



**การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน  
 เสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์  
 เพื่อลดต้นทุนด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์**  
**Experimental performance of hot water production  
 by solar PV/T boosted heat pump system for electric  
 power costs reduction in a slaughterhouse**

Saysana Chanthaseng และ สุลักษณา มงคล\*

Saysana Chanthaseng and Sulaksana Mongkon\*

หน่วยงานวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 50290 เชียงใหม่

Smart Energy and Environmental Research Unit, School of Renewable Energy,

Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

\*E-mail: s\_mongkon@hotmail.com , Tel.: 081-907-4067

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ ใช้ปั๊มความร้อนขนาดประมาณ 17.8 kW<sub>th</sub> ใช้ R134a เป็นสารทำงาน ให้ความร้อนเสริมในส่วนทำระเหยจากน้ำร้อนที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 295 Wp จำนวน 4 แผง และปั๊มความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 Wp จำนวน 14 แผง เพื่อผลิตน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L เพื่อช่วยลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการและชุดขนสุกรที่ต้องการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 65°C จากการทดสอบพบว่า ปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เฉลี่ย 3.17 kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub> สูงกว่าปั๊มความร้อนที่ไม่มีให้ความร้อนเสริม (Heat pump) ที่มีค่า EER เฉลี่ย 2.79 kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub> และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ 59.28% ในด้านการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการและชุดขนสุกร สามารถลดค่า SEC จากเดิม 7.27 kWh/ตัว ลดลงเหลือ 1.82 kWh/ตัว หรือคิดเป็นต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าจาก 33.15 บาท/ตัว เหลือ 8.29 บาท/ตัว สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบสายส่งพื้นฐานลงได้ 75% (27,501.92 kWh/ปี) คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลดลง 125,408.64 บาท/ปี โดยระบบลงทุนเป็นเงิน 708,060 บาท มีระยะคืนทุน 6.07 ปี อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 15.56%

**คำสำคัญ:** แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์; ปั๊มความร้อน; น้ำร้อน; การลดต้นทุนด้านพลังงาน; สมรรถนะ

## ABSTRACT

This research presents the experimental performance of hot water production by solar PV/T boosted heat pump system in actual use in a slaughterhouse at Chai Prakan District, Chiang Mai Province. The system consists of a heat pump of 17.8 kW<sub>th</sub>, using R134a as a refrigerant. At the heat pump evaporator, the additional heat was supplied from a glazed solar photovoltaic thermal panel (PV/T) which peak power was 295 W<sub>p</sub> amounts 4 panels. The heat pump was powered by 14 panels of the solar photovoltaic panel which each peak power was 370 W<sub>p</sub> for hot water production in the storage tank of 3,000 liters for use in the scalding and scraping of pigs processing that required hot water was approximately 65°C. The results showed that the overall efficiency of solar PV/T boosted heat pump was equal to 59.28%, moreover, the average energy efficiency ratio (EER) was 3.17 kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub> which was higher than the heat pump without solar PV/T with an average EER was 2.79 kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub>. For the electric cost analysis of the scalding and scraping process, the specific energy consumption (SEC) could be reduced from 7.27 kWh/pig to 1.82 kWh/pig, or a cost was reduced from 33.15 Baht/pig to 8.29 Baht/pig. In overview, the used electric power from grid line was reduced about 27,501.92 kWh/year, which was equivalent to 125,408.64 baht/year or about 75% of electric power cost compared with the only electrical heater use. The system cost invested 708,060 Baht, so the payback period was equal to 6.07 years and the internal rate of return (IRR) was 15.56%, respectively.

**Keywords:** Solar photovoltaic thermal panel; Heat pump; Hot water; Electric power costs reduction; Performance

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตน้ำร้อนส่วนมากนิยมใช้ขดลวดความร้อนเนื่องจากหาง่ายและราคาถูก แต่ต้องแลกมาซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง ในกระบวนการและชุดขนสุกรของโรงฆ่าสัตว์ทั่ว ๆ ไปและที่โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 27 kW เพื่อผลิตน้ำร้อนปริมาณ 2,500 ลิตรต่อวันที่อุณหภูมิประมาณ 60-64°C สำหรับลวกสุกรประมาณ 40 ตัวต่อวัน จากการเก็บข้อมูลพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้า 117.53 kWh/รอบการผลิต และข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้าพบว่าปี พ.ศ. 2561 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 108,894 kWh/year คิดเป็นค่าใช้จ่าย 493,581.60 Baht/year จำนวนสุกรลวกในกระบวนการ 15,027 ตัว/year คิดเป็นค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร (SEC) 7.27 kWh/ตัว หรือ 33.15 Baht/ตัว ในขณะที่มีการเรียกเก็บเฉพาะในส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 40 Baht/ตัว แนวทางการลดต้นทุนด้าน

พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์มีหลากหลายแนวทาง เช่น การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ [1] หรือเทคโนโลยีที่นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้ามาติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้าไปด้านหลังแผงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผงไปสู่ลำน้ำทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีอุณหภูมิแผงลดลงช่วยให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [2] สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ [3] ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวเรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) นอกจากนี้ยังมีการใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อนที่พบว่าใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าขดลวดความร้อนประมาณ 2-3 เท่า [4] และยังมีหลายงานวิจัยที่มีการนำเอาปั๊มความร้อนและแผงผลิตไฟฟ้าและ

น้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มาทำงานร่วมกันเรียกว่า ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวถูกพัฒนาจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีรูปแบบการทำงานของระบบก็คือใช้ความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน และเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ปั๊มความร้อนอีกด้วย ดังงานวิจัยของ วงศ์สุวรรณค์ และ ทนงเกียรติ [5] Bakirci and Yuksel [6] Burkner and Riffer [7] เป็นต้น โดยงานวิจัยของ วิวัฒน์ และทนงเกียรติ [8] ได้ทำการใช้ปั๊มความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโพลีพรอพิลีนผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 40-50°C แทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า โดยใช้ปั๊มความร้อนขนาด 12 kW ใช้สารทำงาน R-22 พบว่าระบบดังกล่าวใช้กำลังไฟฟ้าลดลง 50% เทียบกับการใช้ขดลวดไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำน้ำร้อน ( $COP_{HP}$ ) มีค่าประมาณ 2.5-5 Anderson et al [9] ทดสอบปั๊มความร้อนที่ใช้แหล่งความร้อนจากอากาศ โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่มีกระจกเป็นเครื่องระเหย พบว่าในวันที่สภาพอากาศแจ่มใสค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบอยู่ระหว่าง 5-7 Chaichana et al [10] ได้จำลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำนวน 1-5 แผง ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนคือ 300-1,200 L ปั๊มความร้อนใช้สารทำงานแบบผสม R22 20% R124 57% และ R152a 23% เป็นสารทำงาน พบว่าระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุดที่ 60°C และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 4.1-4.6 Wang et al [11] ทดสอบปั๊มความร้อนที่เสริมด้วยความร้อนจากสองแหล่งคือ อุณหภูมิแวดล้อมและแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยที่ 4.08 ในด้านการลดพลังงานไฟฟ้ามีงานวิจัยของ ณัฐพงศ์ และโสภิตสุดา [12] ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาติดตั้งบนหลังคา 10 อาคารจากทั้งหมด 183 อาคารในมหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์เพื่อลด

ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานได้ถึงประมาณ 10.97%

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นส่วนมากได้กล่าวถึงการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อน และการใช้เทคโนโลยีทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์เข้าช่วยในการลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ปั๊มความร้อนเข้ามาผลิตน้ำร้อนแทนที่การใช้ขดลวดความร้อนร่วมกับการใช้แผง Solar PV/T เข้ามาช่วยเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อน และใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาช่วยในการลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า “ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump)” โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ก็คือ การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ Solar PV/T boosted heat pump และการลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าของกระบวนการผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ

## 2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้ ดังนี้

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{I_T A_{PV}} \quad (1)$$

เมื่อ  $\eta_{PV}$  คือ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์,  $P_{PV}$  คือ กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W),  $I_T$  ค่ารังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ ) และ  $A_{PV}$  คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $m^2$ )

### 2.2 แผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้ ดังนี้

$$Q_{PV/T} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (2)$$

ประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้ ดังนี้

$$\eta_{PV/T} = \frac{P_{PV/T} + Q_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad (3)$$

เมื่อ  $\eta_{PV/T}$  คือ ประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์,  $Q_{PV/T}$  คือ การถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (W),  $P_{PV/T}$  คือ กำลังไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (W),  $\dot{m}_f$  คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง (kg/s),  $C_{p,f}$  คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (J/kg·K),  $T_{f,i}$  อุณหภูมิน้ำเข้าแผง (°C),  $T_{f,o}$  อุณหภูมิน้ำออกแผง (°C) และ  $A_{PV/T}$  คือ พื้นที่แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (m<sup>2</sup>)

### 2.3 บีบความร้อน

เครื่องควบแน่น (Condenser) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{Cond} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{Cond,o} - T_{Cond,i}) \quad (4)$$

เนื่องจากระบบบีบความร้อนใช้น้ำเป็นตัวถ่ายเทความร้อน จึงใช้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของบีบความร้อน (Energy Efficiency Ratio; EER) ที่เป็นอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ สามารถคำนวณได้จาก

$$EER_{HP} = \frac{Q_{Cond}}{P_{Comp}} \quad (5)$$

เมื่อ  $EER_{HP}$  คือ ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของบีบความร้อน (kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub>),  $Q_{Cond}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่เครื่องควบแน่น (kW<sub>th</sub>),  $P_{Comp}$  คือ ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (kW<sub>e</sub>)

### 2.4 ประสิทธิภาพรวมระบบ

อัตราการความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนในกรณีที่ถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวนอย่างดีและไม่มีการนำน้ำร้อนไปใช้งาน สามารถหาได้จาก

$$Q_S = M_S C_{p,f} \frac{(T_S^{t+\Delta t} - T_S^t)}{\Delta t} \quad (6)$$

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ไฟฟ้าในระบบผลิตน้ำร้อนด้วยบีบความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้จาก

$$P_{Total} = P_{Comp} + P_{fan} + P_{Pump,HP} + P_{Pump,PV/T} \quad (7)$$

ประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยบีบความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้ ดังนี้

$$\eta_{sys} = \frac{Q_S + (P_{PV} + P_{PV/T})}{I_T (A_{PV} + A_{PV/T}) + (P_{Total})} \quad (8)$$

### 2.5 ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) คือ ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน สามารถคำนวณได้จาก

$$SEC = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานต่อปี}}{\text{ปริมาณผลผลิตต่อปี}} \quad (9)$$

## 3. หลักการทำงานและวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์ทดลอง

ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยบีบความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ บีบความร้อน แผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถังเก็บน้ำร้อน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งขนาด

และจำนวนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ได้จากข้อมูลเบื้องต้นของโรงฆ่าสัตว์

### 3.2 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากน้ำร้อนที่ผลิตได้จากแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 4 แผงที่ต่อขนานกันจะถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานที่ออกจากวาล์วลดความดันของปั๊มความร้อน (Expansion valve) โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หลังจากนั้นสารทำงานจะผ่านเครื่องระเหย (Evaporator) และส่งต่อไปที่เครื่องอัดไอ (Compressor) ที่ทำหน้าที่อัดเพิ่มความดัน

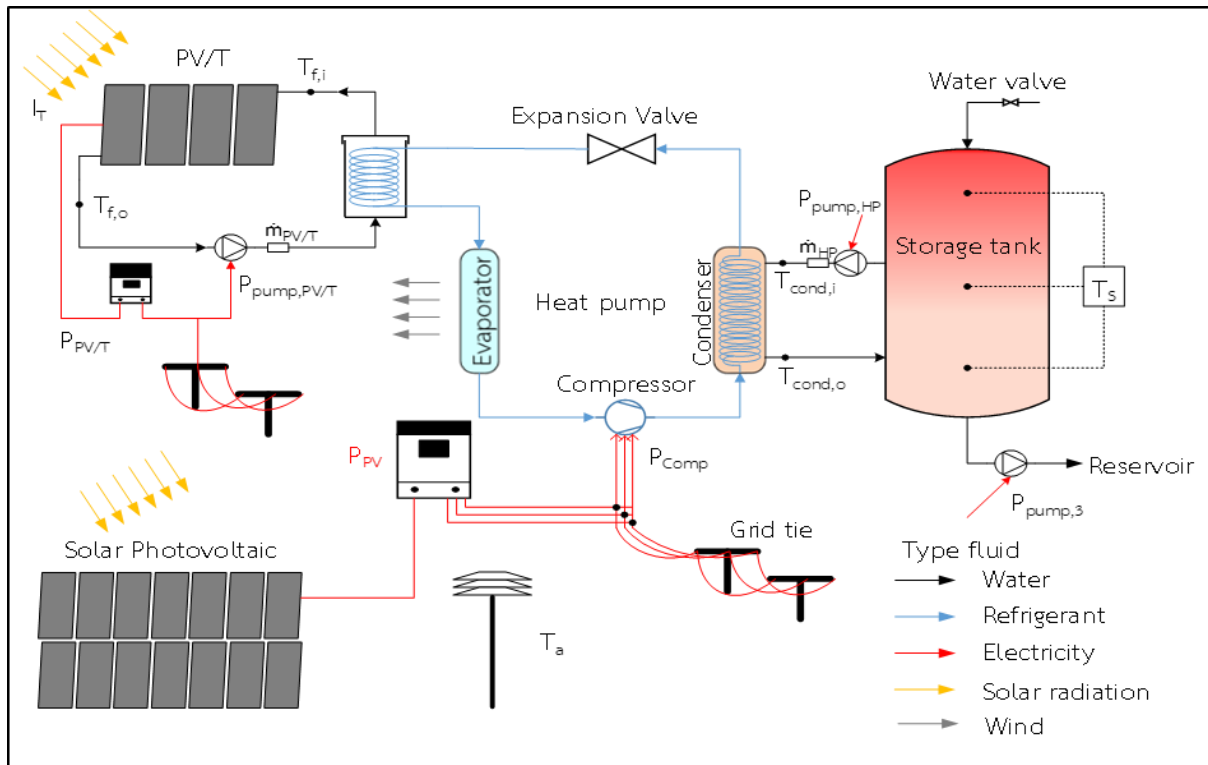
ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานสูงขึ้นและส่งไปต่อเครื่องควบแน่น (Condenser) ที่มีหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนโดยผ่านปั๊มหมุนเวียนน้ำร้อน ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในจำนวน 4 แผง ที่ต่อขนานกัน และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 14 แผง โดยแบ่งเป็น 2 ชุด คือ แต่ละชุดต่ออนุกรมกัน 7 แผง แล้วนำเอาทั้ง 2 ชุดมาต่อขนานกันเพื่อผลิตไฟฟ้าและป้อนให้กับเครื่องอัดไอและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ โดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอจะมีการดึงไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานเข้ามาช่วยในการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบดังกล่าว

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ทดลอง	จำนวน	ข้อมูลเทคนิค
ปั๊มความร้อน	1 เครื่อง	17.8 kW <sub>th</sub> ใช้สารทำงาน R134a
แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบ (Glazed PV/T)	4 แผง	ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว ขนาด 1,678 x 1,012 x 80 (mm) ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 295 Wp
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	14 แผง	ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว 1,956 x 992 (mm) V <sub>m</sub> = 39.5 V, I <sub>m</sub> = 9.28 A V <sub>oc</sub> = 48.5 V, I <sub>sc</sub> = 9.61 A ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 Wp
ถังเก็บน้ำร้อน	1 ถัง	ขนาด 3,000 L
อินเวอร์เตอร์	2 เครื่อง	1. สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Invt รุ่น iMars BG5KTR สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5,000 W 2. สำหรับระบบ Solar PV/T ยี่ห้อ Invt รุ่น iMars MG1K5TL สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1,500 W
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	1 เครื่อง	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.54 m <sup>2</sup>
ปั๊มเวียนน้ำผ่านแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	1 เครื่อง	อัตราการไหลสูงสุด 13 L/min ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 93 W

ตารางที่ 1 (ต่อ) ข้อมูลทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ทดลอง	จำนวน	ข้อมูลเทคนิค
ปั๊มเวียนน้ำระหว่างปั๊มความร้อนและถังเก็บน้ำร้อน	1 เครื่อง	อัตราการไหลสูงสุด 40 L/min ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 W



รูปที่ 1 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

### 3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้มีการแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งระยะเวลาดำเนินการทดสอบคือ ช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม 2562 มีรายละเอียดดังนี้

**ส่วนที่ 1** ทำการทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อนทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 ก่อนจะนำไปติดตั้งร่วมกับปั๊มความร้อน [13] ทำการทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

**ส่วนที่ 2** เมื่อทำการติดตั้งระบบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จากนั้นจะทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน (Heat pump) โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทดสอบปั๊มความร้อนไม่มีการให้ความร้อนเสริม(Heat pump) ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 65°C ควบคุมอัตราการไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนที่ 30 L/min ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L (ปริมาณน้ำในถัง 2,500 L) และกรณีที่ 2 ทดสอบปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) ทำการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 65°C ใช้อัตราการไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊ม

ความร้อนที่ 30 L/min ควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 4 แผง ต่อขนานกันที่ 8.2 L/min ปริมาณน้ำในถังที่ใช้ในการทดสอบคือ 2,500 L เพื่อทดสอบหาสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

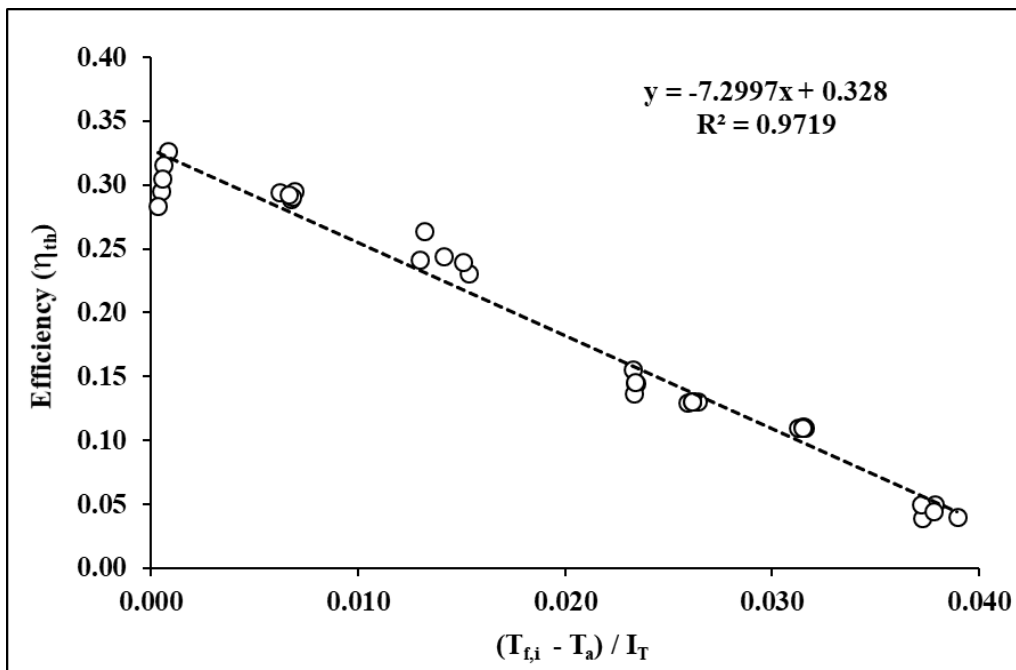
**ส่วนที่ 3** ทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump ที่ทำงานตามการใช้งานจริงซึ่งทางโรงฆ่าสัตว์มีความต้องการใช้น้ำร้อน 2,500 L ที่อุณหภูมิประมาณ 65 °C ในช่วงเวลา 12.30 น. (เริ่มกระบวนการลวกและชุบขนสุกร เดิมมีการผลิตน้ำร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 6.00 – 10.30 น.) ควบคุมอัตราการไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนที่ 30 L/min อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ขนาด 295 Wp จำนวน 4 แผงต่อขนานกันที่ 8.2 L/min และใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 370 Wp จำนวน 14 แผง ผลิตไฟฟ้าป้อนให้แก่ปั๊มความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆในระบบร่วมกับไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน โดยผลการทดสอบในส่วนนี้จะ

วิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตและพลังงานไฟฟ้าที่สามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม

#### 4. ผลการศึกษา

##### 4.1 สมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

**ส่วนที่ 1** ทำการทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อนทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงตามมาตรฐานการทดสอบที่ 0.02 kg/s·m<sup>2</sup> ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิที่เข้าแผง Solar PV/T สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น สมรรถนะของแผง Solar PV/T มีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e = 0.328$  และค่า  $F_{RUL} = 7.2997$  W/m<sup>2</sup>·°C [14]

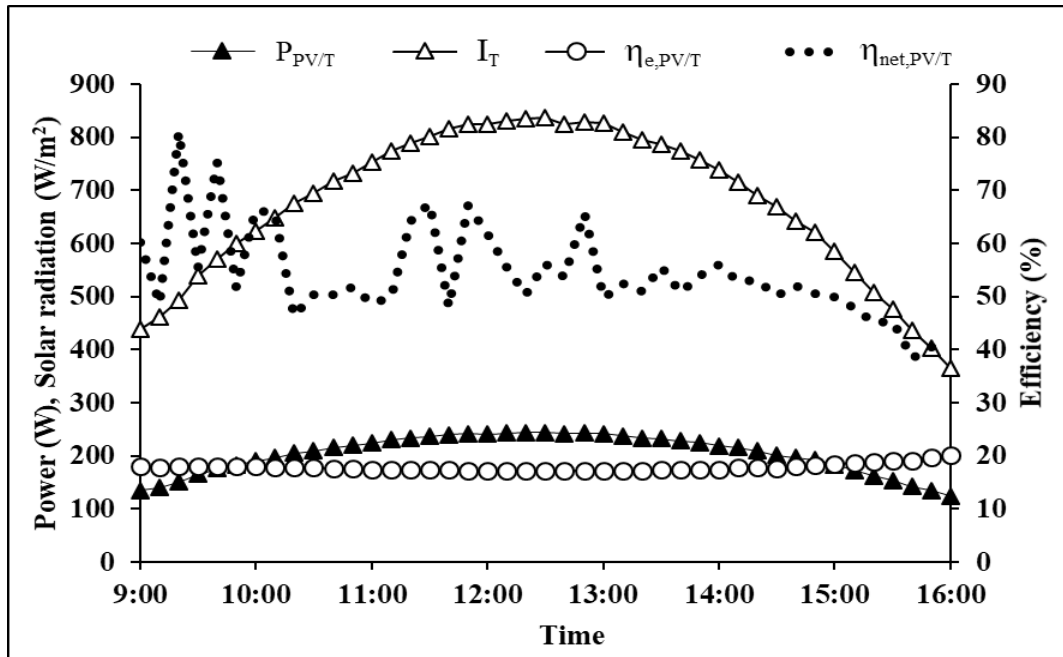


รูปที่ 2 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผง Solar PV/T

จากรูปที่ 3 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ขนาดกำลังผลิต 295 Wp ตั้งแต่เวลา 9.00–16.00 น.

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุดที่ 244 W ในช่วงเวลา 12.20 น. และมีค่าเฉลี่ย

204 W คิดเป็นประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 17.4% และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ตลอดทั้งวันพบว่ามามีค่าเฉลี่ย 53.3%



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T

สมรรถนะของแผง Solar PV/T ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบระบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเก็บข้อมูลตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งอุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง ค่ำรังสีอาทิตย์ เพื่อนำมาสร้างสมการในการออกแบบขนาดของระบบที่เหมาะสม รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4 โดยจะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ประกอบไปด้วย ค่ำรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิน้ำเข้าแผง และอุณหภูมิแผง ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

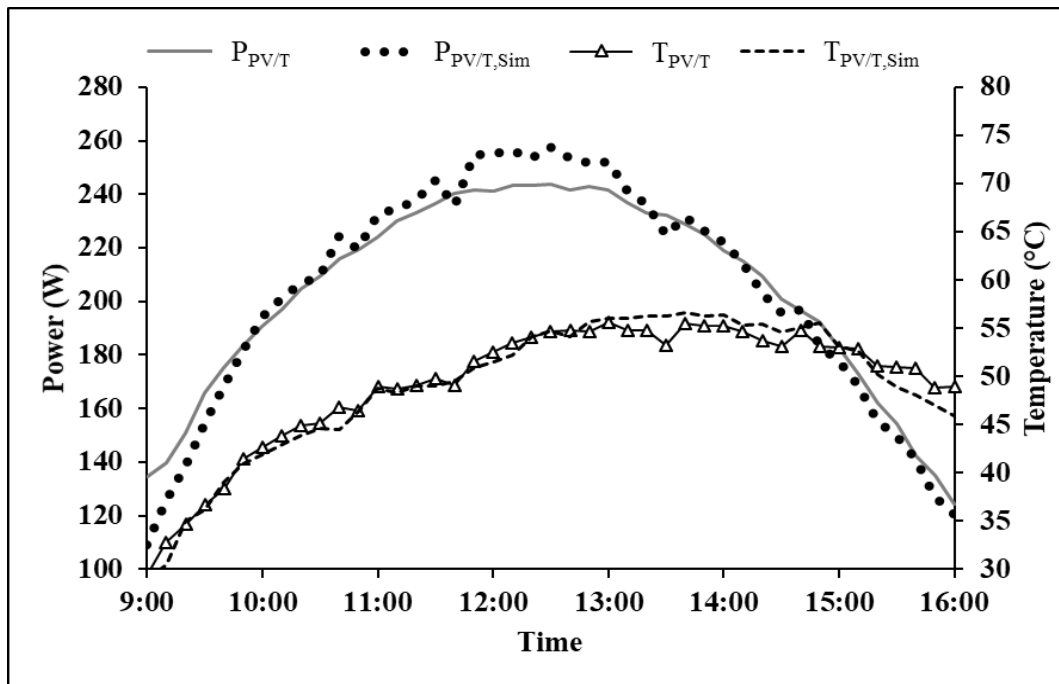
$$T_{PV/T,Sim} = 0.05831 \times (I_T^{0.27576}) \times (T_a^{1.5262}) \times (T_{f,i}^{-0.092972}) \quad (10)$$

$$P_{PV/T,Sim} = 0.82707 \times (T_a^{-0.47834}) \times (T_{f,i}^{-0.47705}) \times (T_{PV/T}^{1.3394}) \quad (11)$$

โดยอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงที่ 0.02 kg/s-m<sup>2</sup> และอุณหภูมิที่ใช้งานได้อยู่ระหว่าง 25-65°C

เมื่อได้สมรรถนะทั้งด้านไฟฟ้าและความร้อนของแผง Solar PV/T แล้วคณะผู้วิจัยใช้ข้อมูลสภาพอากาศทั้งค่ำรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของเดือนที่มีค่าต่ำสุดเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบ โดยพบว่าระบบที่ใช้ออกแบบแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย ปุ่มความร้อน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผง Solar PV/T ถังเก็บน้ำร้อน เป็นต้น โดยรายละเอียดแสดงดังหัวข้อ 3.1 และ 3.2





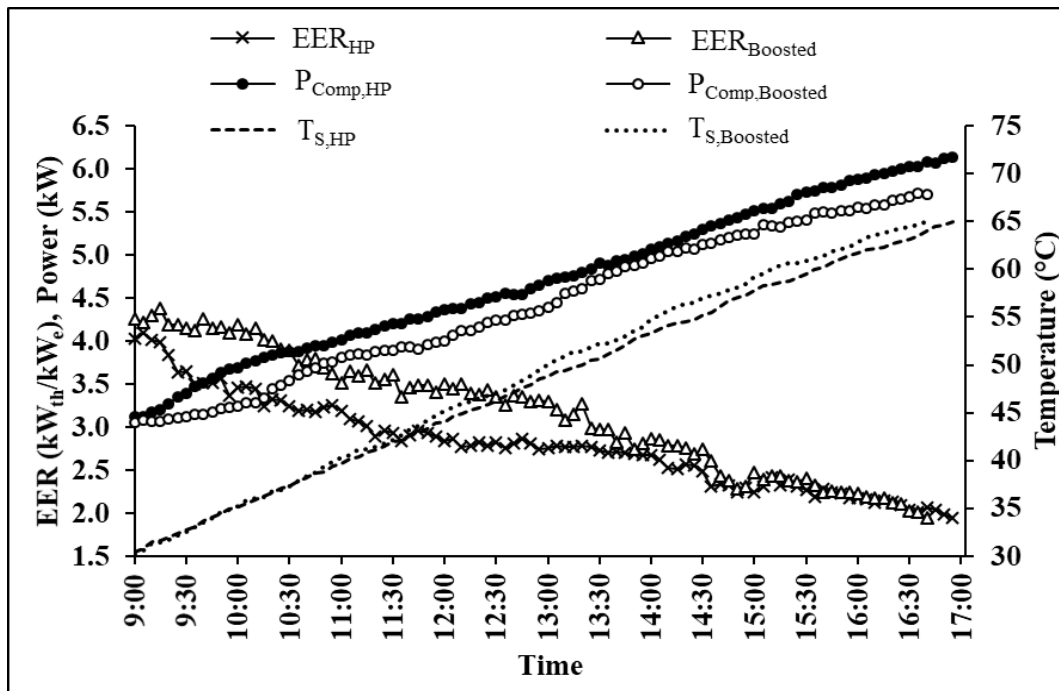
รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผงที่ได้จากการทดลองแผง Solar PV/T และจากการทำนาย

#### 4.2 สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ใน ส่วนที่ 2 เมื่อทำการติดตั้งระบบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จากนั้นจะทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน (Heat pump) โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีปั๊มความร้อนไม่มีการให้ความร้อนเสริม(Heat pump) และกรณีทดสอบปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ซึ่งทำการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 65°C ควบคุมอัตราการไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนที่ 30 L/min ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L (เติมน้ำในถัง 2,500 L) ทำการทดสอบตั้งแต่วันที่ 9.00 น. จนถึงอุณหภูมิ 65°C

จากการทดสอบการทำงานของปั๊มความร้อน (Heat pump) และปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) ของทั้งสองระบบจะมีค่าที่

สูงในการทำงานช่วงแรกและลดลงเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสูงขึ้นส่งผลให้การระบายความร้อนของสารทำงานในส่วนระบายความร้อนลดลง กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดจึงมีค่าสูงขึ้นไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองระบบพบว่า ระบบ Solar PV/T boosted heat pump กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดจะมีค่าระหว่าง 3.05-5.71 kW คิดเป็นเฉลี่ย 4.40 kW ทำให้มีค่า EER สูงสุด 4.37  $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$  คิดเป็นค่าเฉลี่ยคือ 3.17  $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$  ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีปั๊มความร้อนที่ไม่มีระบบ Solar PV/T ที่มีค่า EER สูงสุดที่ 4.09  $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$  คิดเป็นค่าเฉลี่ยได้ 2.79  $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$  ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอมีค่า 3.12-6.13 kW คิดเป็นค่าเฉลี่ย 4.71 kW ดังนั้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของระบบ Solar PV/T boosted heat pump สูงกว่าระบบ Heat pump เนื่องจาก การให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนเสริมในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนช่วยให้สารทำงานเดือดเป็นไอที่อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอต้องใช้น้อยลงนั่นเอง



รูปที่ 5 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

#### 4.3 สมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump ที่ใช้งานจริง

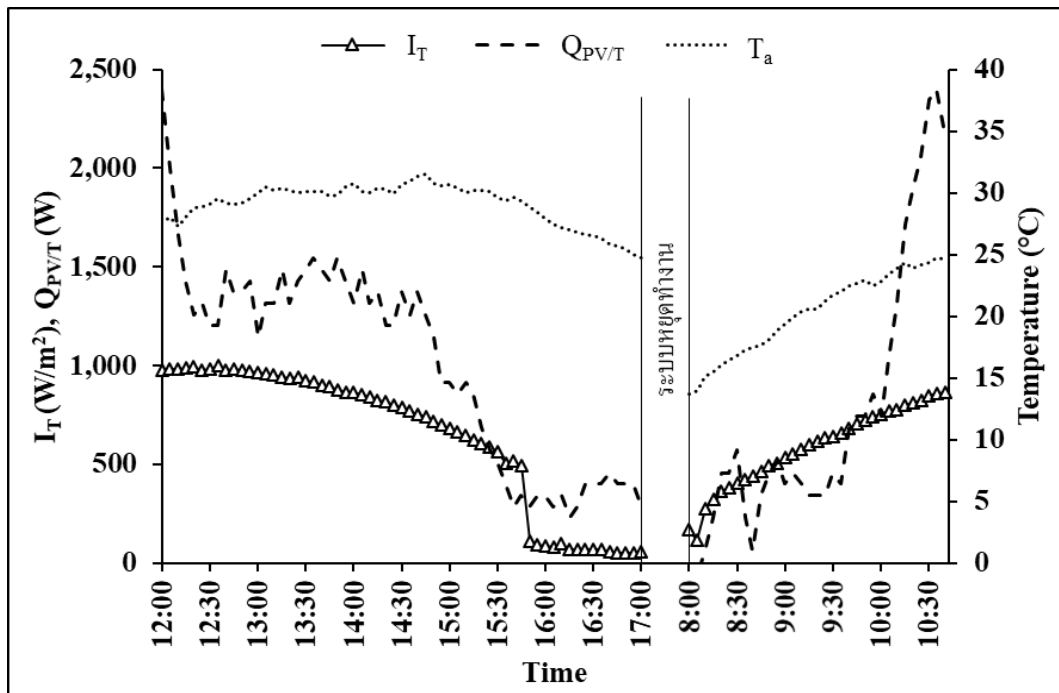
เดิมโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการได้ใช้ขดลวดความร้อน (Heater) ขนาด 27 kW ในการผลิตน้ำร้อนโดยทำงานตั้งแต่เวลา 06.00–10.30 น. หรือใช้เวลาประมาณ 4.5 h คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้คือ 117.53 kWh/day เพื่อผลิตน้ำร้อนให้ทันใช้งานในเวลา 12.30 น. การทดสอบระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) ในการใช้งานจริงจึงต้องมีการกำหนดเวลาการทำงานของระบบให้สอดคล้องกับการใช้งาน ดังนั้นระบบจึงเริ่มทำงานตั้งแต่เวลา 12.00-17.00 น. เพื่อผลิตน้ำร้อนเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อน และจะเริ่มทำงานต่ออีกครั้งในช่วงเช้าของวันถัดไปคือตั้งแต่เวลา 8.00 น. จนถึงเวลาประมาณ 11.00 น. จนได้อุณหภูมิน้ำร้อน 65°C จากนั้นจึงส่งน้ำร้อนที่ผลิตได้ไปยังเครื่องลวกและชุดชงโดยใช้เวลาประมาณ 40 นาที ซึ่งระบบจะสามารถกลับมาผลิตน้ำร้อนต่อได้ในเวลาไม่เกิน 12.00 น. จากการทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าในวันที่ทดสอบมีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดที่ 998 W/m<sup>2</sup> ในเวลา 12.35 น. อุณหภูมิ

แวดล้อมเฉลี่ย 25.9°C ความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 922.25 W/day หรือคิดเป็นความร้อนที่ผลิตได้ต่อวัน 26 MJ/day เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องระเหยของปั๊มความร้อน

จากรูปที่ 7 ระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump เริ่มทำงานในเวลา 12.00 น. อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 30.4°C เมื่อระบบเริ่มทำงานพบว่าช่วงแรก ความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้จะมีสูงสุดประมาณ 14.44 kW และจะลดลงเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อเวลา 17.00 น. รวมระยะเวลาทำงาน 5 h ระบบหยุดจะทำงานสามารถผลิตน้ำร้อนได้ที่อุณหภูมิ 55.2°C และในวันถัดไประบบจะเริ่มทำงานในเวลา 08.00–10.40 น. ความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ก็ยังคงลดลงตามอุณหภูมิน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อระบบหยุดทำงานในเวลา 10.40 น. สามารถผลิตน้ำร้อนขนาด 2,500 L ได้ที่อุณหภูมิ 65.5°C รวมใช้เวลาทั้งสิ้น 7 h 40 min หรือคิดเป็นค่าความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อนผลิตได้ใน 1 รอบการผลิต 367.4 MJ/รอบ จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดยมีค่าตั้งแต่ 3.55-5.67 kW หรือคิดเป็นพลังงานเชิงความร้อน 72.37 MJ/รอบ ในขณะที่ความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์คิดเป็น 741.93 MJ/รอบ ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เริ่มต้นมีค่าสูงสุดที่ 3.99 kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub> และลดลงต่ำสุด 2.23

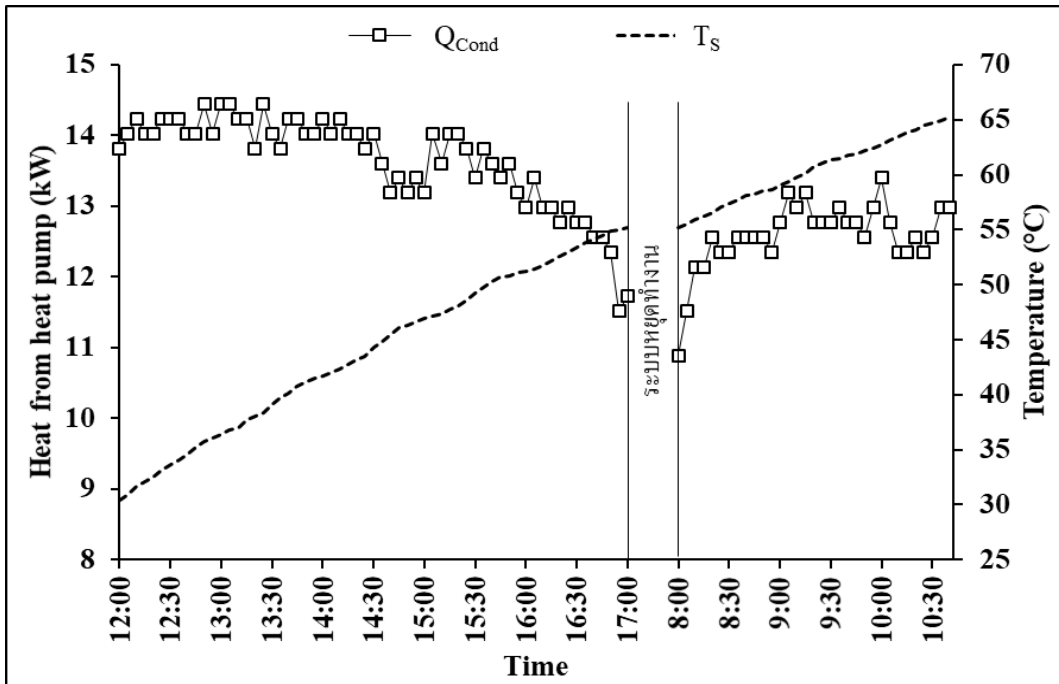
kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub> หรือเฉลี่ยตลอดการทำงาน 2.97 kW<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub> หรือคิดเป็นประสิทธิภาพรวมของระบบ Solar PV/T boosted heat pump ( $\eta_{sys}$ ) 59.28%



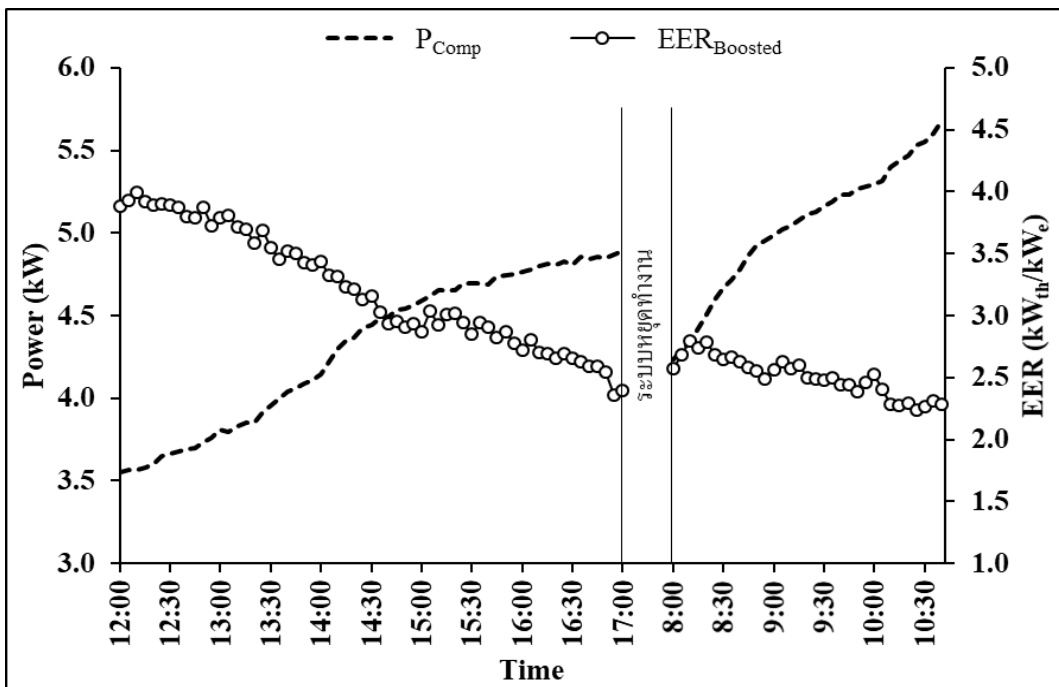
รูปที่ 6 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และความร้อนที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T

นอกจากนี้ในส่วนการพิจารณาเรื่องกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ปั๊มความร้อนต้องการและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อความต้องการของปั๊มความร้อน รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump ต้องการมีค่าตั้งแต่ 4.13-6.26 kW (รวมกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในปั๊มน้ำทุกตัวและอุปกรณ์อื่น ๆ หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ระบบต้องการ 40.32 kWh/รอบการผลิต) ซึ่งสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

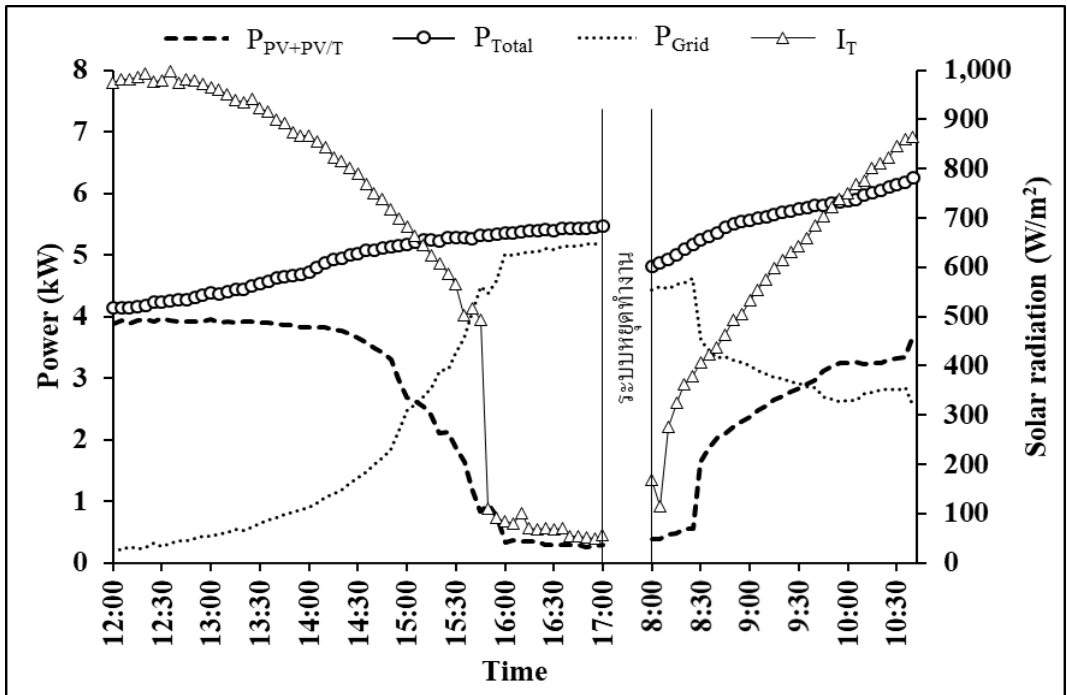
จากทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์รวมกับระบบ Solar PV/T ในทุก ๆ ช่วงเวลาของการทำงาน โดยมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด 3.98 kW และต่ำสุด 0.25 kW ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ารังสีอาทิตย์ โดยตลอดทั้งรอบการผลิตคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 20.10 kWh/รอบการผลิต ดังนั้นระบบนี้จึงต้องการไฟฟ้าจากระบบระบบสายส่งพื้นฐานพื้นฐานเข้ามาช่วย 20.22 kWh/รอบการผลิต โดยเฉพาะในช่วงที่ค่ารังสีอาทิตย์ต่ำระบบจะใช้ไฟฟ้าจากระบบระบบสายส่งพื้นฐานพื้นฐานมากขึ้น



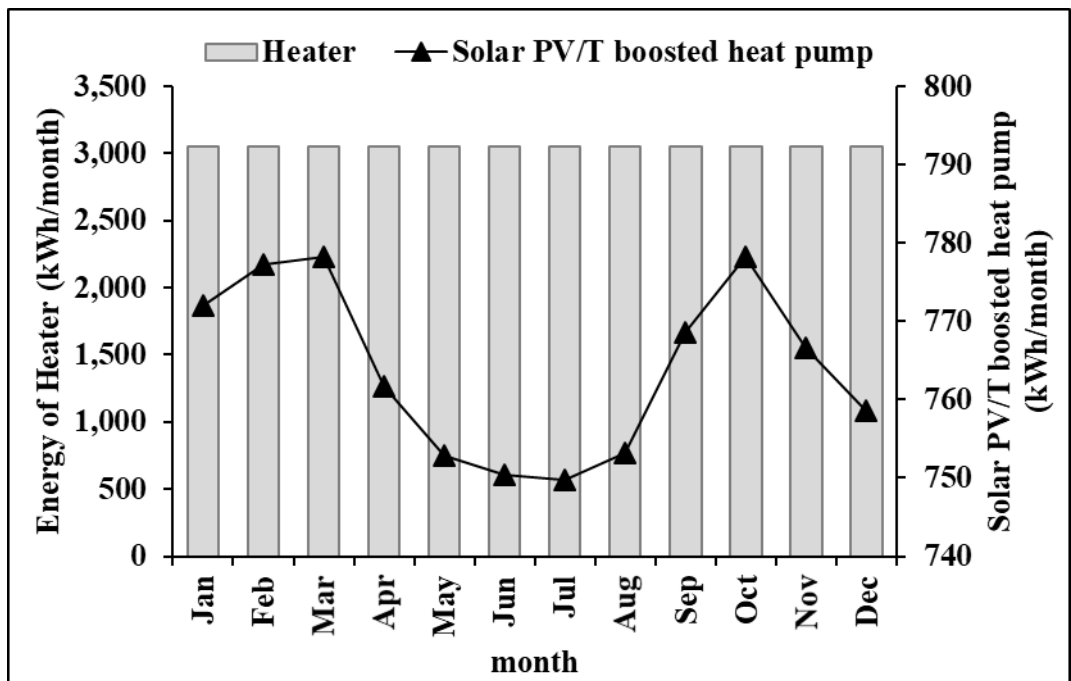
รูปที่ 7 อุณหภูมิในถังและความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้



รูปที่ 8 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบสายส่งพื้นฐานและผลิตได้ของระบบ Solar PV/T boosted heat pump



รูปที่ 10 การใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนของระบบ Solar PV/T boosted heat pump และ Heater

จากการทดลองทั้งหมดและการวิเคราะห์พบว่า เดิมทางโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า 117.53 kWh/รอบการผลิต หรือ 36,669.36 kWh/year คิดเป็นค่าใช้จ่าย 167,212.28 Baht/year หลังจากเปลี่ยนมาใช้ระบบ Solar

PV/T boosted heat pump จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเหลือ 9,167.47 kWh/year แสดงดังรูปที่ 10 คิดเป็นค่าใช้จ่าย 41,803.65 Baht/year สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 75% และทำให้มีผลประหยัด 27,501.92 kWh/year หรือคิดเป็นค่าใช้จ่าย 125,408.64 Baht/year

ส่วนทางด้านค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร (SEC) จากเดิมคือ 7.27 kWh/ตัว ลดลงเหลือ 1.82 kWh/ตัว หรือหากคิดเป็นค่าใช้จ่ายจากเดิมคือ 33.41 Baht/ตัว ลดลงเหลือ 8.29 Baht/ตัว ซึ่งระบบ Solar PV/T boosted heat pump ใช้เงินลงทุนทั้งหมดไปประมาณ 708,060 Baht ทำให้มีระยะคืนทุน 6.07 year มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) คิดอัตราดอกเบี้ย 6.22% ได้ NPV คือ 606,109.75 Baht และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 15.56% รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV/T boosted heat pump

รายละเอียด	Heater	Solar PV/T boosted heat pump
พลังงานเฉลี่ย (kWh/day)	117.53	29.38
พลังงานต่อปี (kWh/year)	36,669.36	9,167.47
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (Baht/kWh)	4.56	4.56
ค่าใช้จ่าย (Baht/year)	167,212.28	41,803.65
ผลประหยัดได้ (kWh/year)	27,501.92 (ลดลง 75%)	
ผลประหยัดได้ (Baht/year)	125,408.64	
เงินลงทุน (Baht)	708,060	
ระยะคืนทุน (year)	6.07	
NPV (Baht)	606,109.75	
IRR	15.56%	
SEC (kWh/ตัว)	7.27	1.82
SEC (Baht/ตัว)	33.15	8.29

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการlovak และชุดขนสุกรของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ โดยสามารถสรุปผลแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ในการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า  $F_R(T\alpha)_e = 0.328$  และค่า  $F_{RUL} = 7.2997 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ย 17.4% และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ตลอดทั้งวันพบว่า มีค่าเฉลี่ย 53.3% นอกจากนี้สามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบติดตั้งระบบใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์ต่อไป

ในส่วนที่ 2 เมื่อทำการติดตั้งระบบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ทำการทดสอบการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) พบว่ามีค่า EER เฉลี่ย  $3.17 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$  ซึ่งสูงกว่าของปั๊มความร้อนกรณีไม่มีการให้ความร้อนเสริม (Heat pump) ที่มีค่า EER เฉลี่ย  $2.82 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$

ในส่วนที่ 3 ผลทดสอบการใช้งานจริงของระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) พบว่าค่า EER มีค่าเฉลี่ยที่  $2.97 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$  ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบคือ 59.28% โดยระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ลงได้ 27,501.92 kWh/ปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 125,408.64 บาท/ปี โดยลงทุนทั้งสิ้น 708,060 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 6.07 ปี มีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 15.56% นอกจากนี้สามารถลดค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร (SEC) จากเดิมคือ 7.27 kWh/ตัว ลดลงเหลือ 1.82 kWh/ตัว หรือสามารถลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าจากเดิม 33.15 Baht/ตัว เหลือเพียง 8.29 Baht/ตัว

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนา ศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศ อาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัย พลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และสำนักงาน พัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ในการ

สนับสนุนทุนและค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณ หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (SEEU) ที่ให้ ค่าปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน และขอขอบคุณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ที่เอื้อเพื่อให้ข้อมูล ในการศึกษาค้างนี้

## 7. รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
EER	ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน	$\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	kW
P	กำลังไฟฟ้า	kW
E	พลังงานไฟฟ้า	kWh
A	พื้นที่	$\text{m}^2$
I	ค่ารังสีอาทิตย์	$\text{W}/\text{m}^2$
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t$	ผลต่างของเวลา	s
M	ปริมาณของน้ำ	kg
Cp	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
$\dot{m}$	อัตราการไหลของน้ำ	$\text{kg}/\text{s}$
SEC	ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ	$\text{kWh}/\text{ตัว}$

ตัวกรีก	ความหมาย	หน่วย
$\eta$	ประสิทธิภาพ	%

ตัวห้อย	ความหมาย
HP	ปั๊มความร้อน
Boosted	ปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
PV	แผงเซลล์แสงอาทิตย์
PV/T	แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Grid	ไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐาน
Total	ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ระบบ Solar PV/T boosted heat pump
Comp	เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน
Cond	เครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน
a	อากาศแวดล้อม
S	ถังเก็บน้ำร้อน

ตัวห้อย	ความหมาย
f	น้ำ
i	เข้า
o	ออก
th	ความร้อน
e	ไฟฟ้า
fan	พัดลม
Pump	ปั๊มน้ำ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สรวุฑ พลวงษ์ศรี และ สุลักษณ์ มงคล. การออกแบบและศึกษาสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับ โรงฆ่าสัตว์ กรณีศึกษาโรงฆ่าสัตว์เทศบาลชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์. การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16, 23-24 กุมภาพันธ์, ศูนย์ฝึกอบรมธนาคาร ไทยพาณิชย์, จังหวัดเชียงใหม่, 2560.
- [2] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Ibrahim, A. and Kazem, H.A. Performance Analysis of Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collectors. *Energy Conversion and Management*, 2014; 78: 641–651.
- [3] สรวุฑ พลวงษ์ศรี และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มี ปั๊มความร้อนเสริมโดยการใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์. *วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 2556; 6(2):106–120.
- [4] เทคโนโลยีการใช้ปั๊มความร้อนสำหรับการทำความร้อน. กรุงเทพฯ:โครงการสาธิตเทคโนโลยีเชิงลึกเพื่อการอนุรักษ์ พลังงานกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, 2552.
- [5] วงศ์สุวรรณ จันทะบูลย์ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริม พลังงานแสงอาทิตย์แผ่นเรียบไม่มีกระจกปิดเป็นอิวาเปอร์เตอร์. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่6), 15-16 มีนาคม, โรงแรมโมร่า จังหวัดเชียงใหม่, 2550.
- [6] Bakirci, K. and Yuksel, B. Experimental Thermal Performance of a Solar Source Heat-Pump System for Residential Heating in Cold Climate Region. *Applied Thermal Engineering*, 2011; 31(8-9): 1508–1518.
- [7] Burkner, M. S. and Riffer, S. B. Solar Assisted Heat Pump Systems for Low Temperature Water Heating Applications: a Systematic Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016; 55: 399–413.
- [8] วิวัฒน์ มูลอ้าย และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. ศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนในโรงพยาบาลด้วยปั๊มความร้อนเสริม แสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีแบบโพลีพรอพิลีน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2552; 16(3): 23–33.
- [9] Anderson, T. N. and Morrison, G. L. Effect of Load Pattern on Solar-Boosted Heat Pump Water Heater Performance. *Solar Energy*, 2007; 81(11): 1386–1395.



- [10] 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.
- [11] Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Sun, C., Deng, Y. and Tong, J. Experimental Study on a Novel PV/T Air Dual-Heat-Source Composite Heat Pump Hot Water System. *Energy and Buildings*, 2015; 108: 175–184.
- [12] ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และโสภิตสุดา ทองโสภิต. การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 2558; 12(2): 59-74.
- [13] สราวุธ พลวงษ์ศรี. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. *วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้*, 2557.
- [14] Wanchupela, N. and Polvongsri, S. The Comparison Study of Performance Between Two Different Types of Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels. The 5<sup>th</sup> National Conference and the 1<sup>st</sup> International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology, May 28-29, Diamond Plaza Hotel, Suratthani, Thailand, 2020.