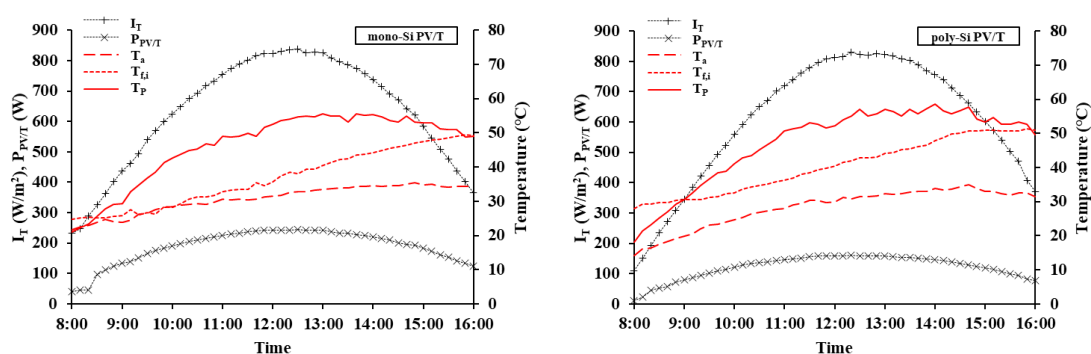
รายการ	ข้อมูล
1. ชนิด solar PV/T	Mono-Si และ poly-Si
2. จำนวน solar PV/T (แผง)	14-20
3. อัตราการไหลของน้ำผ่าน Solar PV/T ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)	0.02
4. สารทำงานในปั๊มความร้อน	R-134a
5. อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นในถังเก็บน้ำร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	30
6. ปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (L)	2,500
7. อัตราค่าไฟฟ้า (Baht/kWh)	4.53

3. ผลการศึกษา

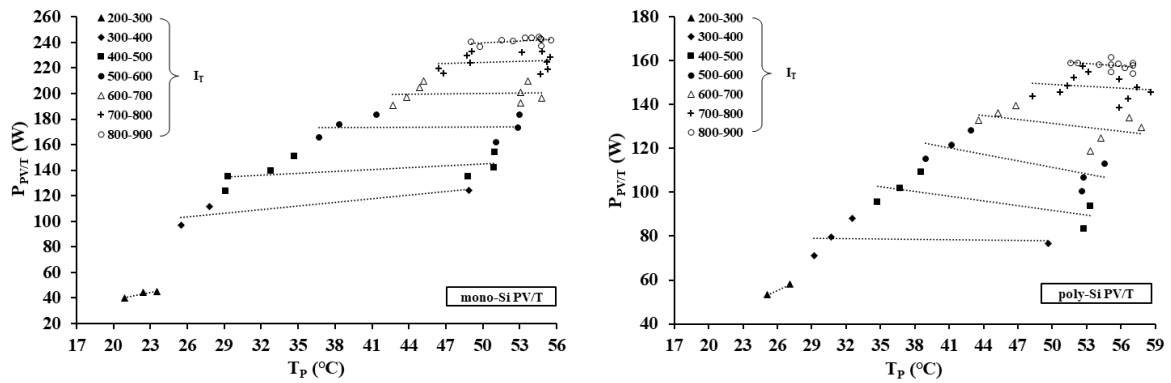
3.1 การทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T และ ปั๊มความร้อน

ทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T ตั้งแต่เวลา 8.00-16.00 น. ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านแผง $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ ปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 75 L/m^2 ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จากรูปที่ 2 พบว่าในวันที่ทดสอบเป็นวันที่ท้องฟ้าโปร่ง โดยวันที่ทดสอบแผง mono-Si PV/T ค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุด 837.12 W/m^2 (เฉลี่ย 631.44 W/m^2) อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุด 35.40°C (เฉลี่ย 30.69°C) และวันที่ทดสอบแผง

poly-Si PV/T ค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุด 829.27 W/m^2 (เฉลี่ย 606.10 W/m^2) อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุด 34.88°C (เฉลี่ย 28.23°C) เมื่อค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิแผง Solar PV/T จะมีค่าสูงขึ้นตามจนถึงประมาณ 12.30 น. หลังจากนั้น ค่ารังสีอาทิตย์จะเริ่มลดลง แต่อุณหภูมิแผง Solar PV/T ยังคงสูงขึ้นเล็กน้อย เกิดจากการสะสมความร้อน และแม้ค่ารังสีอาทิตย์ที่เวลา 15.30 น. จะมีค่าน้อยกว่า 500 W/m^2 แต่อุณหภูมิแผง Solar PV/T ไม่ลดลงตาม เนื่องจากบริเวณใต้แผงมีน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนมาระบายความร้อน ซึ่งน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าสูงขึ้นตามค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้รับ ทำให้อุณหภูมิแผง Solar PV/T มีค่าสูงในกรณีของ mono-Si PV/T อุณหภูมิแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุด 55.60°C (เฉลี่ย 46.21°C) ต่ำกว่า poly-Si PV/T ที่มีอุณหภูมิแผง Solar PV/T สูงสุด 58.57°C (เฉลี่ย 47.21°C) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิแผง Solar PV/T ในช่วงค่ารังสีอาทิตย์ตั้งแต่ $200\text{-}900 \text{ W/m}^2$ จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิแผงของ mono-Si PV/T เพิ่มขึ้น แผงชนิดนี้ยังคงผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แตกต่างจาก poly-Si PV/T ช่วงค่ารังสีอาทิตย์สูงกว่า 400 W/m^2 เมื่ออุณหภูมิแผง Solar PV/T เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแผง Solar PV/T ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าของ poly-Si PV/T ลดลงมากกว่า



รูปที่ 2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแผง mono-Si และ poly-Si PV/T



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิแผง Solar PV/T ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นใหม่ โดยเพิ่มปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า ได้แก่ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้าแผง Solar PV/T ทำให้ได้สมการทำนายในรูปแบบดังต่อไปนี้ เมื่อ $C_0 - C_8$ คือ ค่าคงที่จากตารางที่ 3

$$T_P = f(I_T, T_a, T_{f,i}) \quad (10)$$

$$T_P = C_0 (I_T^{C_1}) (T_a^{C_2}) (T_{f,i}^{C_3}) \quad (11)$$

$$P_{PV/T} = f(I_T, T_a, T_{f,i}, T_P) \quad (12)$$

$$P_{PV/T} = C_4 (I_T^{C_5}) (T_a^{C_6}) (T_{f,i}^{C_7}) (T_P^{C_8}) \quad (13)$$

อุณหภูมิแผง Solar PV/T จากสมการทำนายของทั้งสองแผงมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.41% และ 1.57% สำหรับแผง mono-Si และ poly-Si PV/T ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่สมการทำนายกำลังไฟฟ้า พบว่าสมการทำนายกำลังไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.92% และ 6.77% สำหรับแผง mono-Si และ poly-Si PV/T ตามลำดับ

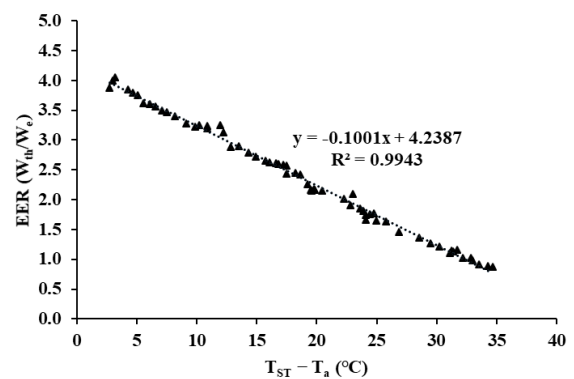
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T

ตัวแปร	mono-Si PV/T	poly-Si PV/T
C_0	0.058310	0.688030
C_1	0.275760	0.153390
C_2	1.526200	1.043000
C_3	-0.092972	-0.064284
C_4	0.827070	0.481370

ตารางที่ 3 (ต่อ) ค่าคงที่ของสมการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T

ตัวแปร	mono-Si PV/T	poly-Si PV/T
C_5	0.563270	0.864310
C_6	-0.478340	-1.907100
C_7	-0.477050	-0.017907
C_8	1.339400	1.669000

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน

ในการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนตั้งแต่เวลา 9.00 น. เพื่อให้ได้น้ำร้อนอุณหภูมิ 65°C พบว่า อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนมีค่าเฉลี่ย 2.38 W_{th}/W_e อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน

จะมีค่าลดลงเมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่ามากขึ้น เนื่องจากปั๊มความร้อนใช้แหล่งความร้อนจากอากาศแวดล้อมเพื่อผลิตน้ำร้อน ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เครื่องอัดไอทำงานหนัก ประกอบกับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ถังเก็บน้ำร้อนจะลดลงตามไปด้วย อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานจากสมการทำนายมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.82% สมการทำนายอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานมีรูปแบบดังนี้

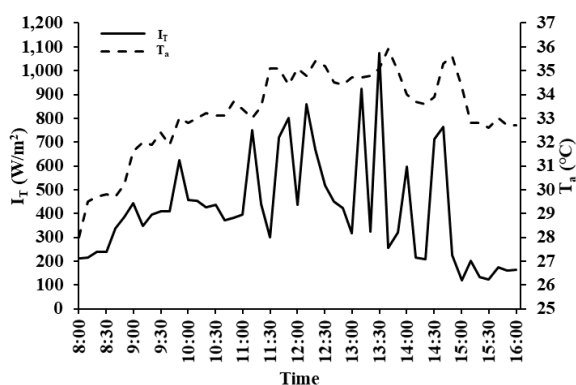
$$EER = -0.1001 (T_{ST} - T_a) + 4.2387 \quad (12)$$

เมื่อ EER คือ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (W_{th}/W_e)

3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

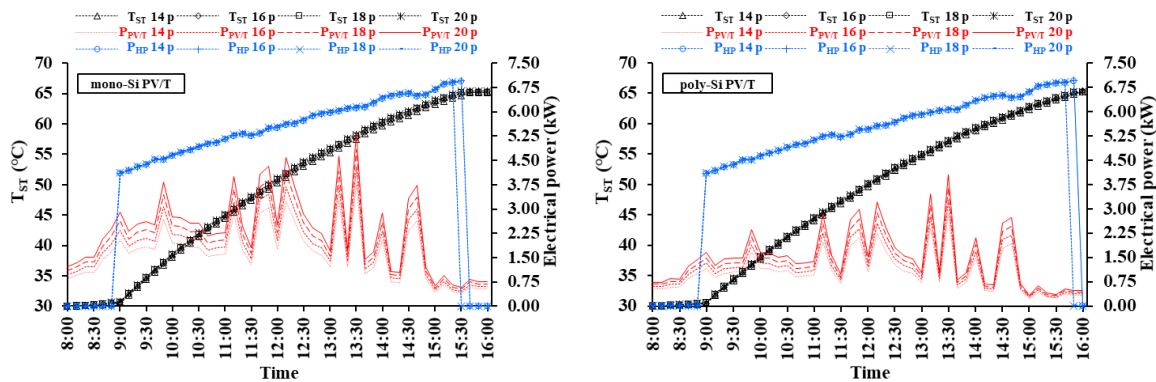
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวันเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปีเพื่อทำนายการทำงานของระบบตลอดทั้งปี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวัน ผู้วิจัยได้ทำการเลือกข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงของวันที่อยู่ในเดือนสิงหาคม ซึ่งเป็นเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุดมาทำการศึกษา ข้อมูลสภาพแวดล้อมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวันแสดงดังรูปที่ 5



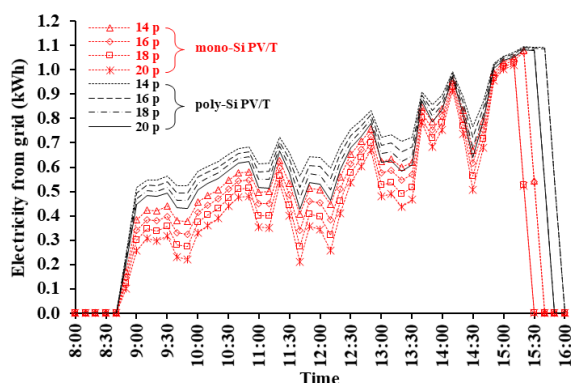
รูปที่ 5 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวัน

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า วันที่อยู่ในเดือนสิงหาคมเป็นวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการบดบังของเมฆ ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเกิดความผันผวนตลอดทั้งวัน โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเฉลี่ย 33.31°C และค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 432.67 W/m^2 จากรูปที่ 6 เมื่อแผง Solar PV/T เริ่มทำงานที่เวลา 8.00 น. ความร้อนที่แผงได้รับจะทำให้อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อปั๊มความร้อนเริ่มทำงานที่เวลา 9.00 น. อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่าในช่วงแรก และปั๊มความร้อนจะหยุดทำงานเมื่อน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิ 65°C โดยระบบที่ใช้แผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิด สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ที่อุณหภูมิ 65°C เวลาในการทำงานของปั๊มความร้อนจะสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อน ซึ่งระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T เล็กน้อย แต่ใช้เวลาในการทำงานสั้นกว่า ในกรณีของระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T การใช้แผงจำนวน 14 แผง และ 16 แผง จะทำให้ปั๊มความร้อนทำงาน 6.50 h/day และจะใช้เวลาทำงานน้อยที่สุด 6.33 h/day หากใช้แผงจำนวน 18 แผง และ 20 แผง กรณีของระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T การใช้แผงจำนวน 14 แผง และ 16 แผง ปั๊มความร้อนจะใช้เวลาทำงานมากที่สุด 6.83 h/day และจะใช้เวลาทำงาน 6.67 h/day หากใช้แผงจำนวน 18 แผง และ 20 แผง เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่าค่าดังกล่าวจะแปรผันตรงกับจำนวนแผง Solar PV/T โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 20 แผง ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด 18.89 kWh/day ขณะที่ระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T จำนวน 14 แผง ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยที่สุด 8.48 kWh/day



รูปที่ 6 อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อน

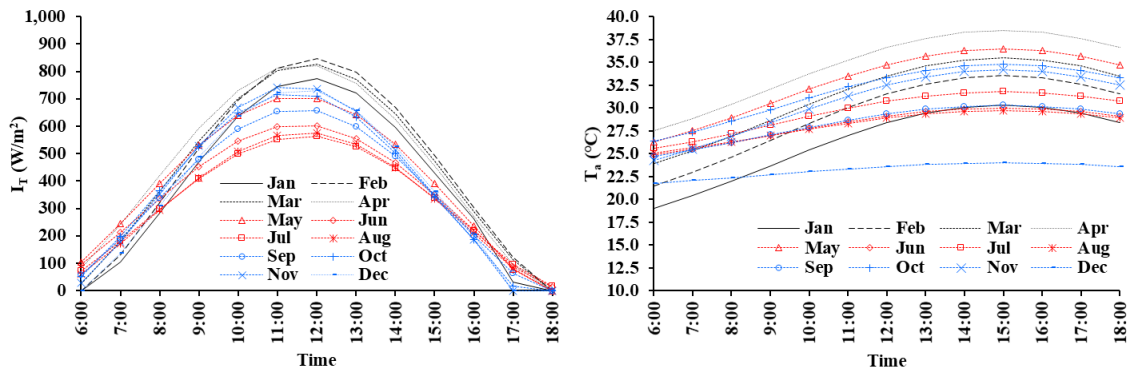
ในขณะที่ปั๊มความร้อนทำงานจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากสองแหล่ง คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง solar PV/T และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะช่วยลดการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ในช่วงที่ปั๊มความร้อนหยุดทำงาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ในส่วนอื่นภายในโรงฆ่าสัตว์ ทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานนอกช่วงเวลาผลิตน้ำร้อนลงได้อีกด้วย พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนแผง ดังแสดงในรูปที่ 7 ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและใช้เวลาผลิตน้ำร้อนน้อยกว่าทุกกรณี โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 20 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 17.62 kWh/day ใช้เวลาผลิตน้ำร้อน 6.33 h/day



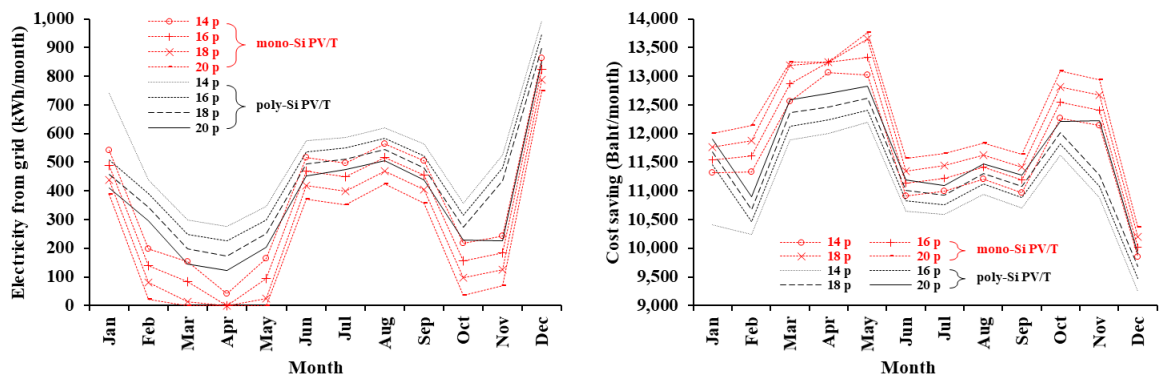
รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปี จะใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมของวันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนของจังหวัดเชียงใหม่มาวิเคราะห์การทำงานของระบบตลอดทั้งปี ข้อมูลสภาพแวดล้อมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปีแสดงดังรูปที่ 8 เห็นได้ชัดเจนว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมากกว่า นอกจากนี้ค่าดังกล่าวยังแปรผกผันกับการเพิ่มจำนวนแผง solar PV/T ดังแสดงในรูปที่ 9 ในเดือนเมษายนระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง 18 แผง และ 20 แผง ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ส่งผลต่อการประหยัดค่าไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์ โดยระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมากที่สุด คือ ระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T จำนวน 14 แผง 6,320.92 kWh/year และระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 20 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 2,767.48 kWh/year ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของผลประหยัดในแต่ละเดือน ยกเว้นเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งมีจำนวนวันทำงานของโรงฆ่าสัตว์น้อย จึงทำให้ผลประหยัดในเดือนนี้มีแนวโน้มแตกต่างไปจากการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ระบบที่ใช้แผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิดนั้นสามารถประหยัดค่าไฟฟ้ารายเดือนให้แก่วงฆ่าสัตว์ได้มากกว่า 9,000 Baht/month ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 20 แผง ช่วยลดค่าไฟฟ้าได้มากที่สุด คือ 147,485.54 Baht/year

น.วันชูเฟลา และ ส.พลวงษ์ศรี



รูปที่ 8 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในแต่ละเดือน

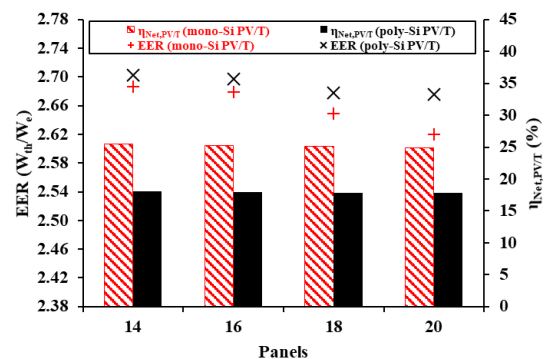


รูปที่ 9 พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและผลประหยัดรายเดือน

อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนเฉลี่ยทั้งปีมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนและชนิดของแผง Solar PV/T ที่ใช้ในระบบ เมื่อใช้แผง Solar PV/T จำนวนมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนลดลงและมีผลกระทบกับแผง mono-Si PV/T มากกว่า ซึ่งมีค่า $2.62-2.69 W_{th}/W_e$ ส่วนระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T มีค่า $2.68-2.70 W_{th}/W_e$ แสดงดังรูปที่ 10 การใช้แผง mono-Si PV/T ทำให้ระบบมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนน้อยกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T เพราะแผง mono-Si PV/T มีสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าแผง poly-Si PV/T ทำให้ปั๊มความร้อนทำงานอยู่ในช่วงผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในถึงเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูง ($T_{ST} - T_a$) เมื่อผลต่างอุณหภูมิดังกล่าวแตกต่างกันมาก อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานจะมีค่าลดลง

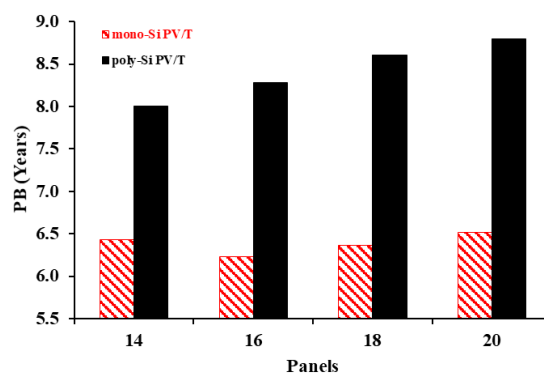
ถึงแม้ว่าแผง mono-Si PV/T จะทำให้ปั๊มความร้อนมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานลดลงเล็กน้อย แต่สามารถ

ทำให้ระบบมีระยะเวลาในการทำงานสั้นลง โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีระยะเวลาทำงาน 5.50-5.58 h ส่วนระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T ทำงาน 5.75-5.92 h การเพิ่มขึ้นของจำนวนแผงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T ลดลงเล็กน้อย แผง mono-Si PV/T มีประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T 24.90-25.48% และแผง poly-Si PV/T มีค่าอยู่ระหว่าง 17.79-18.07%



รูปที่ 10 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนและประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T

ด้วยต้นทุนค่าแผงที่ถูกกว่า ทำให้ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ขณะเดียวกัน ผลประหยัดรายปียังสะท้อนให้เห็นถึง สมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T ทั้งในด้านการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T นั้น มีมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 888,314.00-961,114.00 Baht และมีผลประหยัดรายปี 139,620.30-147,485.54 Baht/years แสดงดังตารางที่ 4 การเพิ่มขึ้นของจำนวนแผงถึงแม้จะทำให้ผลประหยัด รายปีเพิ่มขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นด้วย เช่นกัน ทำให้ระบบมีระยะเวลาคืนทุนนานขึ้น จากรูปที่ 11 ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง เป็นระบบ ที่มีระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุด 6.23 Years สามารถผลิตน้ำ ร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ และมีความคุ้มค่า ทางเศรษฐศาสตร์ โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ระหว่าง 6.23-6.52 Years แตกต่าง จากระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T ที่มีระยะเวลาคืนทุน ระหว่าง 8.01-8.80 Years



รูปที่ 11 ระยะเวลาคืนทุน

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อนำมาใช้ ทดแทนขดลวดไฟฟ้าสำหรับใช้ต้มน้ำ 2,500 L ให้มีอุณหภูมิ 65°C ให้กับโรงฆ่าสัตว์โดยเปรียบเทียบจำนวนของแผง mono-Si และ poly-Si PV/T ที่ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน

ตารางที่ 4 มูลค่าการลงทุนเริ่มต้นและผลประหยัดรายปี

รายการ	จำนวนเงิน			
	14 แผง	16 แผง	18 แผง	20 แผง
mono-Si PV/T				
มูลค่าการลงทุนเริ่มต้น (Baht)	897,732.58	888,314.00	924,714.00	961,114.00
ผลประหยัดรายปี (Baht/year)	139,620.30	142,536.72	145,247.12	147,485.54
poly-Si PV/T				
มูลค่าการลงทุนเริ่มต้น (Baht)	1,051,940.56	1,115,660.56	1,179,380.56	1,234,314.00
ผลประหยัดรายปี (Baht/year)	131,388.47	134,655.22	137,098.90	140,302.84

ผลการศึกษาส่วนแรกเป็นการทดสอบสมรรถนะของ แผง Solar PV/T และทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน จากการทดสอบพบว่า สมการทำนายกำลังไฟฟ้ามีค่า ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.92% และ 6.77% สำหรับแผง mono-Si และ poly-Si PV/T ตามลำดับ สมการทำนาย อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนมีค่า

ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.82% ในส่วนของการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าระบบที่ใช้แผงทั้ง 2 ชนิด สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ ไฟฟ้าพื้นฐานทั้งในช่วงที่ปั๊มความร้อนทำงานและหยุด ทำงานได้ การใช้แผง mono-Si PV/T ช่วยลดภาระการผลิต

น้ำร้อนของปั๊มความร้อนและสามารถลดระยะเวลาการทำงานของปั๊มความร้อนลงได้มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T แต่ขณะเดียวกันก็ทำให้อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนลดลงเล็กน้อย ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อย ทำให้ผลประหยัดรายปีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลดังกล่าวประกอบกับมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ทำให้ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่า ซึ่งการใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน ทำให้ระบบมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด คือ 6.23 Years ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ 31,465.06 kWh/year และคิดเป็นจำนวนเงินที่ประหยัดได้ 142,536.72 Baht/year

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทูสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และทูสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) รวมทั้งขอขอบคุณเทศบาลตำบลเชียงดาว สำหรับข้อมูลและสถานที่เพื่อสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้

6. รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ (m^2)
C	จำนวนเงิน (Baht)
C _p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)
EER	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (W_{th}/W_e)

F_R	Heat removal factor
I_T	ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2)
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
P	กำลังไฟฟ้า (W)
Q	อัตราความร้อน (W)
PB	ระยะเวลาคืนทุน (Year)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
U_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของแผง Solar PV/T ($W/m^2 \cdot K$)

ตัวกรีก

Δt	เวลา (s)
η	ประสิทธิภาพ
$(\tau\alpha)_e$	ประสิทธิภาพเชิงแสงของแผง Solar PV/T

ตัวห้อย

a	Ambient
AC	Alternating current
C	Condenser
Comp	Compressor
f,i	Fluid inlet
f,o	Fluid outlet
Grid	Grid-tied
HP	Heat pump
HX	Heat exchanger
Inv	Investment
Net	Net Efficiency
PV/T	Photovoltaic/Thermal panel
ST	Storage tank
Saving	Cost saving
T	Solar radiation on tilted surface
TC	Critical solar radiation on tilted surface

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579. 2559. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.dede.go.th/download/files/AEDP_2015_Final_version.pdf
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย ปี 2560. 2560. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.dede.go.th/article_attach/developed_solarmap60%20-%20Copy.pdf
- [3] สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์ และ วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์. การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 2562; 14(1): 67-77.
- [4] คอริเยะ, ดุมีแด ซุไรดา สือยู และ ซุลกิพลี กาสอ. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*, 2560; 2(1): 65-75.
- [5] วิทยา ยงเจริญ และ ชววรรณ มาลาหอม. การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบท่อฮีตปัป. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 2554; 8(1): 64-72.
- [6] อาทิตย์ ไชยอรนนทน, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ วารุณี เตีย. การทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2547; 15(2): 31-37.
- [7] มารุต บุรพา, ณัฐนี วยยศ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ สุริยนต์ ชมดี. โมเดลอย่างง่ายของการทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริม. *วารสารคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 2551; 1(2): 15-23.
- [8] สราวุธ พลวงษ์ศรี และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมโดยการใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 2556; 6(2): 106-120.
- [9] Sun, X., Dai, Y., Novakovic, V., Wu, J. and Wang, R. Performance Comparison of Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump and Conventional Air Source Heat Pump for Domestic Hot Water. *Energy Procedia*, 2015; 70: 394-401.
- [10] He, W., Chow, T.T., Ji, J., Lu, J., Pei, G. and Chan, L.S. Hybrid Photovoltaic and Thermal Solar-Collector Designed for Natural Circulation of Water. *Applied Energy*, 2006; 83: 199-210.
- [11] Aste, N., Del Pero, C. and Leonforte, F. Water PVT Collectors Performance Comparison. *Energy Procedia*, 2017; 105: 961-966.
- [12] Yang, X., Sun, L., Yuan, Y., Zhao, X. and Cao, X. Experimental Investigation on Performance Comparison Of PV/T-PCM System And PV/T System. *Renewable Energy*, 2018; 119: 152-159.
- [13] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ ระดับตำบล ปี 2560. 2560. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47941&filename=solar_energy
- [14] Duffie, J.A. and Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [15] ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ. สถิติภูมิอากาศเชียงใหม่. 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.cmnet.tmd.go.th/>

- [16] Chaichana, C., Kiatsiroat, T. and Nuntaphan, A. 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*, 2010; 31(5): 419-429.
- [17] Wanchupela, N. and Polvongsri, S. The Comparison Study of Performance between Two Different Types of Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels. *The 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology 2020*, May 28-29, Diamond Plaza Hotel, Suratthani, Thailand, 2020.