

การลดต้นทุนด้านพลังงานของโรงฆ่าสัตว์ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน
เสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

การลดต้นทุนด้านพลังงานของโรงฆ่าสัตว์ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน
เสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การลดต้นทุนด้านพลังงานของโรงฆ่าสัตว์ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน
เสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

Saysana Chanthaseng

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิชัย พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การลดต้นทุนด้านพลังงานของโรงฆ่าสัตว์ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน เสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ชื่อผู้เขียน	Mr. Saysana Chanthaseng
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดต้นทุนทางด้านพลังงานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) และแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) จากศึกษาพบว่า ปั๊มความร้อนมีค่าเฉลี่ย EER เท่ากับ $2.95 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ แผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบและแผง Solar PV มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 54.13% และ 15.10% ตามลำดับ ส่วนที่สองเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบขนาดและจำนวนของระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์ ซึ่งพบว่า ระบบที่เหมาะสมประกอบไปด้วยปั๊มความร้อนขนาด $17.8 \text{ kW}_{\text{th}}$ ใช้สารทำงาน R134a ใช้แผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ ขนาดกำลังไฟฟ้า 295 W_p จำนวน 4 แผง และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้า 370 W_p จำนวน 14 แผง เพื่อผลิตน้ำร้อนเก็บในถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L

สำหรับส่วนที่สามของการศึกษาเป็นการหาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ในการใช้งานจริง จากการทดสอบพบว่า ที่อัตราการไหล 8.2 LPM เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยมีค่าสูงสุดของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของปั๊มความร้อนเท่ากับ $4.74 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3.38 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ ตามลำดับ ในส่วนที่สี่เป็นการศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump เมื่อใช้งานจริงใน 1 รอบการผลิต โดยระบบเริ่มทำงานตั้งแต่วันที่ 12:00 น. และจะหยุดทำงาน ณ เวลา 17:00 น. สามารถผลิตน้ำร้อนได้ 55.2°C จากนั้นระบบจะกลับมาเริ่มทำงานใหม่ในวันถัดไปตั้งแต่ 08:00 ถึง 10:40 น. ซึ่งทำให้ได้น้ำร้อนอุณหภูมิ 65°C ปริมาณ 2,500 ลิตร ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนต่อรอบการผลิตเท่ากับ 7 h 40 min สำหรับค่าสูงสุดของ EER ของปั๊มความร้อนเท่ากับ $3.99 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ และมีค่าเฉลี่ย $2.97 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ ค่าสมรรถนะทางไฟฟ้า (PR) ของระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 70.17%

และ 78.41% ตามลำดับ ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 40.32 kWh/รอบ โดยได้จากระบบ Solar PV/T และระบบ Solar PV เท่ากับ 20.10 kWh/รอบ และใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่มอีก 20.22 kWh/รอบ ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump มีประสิทธิภาพโดยรวมเท่ากับ 59.28%

สำหรับส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปีของระบบ จากการศึกษาพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 27,512.69 kWh/year คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 125,457.87 Baht/year หรือลดลง 75% เมื่อเทียบกับระบบผลิตน้ำร้อนเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ลดลงได้จากเดิมที่มีค่าเท่ากับ 7.33 kWh/ตัว หรือ 33.41 Baht/ตัว ให้เหลือเพียง 1.83 kWh/ตัว หรือ 8.36 Baht/ตัว โดยระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ใช้เงินลงทุนเท่ากับ 708,060 Baht คิดเป็นระยะคืนทุน 6.07 year และมีอัตราผลตอบแทน (IRR) เท่ากับ 14.24% ตามลำดับ

คำสำคัญ : แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, ป้อนความร้อน, น้ำร้อน, การลดต้นทุนด้านพลังงาน, สมรรถนะ

Title	ENERGY COST REDUCTION OF SLAUGHTERHOUSE WITH HOT WATER GENERATION FROM SOLAR PHOTOVOLTAIC THERMAL HYBRID BOOSTED HEAT PUMP
Author	Mr. Saysana Chanthaseng
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sulaksana Mongkon

ABSTRACT

The aim of this research is to reduce the electric power cost of hot water production in a Chai Pra Kan District slaughterhouse, Chiang Mai Province by solar photovoltaic thermal boosted heat pump system (Solar PV/T Boosted Heat Pump). This research divided into five parts, the first part was a testing of heat pump, solar photovoltaic/thermal panel (Solar PV/T), and solar photovoltaic panel (Solar PV). The study found that, the average Energy Efficiency Ratio (EER) of the heat pump was equal to $2.95 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$, the average efficiency of the glazed Solar PV/T panel and Solar PV panel was 54.13%, and 15.10%, respectively. The second part was a simulation of the mathematical model to determine the suitable size, and number of solar PV/T boosted heat pump system. The results showed that the suitable system consisted of a $17.8 \text{ kW}_{\text{th}}$ heat pump which a refrigerant is R134a, using the glazed Solar PV/T which peak power is 295 W_{p} with 4 panels, and 370 W_{p} Solar PV of 14 panels to produce hot water stored in a 3,000 L hot water tank.

The third part was to determine the suitable flow rate of water through the Solar PV/T panels. The experiment found that the suitable flow rate was 8.2 LPM which the maximum of EER was equal to $4.74 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$, and the average value was equal to $3.38 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$, respectively. The fourth part is to study the electricity consumption of the Solar PV/T Boosted Heat Pump system when it is actually used of the production round. The system started working from 12 a.m. and stop working

at 5 p.m. which the hot water temperature was 55.2 °C. The system resumed working in the next day from 8 a.m. to 10.40 a.m. generating 2,500 liters of hot water at 65 °C. Therefore, the hot water production time was equal to 7 hours 40 minutes. The maximum EER of the heat pump was 3.99 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ and the average was 2.97 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$. The performance ratio (PR) of Solar PV and Solar PV/T systems was 70.17 % and 78.41%, respectively. The Solar PV/T Boosted Heat Pump system consumed a total electric power of 40.32 kWh/round. It derived from the Solar PV/T system and the Solar PV system was equal to 20.10 kWh/round and uses from the utility grid line of 20.22 kWh/round. The Solar PV/T Boosted Heat Pump system had an overall efficiency of 59.28%.

In the final part was an economic analysis by using a mathematical model to simulate the electric power consumption all year round. The study found that Solar PV/T Boosted Heat Pump system could decrease the electric power from the utility grid line by 27,512.69 kWh/year which an equivalent a saving was 125,457.87 Baht/year or approximately 75% compared with using the electrical heaters. The Specific Energy Consumption (SEC) could be reduced from the original value of 7.33 kWh/pig or 33.41 Baht/pig to 1.83 kWh/pig or 8.36 Baht/pig. The investment in this system was equal to 708,060 Baht, representing a payback period of 6.07 years and the internal rate of return (IRR) was equal to 14.24%, respectively.

Keywords : Solar Photovoltaic Thermal panel, Heat pump, Hot water, Electric power costs reduction, Performance

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล ที่รับเป็นประธานที่ปรึกษา วิทยาลัยนิพนธ์ ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนถึงการดูแลเอาใจใส่จนวิทยาลัยนิพนธ์ ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี และ รองศาสตราจารย์ ดร.อักริน นทร์ อินทนิเวศน์ ที่กรุณาได้รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และกรรมการสอบวิทยาลัยนิพนธ์ พร้อมทั้งให้ คำแนะนำ คำปรึกษา และความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรณิศร์ ดีทหายาท ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการ สอบวิทยาลัยนิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยาลัยนิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความสนับสนุนทางด้าน อุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำงานวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนจาก “โครงการผลิตและพัฒนา ศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2561

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้ทุนสนับสนุนทำ วิจัย

ขอขอบพระคุณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการที่ใช้สถานที่สำหรับทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Energy and Environmental Research Unit: SEEU) ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการ ทดลอง

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ Phongamphay Chanthaseng น้องสาว Vilada Chanthaseng คุณ Sounisa kingsada และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้การ สนับสนุนตลอดมา รวมทั้ง พี่ๆ น้องๆ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน โดยเฉพาะ คุณวิลาวัลย์ จันทร์หอม คุณนฤพนธ์ วันชูเพลา คุณภัทรภรณ์ อาจจุฬา คุณศุภกิตต์ นิล ขาว คุณธนวัฒน์ นิลขาว และ คุณธีรพันธุ์ แสงสุวรรณ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้านจนสามารถสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

Saysana Chanthaseng

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
เซลล์แสงอาทิตย์.....	5
หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	5
คุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	7
ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ	8
ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์	9
หลักการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	9
สมรรถนะตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์	11
สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อน.....	13
แผนผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	14

ค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	15
ระบบปั๊มความร้อน.....	15
ประสิทธิภาพรวมของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump	17
การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์.....	18
ระยะเวลาคืนทุน	18
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	18
อัตราผลตอบแทนภายใน.....	19
การประเมินดัชนีชี้วัดค่าการใช้พลังงานจำเพาะ	19
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
อุปกรณ์การทดสอบ.....	30
1. แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	30
2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์	31
3. ปั๊มความร้อน	32
4. ถังเก็บน้ำร้อน	32
5. อินเวอร์เตอร์.....	33
6. ปั๊มน้ำ.....	34
เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล.....	35
วิธีดำเนินงานวิจัย	37
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง	44
ข้อมูลการใช้พลังงานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ.....	44
การออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงาน แสงอาทิตย์.....	51
1. การทดสอบสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	51

แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบ.....	53
แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีกระจก.....	56
2. การทดสอบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	58
3. การทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน.....	59
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	61
ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม.....	61
แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	62
แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	65
ปั๊มความร้อน.....	66
ผลการจำลองของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump.....	68
การทดสอบหาอัตราการไหลผ่านแผง Solar PV/T ที่เหมาะสมต่อระบบ.....	74
1. อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	75
2. ปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	77
3. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์.....	81
ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	81
ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์.....	84
4. กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน.....	86
5. อัตราการไหลที่เหมาะสมแก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump.....	88
ทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงาน แสงอาทิตย์ตามการใช้งานจริง.....	90
วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์.....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
สรุปผลการวิจัย.....	101
ข้อเสนอแนะ.....	103

ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณ	105
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดสอบ.....	115
ภาคผนวก ค. ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย	160
การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ	161
การเผยแพร่ผลงานโดยการตีพิมพ์ในวารสาร	173
บรรณานุกรม.....	192
ประวัติผู้วิจัย.....	196



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
ตารางที่ 2 รายละเอียดของปั้มน้ำ	34
ตารางที่ 3 รายละเอียดของเครื่องมือตรวจวัดข้อมูล	35
ตารางที่ 4 มูลค่าเงินลงทุนและพลังงานที่ประหยัดได้ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump	71
ตารางที่ 5 รายละเอียดการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์	100



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ค่าไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ปี 2561	1
ภาพที่ 2 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	5
ภาพที่ 3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ	6
ภาพที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว แบบผลึกรวม และแบบอะมอร์ฟัส	6
ภาพที่ 5 คุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	8
ภาพที่ 6 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	10
ภาพที่ 7 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ	10
ภาพที่ 8 สมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	12
ภาพที่ 9 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	12
ภาพที่ 10 สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	13
ภาพที่ 11 แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PV/T)	14
ภาพที่ 12 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ	16
ภาพที่ 13 อัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผง PVT	21
ภาพที่ 14 ระบบผลิตน้ำร้อนจากความร้อนปล่อยทิ้งร่วมกับการใช้ปั๊มความร้อน	22
ภาพที่ 15 อัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน	23
ภาพที่ 16 ระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	23
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำในถัง จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์	24
ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระหว่างโหมดปั๊มความร้อน และโหมดปั๊มความร้อนเสริมที่นำความร้อน	25
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วของเครื่องอัดไอ และพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์	26

ภาพที่ 20 ค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์.....	27
ภาพที่ 21 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบ	30
ภาพที่ 22 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีกระจก	31
ภาพที่ 23 แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
ภาพที่ 24 ปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย	32
ภาพที่ 25 ถังเก็บน้ำร้อน.....	32
ภาพที่ 26 อินเวอร์เตอร์.....	33
ภาพที่ 27 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	37
ภาพที่ 28 ระบบที่ใช้ทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	39
ภาพที่ 29 ขั้นตอนทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตาม ASHRAE standard 93-2003	39
ภาพที่ 30 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้า และน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์.....	40
ภาพที่ 31 รายละเอียดตำแหน่งตรวจวัดของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วย การผลิต ไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	42
ภาพที่ 32 โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ.....	45
ภาพที่ 33 อ่างลวกและชุดขนสุกร.....	45
ภาพที่ 34 ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนในเวลา 4 วัน.....	46
ภาพที่ 35 ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนใน วันที่ 28 ก.พ. 2562.....	47
ภาพที่ 36 ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นใน วันที่ 28 ก.พ. 2562.....	47
ภาพที่ 37 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2561.....	48
ภาพที่ 38 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2562.....	49
ภาพที่ 39 ข้อมูลของจำนวนสุกรที่นำมาชำแหละ และค่า SEC ในปี พ.ศ. 2561	50
ภาพที่ 40 ข้อมูลของจำนวนสุกรที่นำมาชำแหละ และค่า SEC ในปี พ.ศ. 2562	50
ภาพที่ 41 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ	51

ภาพที่ 42 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิน้ำเข้าแผง	52
ภาพที่ 43 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	53
ภาพที่ 44 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ	54
ภาพที่ 45 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ	55
ภาพที่ 46 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ	55
ภาพที่ 47 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/Tแบบที่ไม่มีกระจก	56
ภาพที่ 48 ความร้อน และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบที่ไม่มีกระจก	57
ภาพที่ 49 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบที่ไม่มีกระจก	58
ภาพที่ 50 กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	59
ภาพที่ 51 ความร้อนและอุณหภูมิจากการทดสอบปั๊มความร้อน.....	60
ภาพที่ 52 สมรรถนะของปั๊มความร้อน.....	60
ภาพที่ 53 ค่ารังสีอาทิตย์รายเดือนของจังหวัดเชียงใหม่.....	61
ภาพที่ 54 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายเดือนของจังหวัดเชียงใหม่	62
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์	63
ภาพที่ 56 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิน้ำในถัง	63
ภาพที่ 57 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผง	64
ภาพที่ 58 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า.....	64
ภาพที่ 59 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผง.....	65
ภาพที่ 60 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า	66
ภาพที่ 61 สมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน	67
ภาพที่ 62 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า	67
ภาพที่ 63 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนและผลิตได้	69

ภาพที่ 64 จำลองอุณหภูมิในถัง และค่า EER ของปั๊มความร้อน (กรณีใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 14 แผง และแผง Solar PV/T 4 แผง).....	70
ภาพที่ 65 จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน.....	70
ภาพที่ 66 ระยะคืนทุนและพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปีจากแบบจำลอง.....	72
ภาพที่ 67 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump.....	73
ภาพที่ 68 อุณหภูมิแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์เมื่อทดสอบที่อัตราการไหล 6.8 8.2 และ 9.5 LPM 74	
ภาพที่ 69 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (อัตราการไหล 6.8 LPM).....	76
ภาพที่ 70 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (อัตราการไหล 8.2 LPM).....	76
ภาพที่ 71 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (อัตราการไหล 9.5 LPM).....	77
ภาพที่ 72 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน อัตราการไหล 6.8 LPM	78
ภาพที่ 73 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน อัตราการไหล 8.2 LPM	78
ภาพที่ 74 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน อัตราการไหล 9.5 LPM	79
ภาพที่ 75 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 6.8 LPM).....	80
ภาพที่ 76 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 8.2 LPM).....	80
ภาพที่ 77 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 9.5 LPM).....	81
ภาพที่ 78 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T อัตราการไหล 6.8 LPM	82
ภาพที่ 79 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T อัตราการไหล 8.2 LPM	83
ภาพที่ 80 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T อัตราการไหล 9.5 LPM	83
ภาพที่ 81 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV อัตราการไหล 6.8 LPM	85
ภาพที่ 82 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV อัตราการไหล 8.2 LPM	85

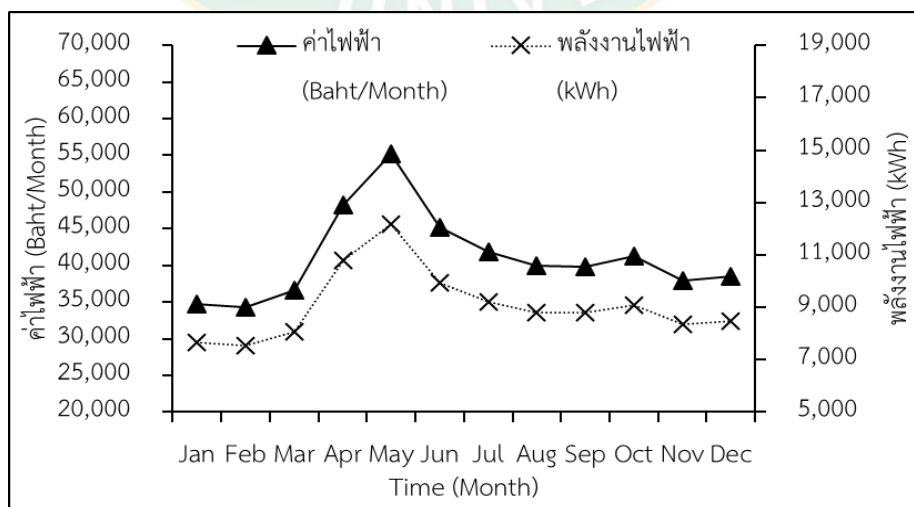
ภาพที่ 83 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV อัตราการไหล 9.5 LPM	86
ภาพที่ 84 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหล 6.8 LPM)	87
ภาพที่ 85 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหล 8.2 LPM)	87
ภาพที่ 86 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหล 9.5 LPM)	88
ภาพที่ 87 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราการไหล	89
ภาพที่ 88 เปอร์เซ็นต์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหล.....	89
ภาพที่ 89 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และความร้อนที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T.....	91
ภาพที่ 90 อุณหภูมิน้ำในถังและอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อน	91
ภาพที่ 91 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน	92
ภาพที่ 92 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T	93
ภาพที่ 93 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV	93
ภาพที่ 94 สมรรถนะของระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T	94
ภาพที่ 95 กำลังไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและผลิตได้ของ ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump	95
ภาพที่ 96 อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิน้ำในถัง และค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน	96
ภาพที่ 97 กำลังไฟฟ้าดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและผลิตได้ของ.....	97
ภาพที่ 98 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายค่า EER	98
ภาพที่ 99 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า	98
ภาพที่ 100 จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน กรณีใช้ Solar PV/T Boosted Heat Pump	99

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

จากข้อมูลการผลิตเนื้อสุกรในปี 2558 ของกรมปศุสัตว์ร่วมกับศูนย์บริการวิชาการ สถาบันพัฒนาบริหารศาสตร์ พบว่าปริมาณการผลิตเนื้อสุกรในประเทศไทยมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีการบริโภคเนื้อสุกรประมาณ 13.57 ล้านตัว (กรมปศุสัตว์, 2558) ในกระบวนการฆ่าสุกรนั้น จะต้องทำในโรงฆ่าสัตว์เพื่อการควบคุม ป้องกันโรคติดต่อ และโรคระบาด ซึ่งโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ อ. ไชยปราการ จ. เชียงใหม่ เป็นโรงฆ่าสัตว์แห่งหนึ่งที่ต้องดำเนินการให้ถูกต้อง ในกระบวนการฆ่าสุกรของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการมีการใช้พลังงานหลัก ๆ อยู่ 2 กระบวนการคือ กระบวนการลวกและชูดขนสุกร และห้องแช่เนื้อ ที่ใช้น้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 62-64 °C เนื่องจากว่าหากอุณหภูมิต่ำกว่านี้จะทำให้การชูดขนสุกรทำได้ยาก และหากอุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำให้เนื้อสุกรเปื่อย โดยน้ำร้อนที่ใช้ลวกสุกรได้จากการใช้ขดลวดไฟฟ้า (Heater) จำนวน 4 ชุด ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 36 kW เปิดใช้งานประมาณ 7-7.5 h/day เพื่อผลิตน้ำร้อนในปริมาณ 2,500 L/day และหลังจากทำการลวกชูดขนเสร็จจะทำการฆ่าและเนื้อสุกร และนำไปเก็บที่ห้องแช่แข็งเพื่อเก็บรักษาไว้ และรอการขนย้ายต่อไป ซึ่งทั้งสองกระบวนการมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จากภาพที่ 1 พบว่าโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 9,074.50 kWh/month คิดเป็นเงิน 41,131.80 Baht/month ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการหาแนวทางลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ



ภาพที่ 1 ค่าไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ปี 2561

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการสำรวจศักยภาพพลังงานทดแทนของประเทศไทย จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทยในปี 2560 พบว่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีมีค่าเท่ากับ $17.6 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ (กระทรวงพลังงาน, 2560) จะเห็นได้ว่าศักยภาพความเข้มรังสีอาทิตย์ของประเทศไทยมีค่าที่สูงเหมาะแก่การใช้งานเป็นพลังงานทางเลือกและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าเป็นอีกทางเลือกสำหรับการลดต้นทุนด้านพลังงาน แต่เนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้อุณหภูมิแผงมีค่าสูงจำเป็นต้องใช้น้ำมาระบายความร้อนได้แผง ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ขึ้นก็คือ แผงผลิตกระแสไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Thermal Hybrid Panel; PV/T) ที่สามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและน้ำร้อน ทางด้านการผลิตน้ำร้อนในปริมาณมากจะมีการใช้ปั๊มความร้อน (Heat pump) ที่เป็นเครื่องทำความร้อนโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งที่มีความร้อนสูงกว่าเพื่อมาผลิตน้ำร้อนแทนที่การใช้ขดลวดไฟฟ้า และปั๊มความร้อนจะใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าขดลวดไฟฟ้าประมาณ 3-4 เท่า ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้ค้นคว้าหาแนวทางการใช้ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น วงศ์สุวรรณค์ และทองเกียรติ (2550) Chaichana et al. (2010) Ji et al. (2007) เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาการนำระบบปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ในโรงฆ่าสัตว์จริง และเพื่อลดปัญหาด้านต้นทุนการใช้พลังงานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และปั๊มความร้อนมาทำงานร่วมกัน เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ และ เพื่อให้ได้เทคโนโลยีและรูปแบบการทำงานที่เหมาะสมกับด้านการลงทุน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะของการผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อศึกษาแนวทางการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงฆ่าสัตว์ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขอบเขตงานวิจัย

1. ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าประมาณ 370 W_p และทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างน้อย 2 ชนิด คือ แผงที่มีกระจกผลิตกำลังไฟฟ้าประมาณ 295 W_p และแผงไม่มีกระจกผลิตกำลังไฟฟ้าประมาณ 270 W_p เพื่อเลือกชนิดแผงที่เหมาะสมแก่ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. ใช้ปั๊มความร้อนชนิดอากาศเป็นแหล่งความร้อน ใช้ R134a เป็นสารทำงาน และขนาดประมาณ 17.8 kW_{th}
3. ใช้ถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนกันความร้อนขนาดประมาณ 3,000 L
4. ใช้ข้อมูลการผลิตของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ
5. ขนาดอ่างน้ำร้อนของเครื่องลวกและชุดขนสุกร ขนาด 2,500 L
6. ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนผ่านแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างน้อย 3 อัตราการไหล ตั้งแต่ 1-2 $L/min \cdot m^2$
7. วิเคราะห์สมรรถนะทางด้านไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และปั๊มความร้อน
8. วิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงาน ต้นทุนการผลิต และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบที่ติดตั้งใช้งาน
9. ทดสอบระบบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สมรรถนะของการผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. ได้แนวทางการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

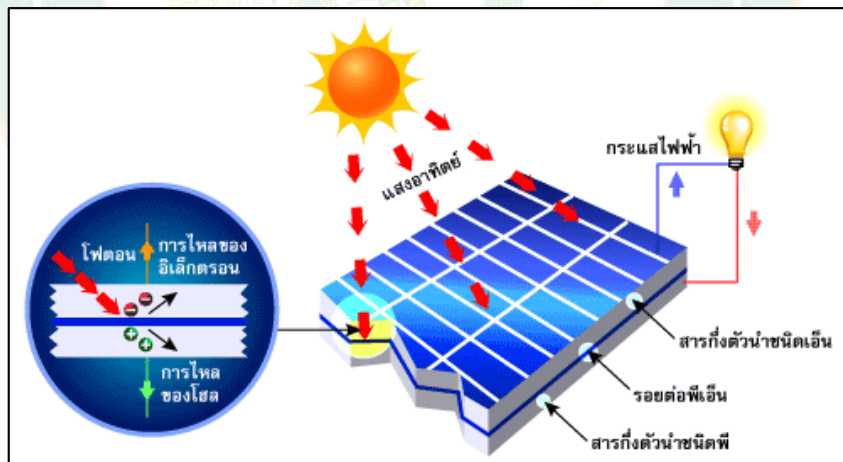


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซลล์แสงอาทิตย์

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ผ่านหลายกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ เมื่อมีค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ จากภาพที่ 2 พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์จะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีอนุภาคของพลังงานโฟตอน (Proton) เมื่อกระทบต่อสารกึ่งตัวนำจะเกิดมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) จึงเกิดเป็นอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายใต้สนามไฟฟ้าของเซลล์ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) โดยในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน

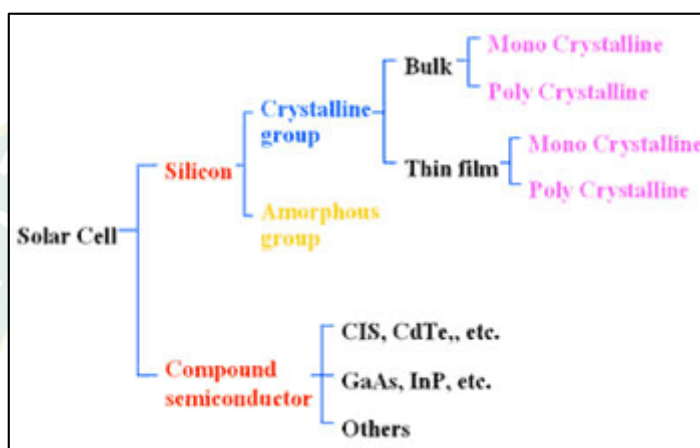


ภาพที่ 2 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

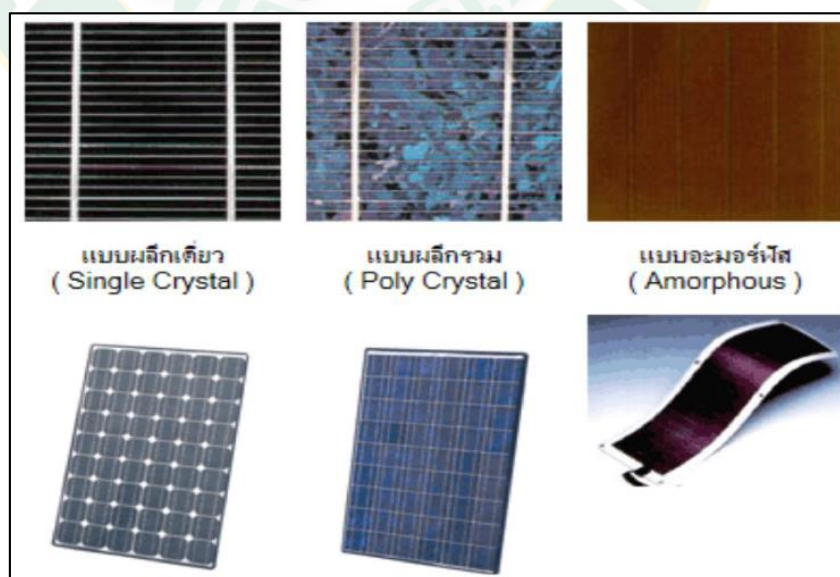
ที่มา: บริษัท Leonic (2558)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังภาพที่ 3 ได้แก่

1. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนที่สามารถแบ่งได้ตามลักษณะผลึกที่เกิดขึ้น เช่น แบบที่เป็นรูปผลึก (Crystal) และแบบที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) ที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดผลึกเดี่ยว (Mono) และชนิดผลึกรวม (Poly) ดังภาพที่ 4
2. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน ที่ใช้ในงานสื่อสารผ่านดาวเทียมและใยแก้วนำแสง แต่มีราคาที่สูงมาก



ภาพที่ 3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ
ที่มา: Rebirth Group (2555)



ภาพที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว แบบผลึกรวม และแบบอะมอร์ฟัส
ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2554)

การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 แบบ

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) เป็นระบบที่ออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ที่ไม่มีระบบระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าและจ่ายให้อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ
2. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้า (PV Grid Connected System) เป็นระบบที่ถูกรออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ เข้าจำหน่ายสู่ระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้าโดยตรง
3. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) เป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และพลังงานน้ำ เป็นต้น

คุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการพิจารณาคคุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$P_m = I_m \times V_m$$

สมการที่ 1

เมื่อ I_m คือกระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)

V_m คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)

P_m คือกำลังไฟฟ้าสูงสุด (W) หมายถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบและอุณหภูมิของตัวเซลล์ที่ค่าหนึ่งๆ เมื่อนำภาระทางไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{PV} = P_m / (I_T A_C)$$

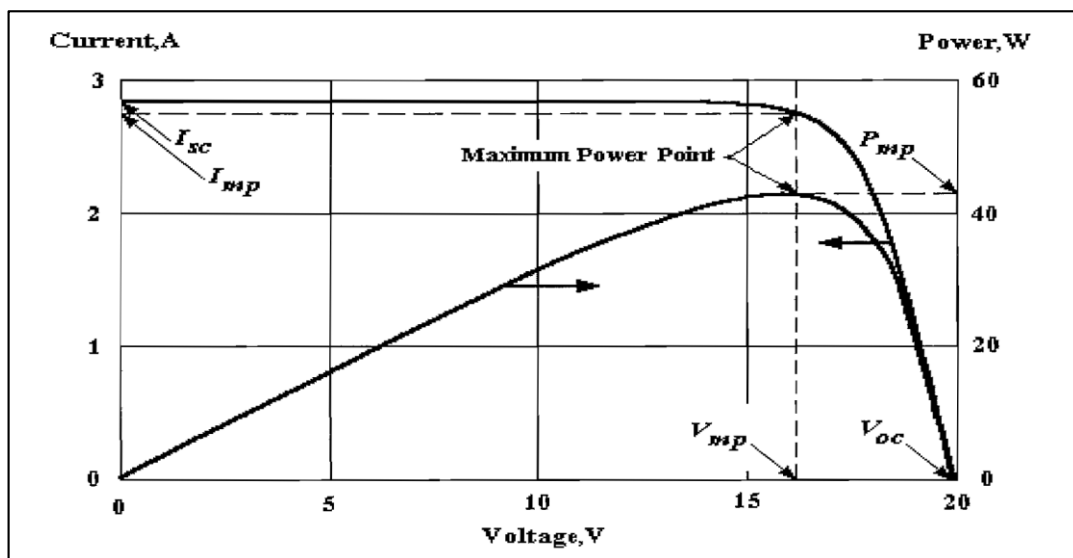
สมการที่ 2

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)

A_C คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

ถึงอย่างไรก็ตาม ตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบและอุณหภูมิขณะทำงานของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งตัวอย่างคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันไฟฟ้างแสดงในภาพที่



ภาพที่ 5 คุณสมบัติทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: สิริชัย (2548)

ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ

ตัวชี้วัดที่ใช้แสดงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน IEC 61724 การวิเคราะห์สมรรถนะทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (กาญจนศิษฐ์, 2560) โดยสามารถประเมินได้จากสมการดังนี้
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array Yield) หาได้จากสมการ

$$Y_A = \frac{\sum E_{DC}}{P_{PV, total}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ Y_A คือพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kW_p)

E_{DC} คือพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)

$P_{PV, total}$ คือกำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kW_p)

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Reference Yield) หาได้จากสมการ

$$Y_R = \frac{\sum H_t}{G_{STC}} \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ Y_R คือพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kW_p)

H_t คือพลังงานจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)

G_{STC} คือค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ (1 kWh/m²)

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield) หาได้จากสมการ

$$Y_F = \frac{\sum E_{AC}}{P_{PV, total}} \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ Y_F คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kW_p)

E_{AC} คือพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้โดยภาระทางไฟฟ้า (kWh)

$P_{PV, total}$ คือกำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kW_p)

พลังงานสูญเสียบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Capture Losses) หาได้จากสมการ

$$L_C = Y_R - Y_A \quad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ L_C คือพลังงานที่สูญเสียบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kW_p)

พลังงานสูญเสียในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (System Losses) หาได้จากสมการ

$$L_S = Y_A - Y_F \quad \text{สมการที่ 7}$$

เมื่อ L_S คือพลังงานที่สูญเสียในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kW_p)

สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio, PR) หาได้จาก

$$PR = Y_F / Y_R \quad \text{สมการที่ 8}$$

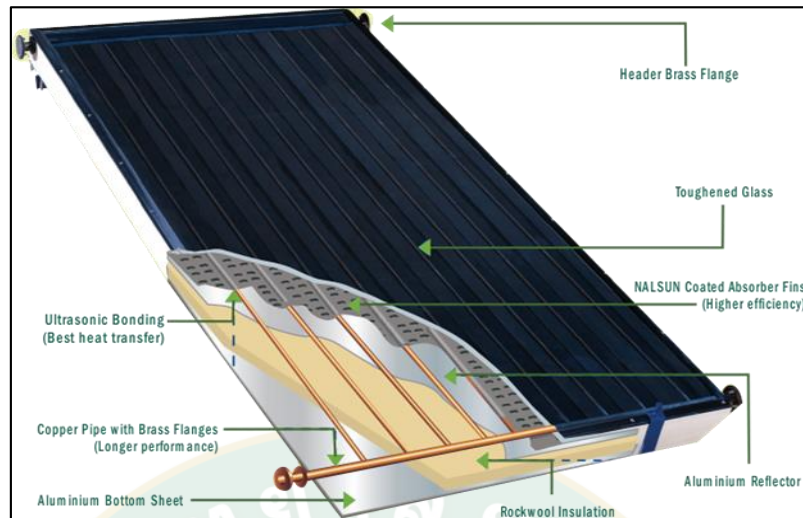
ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

หลักการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีการนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์การทำน้ำร้อน ซึ่งการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้พลังงานในรูปแบบความร้อน ด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) เป็นตัวดูดเก็บความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และถังเก็บสะสมน้ำร้อน โดยการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานของผู้ใช้งาน (กระทรวงพลังงาน, 2548)

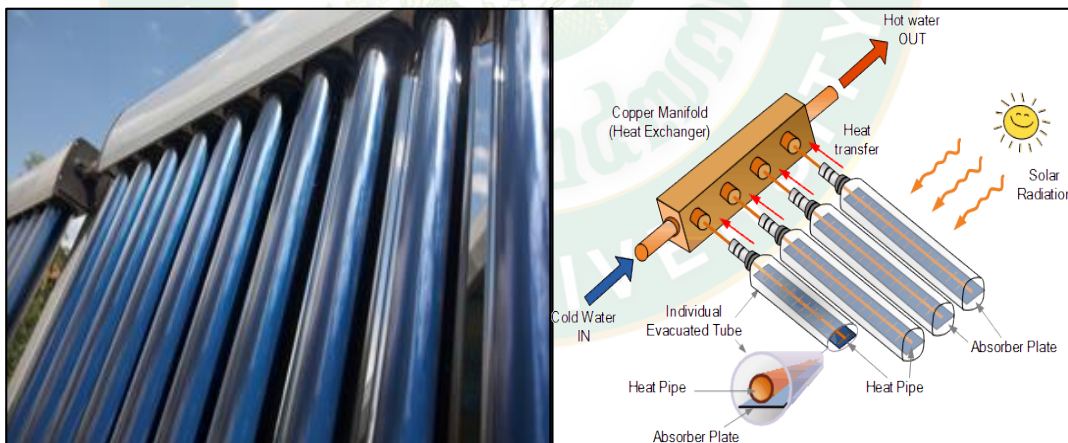
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีหลายชนิดแต่นิยมใช้กัน ดังนี้

1. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) ดังแสดงในภาพที่ 6 มี 2 ชนิดคือ ชนิดมีกระจกปิด (Single Glazed) และชนิดไม่มีกระจกปิด (Unglazed) เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมากโดยประมาณ 40-90 °C



ภาพที่ 6 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
ที่มา: Northern lights solar solutions (2018)

2. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) ดังภาพที่ 7 เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นหลอดแก้ว ภายในเคลือบด้วยสารดูดกลืนรังสีและเหมาะสมกับงานที่ต้องการใช้อุณหภูมิสูงโดยประมาณ 100-200°C



ภาพที่ 7 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ
ที่มา: Alternative energy tutorials (2015)

สมรรถนะตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่เวลาใดๆ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนจะเท่ากับอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ และค่าอัตราความร้อนที่สูญเสียจากผิวดูดรังสี ในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีจะอยู่ในรูปสมการดังนี้ (ทงเกียรติ, 2537)

$$Q_{\text{Coll}} = A_C [I_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_p - T_a)] \quad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ Q_{Coll} คือ อัตราความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)

$(\tau\alpha)_e$ คือ ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)

T_p คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

ในทางปฏิบัติอุณหภูมิผิวดูดกลืนรังสีเฉลี่ย (T_p) วัดให้ถูกต้องได้ยากจึงมักใช้อุณหภูมิของของไหลทำงานเฉลี่ย (T_{fm}) ดังนี้

$$Q_{\text{Coll}} = A_C F' [I_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_{f,i} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 10}$$

เมื่อ F' คือ แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency Factor) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จริงต่อพลังงานที่ได้เมื่ออุณหภูมิผิวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของไหล (T_{fm}) ซึ่งมักจะใช้ค่า

$$T_{fm} \cong \frac{(T_{f,o} + T_{f,i})}{2} \quad \text{สมการที่ 11}$$

ในการออกแบบจะเป็นเรื่องยากที่จะคำนวณ $T_{f,o}$ จากสมการข้างต้นดังนั้น จึงใช้ค่า $T_{f,i}$ เพียงค่าเดียวในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีจะอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$Q_{\text{Coll}} = A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L(T_{f,i} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 12}$$

F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor)

กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะค่าพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

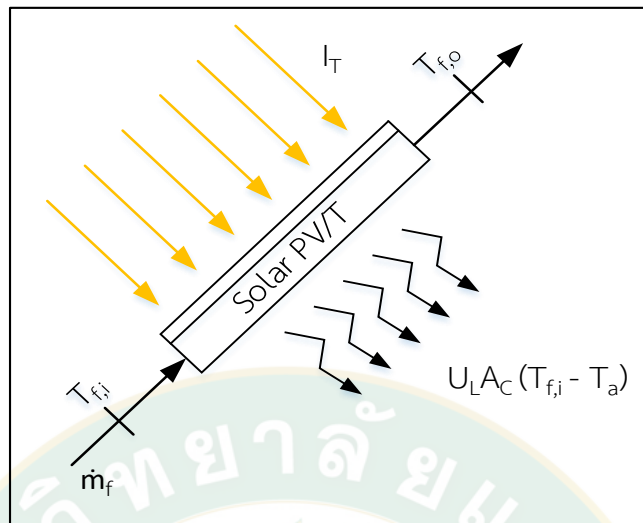
$$Q_{\text{Coll}} = \dot{m}_f C_{p_f}(T_{f,o} - T_{f,i}) \quad \text{สมการที่ 13}$$

เมื่อ \dot{m}_f คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/s)

C_{p_f} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ($\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

$T_{f,i}$ คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{f,o}$ คือ อุณหภูมิของไหลขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

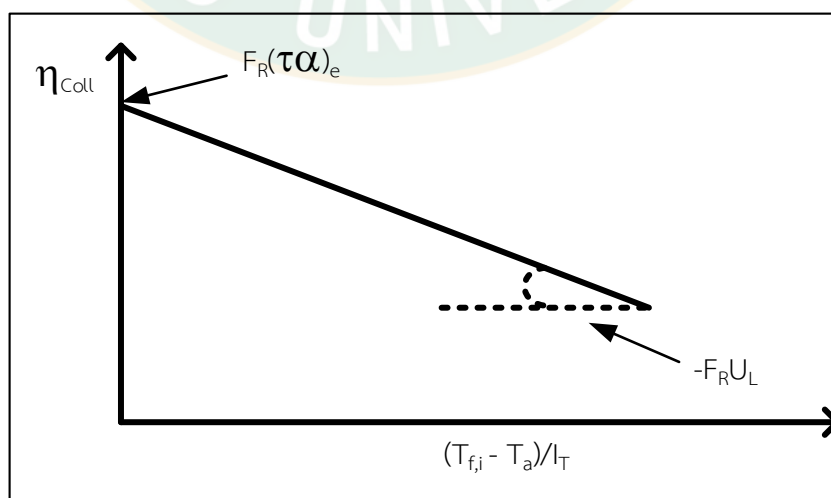


ภาพที่ 8 สมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta_{\text{Coll}} = \frac{Q_{\text{Coll}}}{A_C I_T} = \frac{\dot{m}_f c_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_C I_T} = F_R (\tau \alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_{f,i} - T_a)}{I_T} \quad \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{Coll} และ $(T_{f,i} - T_a)/I_T$ จะได้สมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยที่ค่าความชันของเส้นคือ ค่า $F_R U_L$ ส่วนค่าที่ตัดแกนประสิทธิภาพคือค่า $F_R (\tau \alpha)_e$



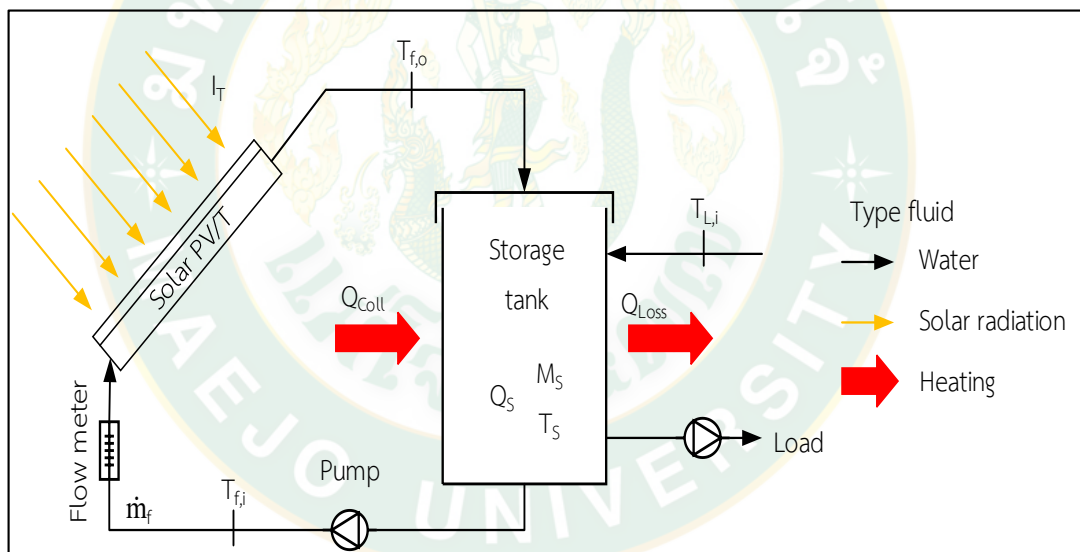
ภาพที่ 9 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อน

ระบบที่ใช้ของงานวิจัยประกอบด้วยปั๊มหมุนเวียนน้ำที่ส่งน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อน้ำได้รับความร้อนที่ถูกถ่ายเทความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์และส่งต่อไปเก็บในถังเก็บสะสมน้ำร้อนที่ถูกหุ้มฉนวนไว้อย่างดี ดังภาพที่ 10 อุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในกรณีที่ถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอและไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิของน้ำ สามารถทำสมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนดังสมการที่ 15

$$Q_{Coll} = Q_S + Q_{Load} + Q_{Loss} \tag{สมการที่ 15}$$

- เมื่อ Q_S คือ อัตราความร้อนสะสมที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อน (kW)
- Q_{Load} คือ อัตราความร้อนที่ดึงออกจากถังเก็บสะสมน้ำร้อน (kW)
- Q_{Loss} คือ อัตราความร้อนสูญเสียออกจากถังน้ำร้อน (kW)



ภาพที่ 10 สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ในกรณีที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อนหุ้มฉนวนอย่างดีและไม่มีการนำน้ำร้อนไปใช้งาน จึงไม่มีการพิจารณาอัตราความร้อนที่ดึงออกจากถังเก็บสะสมน้ำร้อน (Q_{Load}) และอัตราความร้อนสูญเสียออกจากถังน้ำร้อน (Q_{Loss}) ดังสมการดังนี้

$$Q_{Coll} = Q_S \tag{สมการที่ 16}$$

$$A_C [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] = (MCp)_S \frac{(T_S^{t+\Delta t} - T_S^t)}{\Delta t} \tag{สมการที่ 17}$$

จากสมการที่ 17 สามารถเขียนในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้ดังนี้

$$T_S^{t+\Delta t} = T_S^t + \frac{A_C \Delta t}{(MCp)_S} [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_{RU_L} (T_{f,i} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 18}$$

เมื่อ $T_S^{t+\Delta t}$ คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}\text{C}$)

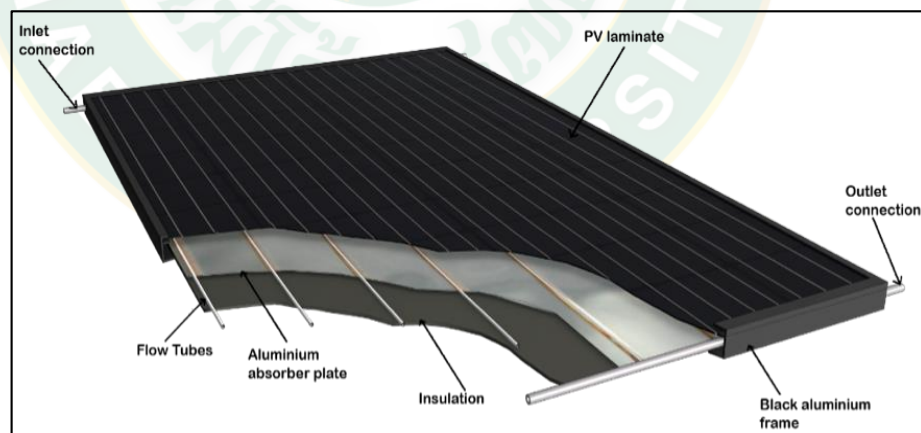
T_S^t คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมน้ำร้อนเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)

Δt คือ ผลต่างเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)

$(MCp)_S$ คือ ผลคูณของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของของไหลในถัง ($\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$)

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Thermal Hybrid Panel; PV/T) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 11 เป็นแผงที่ถูกพัฒนามาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้า และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ผลิตน้ำร้อนมารวมกันเป็นแผงเดียว ซึ่งการทำงานของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้น้ำและอากาศเป็นตัวดูดซับความร้อน โดยปัจจุบันแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะนิยมใช้แบบท่อและแบบแผ่นเรียบ เนื่องจากเหมาะสมในการใช้งานจริง



ภาพที่ 11 แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PV/T)

ที่มา: Culprit design (2018)

ค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (แผง Solar PV/T) แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 19 (โดย $Q_{PV/T} = Q_{Coll}$ จากสมการที่ 13)

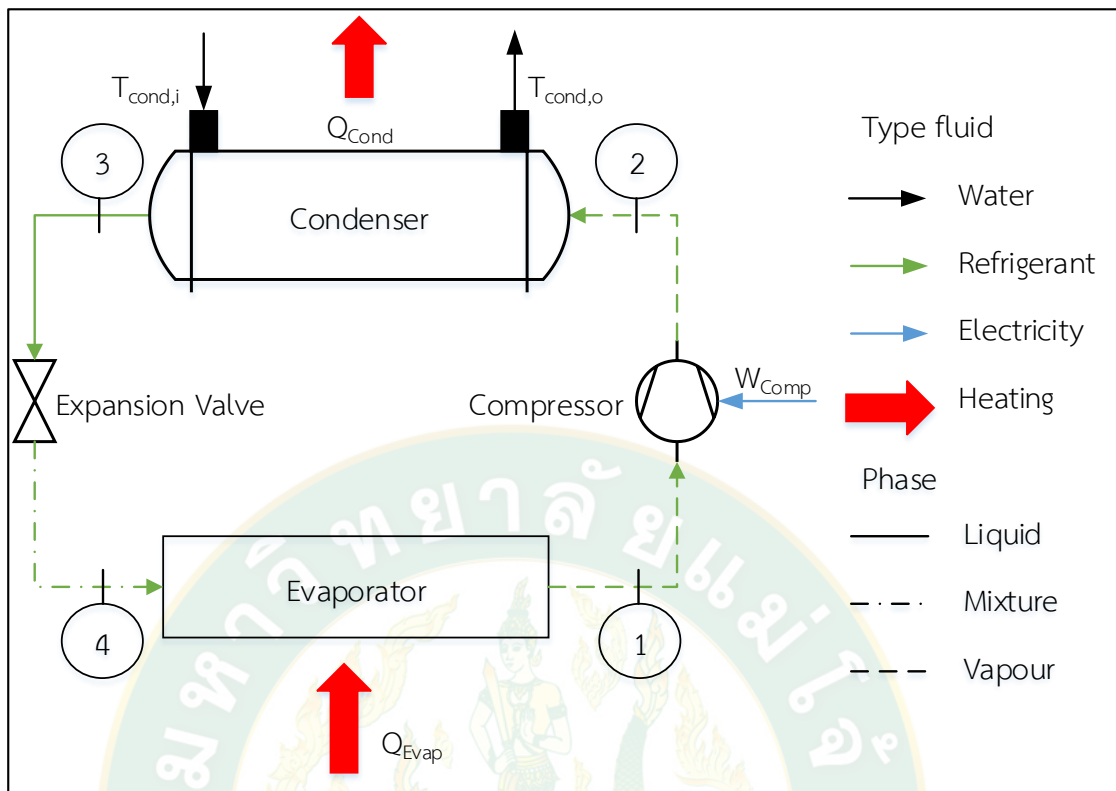
$$\eta_{PV/T} = \frac{P_{PV/T} + Q_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad \text{สมการที่ 19}$$

- เมื่อ $\eta_{PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T (%)
 $P_{PV/T}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T (W)
 $Q_{PV/T}$ คือ อัตราความร้อนที่ได้จากแผง Solar PV/T (W)

ระบบปั๊มความร้อน

วัฏจักรอัดไอมีรูปแบบการใช้งานอยู่ 2 ประเภท คือ การทำความเย็น และการทำความร้อน โดยส่วนประกอบหลักของวัฏจักรประกอบด้วย ดังนี้ (นัฐพร, 2562)

1. เครื่องอัดไอ (Compressor) ทำหน้าที่เพิ่มความดันให้สารทำงานในสถานะไอที่อุณหภูมิต่ำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นและส่งต่อไปที่เครื่องควบแน่น
2. เครื่องควบแน่น (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนจากสารทำงานที่ความดันและอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก ทำให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวที่มีความดันสูงไหลไปยังวาล์วความดัน
3. วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำงาน เพื่อป้อนให้กับเครื่องระเหย
4. เครื่องระเหย (Evaporator) ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากภายนอกเข้าสู่วงจรปั๊มความร้อน ซึ่งสารทำงานที่ความดันและอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกจะดึงความร้อนภายนอก และเปลี่ยนสถานะเป็นไอ



ภาพที่ 12 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ

จากภาพที่ 12 กระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของวัฏจักรอัดไอตามทฤษฎีมีดังนี้

1. กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการอัดไอแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic Compression) กำลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องอัดไอ สมมุติว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อน คำนวณได้จากสมการ $W_{\text{Comp}} = \dot{m}_r (h_2 - h_1)$ สมการที่ 20
2. กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการควบแน่นที่ความดันคงที่ (Isobaric Condensation) อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น คำนวณได้จากสมการ $Q_{\text{Cond}} = \dot{m}_r (h_2 - h_3) = \dot{m}_r C_{p,f} (T_{\text{Cond},o} - T_{\text{Cond},i})$ สมการที่ 21
3. กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ (Isenthalpic Expansion) และลดความดันอย่างเดียวไม่มีงานหรือการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น จะได้ $h_3 = h_4$ สมการที่ 22
4. กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการระเหยที่ความดันคงที่ (Isobaric Expansion) อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยคำนวณได้จากสมการ $Q_{\text{Evap}} = \dot{m}_r (h_1 - h_4)$ สมการที่ 23

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (Coefficient of Performance, COP) คือ ตัวแปรที่ใช้แสดงสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อน ซึ่งนิยามจากสัดส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Output) หารด้วยพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบ (Input) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนสามารถหาได้จาก

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{W_{\text{Comp}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad \text{สมการที่ 24}$$

ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (Energy Efficiency Ratio, EER) คือ ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่หาได้จากอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับปั๊มความร้อน สามารถหาได้จาก

$$\text{EER}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{P_{\text{Comp}}} = \frac{\dot{m}_f C_{p,f} (T_{\text{Cond,o}} - T_{\text{Cond,i}})}{P_{\text{Comp}}} \quad \text{สมการที่ 25}$$

เมื่อ	\dot{m}_f	คือ อัตราการไหลของสารทำงาน (kg/s)
	h_1	คือ เอนทาลปีขาออกเครื่องระเหย (kJ/kg)
	h_2	คือ เอนทาลปีขาเข้าเครื่องควบแน่น (kJ/kg)
	h_3	คือ เอนทาลปีขาออกของเครื่องควบแน่น (kJ/kg)
	h_4	คือ เอนทาลปีขาออกของวาล์วขยายตัว (kJ/kg)
	\dot{m}_f	คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
	$T_{\text{Cond,i}}$	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าเครื่องควบแน่น (°C)
	$T_{\text{Cond,o}}$	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกเครื่องควบแน่น (°C)
	W_{Comp}	คือ กำลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องอัดไอ (kW)
	Q_{Cond}	คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทที่เครื่องควบแน่น (kW)
	Q_{Evap}	คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทที่เครื่องระเหย (kW)
	COP_{HP}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน
	EER_{HP}	คือ ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน ($\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$)

ประสิทธิภาพรวมของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

อัตราความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนในกรณีที่ถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวนอย่างดีและไม่มีการนำน้ำร้อนไปใช้งาน คำนวณได้จาก

$$Q_S = M_S C_{P,f} \frac{(T_S^{t+\Delta t} - T_S^t)}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 26}$$

เนื่องจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าหลายอย่าง เช่น ปั๊มน้ำ พัดลม เป็นต้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 27

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{Comp}} + P_{\text{fan}} + P_{\text{Pump,HP}} + P_{\text{Pump,PV/T}} \quad \text{สมการที่ 27}$$

ประสิทธิภาพรวมของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump คืออัตราส่วนระหว่างความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน (Q_S) รวมด้วยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ($P_{PV} + P_{PV/T}$) ที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) ที่ตกกระทบต่อพื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A_{PV}) กับแผง Solar PV/T ($A_{PV/T}$) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (P_{Total}) สามารถหาได้จากสมการที่ 28

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{Q_S + (P_{PV} + P_{PV/T})}{I_T (A_{PV} + A_{PV/T}) + (P_{\text{Total}})} \quad \text{สมการที่ 28}$$

การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสม จากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 29

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \quad \text{สมการที่ 29}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) คือ ผลบวกของรายรับทั้งหมด และรายจ่ายทั้งหมดที่ได้จากโครงการ เพื่อชี้ให้เห็นว่าโครงการนั้นเป็นที่น่าสนใจในการลงทุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 30

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \quad \text{สมการที่ 30}$$

เมื่อ

R_n คือ ผลตอบแทนในปีที่ n (Baht)

C_n คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n (Baht)

- N คือ ระยะเวลาของโครงการ (y)
 i คือ อัตราส่วนลด (%)
 TIC คือ เงินลงทุนทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบัน (Baht)

อัตราผลตอบแทนภายใน

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) คือ อัตราผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 31

$$\sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1 + IRR)^n} - TIC = 0 \quad \text{สมการที่ 31}$$

การประเมินดัชนีชี้วัดค่าการใช้พลังงานจำเพาะ

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และแสดงถึงต้นทุนทางด้านพลังงานของโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยทั่วไปค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่ใช้ในเวลานั้น ต่อผลผลิตทั้งหมดในช่วงเวลาเดียวกัน โดยค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือที่สุด คือ จะได้จากการวิเคราะห์ที่อาศัยข้อมูลที่แท้จริงจากการตรวจวัด ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ขึ้นกับปัจจัย 3 ตัวด้วยกัน คือ ชนิดของผลผลิต ชนิดของกระบวนการผลิต และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ซึ่งโดยทั่วไปการพิจารณาค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สามารถทำได้ 2 แบบ คือ เปรียบเทียบกับค่าการใช้พลังงานจำเพาะปัจจุบันของกระบวนการผลิต หรือเปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สามารถหาได้ดังสมการที่ 32

$$SEC = \frac{\text{การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (kWh/Month)}}{\text{ปริมาณผลผลิตต่อเดือน (ตัว/Month)}} \quad \text{สมการที่ 32}$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

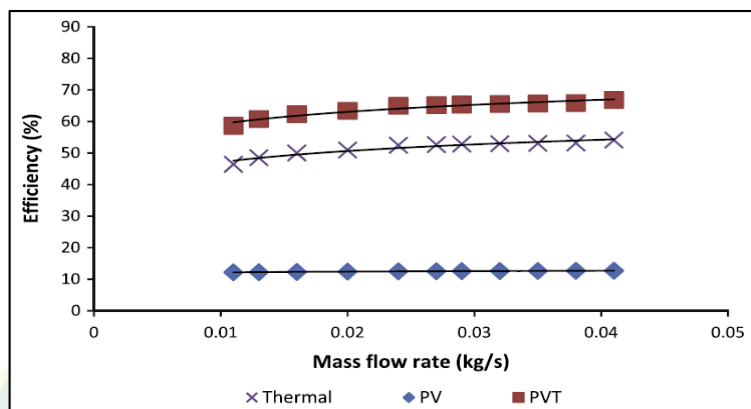
จากการศึกษา และค้นคว้าสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้

ณัฐพงศ์ และโสภิตสุตา (2558) ศึกษาศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งในปี 2556 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้า 80,385,941 kWh จึงต้องมีการลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยเลือกอาคารในการศึกษาจำนวน 10 อาคารจากทั้งหมด 183 อาคาร จากข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์โดยเฉลี่ยในเขตพื้นที่ปทุมวันเท่ากับ 17.93 MJ/m^2 พบว่าผลรวมของพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ $56,029.98 \text{ kWh/day}$ เมื่อคำนวณจากพื้นที่ที่เหมาะสมสามารถติดตั้งระบบได้จริง กำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ หันหน้าแผงไปด้านทิศใต้ ทำมุม 15° พบว่าผลรวมพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ $42,138.38 \text{ kWh/day}$ ในการประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคแบบเต็มพื้นที่ ใช้ปัจจัยประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และของระบบเท่ากับ 14.64 % และ 85% ส่วนศักยภาพเชิงเทคนิคเท่ากับ $5,296.98 \text{ kWh/day}$ และ $2,949.19 \text{ kWh/day}$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และความต้องการใช้ไฟฟ้าของทุกอาคารที่ศึกษา พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 10.97% ในปีแรกและสามารถลดการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในปีต่อ ๆ ไป (ณัฐพงศ์ และโสภิตสุตา, 2558)

แบงค์ และวิทยา (2556) ทำการศึกษาสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic/Thermal; PV/T) แบบ Amorphous Silicon ที่มีขนาดพื้นที่ของแผง 0.97 m^2 กำลังไฟฟ้า 40 W_p ปริมาณน้ำในการทดสอบ 80 L อัตราการไหลของน้ำเข้าแผง 1.2 L/min ในการทดสอบใช้เวลา 10 วัน โดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยต่อวงจรกับตัวต้านทานชนิดไวร์วาวด์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า แล้วคูณกับเวลาที่ติงประจุออกจากแบตเตอรี่จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้า จากการทดสอบพบว่าแผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพทางความร้อนรายวันเฉลี่ยที่ 40.9% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ารายวันเฉลี่ยที่ 3% และประสิทธิภาพรวมรายวันเฉลี่ยที่ 43.9% และเมื่อใช้ข้อมูลค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศในปี 2553 สามารถทำนายระบบ Solar PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 78 Wh/day และพลังงานความร้อนเฉลี่ยได้ $1,181 \text{ Wh/day}$ ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำร้อน $41.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (แบงค์ และวิทยา, 2556)

Fudholi et al. (2014) ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic/Thermal; PV/T) ซึ่งมีขนาด 0.512 m^2 ค่ารังสีอาทิตย์ระหว่าง $500\text{-}800 \text{ W/m}^2$ ใช้อัตราการไหลของน้ำระหว่าง $0.011\text{-}0.041 \text{ Kg/s}$ ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ประสิทธิภาพการผลิตความร้อนและประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของแผง Solar PV/T ผลการทดลอง

พบว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ 800 W/m^2 และอัตราการไหลของน้ำที่ 0.041 Kg/s ได้ประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของแผง Solar PV/T สูงสุด 66.82% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 12.69% และประสิทธิภาพการผลิตความร้อนสูงสุด 54.13% ดังภาพที่ 13 (Fudholi และคณะ, 2014)



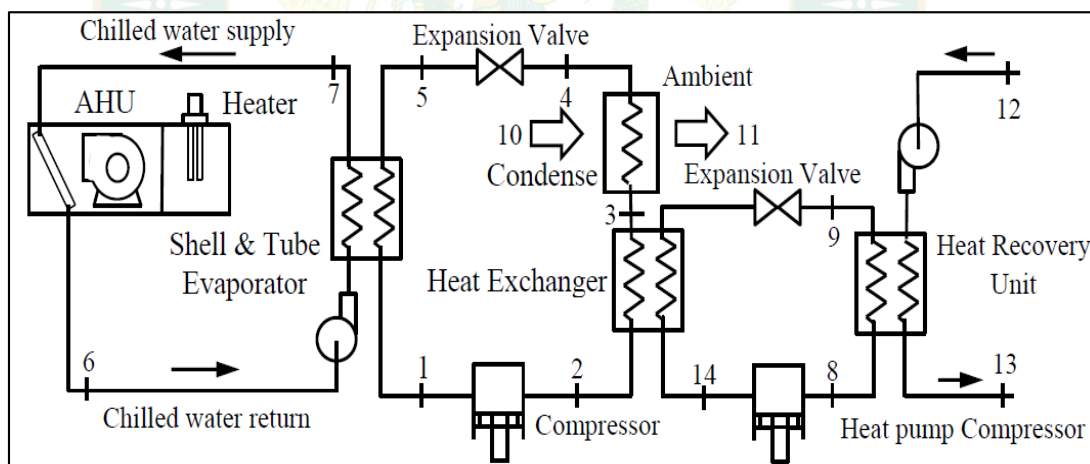
ภาพที่ 13 อัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผง PVT
ที่มา: Fudholi et al. (2014)

วงศ์สุวรรณ และทองเกียรติ (2550) ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดขนาด 2.09 m^2 เป็นเครื่องระเหย ใช้เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 0.25 HP ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 200 L ใช้สารทำงาน R22 เป็นสารทำงาน ได้ทำการทดสอบตั้งแต่วันที่ 10.00-14.00 น. ภายใต้สภาวะภูมิอากาศและค่ารังสีแสงอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ โดยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก $26.9-53.2 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยค่ารังสีแสงอาทิตย์จะมีผลต่อสมรรถนะของระบบในช่วงแรกๆ ของการทดสอบ จากนั้นสมรรถนะของระบบจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่สูงขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนนำไฟฟ้าพบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่า (วงศ์สุวรรณ และทองเกียรติ, 2550)

Abou-Ziyan et al. (1997) ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารทำงานระหว่าง R22 R404a และ R134a ในการจำลองการทดสอบสำหรับปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยปั๊มความร้อนสามารถทำอุณหภูมิที่เครื่องระเหยอยู่ที่ $0-45 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ $50-70 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนพิสูจน์ได้ว่าสารทำงาน R134a เป็นทางเลือกที่เหมาะสมแทนที่ R22 โดยเหมาะสำหรับการทำอุณหภูมิต่ำ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของ R134a มากกว่า R404a 23% การเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนเสริมพลังงาน

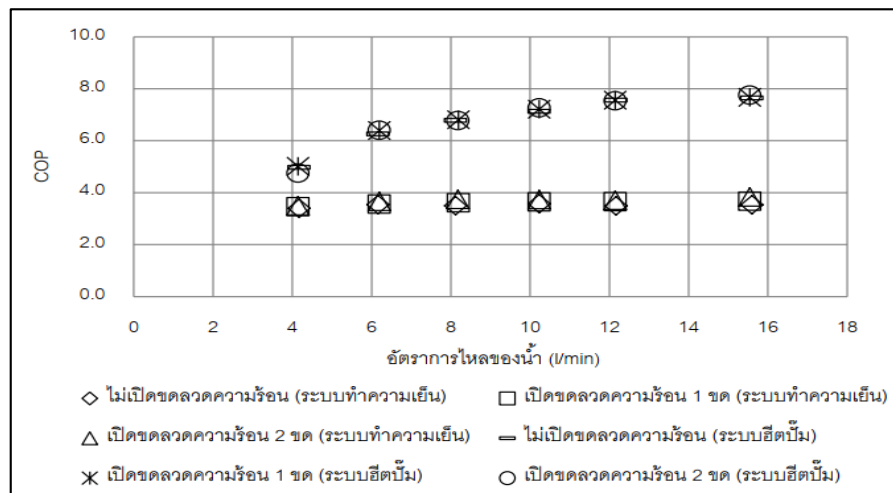
แสงอาทิตย์ และปั๊มความร้อนแบบธรรมดา แสดงให้เห็นว่า ระบบปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าระบบทั่วไป ระบบดังกล่าวจะผลิตความร้อนด้วยอากาศร้อนไหลจากตัวเก็บสะสมรังสีอาทิตย์ไปยังเครื่องระเหยและผ่านเครื่องควบแน่น ระบบนี้ใช้สารทำงาน R134a ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่า 50% (Abou-Ziyan และคณะ, 1997)

วิศิษฐ์ และจิตติน (2555) ทำการศึกษากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ด้วยการนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบปรับอากาศทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนดังภาพที่ 14 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ส่งผลถึงปริมาณและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลมีค่าลดลง อุณหภูมิน้ำร้อนและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนจะมีค่าลดลง ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำร้อนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.01 เป็น 6.39 6.77 7.21 7.56 และ 7.66 คิดเป็น 27.5% 35.1% 43.9% 50.9% และ 52.9% ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนเท่ากับ 4 6 8 10 12 และ 15.5 L/min ตามลำดับ ดังภาพที่ 15 (วิศิษฐ์ และจิตติน, 2555)



ภาพที่ 14 ระบบผลิตน้ำร้อนจากความร้อนปล่อยทิ้งร่วมกับการใช้ปั๊มความร้อน

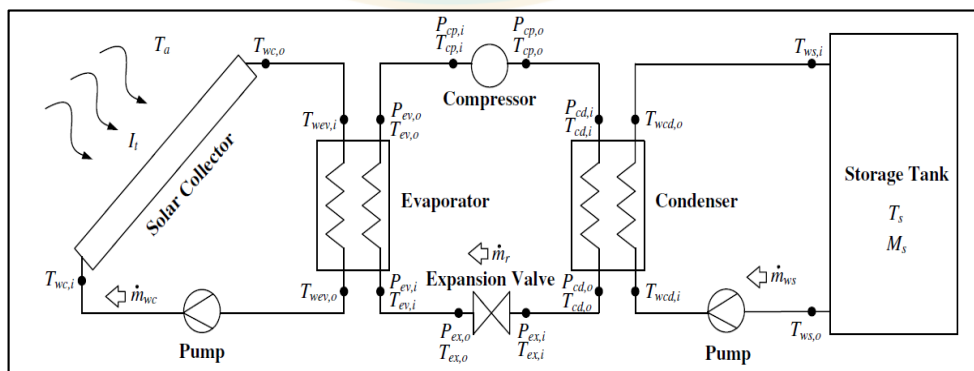
ที่มา: วิศิษฐ์ และจิตติน (2555)



ภาพที่ 15 อัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ที่มา: วิศิษฎ์ และจิตติน (2555)

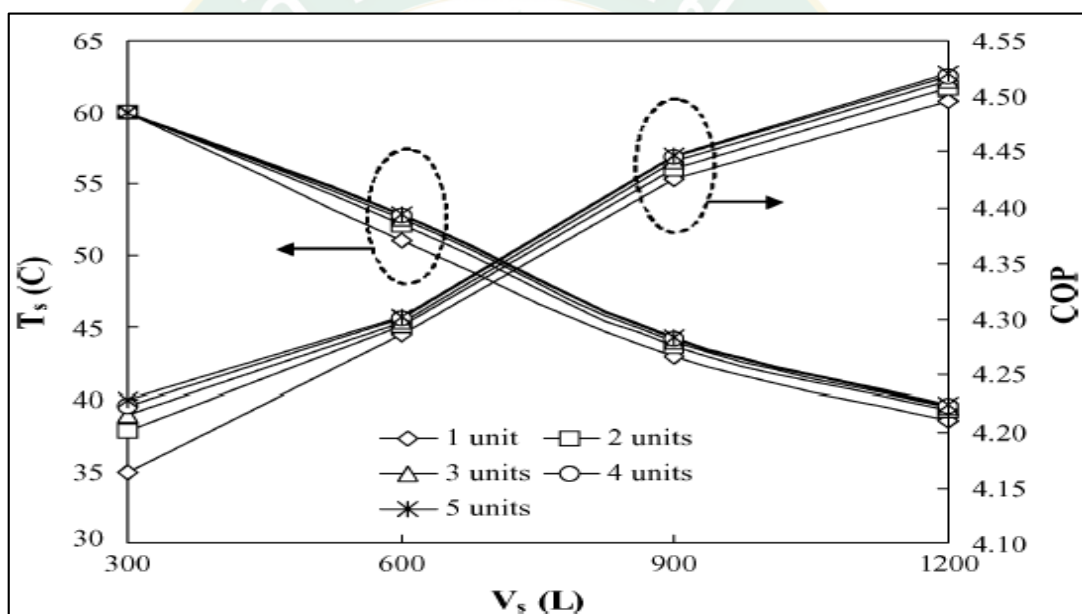
Nuntaphan et al. (2009) ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 16 ใช้สารทำงานแบบผสม โดยประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ใช้โปรแกรมจำลองในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นแบบจำลองสำหรับปั๊มความร้อนโดยใช้สารทำงานแบบผสมคือ R22 R124 R152a ที่ถูกเลือกด้วยโปรแกรมจำลองพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นที่อัตราส่วนของมวลคือ R22 ที่ 20% R124 ที่ 57% และ R152a ที่ 23% ความเร็วคอมเพรสเซอร์ 20 RPM และอัตราการไหลของสารทำงานที่ 0.01 kg/s ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 5.0 นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าปริมาณน้ำร้อนที่เหมาะสมในถังเก็บคือ 400 kg และระยะเวลาคืนทุนสำหรับระบบนี้คือ 2.3 ปี (Nuntaphan และคณะ, 2009)



ภาพที่ 16 ระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

ที่มา: Nuntaphan et al. (2009)

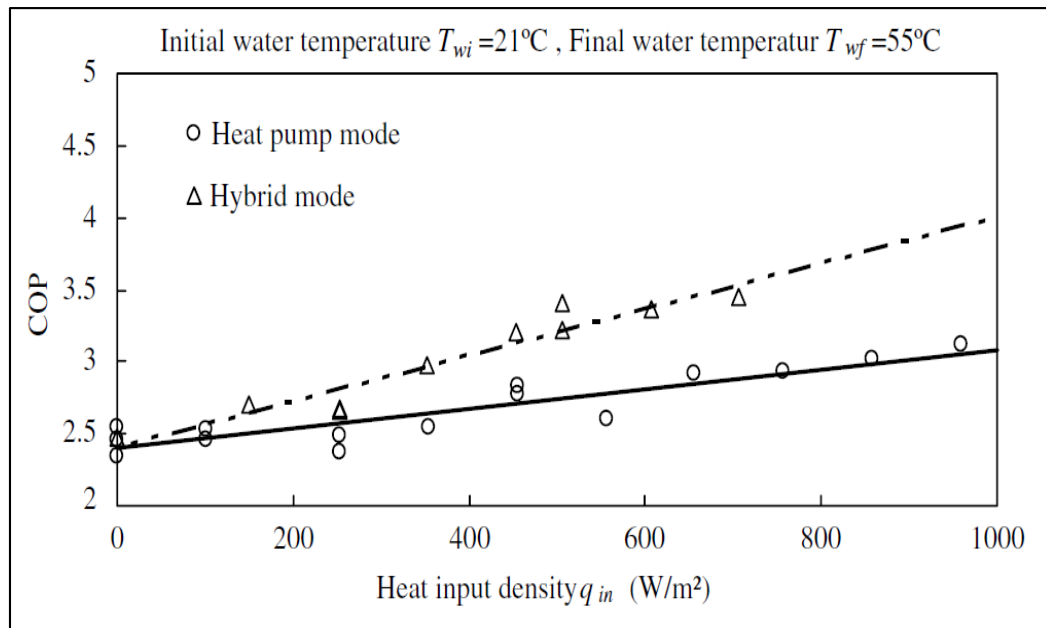
Chaichana et al. (2010) ได้ศึกษาโดยการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขนาดแผง 4 m² จำนวน 1-5 แผง ในอัตราการไหลที่ 0.04 kg/s และปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนคือ 300-1,200 L ปั๊มความร้อนใช้สารทำงานแบบผสม R22 ที่ 20% R124 ที่ 57% และ R152a ที่ 23% เป็นสารทำงานที่อัตราการไหล 0.01 kg/s ทดสอบในสภาพอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ประเทศไทย จากการวิเคราะห์พบว่า ในกรณีของระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุดที่ 60 °C อย่างไรก็ตามในกรณีของระบบปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนอยู่ระหว่าง 4.1 ถึง 4.6 ซึ่งขึ้นกับปริมาณของน้ำในถังและจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังภาพที่ 17 (Chaichana และคณะ, 2010)



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิถังเก็บน้ำในถัง จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์
ที่มา: Chaichana et al. (2010)

Huang et al. (2005) ศึกษาการใช้ท่อนำความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นระบบที่ใช้แหล่งความร้อนควบคู่กันไประหว่างปั๊มความร้อน และท่อนำความร้อนหรือตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R134a ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1.21 m² ระบบนี้สามารถทำงานได้สองกรณีคือ กรณีที่ใช้เพียงแค่อุปกรณ์ปั๊มความร้อนเมื่อไม่มีรังสีอาทิตย์ และกรณีที่ใช้อุปกรณ์เสริมท่อนำความร้อนเมื่อมีรังสีอาทิตย์ ถ้าหากค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงระบบนี้สามารถมี

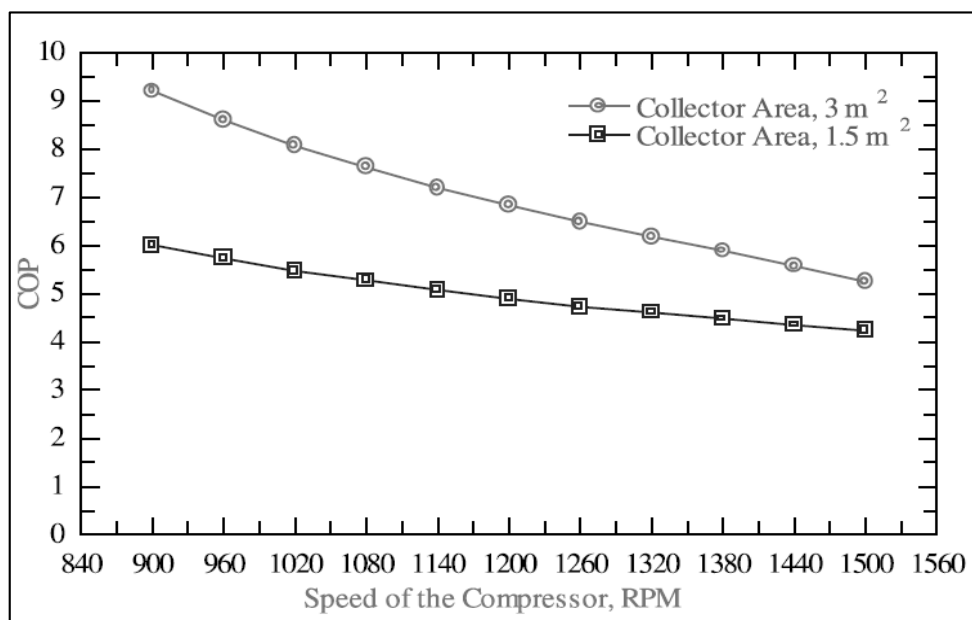
ประสิทธิภาพทางพลังงานสูง สำหรับการทดสอบในกลางแจ้งของระบบนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมท่อนำความร้อนเฉลี่ยที่ 3.32 โดยมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 28.7% เมื่อเทียบกับกรณีปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ 2.58 ดังภาพที่ 18 (Huang และคณะ, 2005)



ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระหว่างโหมดปั๊มความร้อน และโหมดปั๊มความร้อนเสริมท่อนำความร้อน
ที่มา: Huang et al. (2005)

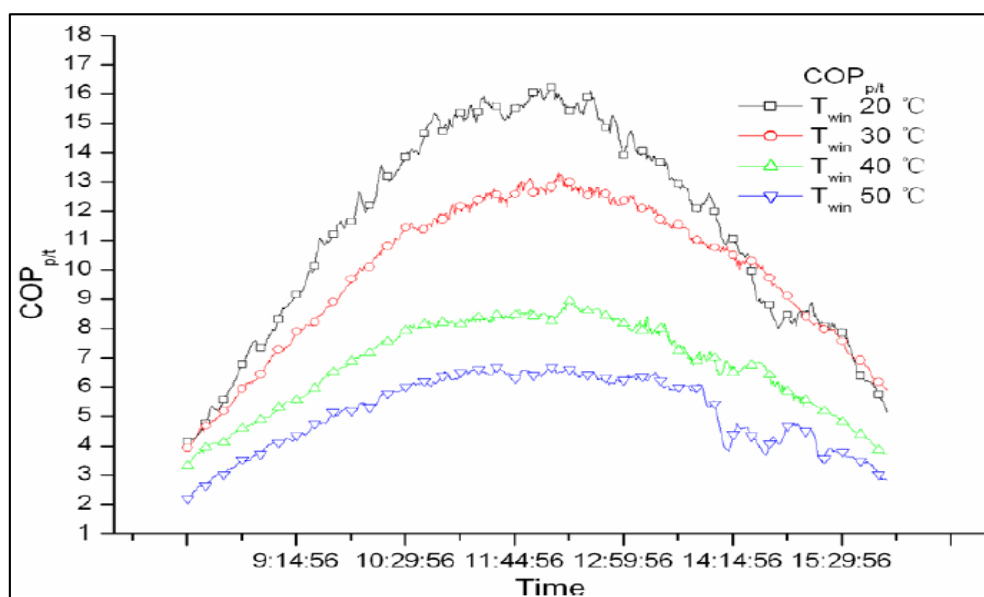
Hawlader et al. (2001) ได้ทำการวิเคราะห์และทดลองระบบผลิตน้ำร้อนปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหยขนาด 1.5 m² จำนวนสองแผงต่ออนุกรมกัน ใช้สารทำงาน R134a ซึ่งระบบดังกล่าวได้รับการออกแบบและดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมในประเทศสิงคโปร์ ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำในเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นตามเวลา ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะก็เพิ่มขึ้นเช่นกันและประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ที่ประมาณ 4 ถึง 9 และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์พบว่ามีความระหว่าง 40-75% สำหรับอุณหภูมิของน้ำในเครื่องควบแน่นที่แตกต่างกันระหว่าง 30 °C และ 50 °C แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีการทดลองชุดตัวเลขเพื่อระบุตัวแปรสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าประสิทธิภาพของระบบขึ้นกับ

พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ และค่ารังสีแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 19 (Hawlder และคณะ, 2001)



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วของเครื่องอัดไอ และพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์
ที่มา: Hawlder et al. (2001)

Ji et al. (2008) ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนแบบไม่มีกระจกปิดขนาด 4.59 m² เป็นเครื่องระเหยของปั๊มความร้อน ใช้ R22 เป็นสารทำงาน ช่วงเวลาทำการศึกษาและทดลองใช้อุณหภูมิของน้ำเข้าปั๊มความร้อนที่ 20 °C 30 °C 40 °C 50 °C ตามลำดับ ในระยะเวลา 4 วัน ที่มีสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดมาวิเคราะห์ ใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.217 kg/s เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 606 W/m² และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 13.7 °C โดยผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ไม่มีตัวเสริม และในขณะเดียวกันประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ก็สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5.4 ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 13.4% ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์สูงถึง 16.1 และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 8.3 ดังภาพที่ 20 (Ji และคณะ, 2008)



ภาพที่ 20 ค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์
ที่มา: Ji et al. (2008)

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำไปประยุกต์ใช้
ณัฐพงศ์ และโสภิต สุดา	ศึกษาศักยภาพของระบบผลิต ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บน หลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	นำไปใช้การวิเคราะห์สมรรถนะของ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
แบงค์ และวิทยา	ศึกษาสมรรถนะของระบบผลิต ไฟฟ้าและทำความร้อนด้วยแผง ผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์	นำไปใช้การวิเคราะห์สมรรถนะของ แผง ผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์
Fudholi et al.	ทดสอบสมรรถนะที่เหมาะสม ต่อระบบผลิตไฟฟ้าและทำความ ร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำ ร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	นำไปใช้การวิเคราะห์สมรรถนะของ แผง ผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ เพื่อหาอัตราการไหลที่ เหมาะสมต่อระบบ

ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำไปประยุกต์ใช้
วงศ์สุวรรณค์ และทนางเกียรติ	ศึกษาสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดเป็นเครื่องระเหย	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะของปั๊มความร้อน
Abou-Ziyan et al.	ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารทำงาน	ใช้เป็นแนวทางในการเลือกสารทำงาน R134a ให้กับปั๊มความร้อน
วิศิษฐ์ และจิตติน	ศึกษากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยการนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบปรับอากาศทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อน	นำไปวิเคราะห์และนำใช้หลักการเอาความร้อนทิ้งจากระบบปรับอากาศมาทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน
Haug et al.	ศึกษาการใช้ท่อทำความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Hawlader et al.	วิเคราะห์และการดำเนินการทดลองระบบผลิตน้ำร้อนปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหย	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Ji et al.	ศึกษาสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงโซลาร์แบบผลึกเดี่ยวไม่มีกระจกปิดเป็นเครื่องระเหย	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะโดยรวมของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำไปประยุกต์ใช้
Nuntaphan et al.	วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้สารทำงานแบบผสม	นำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Chaichana et al.	ศึกษาการแบบจำลองระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก	นำไปวิเคราะห์ข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการดำเนินการติดตั้ง ทดสอบ และตรวจวัดค่าต่าง ๆ ของระบบผลิตน้ำร้อน ด้วยปั๊มความร้อนเสริมการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบดังกล่าวประกอบไปด้วย เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการติดตั้งและตรวจวัดข้อมูลในการทดลอง มีดังนี้

อุปกรณ์การทดสอบ

1. แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 2 ชนิด เพื่อคัดเลือกแผง Solar PV/T ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดไปใช้งานกับระบบดังกล่าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

แผงที่ 1 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Mono crystalline silicon) ยี่ห้อ 5STAR ที่มีกระจกครอบ ขนาด 1.698 m² และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 295 Wp ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบ

แผงที่ 2 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกรวม (Poly crystalline silicon) ยี่ห้อ DYY SOLAR ที่ไม่มีกระจกครอบ ขนาด 1.636 m² และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 270 Wp ดังภาพที่ 22



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (STC)			
Peak Power Watts* ^a	PMAX	(Wp)	270
Power Output Tolerance	PMAX	(W)	0 - +3%
Maximum Power Voltage	VMPP	(V)	30.98
Maximum Power Current	IMPP	(A)	8.91
Open Circuit Voltage	VOC	(V)	43.3
Short Circuit Current	ISC	(A)	9.71
Module Efficiency	η	(%)	18.40
STC: Irradiance 1000W/m ² , Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.			
Thermal collector specification			
Peak Power Watts	760W		
Thermal Efficiency	46%		
Insulation layer	Glass wool		
Flowing tube	Aluminium-copper Φ8x0.6 mm		
Number of flowing tube	6pcs		
Passageway	copper Φ16x0.8 mm, 1/2inch Male Thread		
Back sheet	Galvanized steel , thickness:0.4mm		
Working Pressure	0.6Mpa		
Working temperature	Minus 35 degree celsius to 150 degree celsius		

ภาพที่ 22 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีกระจก

2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์


แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Mono crystalline silicon) ยี่ห้อ Jinko Solar ที่มีขนาด 1.94 m² และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 Wp แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

3. ปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อน (Heat pump) ยี่ห้อ KONNEN รุ่น Volcano series HT7P-E7 ที่มีขนาดความร้อน 17.8 kW_{th} ใช้สารทำงาน R-134a และสามารถทำความร้อนได้สูงสุดที่ 80°C ดังภาพที่ 24 โดยการเลือกใช้ปั๊มความร้อนขนาดดังกล่าวได้จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นจากโรงฆ่าสัตว์ และมีวิธีการคำนวณหาขนาดปั๊มความร้อนได้จากสมการในภาคผนวกที่ ก.2



KONNEN 創能

Volcano series (High temperature air source heat pump water heater circulation type)

		HT3Ps-E3	HT5sP-E5	HT3P-E3	HT5P-E5	HT7P-E7
Rated heating capacity	kW	8.2	13.5	8.2	13.5	17.8
Rated input power	kW	2.42	3.98	2.42	3.95	5.26
Rated input current	A	10.58	17.56	4.58	7.52	9.99
Maximum input power	kW	3.14	5.17	3.14	5.13	6.84
Maximum input current	A	14.01	23.23	5.95	9.75	13.02
Performance coefficient(COP)	/	3.39	3.39	3.39	3.42	3.38
Rated hot water output temp.	°C					75
Maximum hot water output temp.	°C					80

ภาพที่ 24 ปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

4. ถังเก็บน้ำร้อน

ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) ทำหน้าที่เก็บน้ำร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจากปั๊มความร้อน ซึ่งทำมาจากเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) มีขนาดความจุ 3,000 L และหุ้มด้วยฉนวนหนา 7.5 cm ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ถังเก็บน้ำร้อน

5. อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในระบบนี้ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์จำนวน 2 เครื่อง เครื่องแรกต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวน 14 แผง ใช้เครื่องแปลงไฟฟ้ารุ่น iMars BG5KTR สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5,000 W ดังภาพที่ 26 (ก) และเครื่องที่สองต่อเข้ากับแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีจำนวน 4 แผง โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้ารุ่น iMars MG1K5TL สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1,500 W แสดงดังภาพที่ 26 (ข) นอกจากนี้แล้วอินเวอร์เตอร์ทั้งสองรุ่นยังสามารถเก็บบันทึกข้อมูลทางด้านไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้อีกด้วย



(ก) อินเวอร์เตอร์ที่ต่อเข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



(ข) อินเวอร์เตอร์ที่ต่อเข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ภาพที่ 26 อินเวอร์เตอร์

6. ปั๊มน้ำ

ปั๊มน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีรายละเอียด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของปั๊มน้ำ

รูป	รายละเอียด	หน้าที่
	<p>ยี่ห้อ: SEAFL0 รุ่น: SFDP1-014-080-22 อัตราการไหล: 5.1 LPM กำลังไฟฟ้า: 25.2 W</p>	<p>หมุนเวียนน้ำไปปรับความร้อนที่แผง Solar PV/T และใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแผงเพื่อเลือกเอาไปติดตั้งกับระบบใหญ่ (ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน)</p>
<p>PV/T</p> 	<p>ยี่ห้อ: Wilo รุ่น: RS25/6 อัตราการไหลสูงสุด: 13 LPM กำลังไฟฟ้า: 93 W</p>	<p>หมุนเวียนน้ำจากแผง Solar PV/T เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำงานในปั๊มความร้อน (ทดสอบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ)</p>
<p>Heat pump</p> 	<p>ยี่ห้อ: SAER รุ่น: KFZ1 อัตราการไหลสูงสุด: 2.4 m³/h กำลังไฟฟ้า: 370 W</p>	<p>หมุนเวียนน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน (ทดสอบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ)</p>
<p>Reservoir</p> 	<p>ยี่ห้อ: Burks รุ่น: BKN-750EH อัตราการไหล: 6.6-12 m³/h กำลังไฟฟ้า: 1.1 kW</p>	<p>หมุนเวียนน้ำร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนและส่งไปที่อ่างลวกสุกร (ทดสอบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ)</p>

เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิน้ำ ค่ารังสีอาทิตย์ อัตราการไหลเชิงมวล และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3

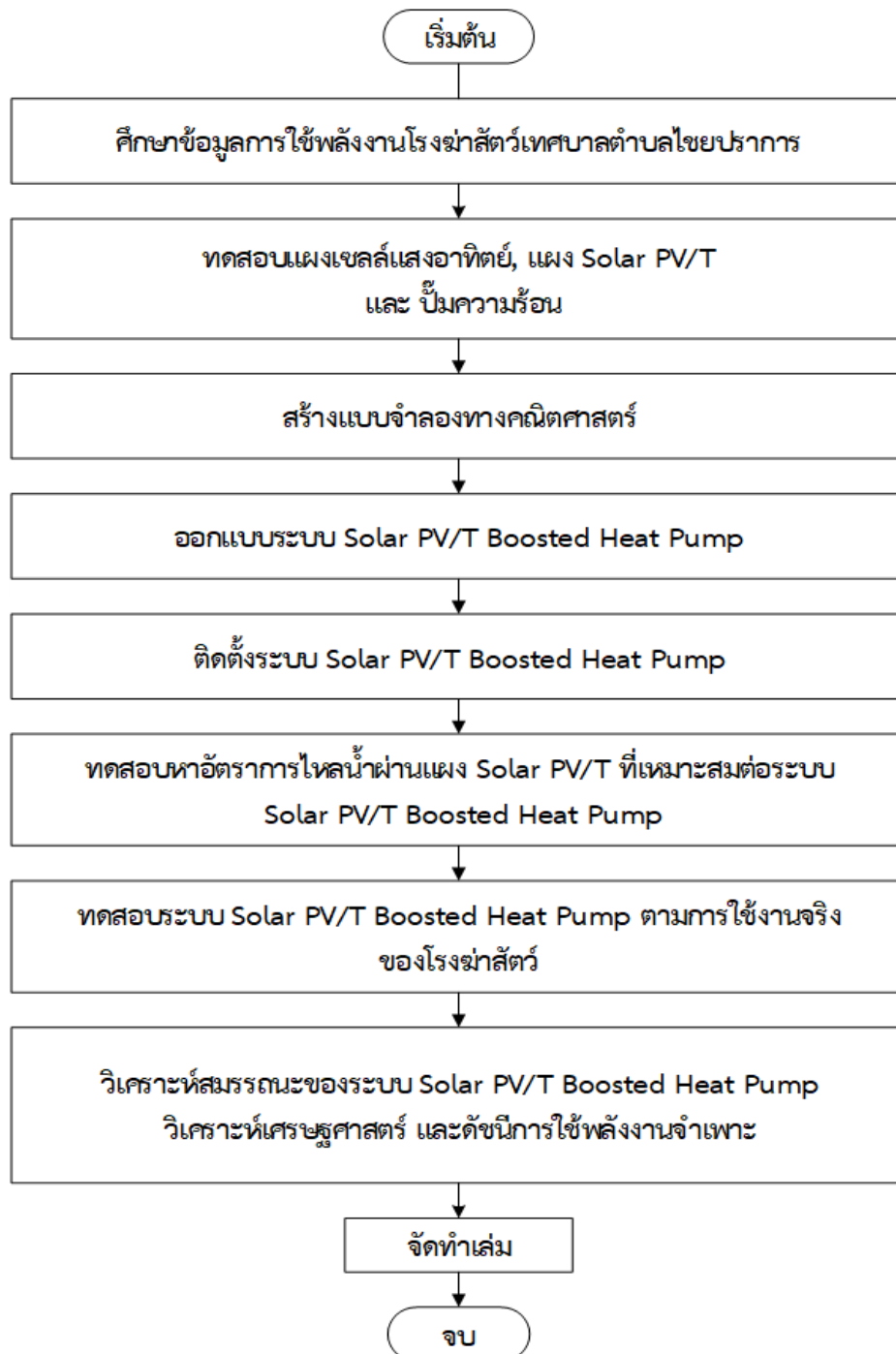
ตารางที่ 3 รายละเอียดของเครื่องมือตรวจวัดข้อมูล

อุปกรณ์	รูป	คุณสมบัติ
สายวัดอุณหภูมิ		เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด k โดยใช้งานร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ คือ $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, ค่าความถูกต้อง $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$
เครื่องบันทึกข้อมูล		ยี่ห้อ: Lutron รุ่น: TM-1947SD แบบ: 4 channels หน้าจอแสดงผลอุณหภูมิพร้อมใช้งานร่วมกับ Thermocouple Type K บันทึกข้อมูลลง SD card ค่าความถูกต้อง คือ $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
เครื่องบันทึกข้อมูล		ยี่ห้อ: Graphtec รุ่น: GL240 แบบ: 10 channels บันทึกข้อมูลลง SD card ค่าความถูกต้อง คือ $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
เครื่องวัดตัวแปรทางไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์		ยี่ห้อ: Solar module analyzer รุ่น: PROVA 210A วัดแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 60 V วัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด 12 A ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$ (ใช้ทดสอบแผง Solar PV/T ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน)

อุปกรณ์	รูป	คุณสมบัติ
เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มความร้อน		ยี่ห้อ: Treatton รุ่น: Z-3004 อัตราการไหล: 4-60 LPM
เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำที่แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์		ยี่ห้อ: Treatton รุ่น: Z-3002 อัตราการไหล: 2-18 LPM
อุปกรณ์วัดค่ารังสีอาทิตย์		ยี่ห้อ: Apogee การตอบสนองเอาต์พุต: 0.2 mV ต่อ W/m ² ความไวรับเทียบ: 5 W/m ² ต่อ mV
เครื่องมือวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า		ยี่ห้อ: Chauvin รุ่น: C.A. วัดแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 1,000 V วัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด 200 A
แคลมป์มิเตอร์		ยี่ห้อ: UNI-T รุ่น: UT203 วัดแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 600 V วัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด 400 A ค่าความถูกต้อง คือ ± 1-3%

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ โดยการใช้ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

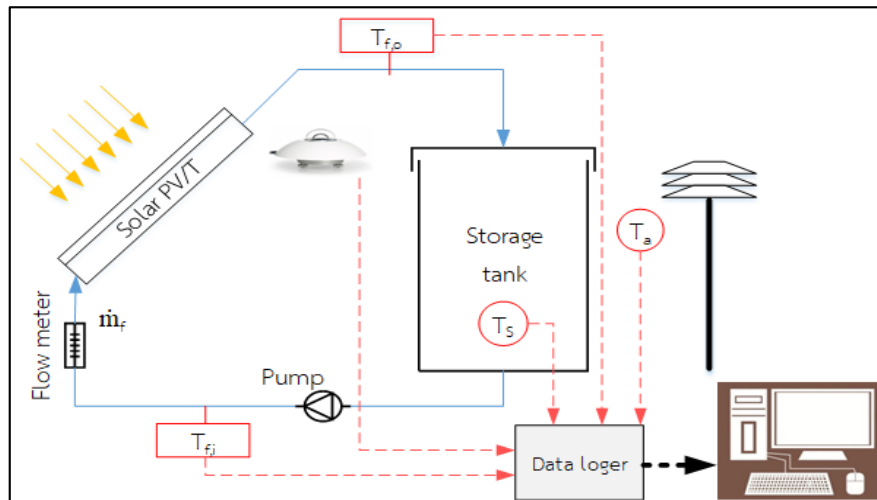
ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ และทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ป้อนความร้อน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (แผง Solar PV/T) เพื่อจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยป้อนความร้อนเสริมการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์จะใช้เพื่อคำนวณและวิเคราะห์ในการเลือกขนาด จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแผง Solar PV/T ที่เหมาะสมแก่ระบบดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้

- การทดสอบสมรรถนะของป้อนความร้อน จะทำการทดสอบกับป้อนความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ยี่ห้อ KONNEN รุ่น Volcano series HT7P-E7 ใช้สารทำงาน R134a สามารถทำความร้อนได้สูงสุดที่ 80°C

- การทดสอบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Mono crystalline silicon) ยี่ห้อ Jinko Solar ที่มีขนาด 1.94 m² และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 Wp

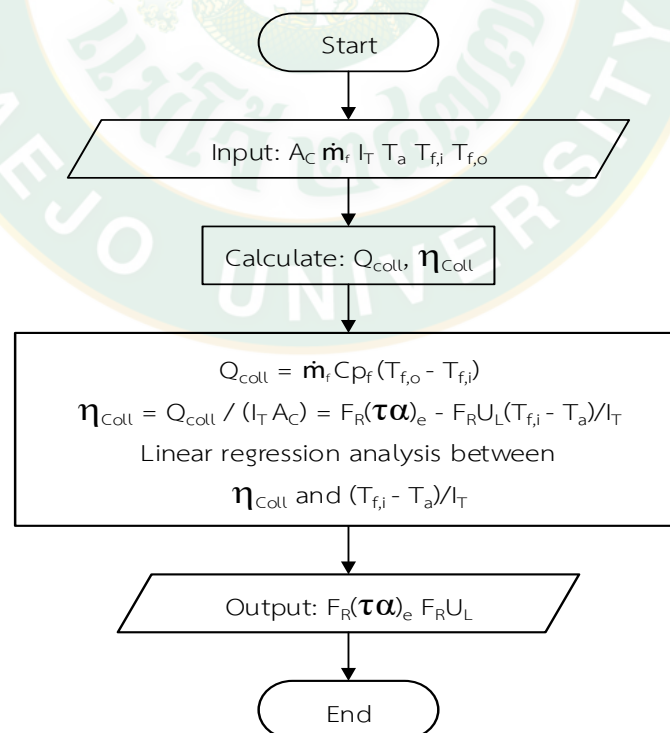
- การทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T โดยทดสอบทั้งแบบมีกระจกและไม่มีกระจกครอบ ซึ่งจะทดสอบตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 ในการหาค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ F_{RUL} เพื่อสามารถทำนายกำลังไฟฟ้าและความร้อนที่แผงผลิตได้จากสมการที่ 12 และเพื่อคัดเลือกแผงที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดไปใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชุดทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หันแผงไปทางทิศใต้ และเอียงทำมุมระนาบตามละติจูดที่ตั้งของสถานที่ทดลอง ซึ่งกรณีนี้เอียงมุม 18°
2. ทดสอบแผงเมื่อค่ารังสีอาทิตย์มีค่า $\geq 790 \text{ W/m}^2 \pm 32 \text{ W/m}^2$
3. ควบคุมอัตราการสูญเสียความร้อนหน้าแผงให้คงที่ โดยใช้พัดลมเป่าบริเวณหน้าแผงที่ค่าความเร็วเฉลี่ยระหว่าง 2.2-4.5 m/s
4. ควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบตามค่ามาตรฐานที่ 0.02 kg/s·m²
5. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงด้วยขดลวดไฟฟ้า โดยอุณหภูมิที่ทำการทดสอบอยู่ที่ 35 40 45 50 55 60 และ 65 °C ตามลำดับ
6. ระบบจะต้องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state condition) เพื่อทำการเก็บและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก อุณหภูมิน้ำในถัง ที่ใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) เป็นตัวบันทึกอุณหภูมิต่าง ๆ และค่ารังสีอาทิตย์ที่บันทึกด้วย Pyranometer ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ระบบที่ใช้ทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

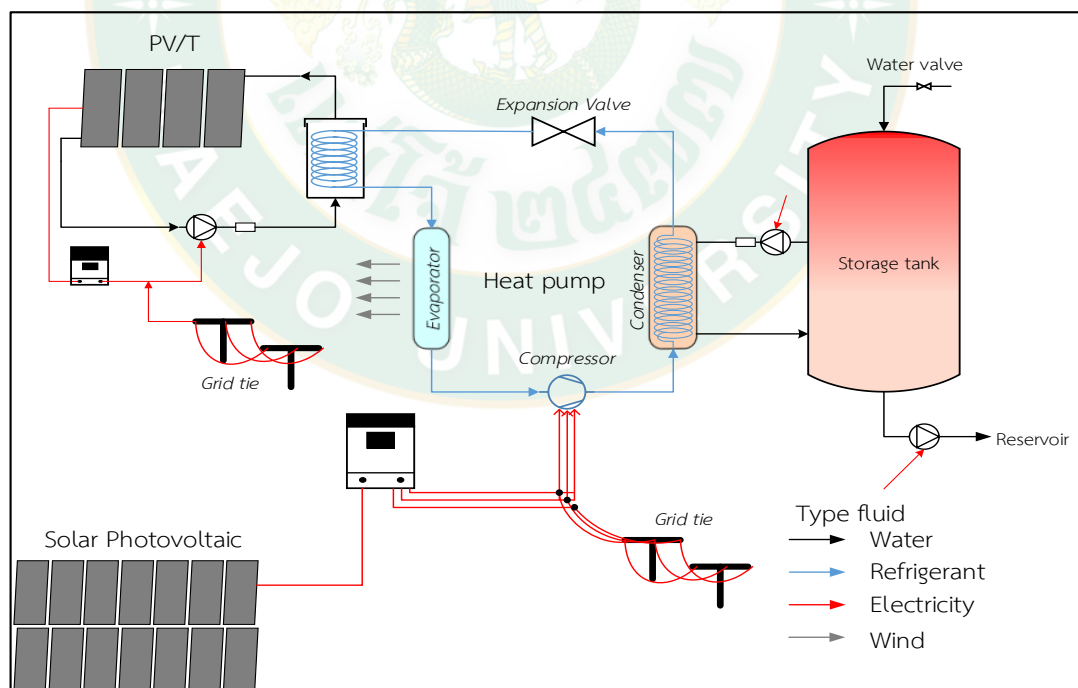
7. เมื่อทำการเก็บข้อมูลเสร็จ ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 29 เพื่อเลือกเอาแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะดีที่สุดไปติดตั้งในระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 29 ขั้นตอนทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ตาม ASHRAE standard 93-2003

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลอง ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จะได้จำนวน และขนาดของอุปกรณ์ที่เหมาะสม จึงทำการติดตั้งระบบดังกล่าว โดยมีการออกแบบระบบดังในภาพที่ 30 หลักการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มจาก เมื่อน้ำที่ไหลเข้าไปรับความร้อนจากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น และไหลเข้าไปถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานของปั๊มความร้อนตรงจุดระหว่างวาล์วลดความดันกับเครื่องระเหยโดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนการทำงานของปั๊มความร้อนเริ่มจาก สารทำงานในสถานะไอร้อนยวดยิ่งที่ออกจากเครื่องอัดไอไหลออกไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนเพื่อรับความร้อนภายในเครื่องควบแน่น แล้วสารทำงานจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลต่อไปยังวาล์วลดความดัน เพื่อลดอุณหภูมิและความดันก่อนที่จะไหลไปที่เครื่องระเหยและหมุนเวียนไปเรื่อย ๆ ส่วนทางด้านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการต่อร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานการไฟฟ้าจะผลิตไฟฟ้าป้อนให้กับปั๊มความร้อน และไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ก็จะถูกป้อนให้กับปั๊มต่าง ๆ ในระบบ เช่น ปั๊มเวียนน้ำในถังเก็บน้ำร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และปั๊มส่งน้ำไปอย่างลวกสุกร



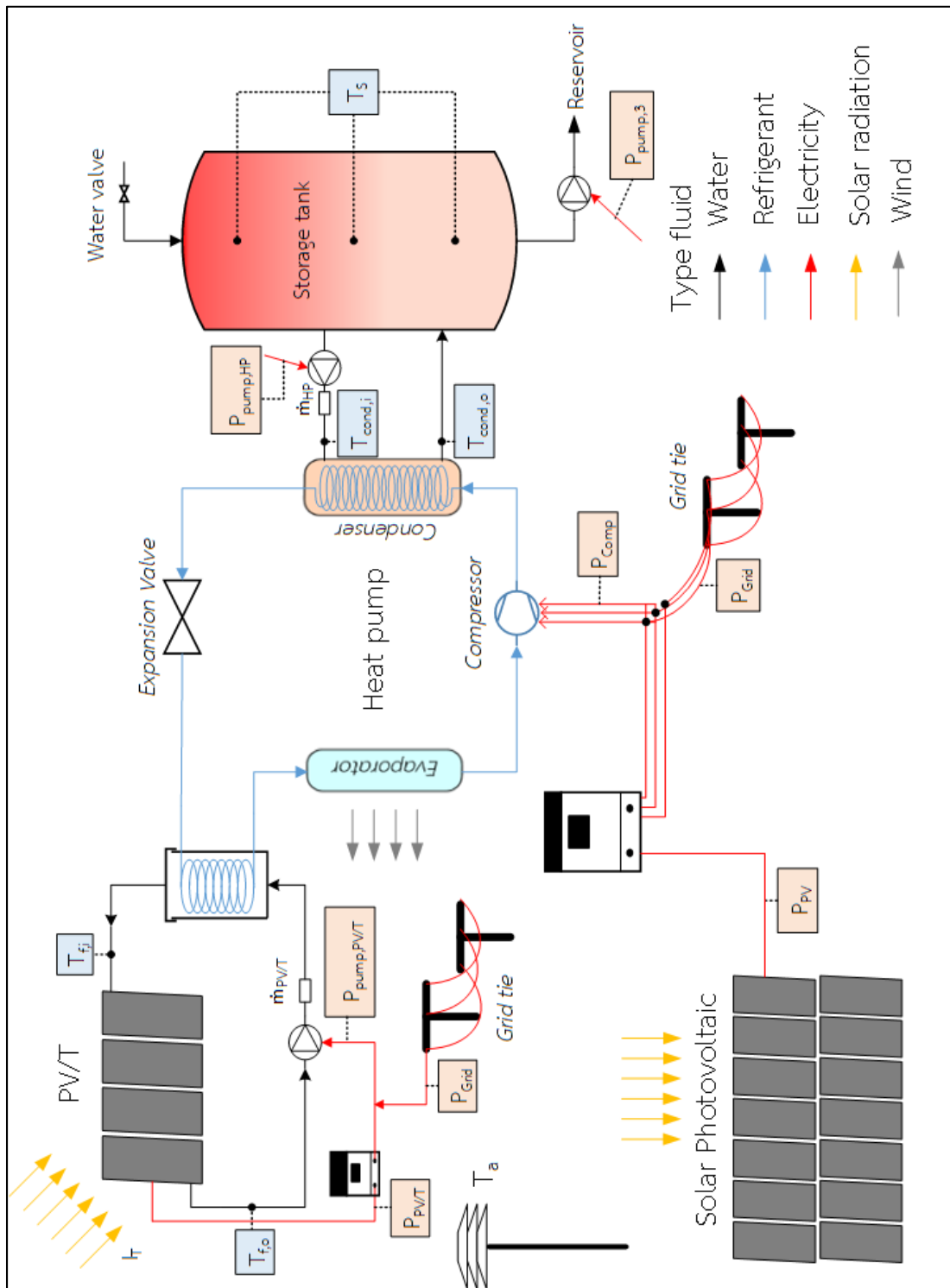
ภาพที่ 30 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้า และน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดสอบและเก็บบันทึกข้อมูล ในการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 อัตราการไหลที่ผ่านแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คือ อัตราการไหลที่ 6.8 LPM 8.2 LPM และ 9.5 LPM เพื่อหาอัตราการไหลที่ทำให้สมรรถนะของระบบดีที่สุด และใช้กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (Grid) น้อยที่สุด โดยได้ทำการติดตั้งจุดตรวจวัดต่าง ๆ ดังภาพที่ 31 ขั้นตอนในการทดสอบมีดังนี้

1. ตั้งค่าปั๊มความร้อนไว้ที่อุณหภูมิ 65°C
2. ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านปั๊มความร้อนไว้ที่ 30 LPM
3. เติมน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ปริมาณ 2,500 L (ปริมาณที่ใช้จริงในโรงฆ่าสัตว์)
4. เริ่มบันทึกข้อมูลในเวลา 9:00 น. จนผลิตน้ำร้อนได้ 65 °C และทำการบันทึกข้อมูลการ

ทดลองทุก ๆ 5 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบหาช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์ เนื่องจากทางโรงฆ่าสัตว์แห่งนี้ได้เริ่มดำเนินการในเวลา 12:30 น. จึงต้องหาเวลาในการทำงานของระบบให้เหมาะสม และหันเวลาใช้งานจริงของโรงฆ่าสัตว์ โดยบันทึกข้อมูลการทดลองทุก ๆ 5 นาที ส่วนรายละเอียดในการทดสอบเหมือนดังขั้นตอนที่ 3



ภาพที่ 31 รายละเอียดตำแหน่งตรวจวัดของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยนำเอาค่าต่างๆที่วัดได้ไปวิเคราะห์สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Thermal Hybrid Efficiency; η_{PVT}) สมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio; PR) ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (Energy Efficiency Ratio; EER_{HP}) และ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (η_{Sys})

ขั้นตอนที่ 6 ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และค่าดัชนีชี้วัดค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption; SEC) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 29-32



บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

จากงานวิจัยในการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

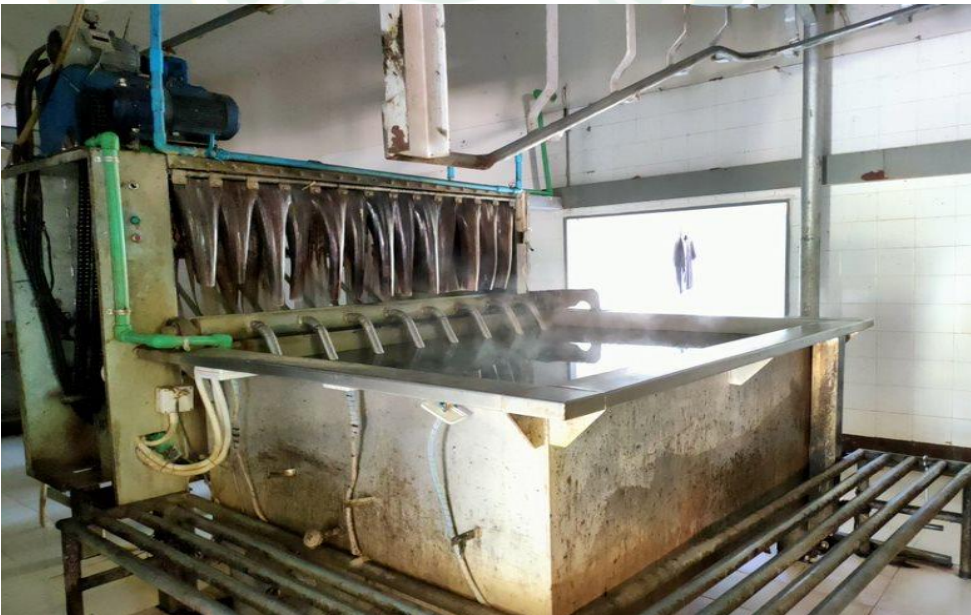
1. ข้อมูลการใช้พลังงานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ
2. การออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
3. การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อหาอัตราการไหลน้ำระบายความร้อนผ่านแผงที่เหมาะสมแก่ระบบ
4. การทดสอบการใช้งานจริงของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
5. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์

ข้อมูลการใช้พลังงานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ

โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ตั้งขึ้นเมื่อวันที่ 21 ก.พ. ปี พ.ศ. 2549 และตั้งอยู่ในเขตชุมชนบ้านหนองบัวคำ หมู่ที่ 3 ตำบลหนองบัว อำเภอไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ แสดงดังภาพที่ 32 โดยทางโรงฆ่าสัตว์แห่งนี้ใช้เครื่องลวกและชุดขนสุกรที่ติดตั้งขดลวดไฟฟ้าจำนวน 4 ชุด ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 36 kW พร้อมด้วยอ่างลวกขนาดประมาณ 2,500 L แสดงดังภาพที่ 33 ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 62-64°C ซึ่งขั้นตอนการฆ่าและชำแหละสุกรเริ่มจากการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงช็อตสุกรให้เสียชีวิตแล้วทำการแทงเพื่อเอาเลือดสุกรจนหมด หลังจากนั้นนำไปลวกในอ่างน้ำร้อนประมาณ 15 นาที ทำการชุดขน ต่อด้วยการชำแหละเนื้อ และนำเอาไปเก็บไว้ในห้องเย็นเพื่อการขนส่งให้กับทางลูกค้า

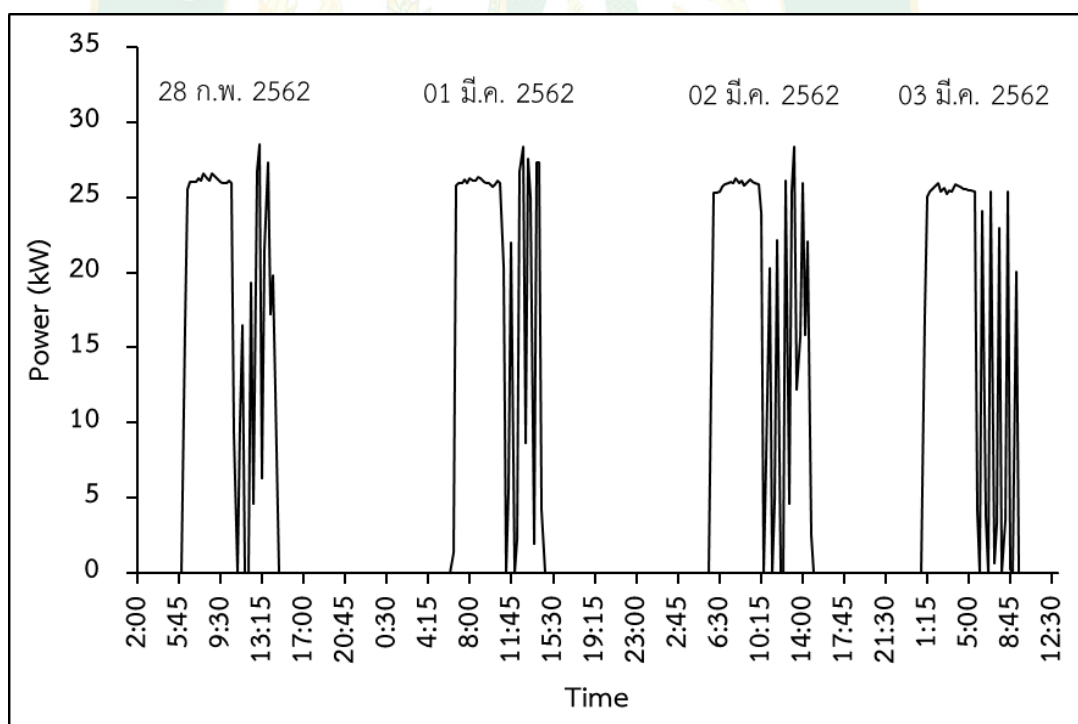


ภาพที่ 32 โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ

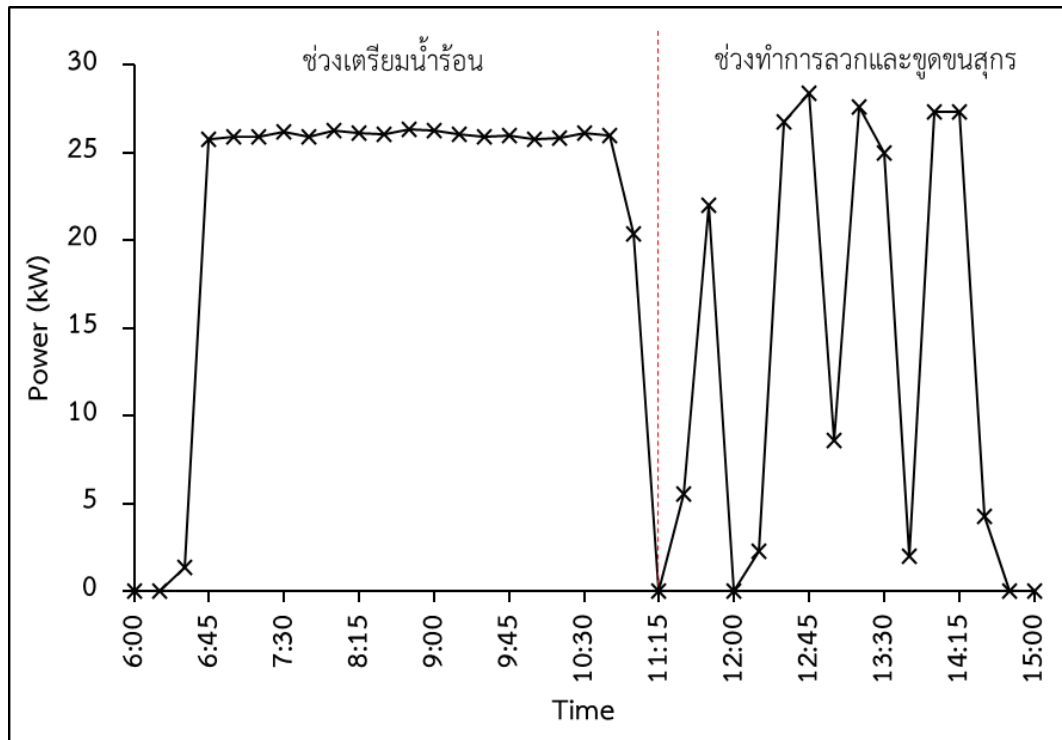


ภาพที่ 33 อ่างลวกและชุดขนสุกร

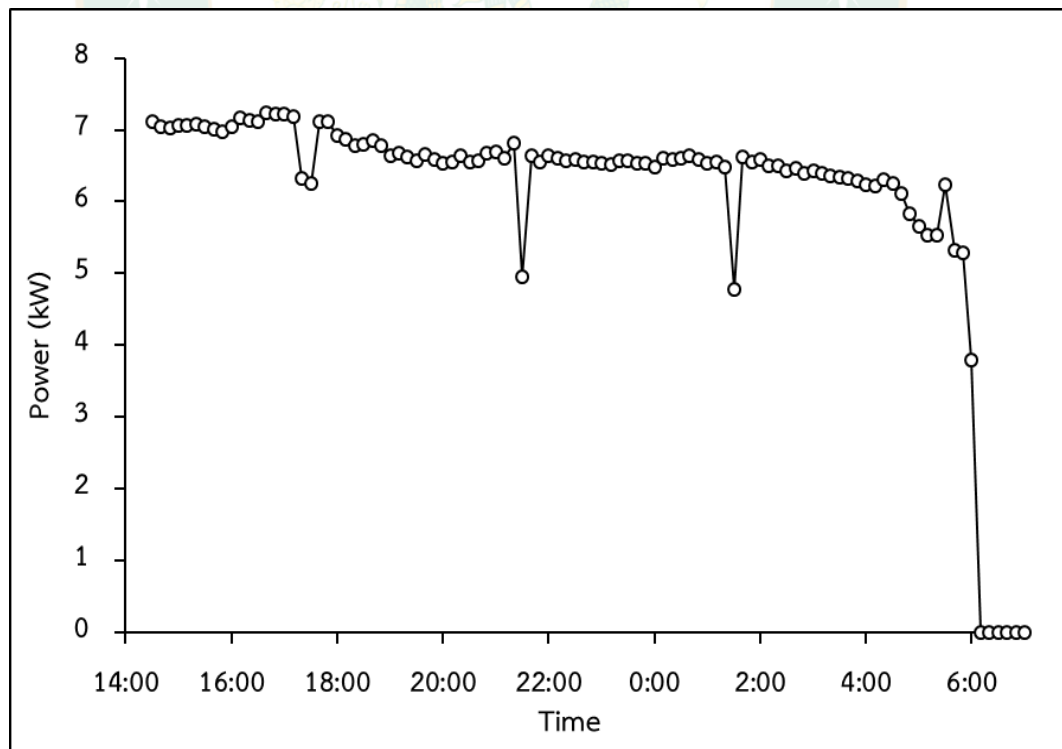
ในงานวิจัยได้ทำการสำรวจและตรวจวัดลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาล ตำบลไชยปราการ พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยกัน 2 ส่วนหลักได้แก่ เครื่องลวกและชุดขนสุกร และเครื่องทำความเย็นสำหรับเก็บรักษาเนื้อสุกรที่ผ่านการชำแหละแล้ว ในการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า ได้มีการเก็บบันทึกข้อมูลเป็นเวลา 4 วัน เก็บข้อมูลทุก 15 นาที ตั้งแต่วันที่ 28 ก.พ. - 3 มี.ค. 2562 ดังภาพที่ 34 โดยทั้ง 4 วัน มีลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้น ผู้วิจัยได้เลือกเอา ข้อมูลของวันที่ 28 ก.พ. 2562 มาวิเคราะห์ จากภาพที่ 35 พบว่าเครื่องลวกและชุดขนสุกรจะเริ่มทำงานในช่วงเวลา 06:00 น ถึง 10:45 น โดยรวมใช้เวลาประมาณ 4.5 ชั่วโมง เพื่อผลิตน้ำร้อนให้อุณหภูมิประมาณ 64°C และสามารถตรวจวัดกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 27 kW หากคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ผลิตน้ำร้อนต่อวันเท่ากับ 117.53 kWh/day โดยในช่วงเวลา 11:15 – 16:30 น. เป็นช่วงเวลาที่ขดลวดไฟฟ้าจะทำงานเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำให้ร้อนคงที่ และมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 52.51 kWh/day ส่วนทางด้านเครื่องทำความเย็นที่ใช้สำหรับเก็บแช่เนื้อ จากการเก็บข้อมูลแล้วพบว่ามีการเปิดใช้งานในเวลา 14:30 น. จนถึง 06:00 น. กำลังไฟฟ้าที่วัดได้เฉลี่ยเท่ากับ 6.52 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 102.21 kWh/day ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 34 ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนในเวลา 4 วัน

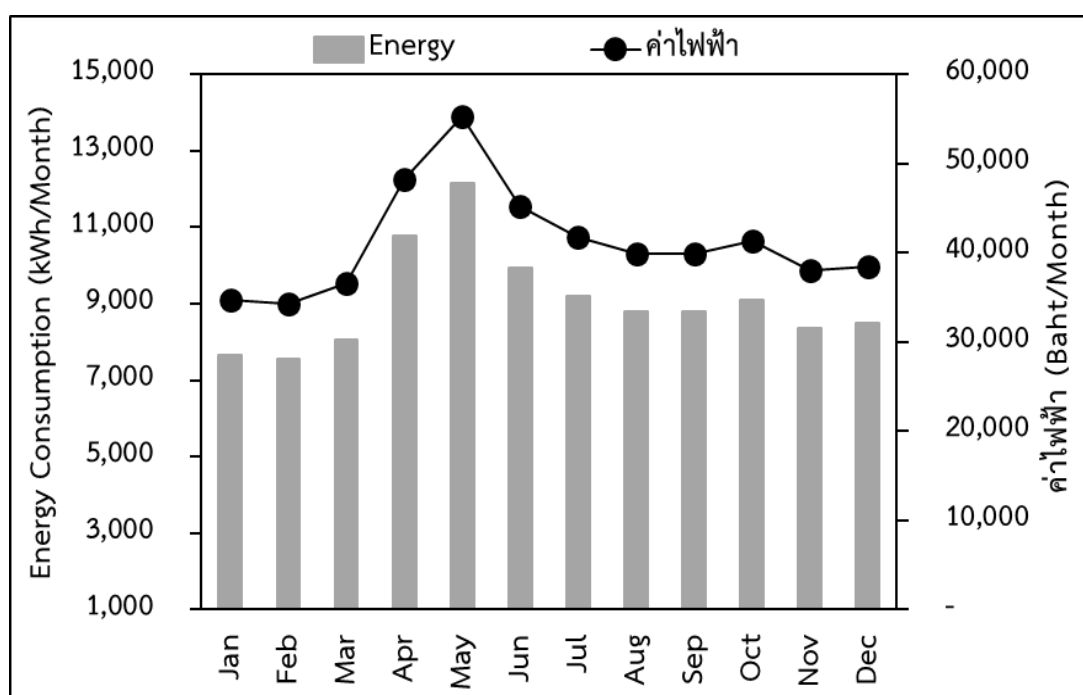


ภาพที่ 35 ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนใน วันที่ 28 ก.พ. 2562



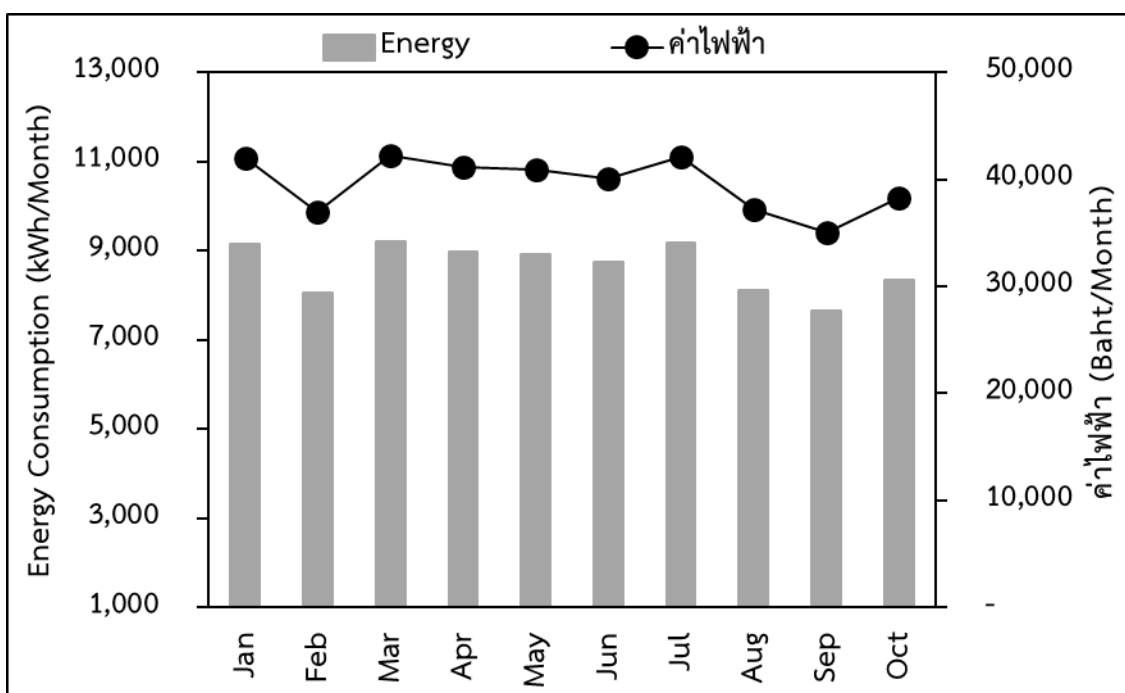
ภาพที่ 36 ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นใน วันที่ 28 ก.พ. 2562

สำหรับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการย้อนหลัง ตั้งแต่เดือน มกราคม 2561 ถึง ตุลาคม 2562 แสดงดังภาพที่ 37 พบว่าเดือนพฤษภาคมมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุดเท่ากับ 12,157 kWh มีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเท่ากับ 55,256.78 Baht ส่วนเดือนกุมภาพันธ์มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 7,556 kWh และมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเท่ากับ 34,271.20 Baht หากคิดเป็นค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 9,074.5 kWh/Month หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 41,131.80 Baht/Month



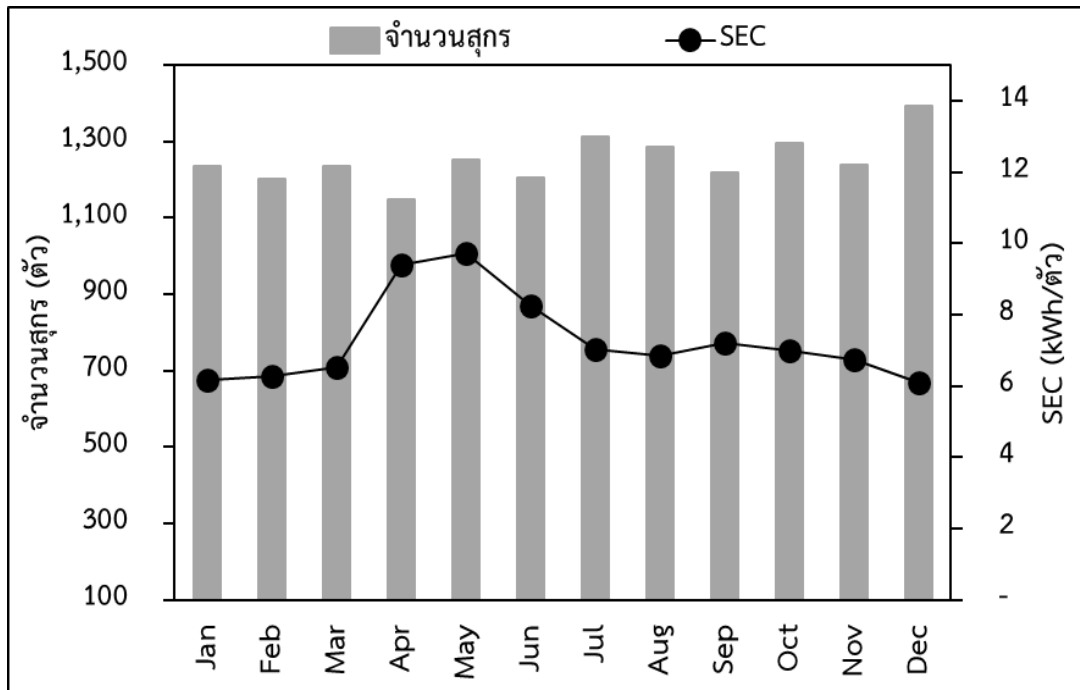
ภาพที่ 37 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2561

การใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2562 แสดงดังภาพที่ 38 โดยได้รวบรวมข้อมูลตั้งแต่เดือน มกราคม - เดือนตุลาคม เนื่องจากเดือนพฤศจิกายนเป็นช่วงที่ทำการติดตั้งระบบ พบว่าเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด ได้แก่เดือนมีนาคมมีค่าเท่ากับ 9,201 kWh มีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเท่ากับ 42,197.53 Baht ส่วนเดือนกันยายนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 7,651 kWh และมีค่าใช้จ่ายอยู่ 35,056.52 Baht และคิดเป็นค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 8,635 kWh/Month หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 39,591.30 Baht/Month

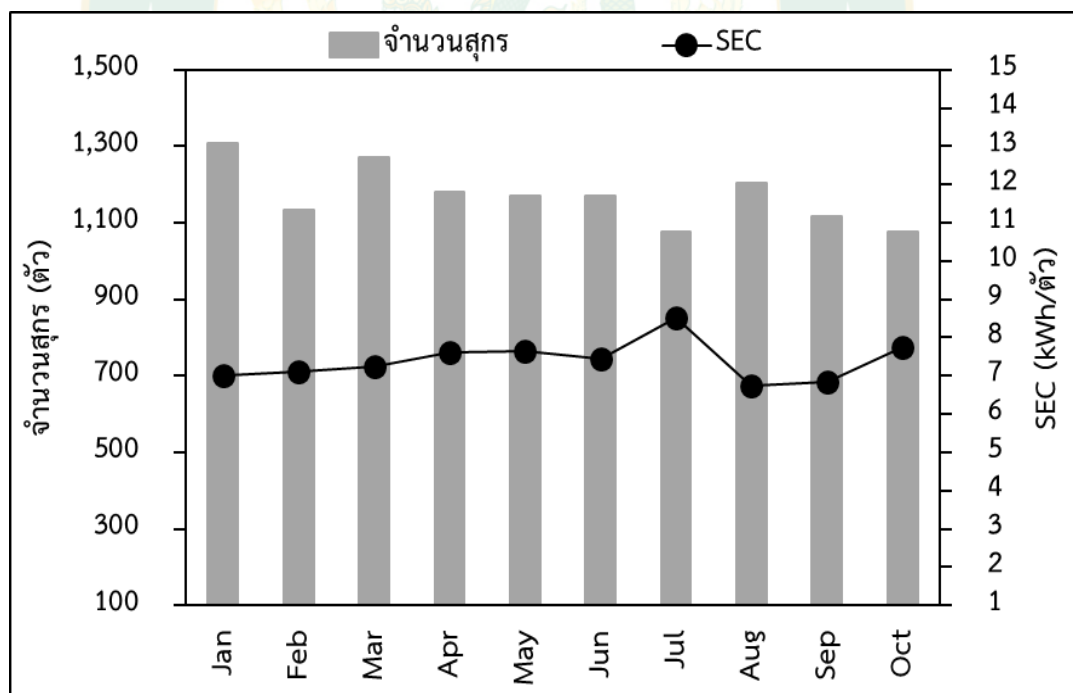


ภาพที่ 38 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2562

จากภาพที่ 39 และภาพที่ 40 แสดงข้อมูลของจำนวนสุกรที่นำมาฆ่าในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ โดยในปี พ.ศ. 2561 พบว่าเดือนธันวาคมเป็นเดือนที่มีการฆ่าและสุกรเป็นจำนวนสูงที่สุดที่ 1,392 ตัว และต่ำสุดในเดือนกุมภาพันธ์ 1,201 ตัว หากคิดจำนวนสุกรเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1,252 ตัว/เดือน สำหรับข้อมูลในปี พ.ศ. 2562 (เดือนมกราคม–เดือนตุลาคม) พบว่าจำนวนสุกรที่นำเข้ามาฆ่าและสูงสุดคือเดือนมกราคม 1,307 ตัว และต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม 1,077 ตัว คิดเป็นจำนวนสุกรเฉลี่ย 1,171 ตัว/เดือน เมื่อนำเอาข้อมูลพลังงานไฟฟ้าและจำนวนสุกรแต่ละเดือนมาวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร (SEC; Specific Energy Consumption) พบว่าดัชนีการใช้พลังงานของทั้งสองปีมีค่าอยู่ระหว่าง 6.09–9.71 kWh/ตัว หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.33 kWh/ตัว

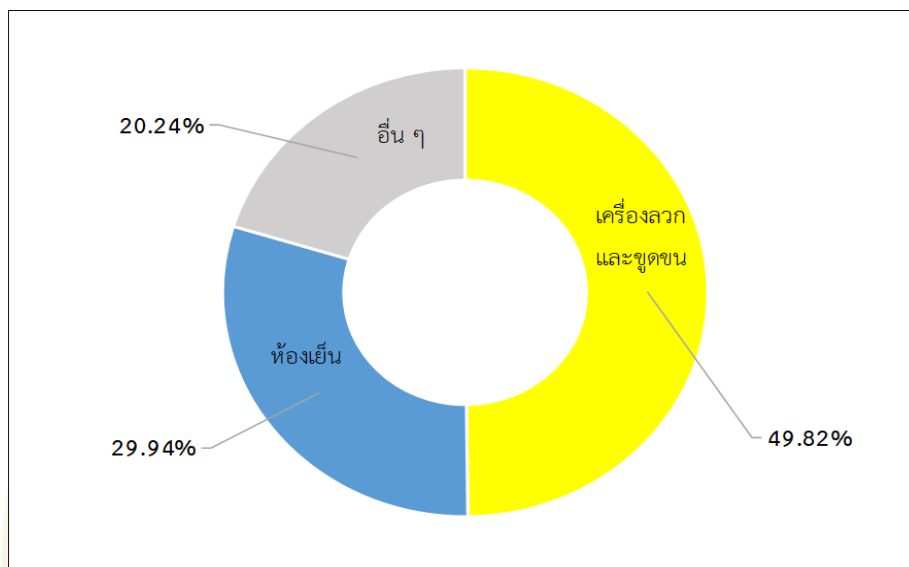


ภาพที่ 39 ข้อมูลของจำนวนสุกรที่นำมาฆ่าและ ค่า SEC ในปี พ.ศ. 2561



ภาพที่ 40 ข้อมูลของจำนวนสุกรที่นำมาฆ่าและ ค่า SEC ในปี พ.ศ. 2562

จากการสำรวจและเก็บข้อมูล พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนหลัก ๆ ของโรงฆ่าสัตว์แห่งนี้คือ ส่วนเครื่องลวกและชุดขนสุกร และเครื่องทำความเย็นในห้องเย็น โดยสามารถแบ่งสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ เครื่องลวกและชุดขนสุกร 49.82% ห้องเย็น 29.94% และอื่น ๆ 20.24% ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ

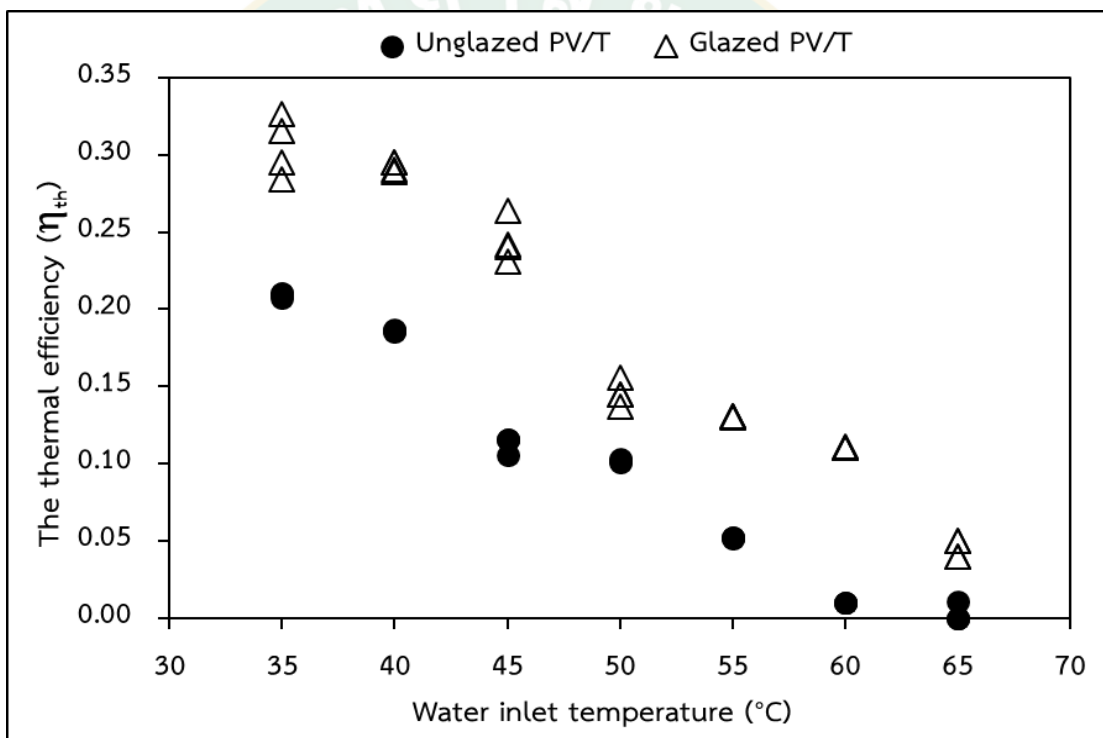
การออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ก่อนทำการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์แต่ละชนิดก่อน เพื่อนำเอาผลทดสอบไปวิเคราะห์ทำนายหาจำนวน และขนาดของอุปกรณ์แต่ละชนิดก่อนจะไปติดตั้งระบบจริง โดยมีรายละเอียดดังนี้

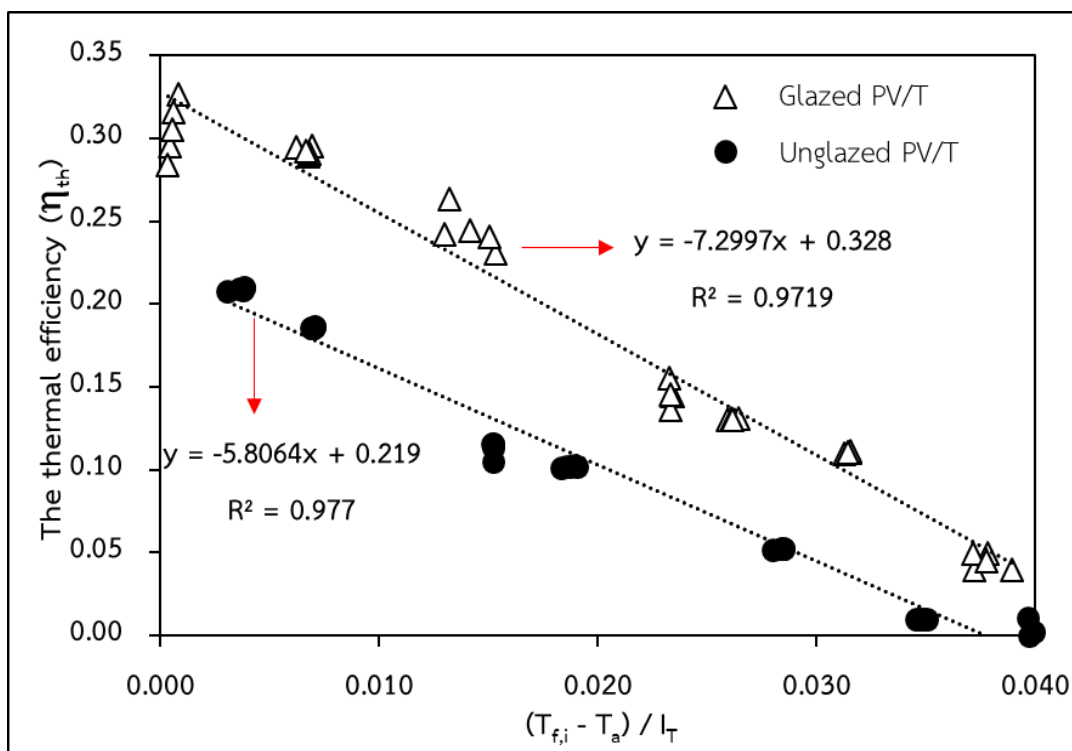
1. การทดสอบสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบ (Glazed PV/T) และแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีกระจก (Unglazed PV/T) โดยทดสอบตามมาตรฐานของ ASHRAE STANDARD 93-2003 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผลทดสอบพบว่าหากอุณหภูมิน้ำเข้าแผงมีค่าที่สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของทั้งสองแผงมีค่าลดลง ดังภาพที่ 42 เนื่องจากอุณหภูมิแผงสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ 35 °C จะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่าที่สูงสุด จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบตาม ASHRAE STANDARD 93-2003 พบว่ามีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.328 และ F_{RUL} เท่ากับ 7.2997 W/m²·K สำหรับแผง Solar PV/T แบบไม่มีกระจก พบว่ามีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.219 และ F_{RUL} เท่ากับ 5.8064W/m²·K ดังภาพที่ 43 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบมีประสิทธิภาพทางด้านความร้อนที่สูงกว่าแผง Solar PV/T แบบไม่มีกระจก



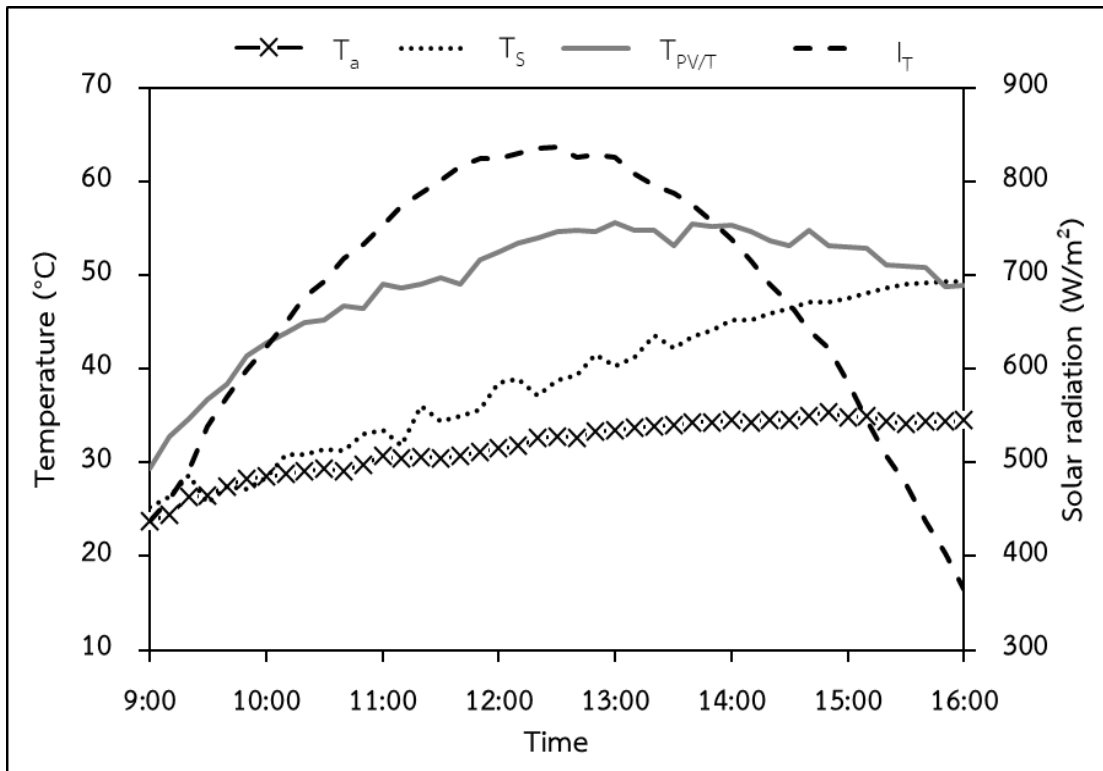
ภาพที่ 42 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิน้ำเข้าแผง



ภาพที่ 43 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

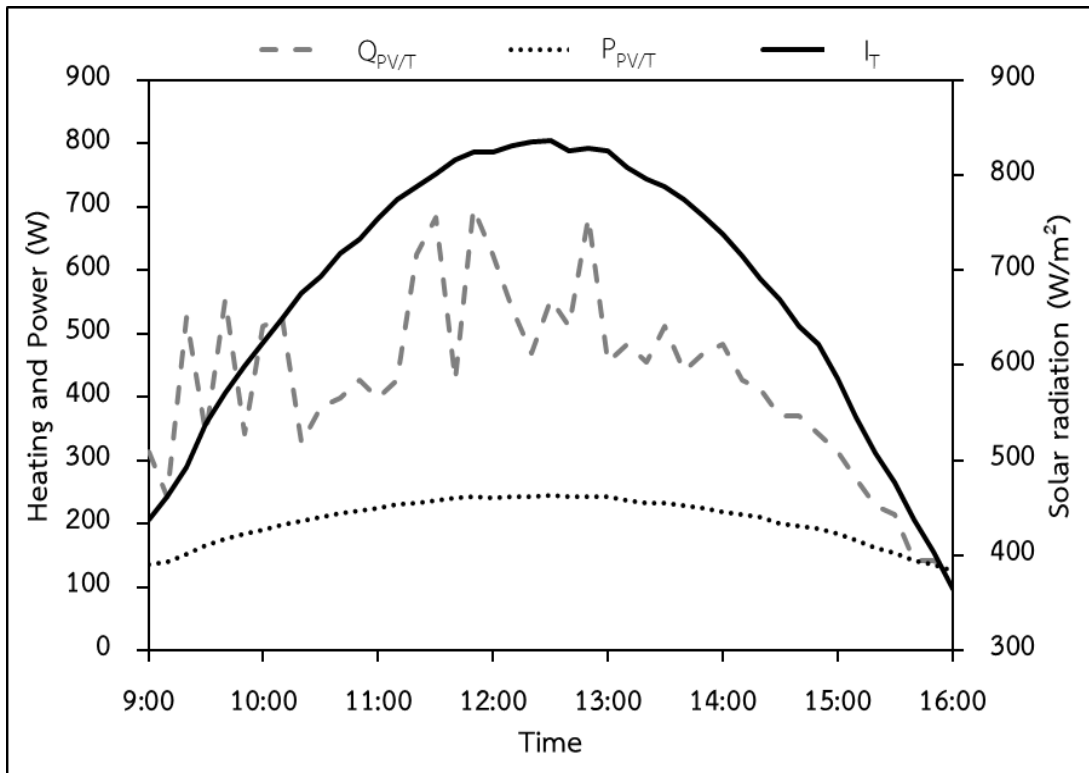
แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบ

การทดสอบสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการทำงานของระบบทั้งวันเพื่อหาประสิทธิภาพโดยรวมของแผง โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ ตั้งแต่เวลา 9:00 – 16:00 น. ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ 122 L และทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ภาพที่ 44 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบชนิดผลึกเดี่ยวพบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:30 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 837.12 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง สำหรับอุณหภูมิแวดล้อม ตั้งแต่เวลา 9:00 น. มีค่าเท่ากับ $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$ และสูงสุด $35.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ณ เวลา 14:50 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกครอบมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $29.3 \text{ }^\circ\text{C}$ จนถึงเวลา 13:00 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ $55.6 \text{ }^\circ\text{C}$ สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $25.3 \text{ }^\circ\text{C}$ และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ $49.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ณ เวลา 15:50 น. ซึ่งเวลาดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิแผงมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำในถังแต่เนื่องจากแผงยังมีความร้อนสะสมอยู่จึงทำให้อุณหภูมิน้ำในถังมีค่าที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

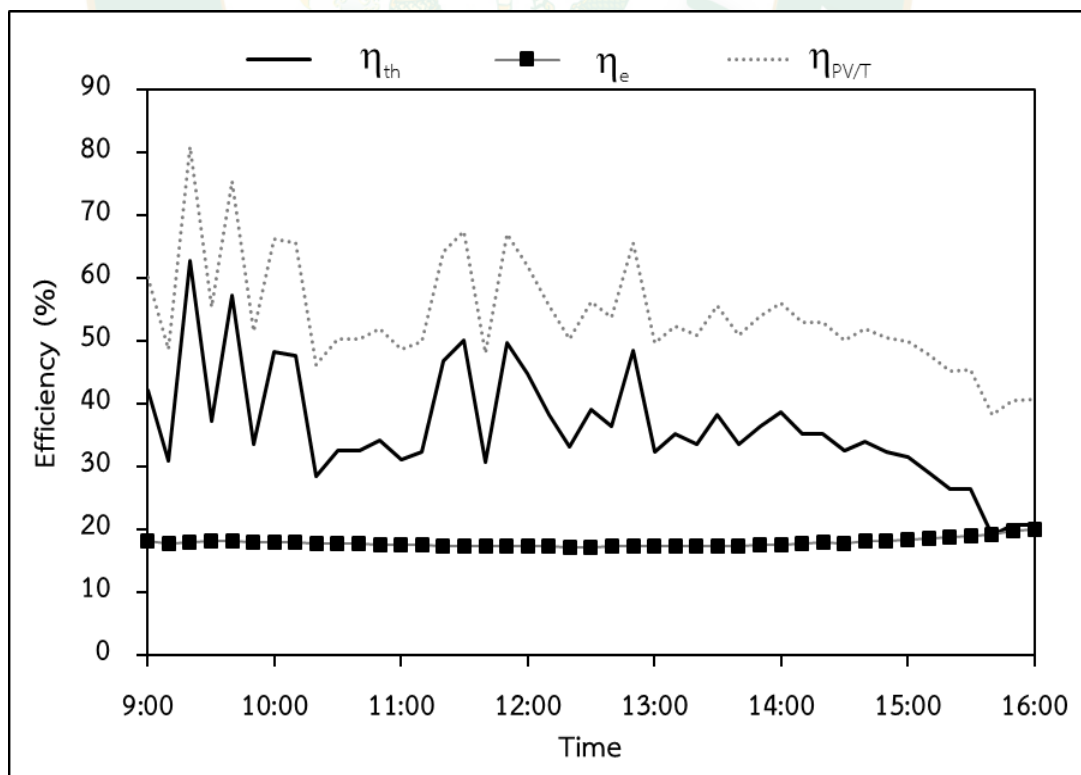


ภาพที่ 44 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ

จากภาพที่ 45 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T ที่คำนวณมาจากสมการที่ 13 แบบมีกระจกครอบ พบว่า ณ เวลา 11.50 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 696.73 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 6:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 10.9 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่น เมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 243.7 W ที่เวลา 12:30 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ 1,458.73 Wh จากภาพที่ 46 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.85% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 36.28% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 54.13%



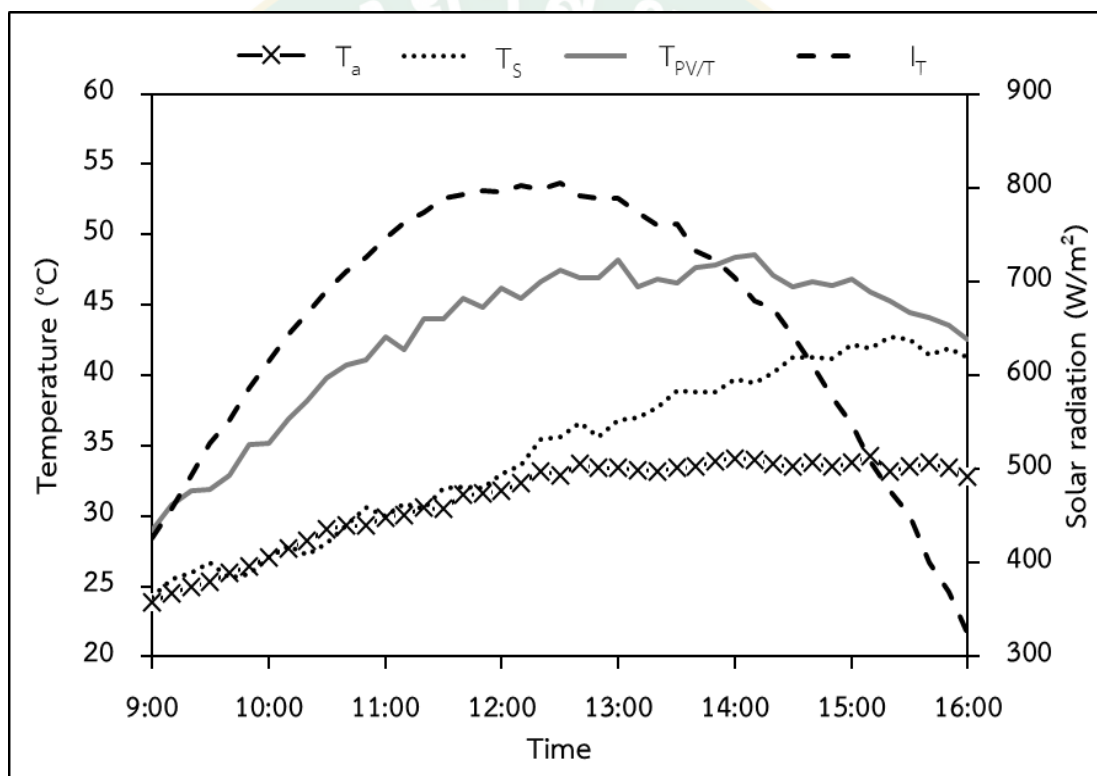
ภาพที่ 45 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ



ภาพที่ 46 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ

แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีกระจก

ภาพที่ 47 แสดงกรณีทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีกระจก ชนิดผลึกรวม จากภาพพบว่าค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเวลา 12:30 น. มีค่ารังสีอาทิตย์ สูงสุดที่ 804.92 W/m^2 หลังจากนั้นจึงเริ่มลดลง สำหรับอุณหภูมิแวดล้อมเริ่มตั้งแต่เวลา 9:00 น. มี อุณหภูมิเท่ากับ $23.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และสูงสุด $34.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ณ เวลา 15:10 น. อุณหภูมิแผงมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึงเวลา 14:10 น. จึงมีอุณหภูมิสูงสุดที่ $48.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้น เท่ากับ $24.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สูงขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ $42.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ณ เวลา 15:20 น. และมีค่าลดลง เรื่อยๆ เนื่องจากค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงที่ค่าที่ลดลง

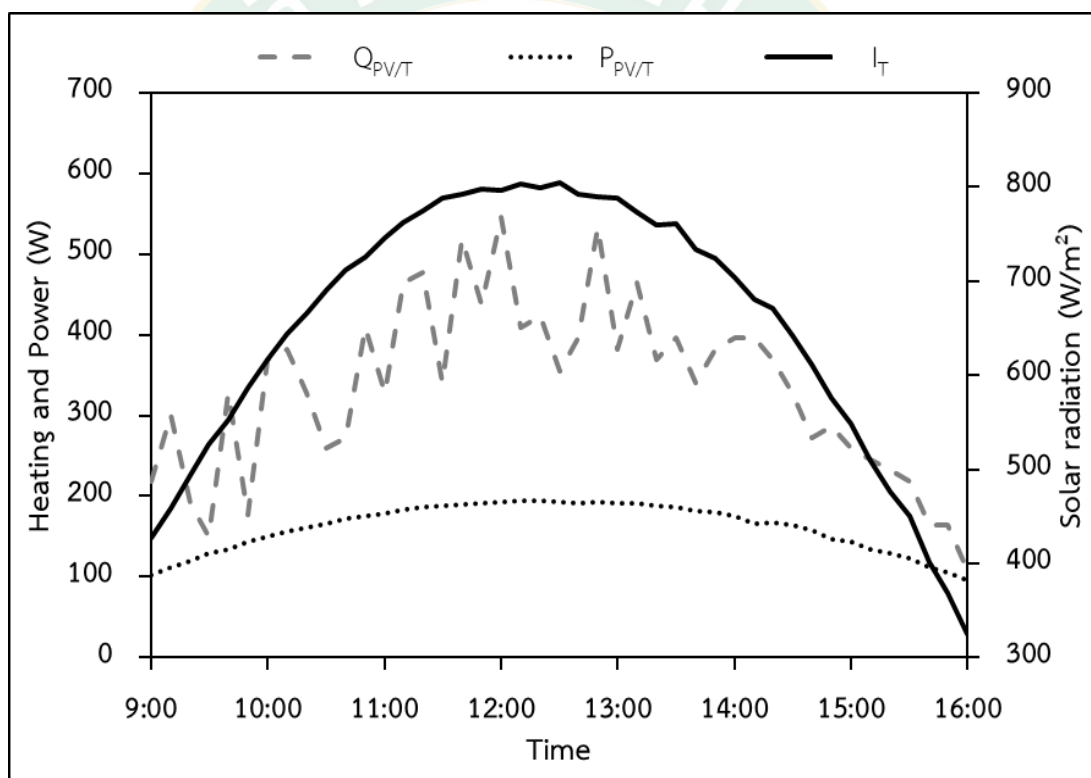


ภาพที่ 47 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบที่ไม่มีกระจก

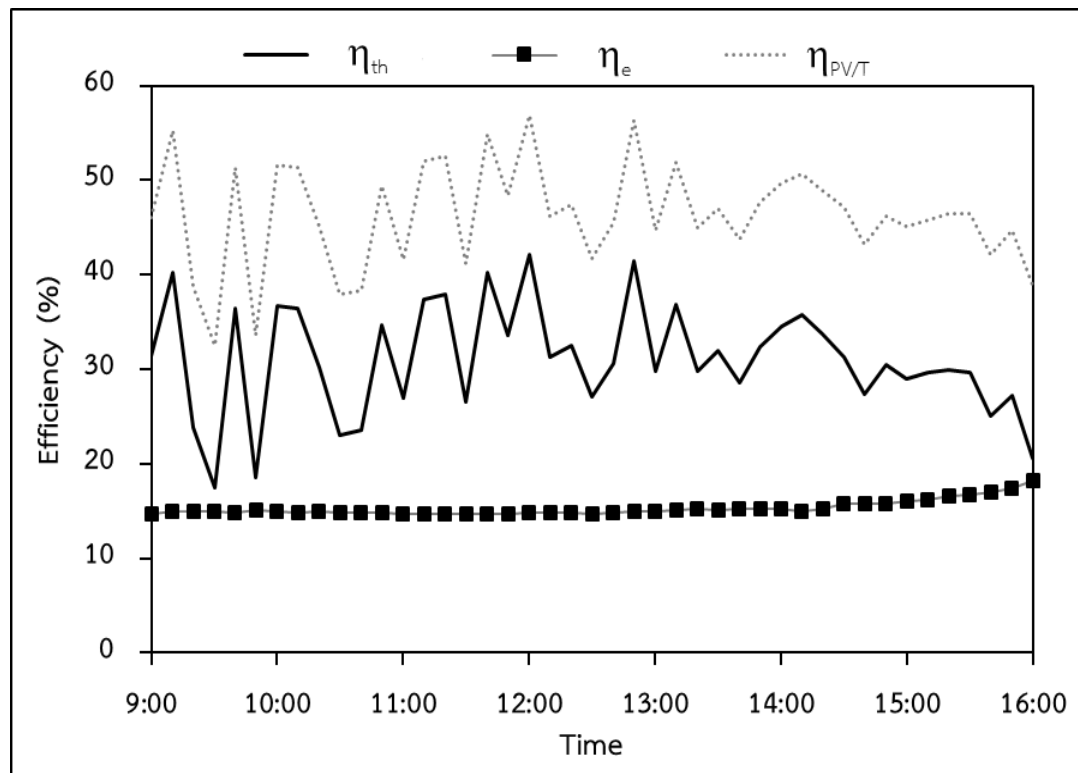
ภาพที่ 48 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบไม่มี กระจกครอบ พบว่า ณ เวลา 12:00 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 545.98 W หากคิดเป็น อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผงจะเห็นว่า ในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 8.6 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 194 W ที่เวลา 12:10 น. คิดเป็นหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ $1,155.31 \text{ Wh}$ ส่วนในการทดสอบหา ประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน

พลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่ามีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 15.29% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 31.01% และประสิทธิภาพโดยรวมมีค่าเฉลี่ยที่ 46.30% ดังภาพที่ 49

หลังจากเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T ทั้งแบบมีกระจกและไม่มีกระจกครอบ พบว่าแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมที่สูงกว่าแผง Solar PV/T แบบที่ไม่มีกระจกครอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกเอาแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบเข้ามาติดตั้งร่วมกับปั๊มความร้อน หรือระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยติดตั้งระบบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ



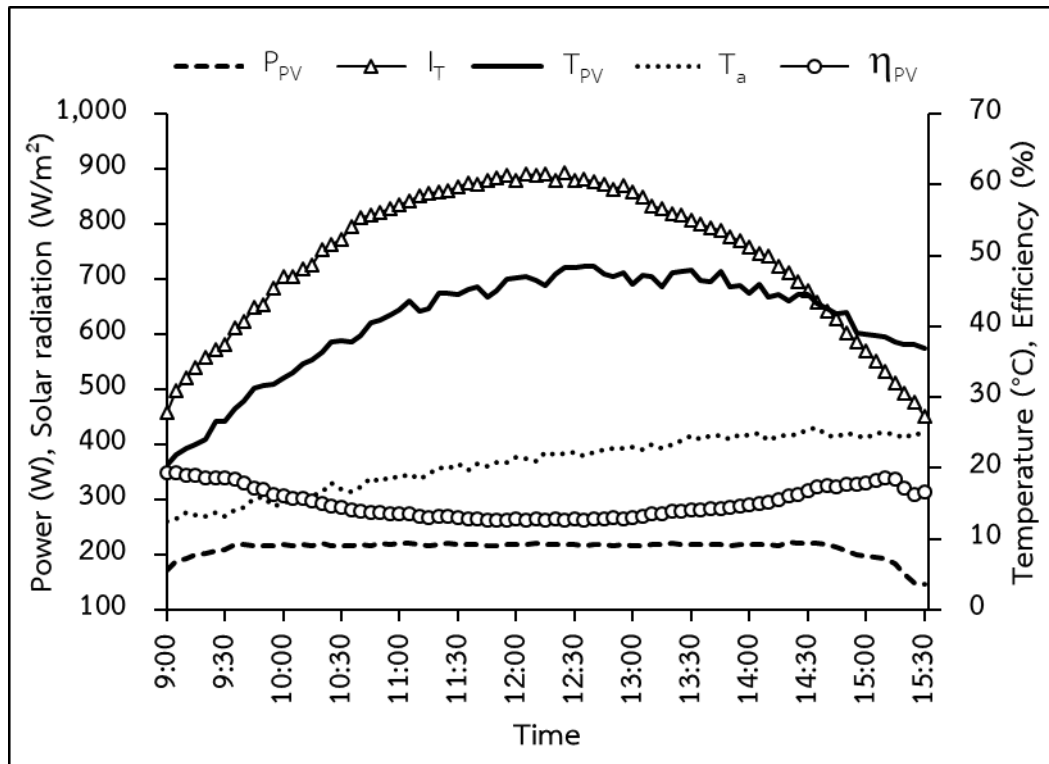
ภาพที่ 48 ความร้อน และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบที่ไม่มีกระจก



ภาพที่ 49 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบที่ไม่มีกระจก

2. การทดสอบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

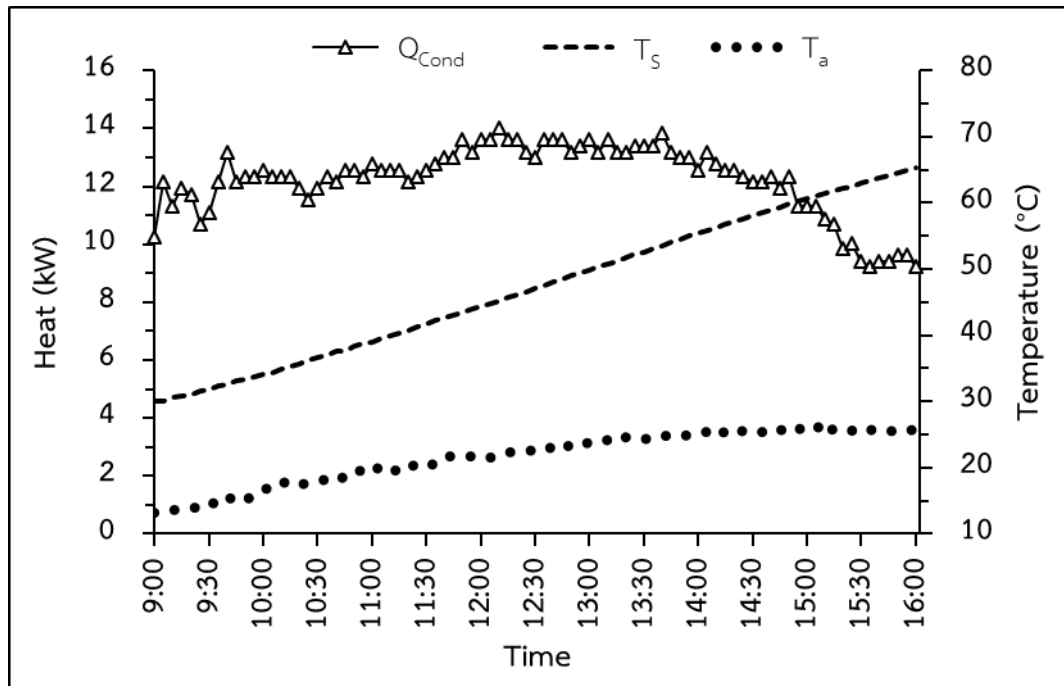
การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar PV) ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 9:00 – 15:30 น. จากภาพที่ 50 พบว่า มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุด ณ เวลา 12:25 น. เท่ากับ 893.3 W/m² มีอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 20.6 °C ส่วนอุณหภูมิแผงมีค่าสูงสุด 48.5 °C หรือมีค่าเฉลี่ย 40.7 °C ณ เวลา 12:40 น. สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิแผง จึงทำให้ ณ เวลา 14:20 น. แผง Solar PV ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 222.8 W หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 211.8 W สำหรับประสิทธิภาพของแผงมีค่าสูงสุด 19.39% ในเวลา 9:00 น. หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.10% ซึ่งพบว่าอุณหภูมิแผงมีผลต่อประสิทธิภาพของแผง เมื่ออุณหภูมิแผงต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพแผงสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิแผงเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของแผงดังกล่าวมีค่าที่ลดลง ดังเช่น ประสิทธิภาพแผงในตอนเช้าจะมีค่าที่สูงกว่าตอนบ่าย เนื่องจากในตอนบ่ายจะมีอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิแผงสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของแผงในตอนบ่ายต่ำกว่าตอนเช้า



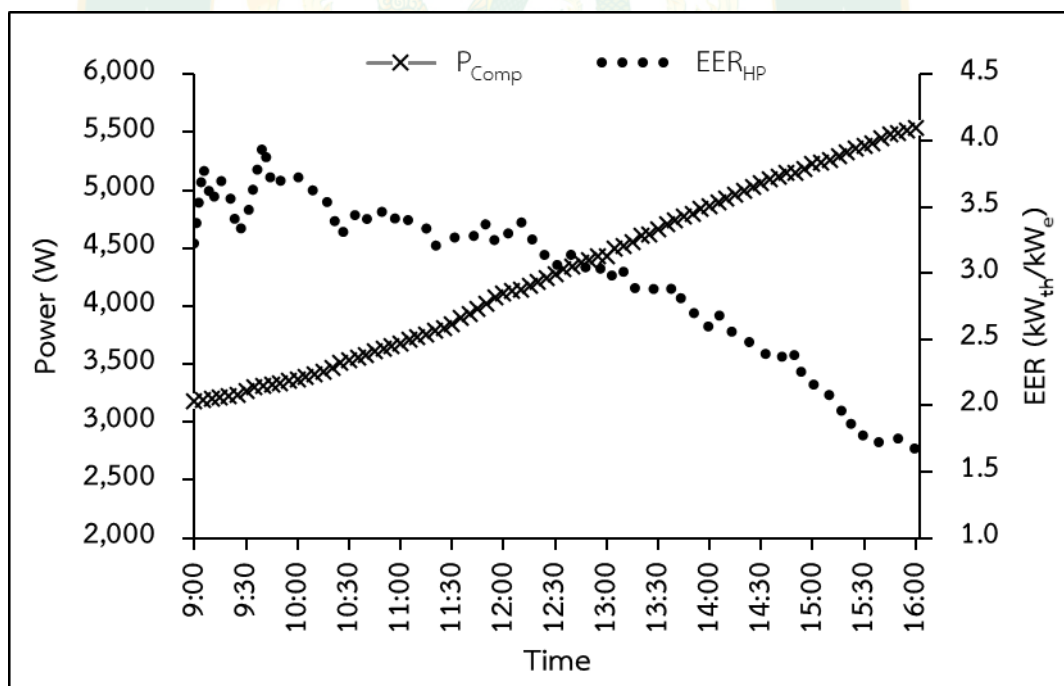
ภาพที่ 50 กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3. การทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน

ในการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนได้เริ่มดำเนินการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 2,500 L จากอุณหภูมิ 30 – 65 °C โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 9:00 – 16:00 น. หรือใช้เวลา 7 h แสดงดังภาพที่ 51 ผลการทดสอบพบว่าความร้อนที่ผลิตได้จากปั๊มความร้อนมีค่าระหว่าง 9.2 – 14 kW และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.3 kW โดยในช่วงเวลา 14:55 น. เป็นต้นไป พบว่าความร้อนที่ผลิตได้จะมีค่าลดลงเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่สูงขึ้นและมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสารทำงาน จึงทำให้ความร้อนที่ผลิตได้จากปั๊มความร้อนมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เช่นกันสำหรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จาก 3,178 – 5,536 W ทำให้มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนตั้งแต่ 1.66 – 3.98 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.95 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ แสดงดังภาพที่ 52 ซึ่งจะพบว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในถังที่สูงขึ้น และส่งผลต่อค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานที่มีค่าลดลง



ภาพที่ 51 ความร้อนและอุณหภูมิจากการทดสอบปั๊มความร้อน



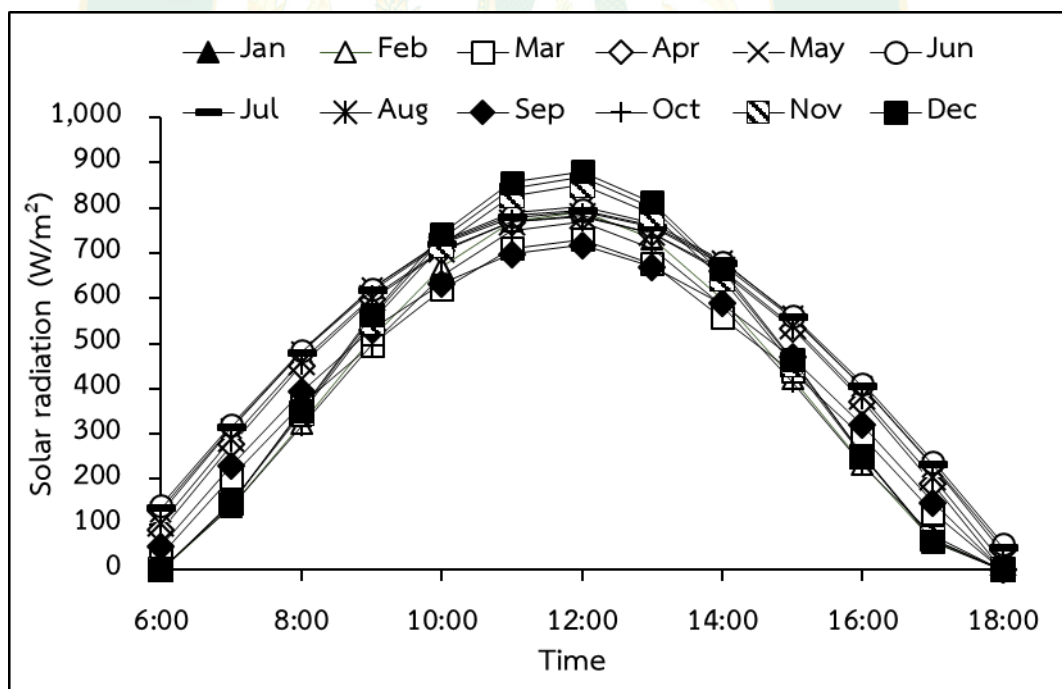
ภาพที่ 52 สมรรถนะของปั๊มความร้อน

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลังจากการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และปั๊มความร้อน สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผล เพื่อเลือกจำนวน และขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับนำไปติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยมีรายละเอียดดังนี้

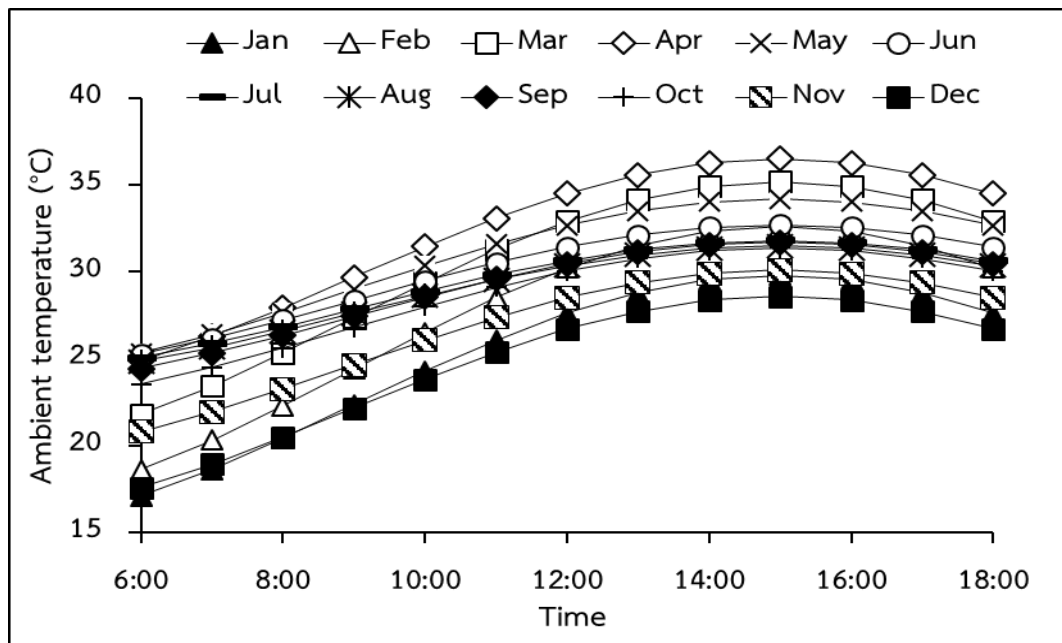
ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม

ในการทำนายผลจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) เพื่อนำไปติดตั้ง ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ก่อนอื่นต้องทราบข้อมูลที่เป็นตัวแปรหลักคือ ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่ โดยจะใช้วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนมาคำนวณ แสดงดังภาพที่ 53 และ ภาพที่ 54 ตามลำดับ



ภาพที่ 53 ค่ารังสีอาทิตย์รายเดือนของจังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: (นัฐพร, 2562)



ภาพที่ 54 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายเดือนของจังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: (นัฐพร, 2562)

แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทดสอบพบว่าแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบมีสมรรถนะที่ดีกว่าแบบไม่มีกระจก จึงได้เลือกใช้ข้อมูลแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบเป็นข้อมูลหลักเพื่อวิเคราะห์เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพบว่าแผง Solar PV/T ดังกล่าวมีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.328 และ F_{RUL} เท่ากับ $7.2997 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ซึ่งจากสมการที่ 12 สามารถหาสมการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการที่ 33

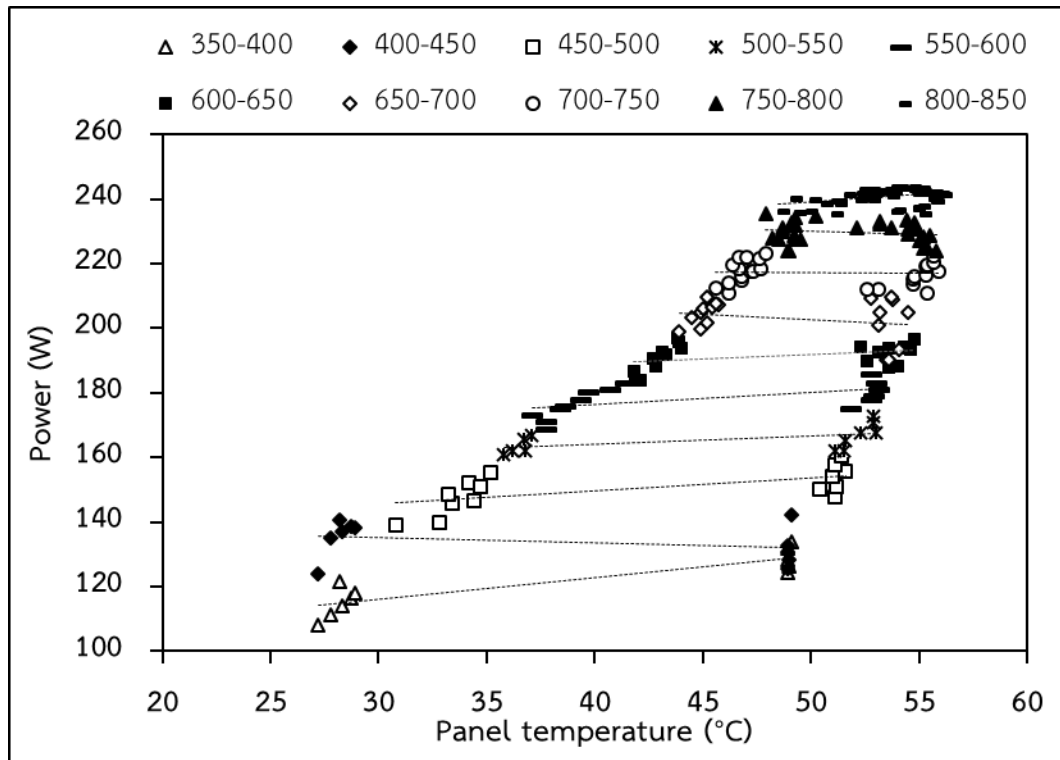
$$Q_{PV/T} = A_{PV/T} [(0.328 I_T) - (7.2997 (T_{f,i} - T_a))] \quad \text{สมการที่ 33}$$

จากภาพที่ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง ค่ารังสีอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่า เมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จากการพิจารณาเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะพบว่า อุณหภูมิแผงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยที่อุณหภูมิแผงจะขึ้นกับความร้อนสะสมที่ได้จากรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้ามาระบายความร้อนของแผง Solar PV/T ดังนั้น ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ก่อนอื่นต้องทราบอุณหภูมิแผง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 34

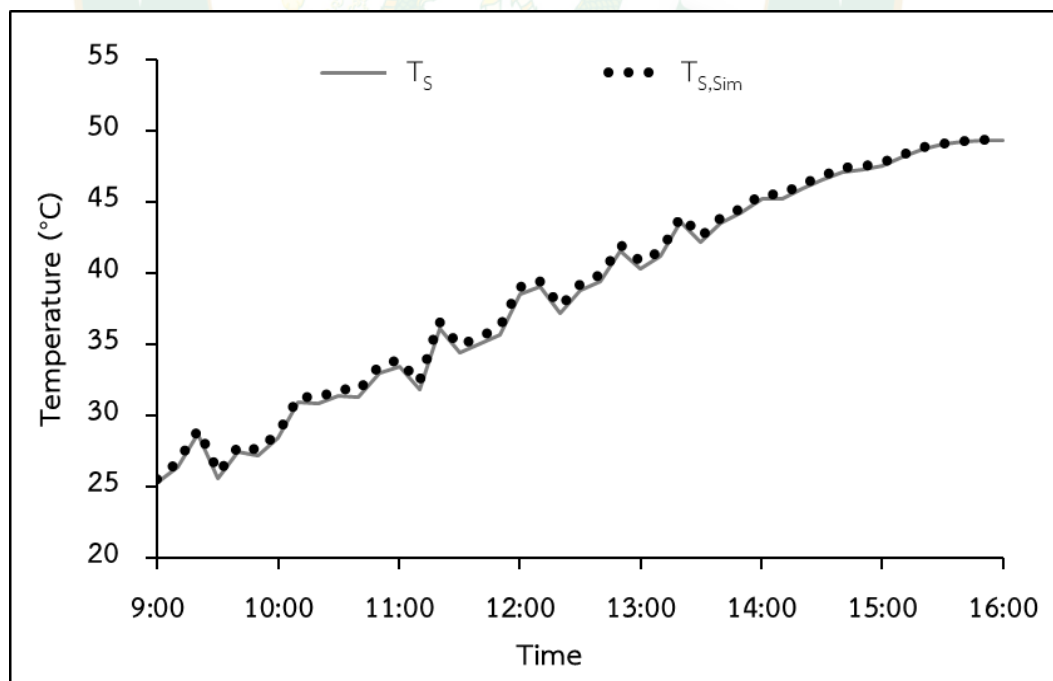
$$T_{PV/T,Sim} = 0.05831 \times (I_T^{0.27576}) \times (T_a^{1.5262}) \times (T_{f,i}^{-0.092972}) \quad \text{สมการที่ 34}$$

การทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 35

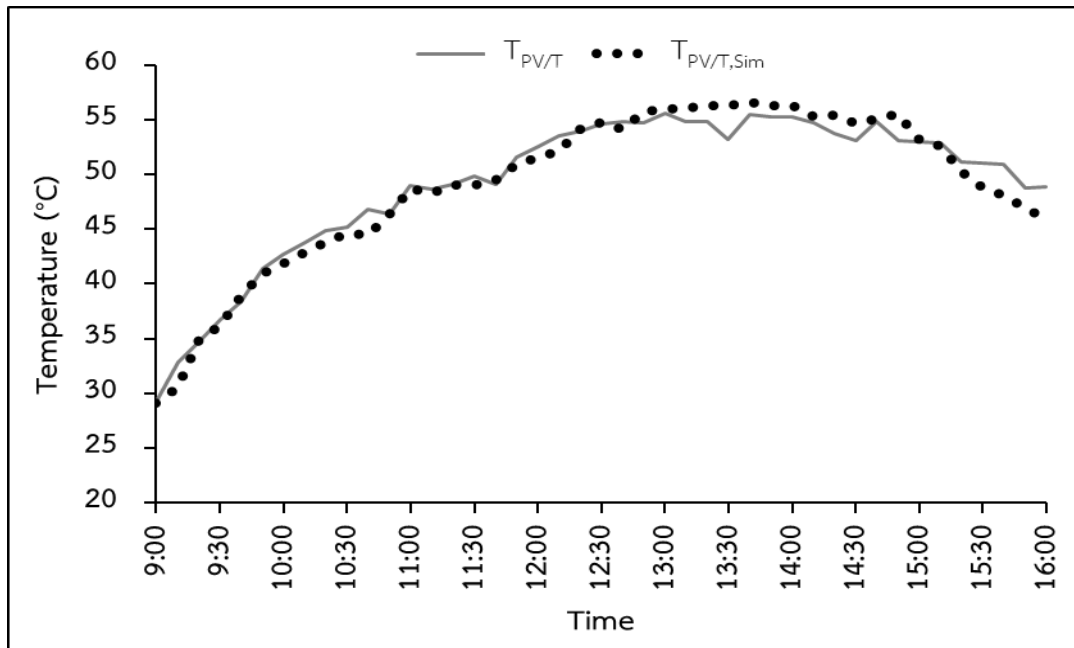
$$P_{PV/T,Sim} = 0.82707 \times (I_T^{0.56327}) \times (T_a^{-0.47834}) \times (T_{f,i}^{-0.47705}) \times (T_{PV/T}^{1.3394}) \quad \text{สมการที่ 35}$$



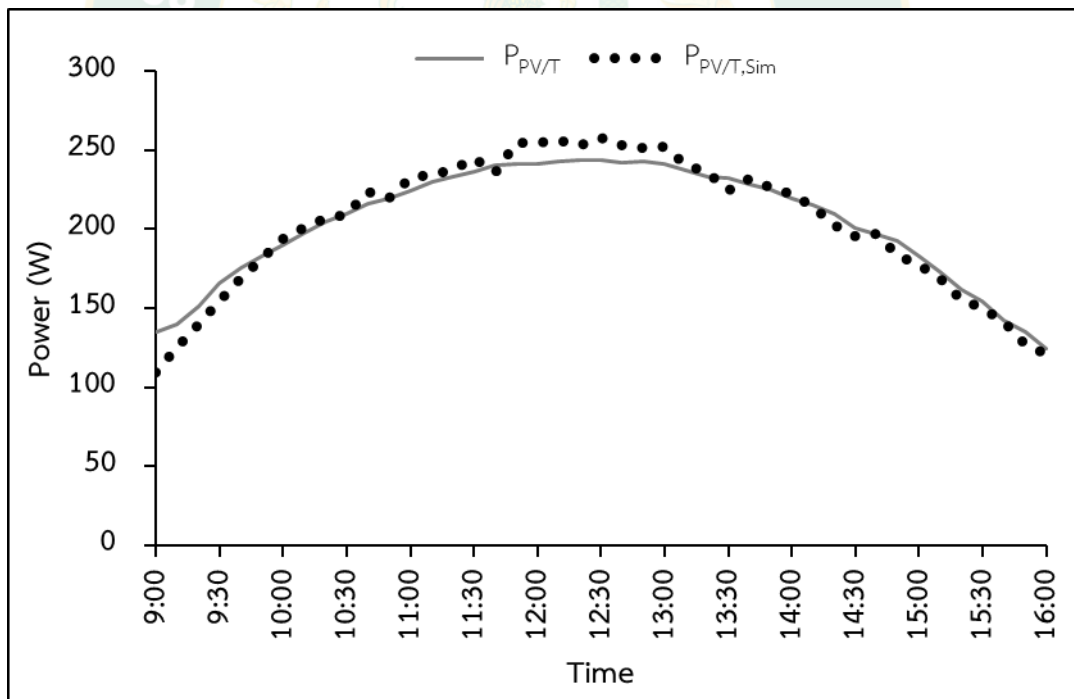
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์



ภาพที่ 56 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิน้ำในถัง



ภาพที่ 57 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผง



ภาพที่ 58 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า

โดยสมการที่ 34 และ 35 ได้จากการนำเอาข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ ข.2 ของภาคผนวก เพื่อมาทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) เมื่อนำเอาสมการเหล่านี้

ไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่สมการที่ 33 เมื่อคำนวณและเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังจากการทดลอง แสดงดังภาพที่ 56 มีความคลาดเคลื่อน 1% ส่วนสมการที่ 34 และ 35 เมื่อนำไปคำนวณและเปรียบเทียบกับผลทดลองของอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 2.1% และ 3.6% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 57 และ ภาพที่ 58 โดยความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์

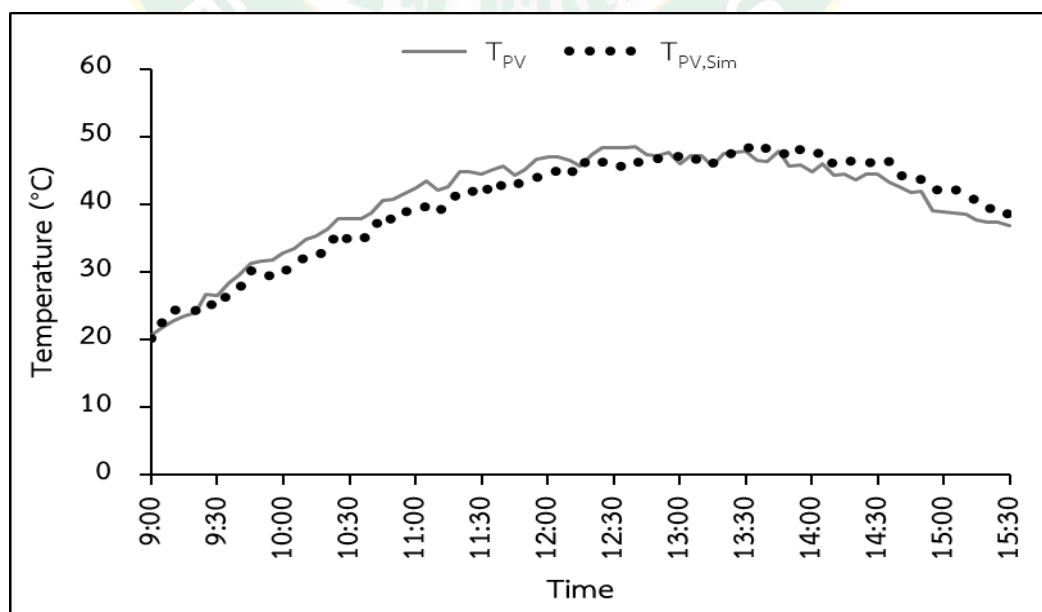
หลังจากทดสอบหาสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar PV) สำเร็จ จึงนำเอาข้อมูลไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสามารถทำนายอุณหภูมิแผงของแผง Solar PV ได้จากสมการที่ 36

$$T_{PV,Sim} = 0.17661 \times (I_T^{0.41565}) \times (T_a^{0.86861}) \quad \text{สมการที่ 36}$$

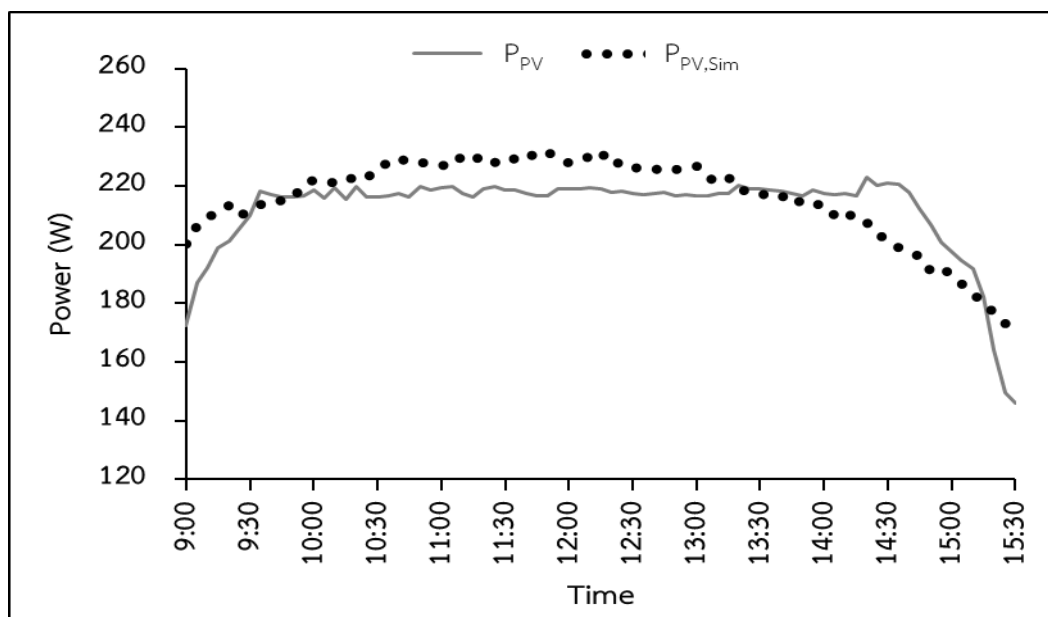
การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 37

$$P_{PV,Sim} = 14.046 \times (I_T^{0.57571}) \times (T_a^{0.039103}) \times (T_{PV}^{-0.32111}) \quad \text{สมการที่ 37}$$

สมการที่ 36 และ 37 ได้จากการนำเอาข้อมูลการทดสอบสมรรถนะของแผงที่แสดงดังตารางที่ ข.5 จากภาคผนวก เพื่อมาทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) และ เมื่อนำเอาสมการข้างต้นไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 59 และภาพที่ 60 โดยสมการที่ 36 มีความคลาดเคลื่อน 4.97% และสมการที่ 37 มีความคลาดเคลื่อน 4.5% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 59 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผง



ภาพที่ 60 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า

ปั๊มความร้อน

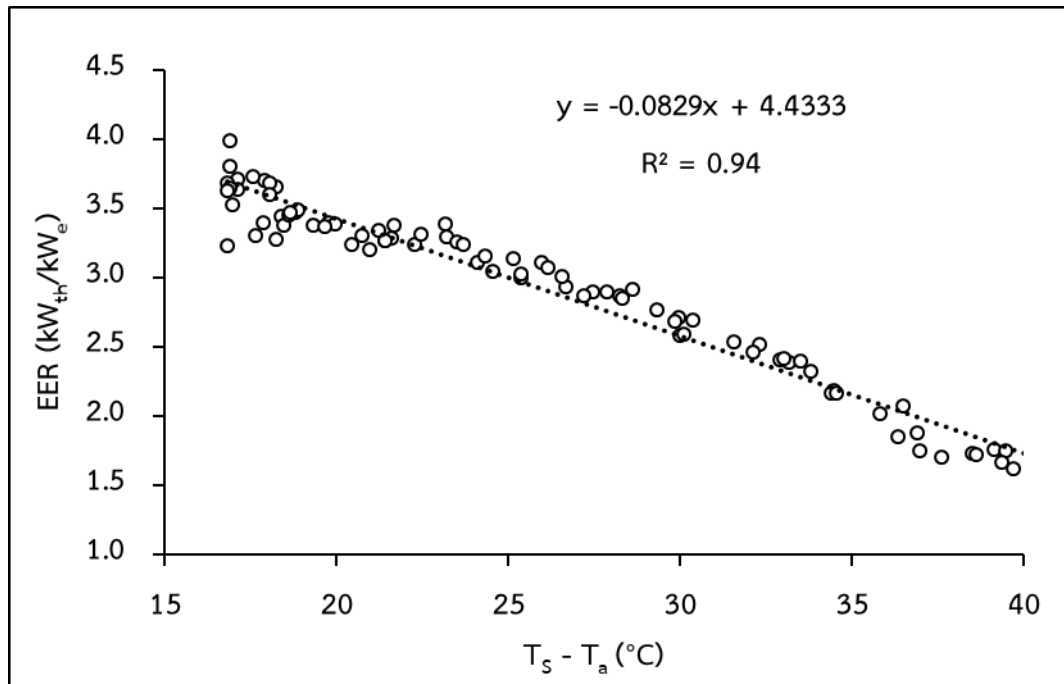
การทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) พบว่า มีการแปรผันตามอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิน้ำในถัง ดังนั้นเมื่อนำเอาผลต่างอุณหภูมิน้ำในถังกับอุณหภูมิแวดล้อม ($T_s - T_a$) และ ค่า EER (ข้อมูลจากตารางที่ ข.6 ในภาคผนวก) ไปวิเคราะห์ด้วยสมการเส้นตรงแสดงดังภาพที่ 61 พบว่า เมื่อผลต่างอุณหภูมิต่ำจะทำให้ค่า EER สูงขึ้น แต่หากผลต่างอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ค่า EER ต่ำลง เนื่องจากว่าถ้าหากอุณหภูมิในถังเพิ่มขึ้นจะทำให้ปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 38

$$EER_{HP,Sim} = 4.4333 - [0.0829 (T_s - T_a)] \quad \text{สมการที่ 38}$$

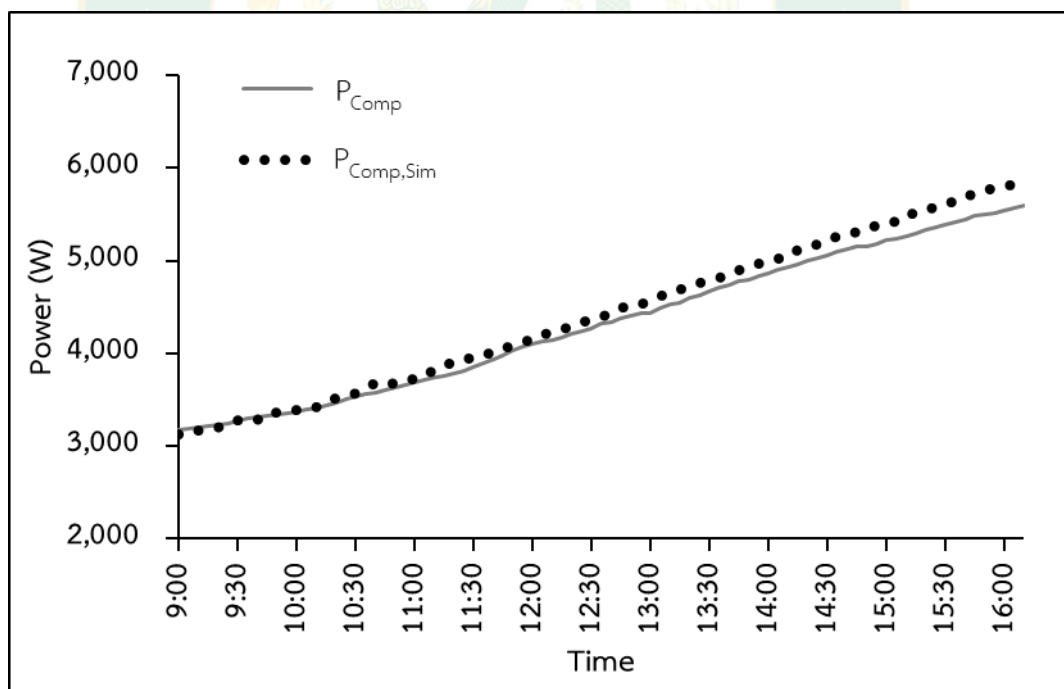
ในการทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 39

$$P_{Comp,Sim} = 195.87 \times (T_a^{-0.15947}) \times (T_s^{0.93508}) \quad \text{สมการที่ 39}$$

โดยสมการที่ 39 ได้จากการนำเอาข้อมูลผลทดสอบปั๊มความร้อนแสดงดังตารางที่ ข.6 ในภาคผนวก เพื่อมาทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) และนำเอาสมการดังกล่าวไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีความคลาดเคลื่อน 2.39% แสดงดังภาพที่ 62



ภาพที่ 61 สมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน

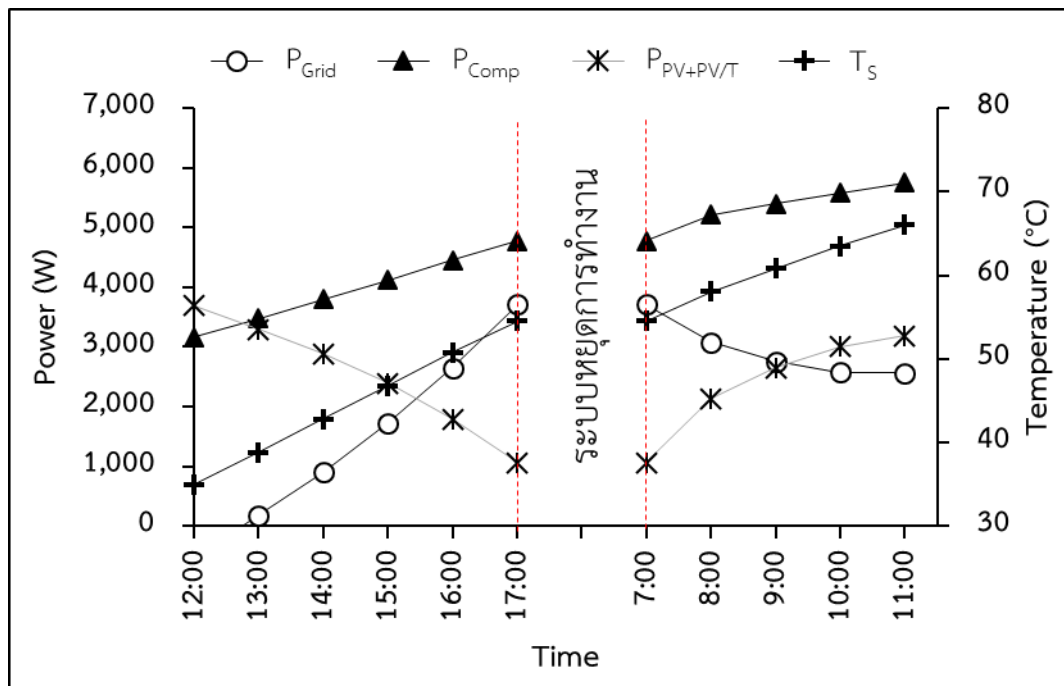


ภาพที่ 62 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า

ผลการจำลองของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

หลังจากได้สมการทำนายของอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงสามารถสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ในการเลือกจำนวนและขนาดอุปกรณ์ที่เหมาะสมแก่ระบบ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้แผง Solar PV/T จำนวน 4 แผง ทำงานร่วมกับแผง Solar PV ตั้งแต่จำนวน 10 – 18 แผง (เพิ่มขึ้นทีละ 2 แผง) และใช้น้ำในถังเก็บประมาณ 2,500 L

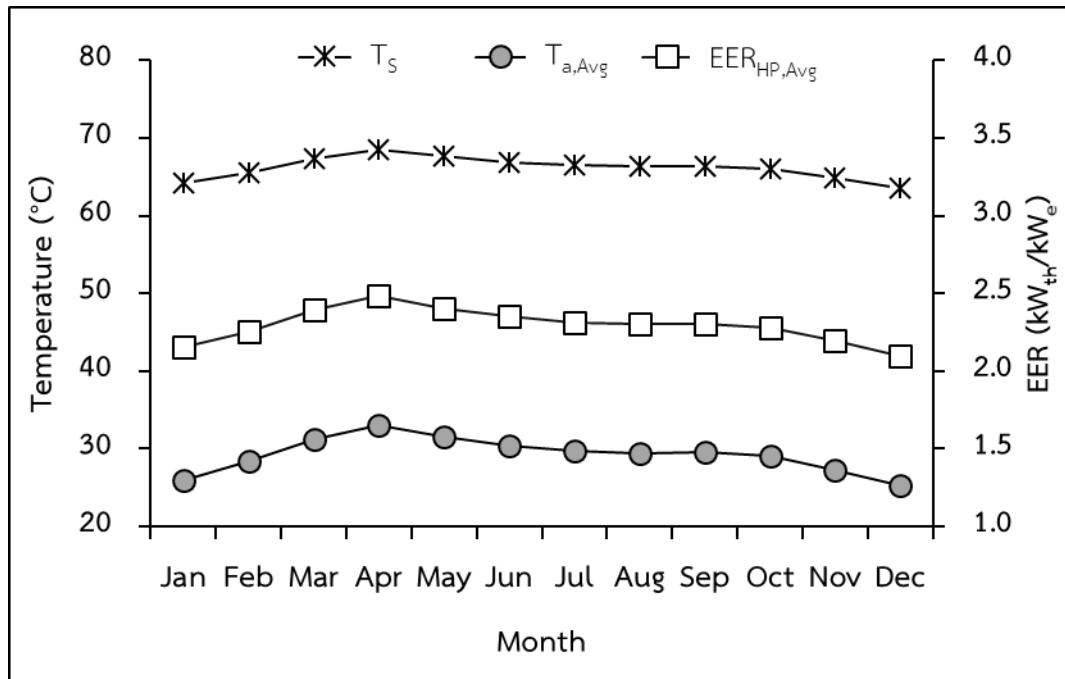
จากภาพที่ 63 แสดงผลจำลองการทำงานระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้แผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ จำนวน 4 แผง ทำงานร่วมกับแผง Solar PV จำนวน 14 แผง โดยใช้ผลทำนายค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่เดือน ตุลาคม เนื่องจากเป็นเดือนที่มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่ำสุด ซึ่งพบว่าโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการเริ่มกระบวนการลวกและชุดขนสุกรในเวลา 12:30 น. จึงทำการหาช่วงเวลาในการผลิตน้ำร้อนใหม่ จากระบบเดิม (Heater) มีการเตรียมน้ำร้อนตั้งแต่เวลา 6:00 – 10:45 น. และใช้พลังงานไฟฟ้า 117.5 kWh/day ดังนั้น ในการจำลองข้อมูลจึงได้เวลาผลิตน้ำร้อนใหม่ เริ่มตั้งแต่เวลา 12:00 น. โดยใช้อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้น 35 °C จนถึงเวลา 17:00 น. ได้อุณหภูมิ 54.5 °C และระบบจะทำงานต่อในวันถัดไปเวลา 7:00 – 11:00 น. ได้อุณหภูมิน้ำในถัง 65.9 °C จึงปล่อยน้ำไปอ่างลวกและชุดขนใช้เวลาส่งประมาณ 40 min และระบบจะเริ่มผลิตน้ำร้อนใหม่อีกรอบในเวลา 12:00 น. จากผลจำลองระบบพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV กับแผง Solar PV/T รวมกันจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 26.11 kWh/day เพื่อป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำที่มีค่าตั้งแต่ 3,163 – 5,752 W ค่าเฉลี่ย 4,572 W คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 45.72 kWh/day ซึ่งพบว่าพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อระบบ จึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มเท่ากับ 19.61 kWh/day คิดเป็น 83.3% ของพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้



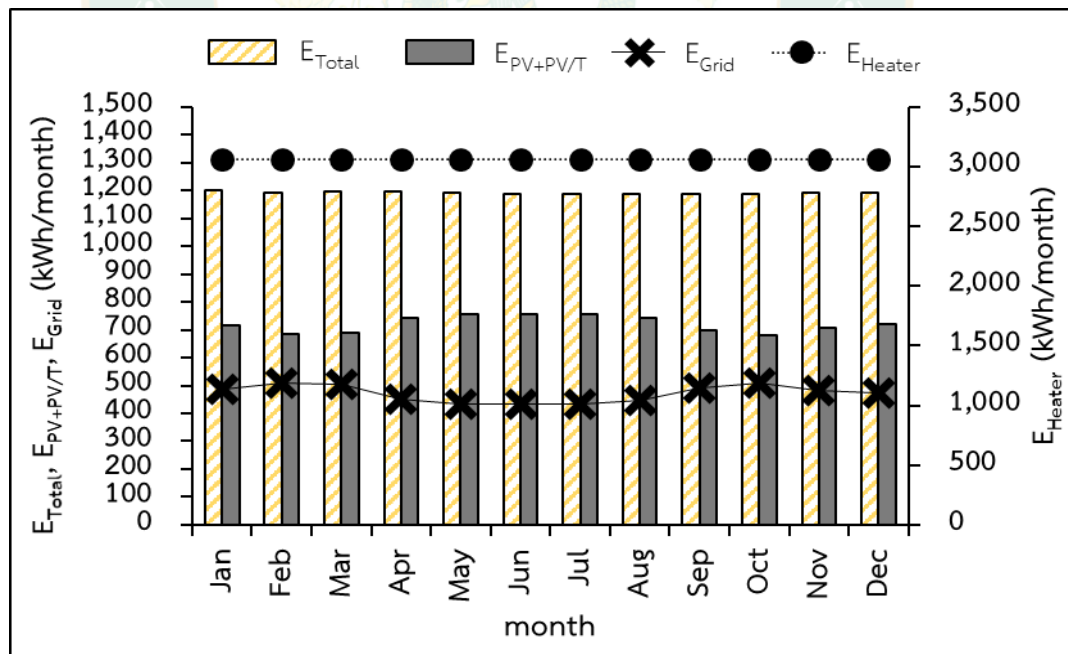
ภาพที่ 63 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนและผลิตได้

(กรณีใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 14 แผง และแผง Solar PV/T 4 แผง)

จากภาพที่ 64 แสดงผลจำลองการทำงานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จากการใช้ตัวแทนของวันในแต่ละเดือนมาทำนายผลพบว่า เดือนเมษายนเป็นเดือนที่มีค่า EER สูงสุด คือ $2.48 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$ คิดเป็นค่าเฉลี่ยทั้งปี $2.30 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$ โดยอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่ำสุดได้แก่ เดือนเมษายนที่อุณหภูมิ $33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และสูงสุดในเดือนธันวาคมที่อุณหภูมิ $25.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีค่าระหว่าง $63.54\text{-}68.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทางโรงฆ่าสัตว์ยอมรับได้ จากภาพที่ 65 แสดงผลจำลองใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนโดยพบว่า ในเดือนหนึ่งขดลวดความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนไปประมาณ $3,005.78 \text{ kWh/month}$ หรือ $36,669.36 \text{ kWh/year}$ สำหรับระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV กับระบบ Solar PV/T รวมกันเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับ 720.55 kWh/month หรือ $8,646.63 \text{ kWh/year}$ สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อ้อนให้ระบบเท่ากับ $1,191.56 \text{ kWh/year}$ เมื่อคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มเท่ากับ $5,652.11 \text{ kWh/year}$ เมื่อเปลี่ยนจากการใช้ขดลวดความร้อนมาใช้ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ $31,017.25 \text{ kWh/year}$ คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ประมาณ $142,059.02 \text{ Baht/year}$



ภาพที่ 64 จำลองอุณหภูมิน้ำในถัง และค่า EER ของปั๊มความร้อน (กรณีใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 14 แผง และแผง Solar PV/T 4 แผง)



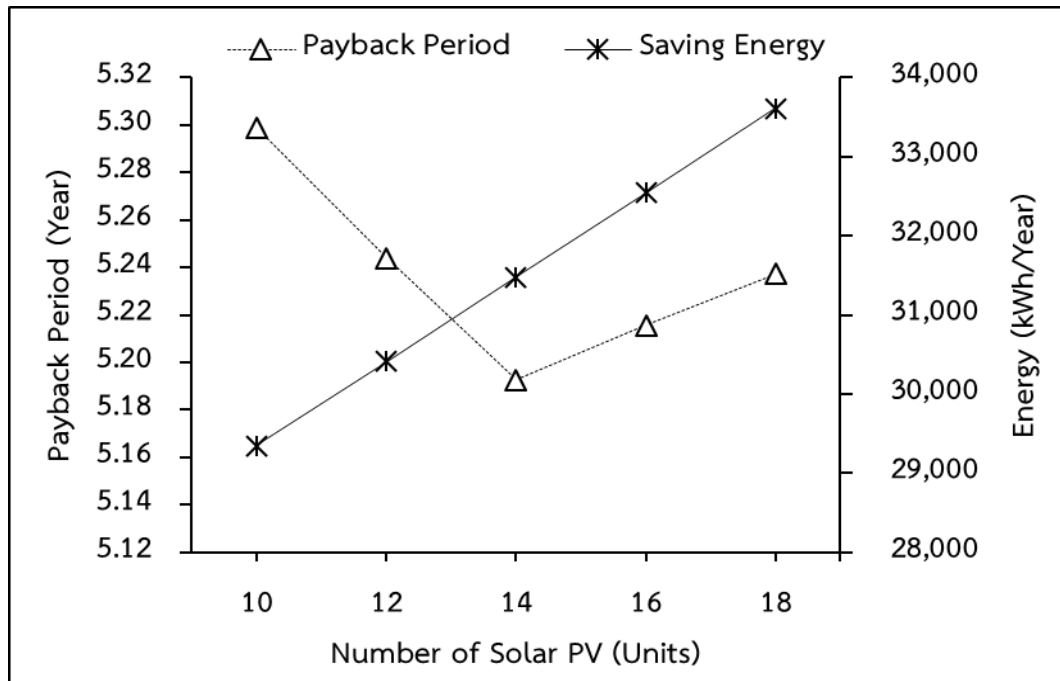
ภาพที่ 65 จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน (กรณีใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 14 แผง และแผง Solar PV/T 4 แผง)

ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ได้ทำการปรับจำนวนแผง Solar PV เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าช่วยระบบตั้งแต่ 10 – 18 แผง จากภาพที่ 66 พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 18 แผง สามารถลดการใช้พลังงานลงมากที่สุด 33,605.68 kWh/year (เปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ Heater) รองลงมาเป็นจำนวน 16 แผง 14 แผง 12 แผง และ 10 แผง สามารถลดพลังงานไฟฟ้าไปได้ 32,541.28 kWh/year 31,476.89 kWh/year 30,412.49 kWh/year และ 29,348.10 kWh/year ตามลำดับ เมื่อนำเอาค่าเหล่านี้ไปวิเคราะห์ร่วมกับเงินลงทุนสร้างระบบแสดงดังตารางที่ 4 เพื่อหาระยะคืนทุนตามสมการที่ 29 โดยพบว่า ในกรณี แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 14 แผง มีระยะคืนทุนสั้นที่สุด 5.19 year ลำดับถัดไปคือจำนวน 16 แผง 18 แผง 12 แผง และ 10 แผง ที่มีระยะคืนทุน 5.22 year 5.23 year 5.24 year และ 5.29 year ตามลำดับ

ดังนั้น จากข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จะใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ใช้สารทำงาน R134a เสริมด้วยแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบจำนวน 4 แผง ต่อขนานกันเพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องระเหยของปั๊มความร้อน ใช้แผง Solar PV จำนวน 14 แผง โดยแบ่งเป็น 2 ชุด แต่ละชุดจะทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 7 แผง แล้วจึงนำเอาทั้ง 2 ชุดมาต่อขนานเข้าด้วยกัน ในระบบนี้จะใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L และทำการติดตั้ง ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ แสดงดังภาพที่ 67

ตารางที่ 4 มูลค่าเงินลงทุนและพลังงานที่ประหยัดได้ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

จำนวนแผง Solar PV/T	4 แผง				
จำนวนแผง Solar PV	10 แผง	12 แผง	14 แผง	16 แผง	18 แผง
เงินลงทุนสร้างระบบ (Baht)	673,700	690,880	708,060	735,240	762,420
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kWh/year)	29,348.10	30,412.49	31,476.89	32,541.28	33,605.68



ภาพที่ 66 ระยะคืนทุนและพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปีจากแบบจำลอง



(ก) ป้อนความร้อนเสริมด้วยระบบ Solar PV/T



(ข) ระบบ Solar PV/T

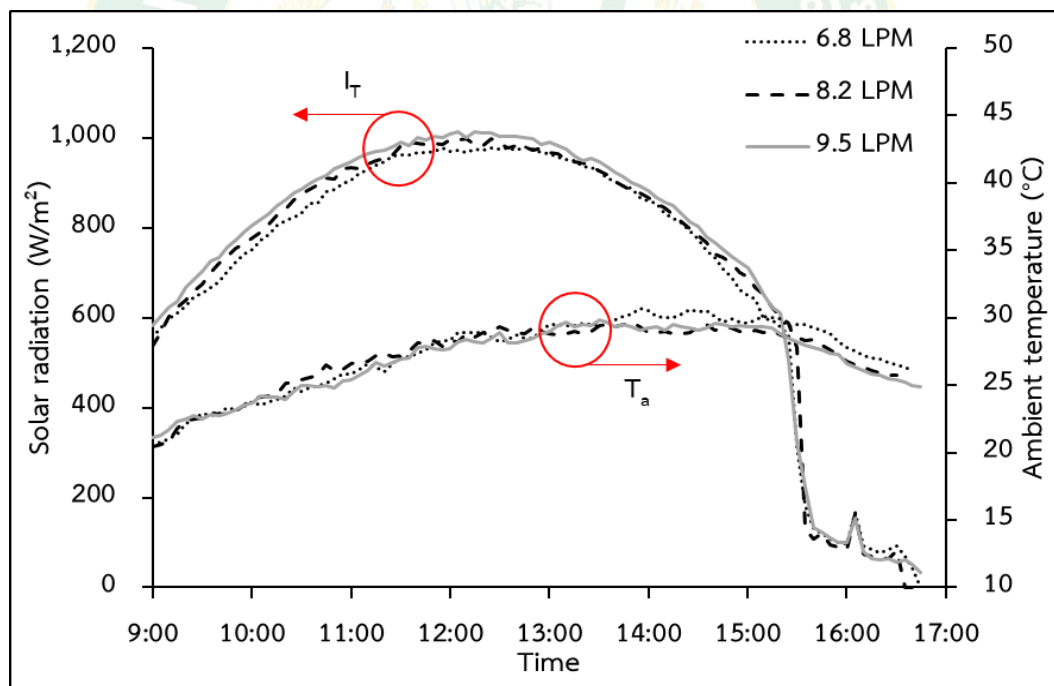


(ค) ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ภาพที่ 67 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

การทดสอบหาอัตราการไหลผ่านแผง Solar PV/T ที่เหมาะสมต่อระบบ

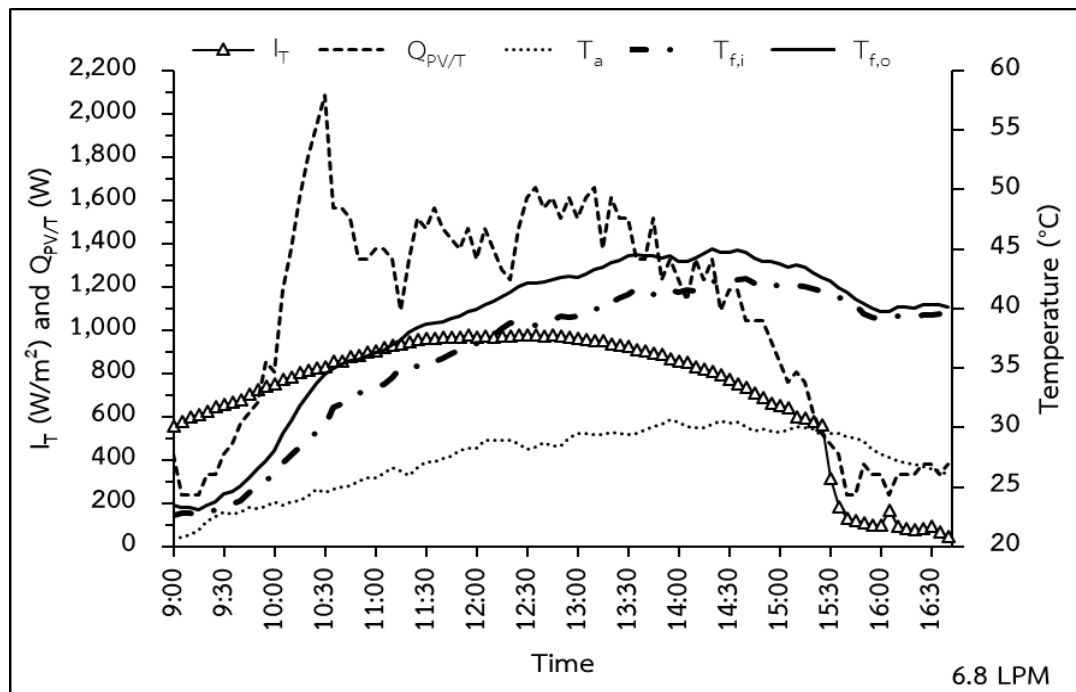
หลังจากทำการติดตั้งระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ต่อไปจะทำการทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเพิ่มสมรรถนะที่ดีที่สุดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ซึ่งได้ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ค่า คือ 6.8 LPM 8.2 LPM และ 9.5 LPM โดยทั้ง 3 อัตราการไหลได้จาก $1 \text{ kg/min}\cdot\text{m}^2$ $1.2 \text{ kg/min}\cdot\text{m}^2$ และ $1.4 \text{ kg/min}\cdot\text{m}^2$ ตามลำดับ ในการผลิตน้ำร้อนประมาณ 2,500 L จากอุณหภูมิประมาณ $30 - 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการทดสอบได้ทำการทดสอบในวันที่มีอุณหภูมิแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะอยู่ในทิศทางที่ใกล้เคียงกัน ตั้งแต่วันที่ 30 พฤศจิกายน - 02 ธันวาคม 2563 ดังภาพที่ 68 หลังจากนั้น จึงทำการวิเคราะห์สมรรถนะความร้อนของปั๊มความร้อน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV แผง Solar PV/T และพลังงานไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



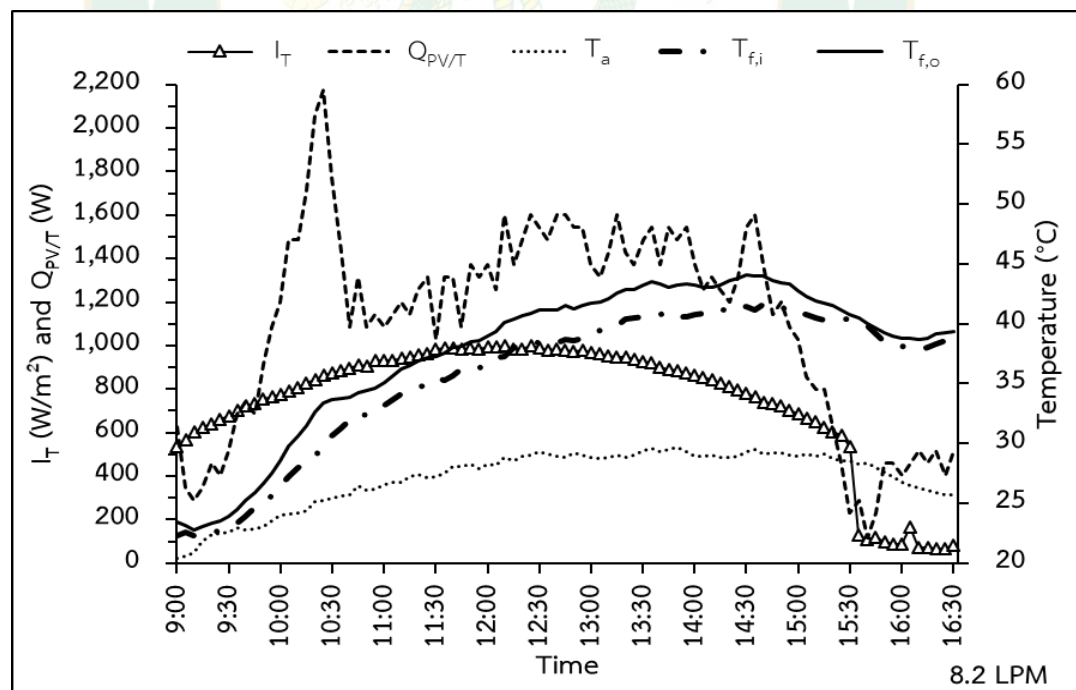
ภาพที่ 68 อุณหภูมิแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์เมื่อทดสอบที่อัตราการไหล 6.8 8.2 และ 9.5 LPM

1. อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

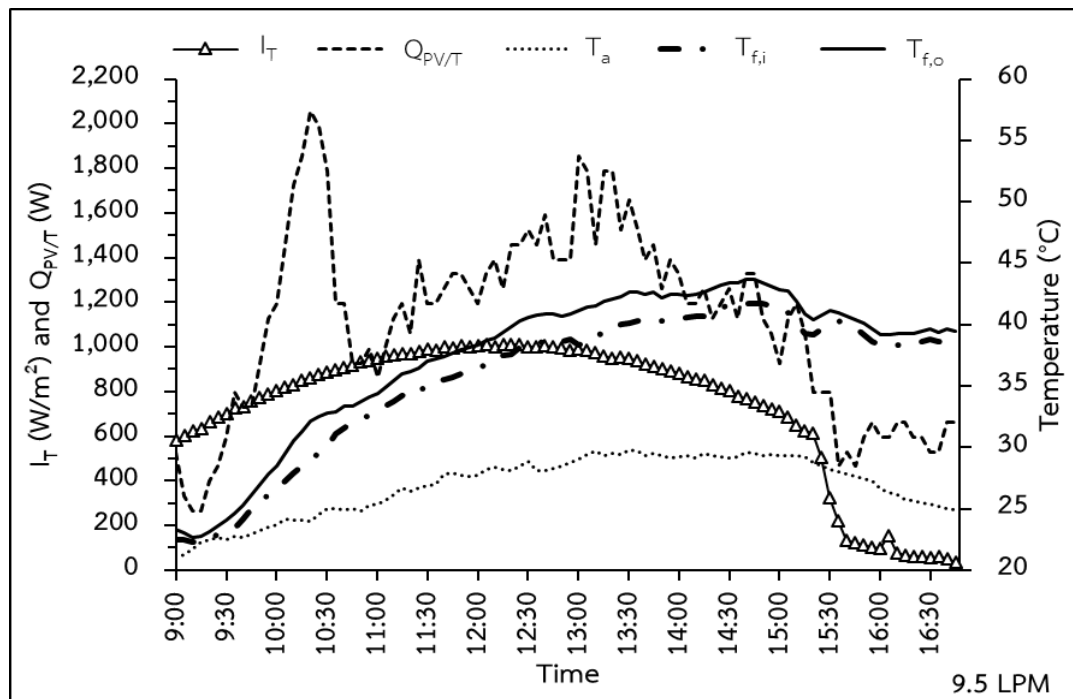
จากภาพที่ 69 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 6.8 LPM พบว่าค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่ 977 W/m^2 ในเวลา 11:55 น. อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $27.33 \text{ }^\circ\text{C}$ ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T จะมีค่าที่สูงขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุด $2,088 \text{ W}$ ในเวลา 10:30 น. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,063 \text{ W}$ หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้คือ $29.66 \text{ MJ/รอบการผลิต}$ เพื่อป้อนความร้อนให้กับเครื่องระเหยของปั๊มความร้อน ในกรณีการทดสอบของอัตราการไหล 8.2 LPM ดังภาพที่ 70 แสดงให้เห็นว่าค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าสูงสุดที่ 998 W/m^2 ในเวลา 12:10 น. อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $27.11 \text{ }^\circ\text{C}$ ทางด้านอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด $2,174 \text{ W}$ ในเวลา 10:25 น. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,104 \text{ W}$ หรือคิดเป็นความร้อนที่ผลิตได้ $30.14 \text{ MJ/รอบการผลิต}$ สำหรับกรณีการทดสอบของอัตราการไหล 9.5 LPM แสดงดังภาพที่ 71 พบว่าค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ $1,012.5 \text{ W/m}^2$ ในเวลา 12:05 น. ในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $26.9 \text{ }^\circ\text{C}$ และอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด $2,055 \text{ W}$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,110 \text{ W}$ หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ $31.32 \text{ MJ/รอบการผลิต}$ เนื่องจากว่าในการทำงานช่วงแรกของระบบพบว่า อุณหภูมิน้ำจากระบบ Solar PV/T ที่ออกไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำงานที่ติดตั้งอยู่ระหว่างวาล์วลดความดันกับเครื่องระเหยในปั๊มความร้อนมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำประกอบกับมีเงาบังแผงในช่วงตอนต้น ทำให้ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกและขาเข้ามีค่าที่ต่ำไปด้วย เมื่อเข้าสู่ช่วงที่แผง Solar PV/T ได้รับค่ารังสีอาทิตย์เต็มที่จึงทำให้ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกและขาเข้ามีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นโดยส่งผลต่อความร้อนที่ผลิตได้สูงขึ้นและมีค่าลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลผ่านระบบ Solar PV/T จะเห็นได้ว่าหากอัตราการไหลผ่านแผงมีค่าที่สูงขึ้นจะทำให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 69 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (อัตราการไหล 6.8 LPM)



ภาพที่ 70 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (อัตราการไหล 8.2 LPM)

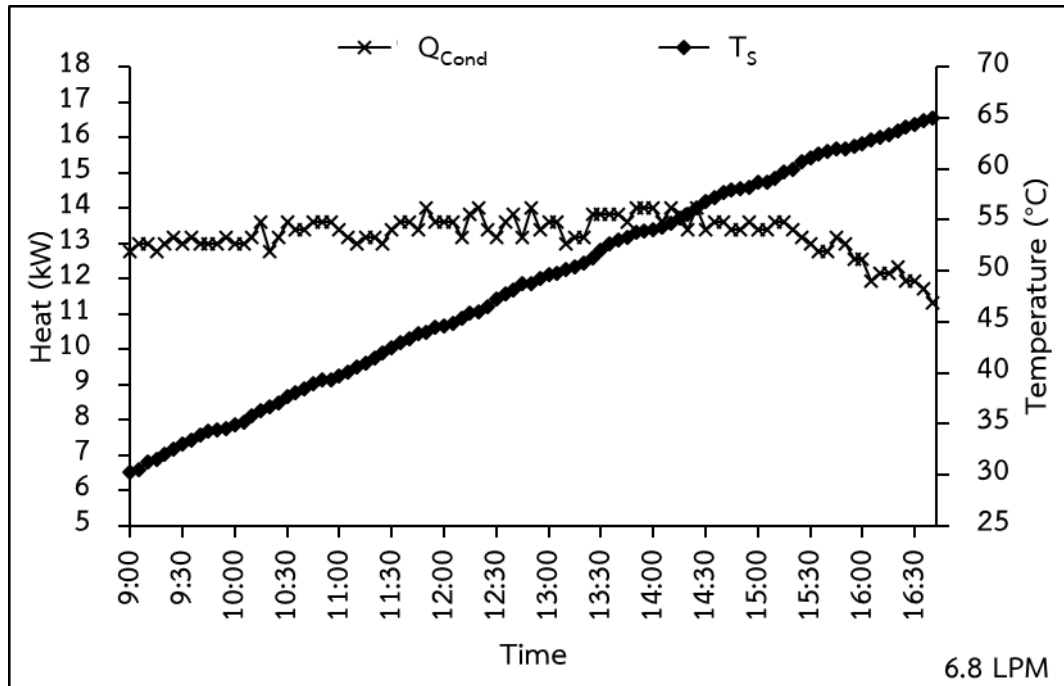


ภาพที่ 71 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (อัตราการไหล 9.5 LPM)

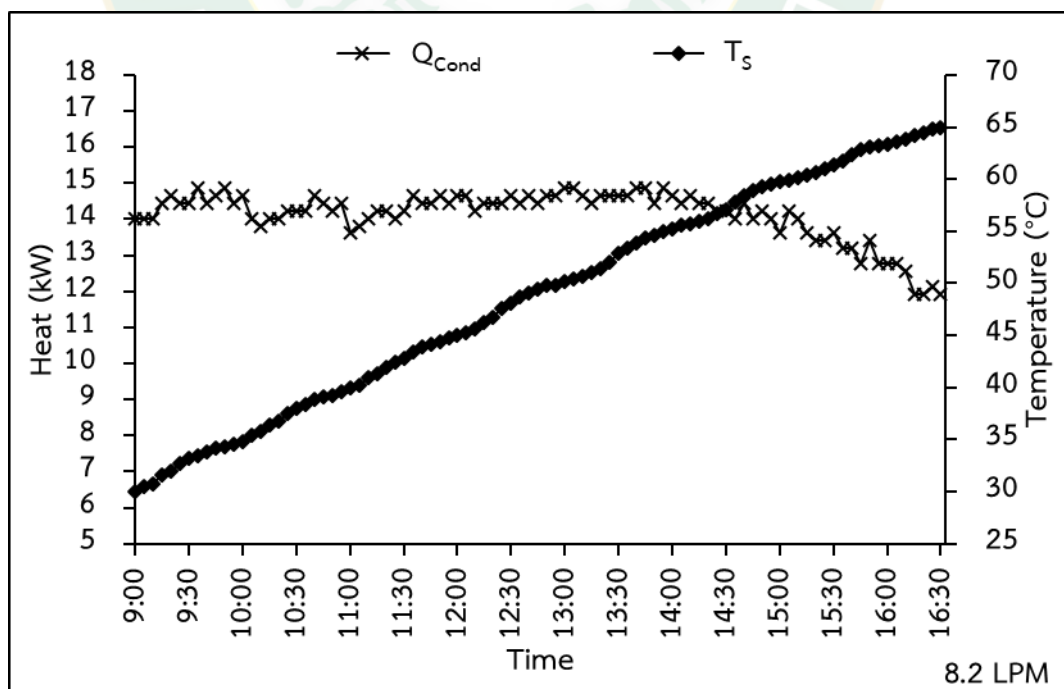
2. ป้อนความร้อนเสริมด้วยการผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 72 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 6.8 LPM พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนมีค่าสูงสุดที่ 14.03 kW เหลือได้ 13.25 kW และใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนโดยเริ่มแต่อุณหภูมิ 30 – 65 °C ด้วยเวลาประมาณ 7 h 40 min ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 8.2 LPM แสดงดังภาพที่ 73 พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนสูงสุด 14.86 kW และมีค่าเฉลี่ย 14.12 kW ใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนจนถึงอุณหภูมิ 65 °C ด้วยเวลาประมาณ 7 h 30 min จากภาพที่ 74 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 9.5 LPM พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนสูงสุด 14.65 kW มีค่าเฉลี่ย 13.42 kW ใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนจนถึงอุณหภูมิ 65 °C ด้วยเวลาประมาณ 7 h 45 min โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเริ่มเข้าสู่อุณหภูมิประมาณ 60 °C ทำให้ความร้อนที่ผลิตได้มีค่าเริ่มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่สูงขึ้นและเข้าใกล้อุณหภูมิ 65 °C ที่ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้เบื้องต้น จึงทำให้อุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสารทำงาน และส่งผลต่อผลต่างอุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลงและทำให้การผลิตความร้อนของปั๊มความร้อนมีค่าที่ลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งจากการทดสอบของทั้ง 3 อัตราการไหลจะสังเกตเห็นว่าในการทำงานในช่วงแรก ความร้อนที่ผลิตได้จากปั๊มความร้อนจะมีค่าที่สูงเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่ต่ำ และเมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเพิ่มสูงขึ้นในช่วงท้ายจะทำให้ความร้อนที่

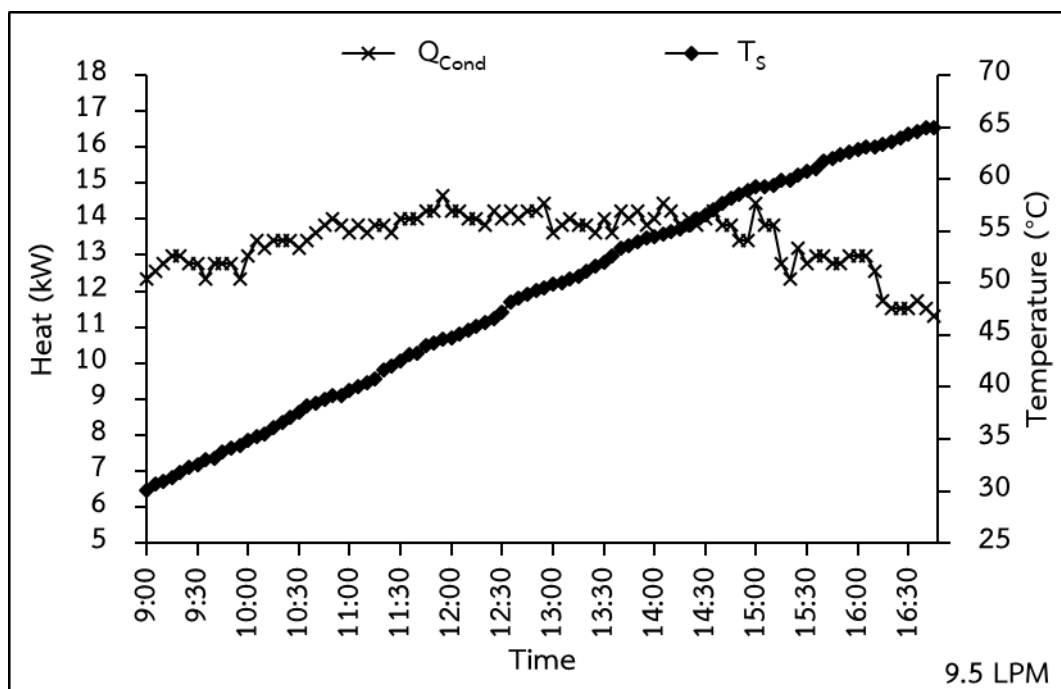
ผลิตได้ลดลงเรื่อย ๆ และสามารถสรุปได้ว่าในอัตราการไหล 8.2 LPM สามารถผลิตความร้อนได้สูงที่สุด รองลงมาคืออัตราการไหล 9.5 และ 6.8 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 72 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน อัตราการไหล 6.8 LPM



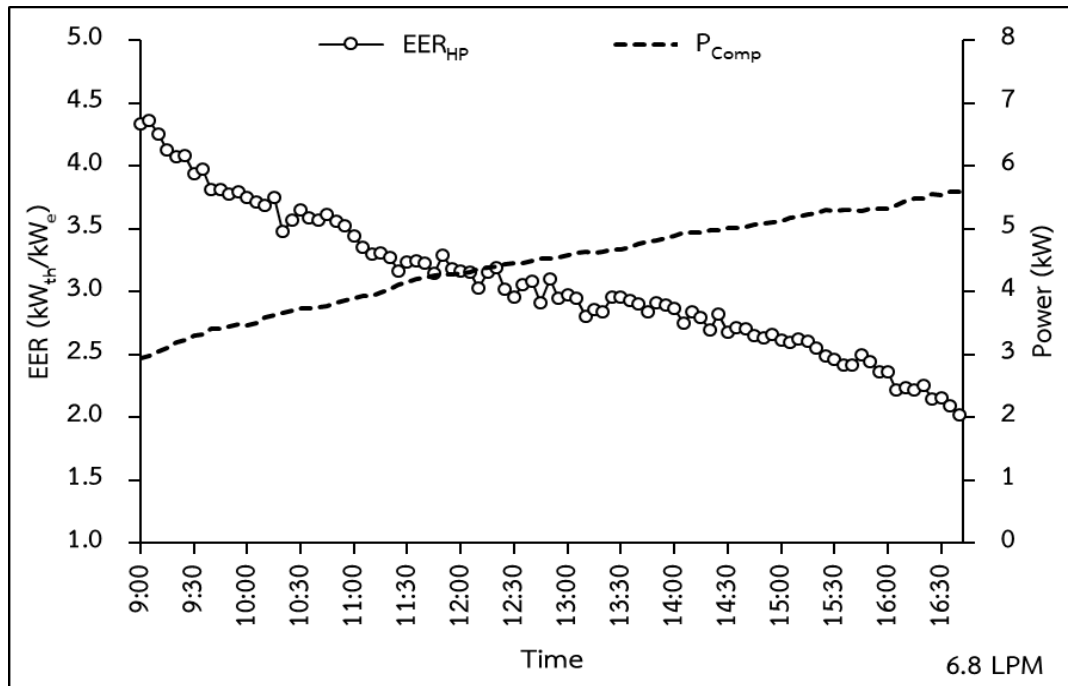
ภาพที่ 73 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน อัตราการไหล 8.2 LPM



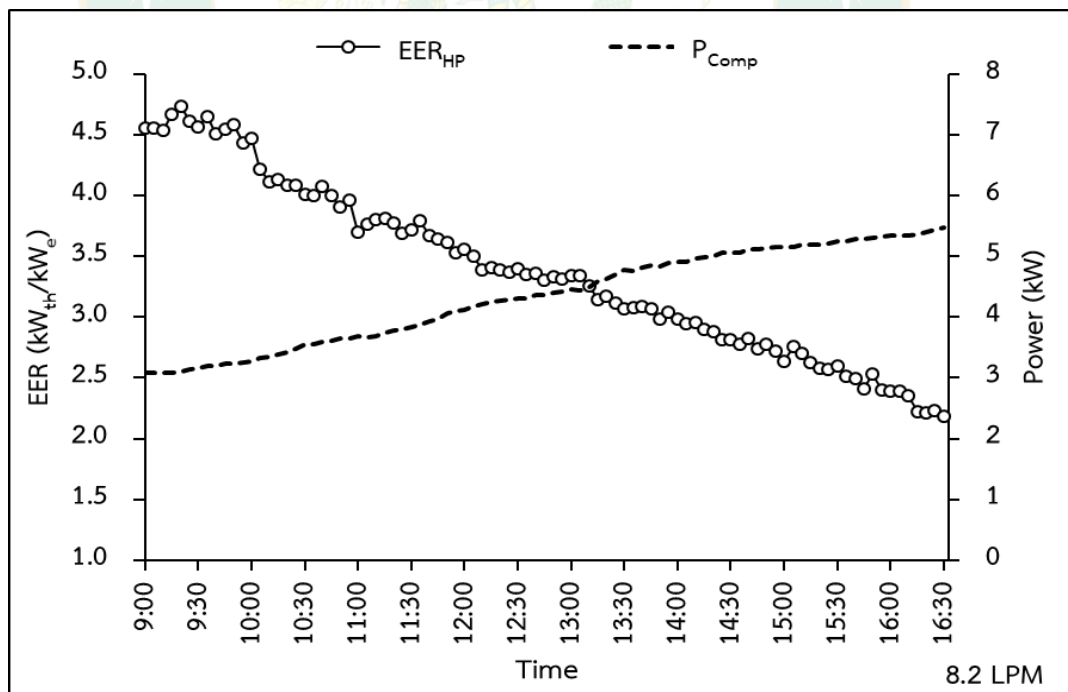
ภาพที่ 74 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน อัตราการไหล 9.5 LPM

จากภาพที่ 75 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 6.8 LPM พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำมีค่าตั้งแต่ประมาณ 2.94 – 5.59 kW คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.45 kW และใช้พลังงานไฟฟ้าไปที่ 34.5 kWh ส่วนค่า EER จะมีค่าตั้งแต่ 2.02 – 4.36 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ มีค่าเฉลี่ย 3.06 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 8.2 LPM ดังภาพที่ 76 พบว่า กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอน้ำมีค่าตั้งแต่ 3.07 – 5.47 kW หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.33 kW และใช้พลังงานไฟฟ้า 32.87 kWh ทางด้าน EER มีค่าตั้งแต่ 2.17 – 4.74 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ มีค่าเฉลี่ย 3.38 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ จากภาพที่ 77 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 9.5 LPM พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำมีค่าตั้งแต่ 3.01 – 5.40 kW คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.21 kW และใช้พลังงานไฟฟ้าไปที่ 33.02 kWh สำหรับค่า EER จะมีค่าตั้งแต่ 2.09 – 4.30 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.29 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$

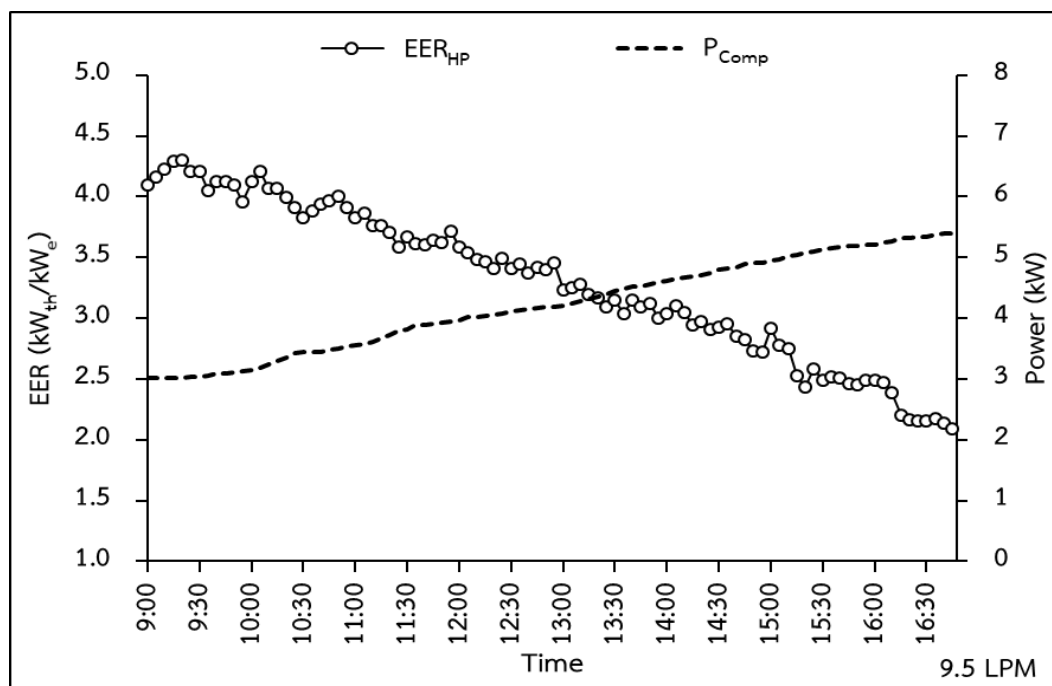
การทดสอบปั๊มความร้อนของทั้ง 3 อัตราการไหลจะสังเกตเห็นว่า ในการทำงานช่วงแรกของระบบจะมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนที่สูง หลังจากนั้นก็จะลดลงเรื่อย ๆ ในตอนท้าย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอน้ำ จากข้อมูลที่ได้พบว่าที่อัตราการไหล 8.2 LPM (อัตราการไหลตามค่ามาตรฐาน ASHRAE 93-2003) ทำให้ค่า EER มีค่าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 9.5 LPM และ 6.8 LPM ตามลำดับ ส่วนทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอน้ำเห็นว่าที่อัตราการไหล 8.2 LPM ใช้พลังงานน้อยที่สุด รองลงมาคือ 9.5 และ 6.8 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 75 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 6.8 LPM)



ภาพที่ 76 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 8.2 LPM)



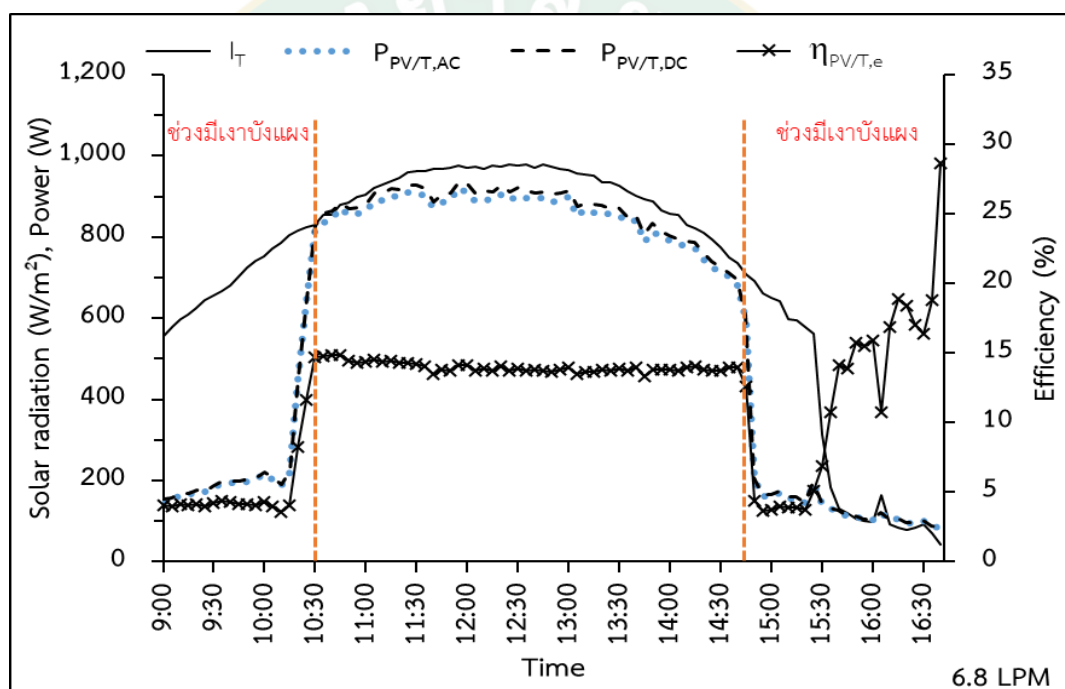
ภาพที่ 77 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน
(อัตราการไหล 9.5 LPM)

3. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์

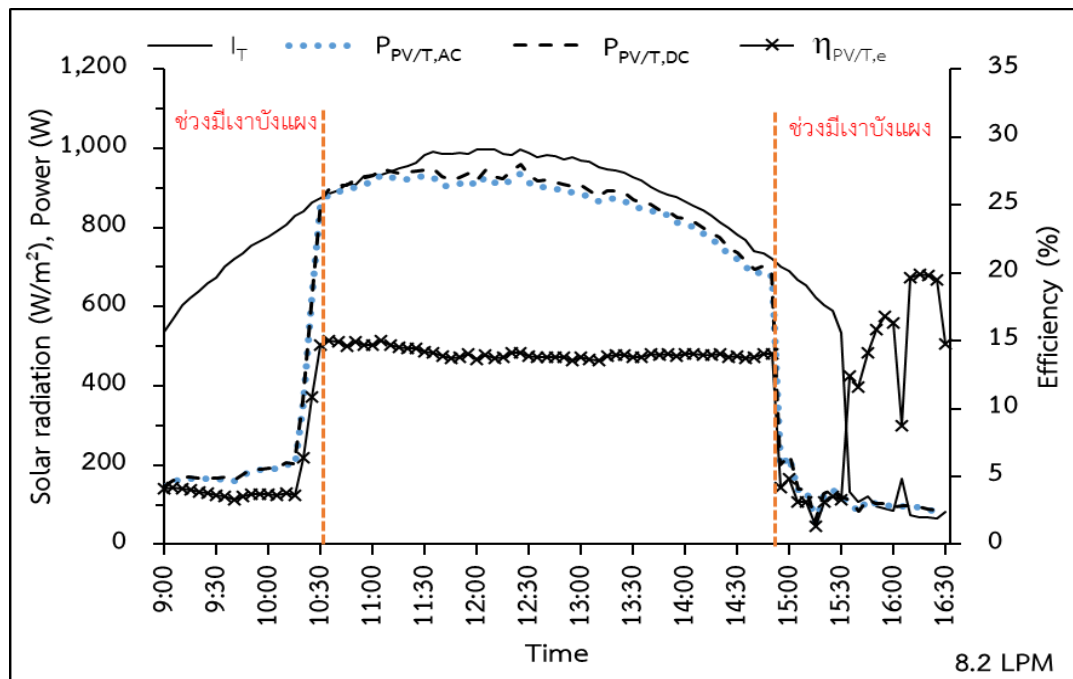
ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากว่าโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการมีต้นไม้สูงจำนวนหนึ่งอยู่ใกล้กับสถานที่เก็บข้อมูล จึงทำให้เกิดมีเงาบังแผง Solar PV/T ในบางช่วงเวลาและในช่วงที่ไม่มีเงาบังแผง Solar PV/T ตั้งแต่เวลา 10:30 – 14:40 น. กำลังไฟฟ้าติดตั้งของระบบ Solar PV/T คือ 1,180 W โดยไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกจ่ายให้กับปั๊มน้ำต่าง ๆ ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จากภาพที่ 78 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีอัตราการไหลผ่านแผง 6.8 LPM จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ (เริ่มเก็บในเวลา 9:00 – 16:40 น.) ซึ่งกำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 936 W มีค่าเฉลี่ย 559 W เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นกระแสตรง จึงต้องนำไปแปลงเป็นกระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์ พบว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 922 W มีค่าเฉลี่ย 548 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T หากนับเฉพาะในช่วงที่ไม่มีโดนเงาจากต้นไม้บังจะมีค่าสูงสุด 14.82% มีค่าเฉลี่ย 13.98% จากภาพที่ 79 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีอัตราการไหลผ่านแผง 8.2 LPM (เริ่มเก็บในเวลา 9:00 – 16:30 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 958 W มีค่าเฉลี่ย 579 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว เห็นว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 935 W มีค่าเฉลี่ย 568 W ทางด้าน

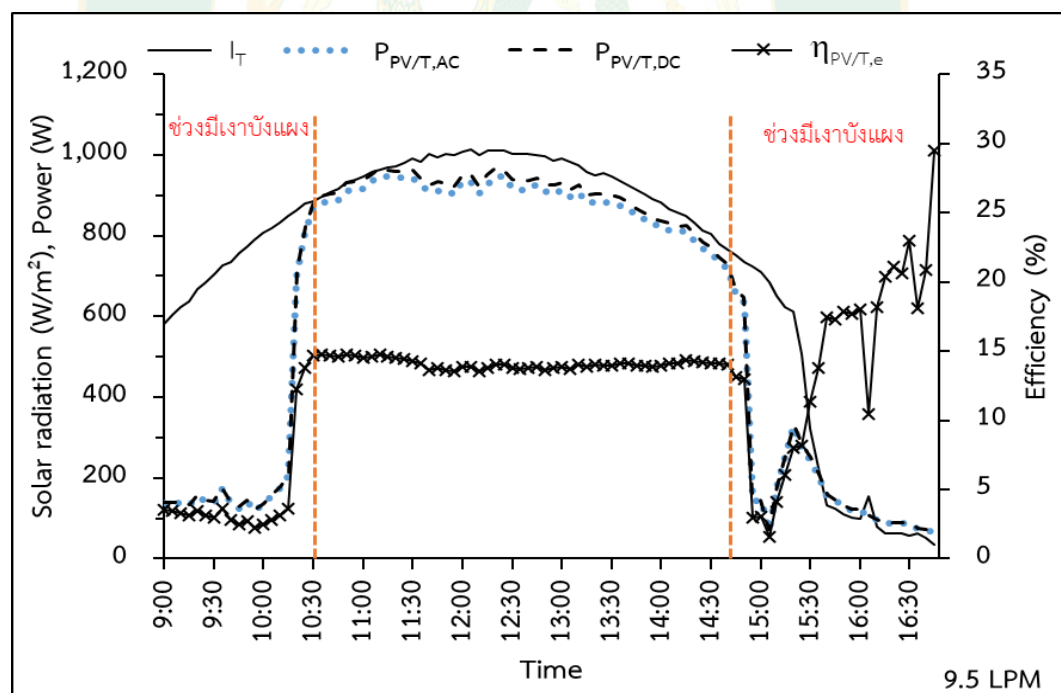
ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T (ช่วงที่ไม่โดนเงาบัง) มีค่าสูงสุด 14.99% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.07% จากภาพที่ 80 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีอัตราการไหลผ่านแผง 9.5 LPM (เริ่มเก็บในเวลา 9:00 – 16:45 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่ผลิตได้คือ 966 W มีค่าเฉลี่ย 581 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว พบว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 948 W มีค่าเฉลี่ย 569 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T (ช่วงที่ไม่โดนเงาบัง) มีค่าสูงสุด 14.76% มีค่าเฉลี่ย 14.10% จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลจะมีผลต่อประสิทธิภาพที่ผลิตได้ของระบบ Solar PV/T โดยพบว่าที่อัตราการไหล 8.2 LPM มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T สูงที่สุด ตามมาด้วยอัตราการไหล 6.8 LPM และ 9.5 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 78 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T อัตราการไหล 6.8 LPM



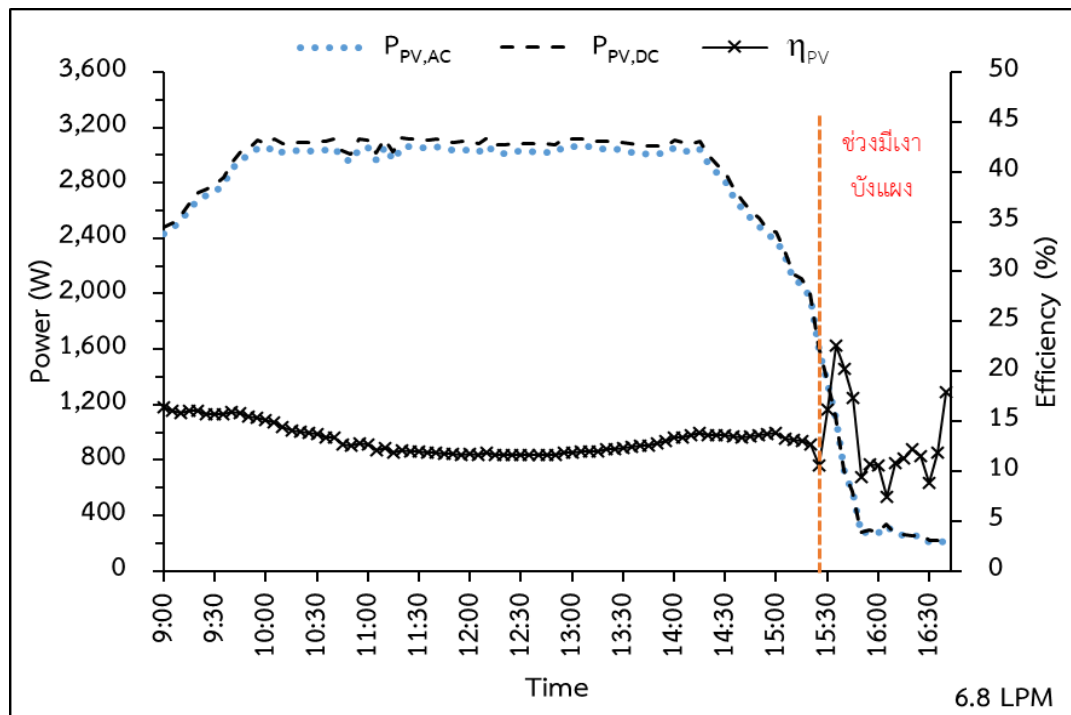
ภาพที่ 79 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T อัตราการไหล 8.2 LPM



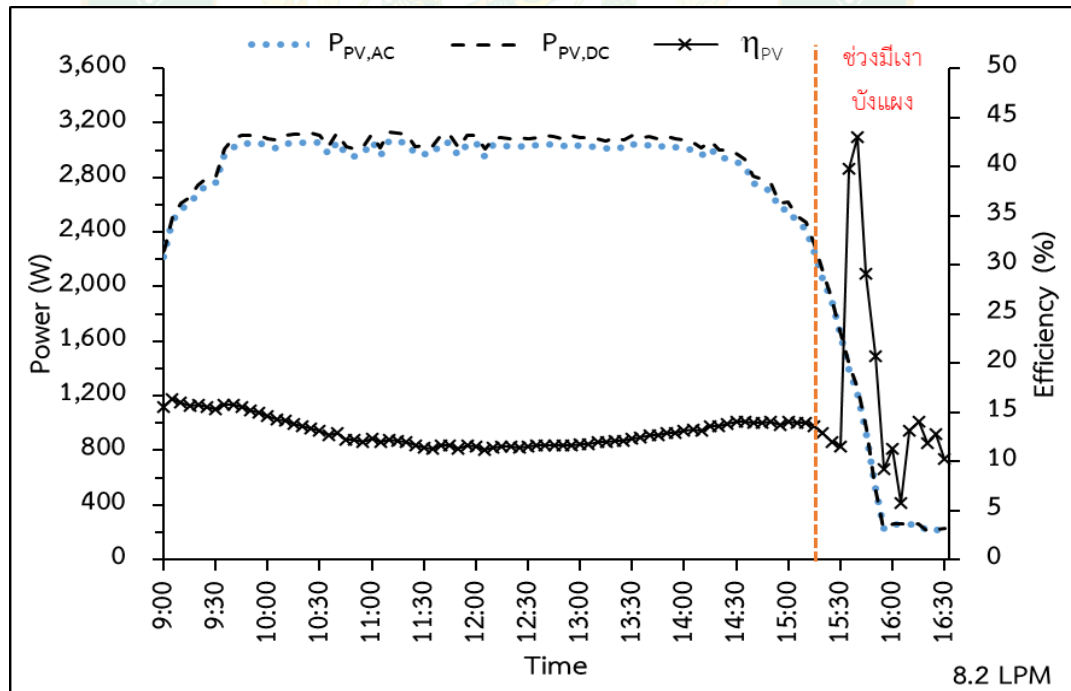
ภาพที่ 80 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T อัตราการไหล 9.5 LPM

ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

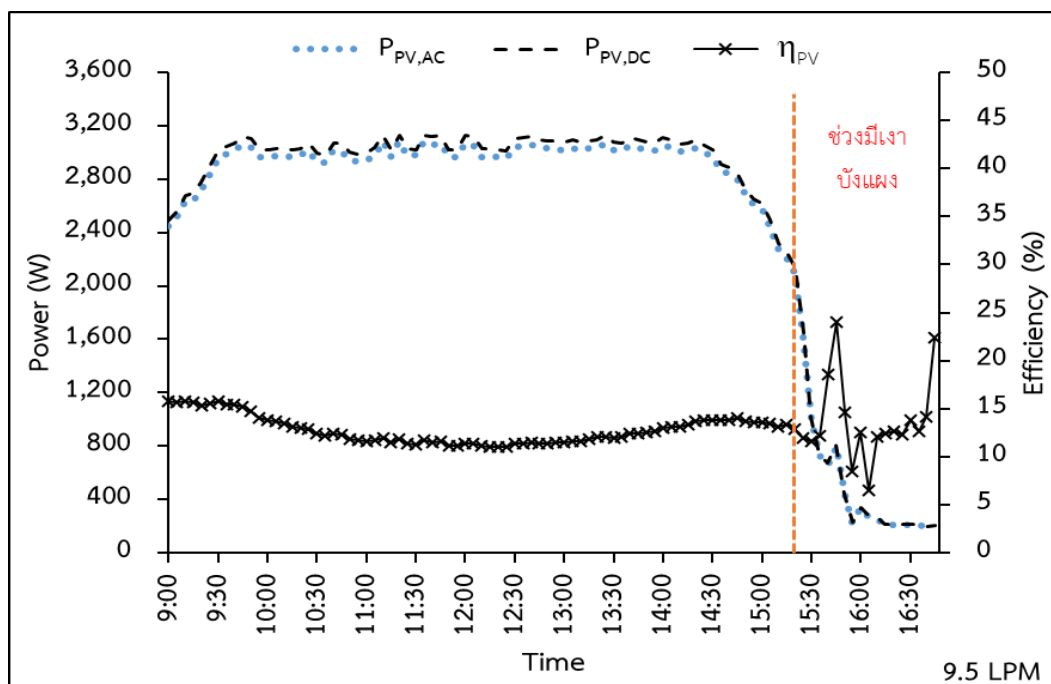
ในการเก็บข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบ Solar PV พบว่ามีเงาจากต้นไม้บังแผงในช่วงเวลาสุดท้ายของการทำงาน ซึ่งช่วงเวลาที่ไม่มีเงาบังแผงคือ ตั้งแต่ 9:00 – 15:15 น. กำลังไฟฟ้าติดตั้งของระบบ Solar PV คือ 5,180 W โดยไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบนี้จะถูกป้อนให้กับปั๊มความร้อน ถ้าหากไม่เพียงพอก็จะมีการดึงกำลังไฟฟ้ามาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่ม จากภาพที่ 81 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีวันที่ทดสอบอัตราการไหล 6.8 LPM จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ 3,126 W มีค่าเฉลี่ย 2,530 W เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจึงต้องนำไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์ พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เท่ากับ 3,069 W มีค่าเฉลี่ย 2,483 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV หากนับเฉพาะในช่วงที่ไม่โดนเงาจากต้นไม้บังจะมีค่าสูงสุด 16.38% มีค่าเฉลี่ย 13.20% จากภาพที่ 82 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีวันที่ทดสอบอัตราการไหล 8.2 LPM พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 3,133 W มีค่าเฉลี่ย 2,622 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เท่ากับ 3,070 W มีค่าเฉลี่ย 2,573 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV (ช่วงที่ไม่โดนเงาบัง) มีค่าสูงสุด 16.34% มีค่าเฉลี่ย 13.06% จากภาพที่ 83 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีวันที่ทดสอบอัตราการไหล 9.5 LPM พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 3,131 W มีค่าเฉลี่ย 2,520 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว พบว่ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3,087 W มีค่าเฉลี่ย 2,473 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV (ช่วงที่ไม่โดนเงาบัง) มีค่าสูงสุด 15.81% มีค่าเฉลี่ย 12.79% เนื่องจากประสิทธิภาพขึ้นกับอุณหภูมิของแผง จึงทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV แต่ละวันจะมีค่าที่ไม่เหมือนกัน



ภาพที่ 81 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV อัตราการไหล 6.8 LPM



ภาพที่ 82 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV อัตราการไหล 8.2 LPM

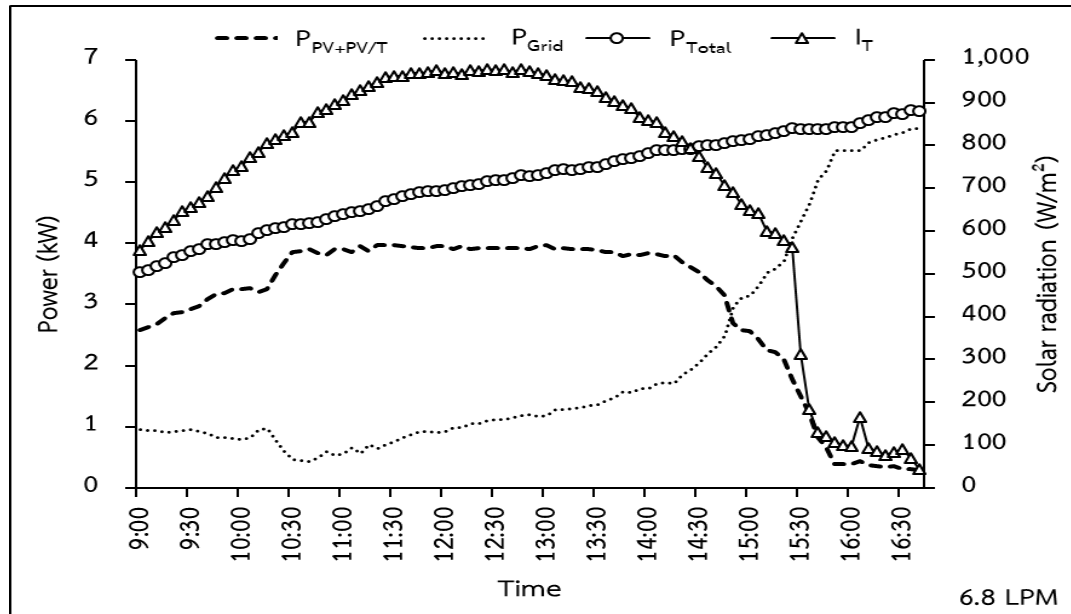


ภาพที่ 83 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV อัตราการไหล 9.5 LPM

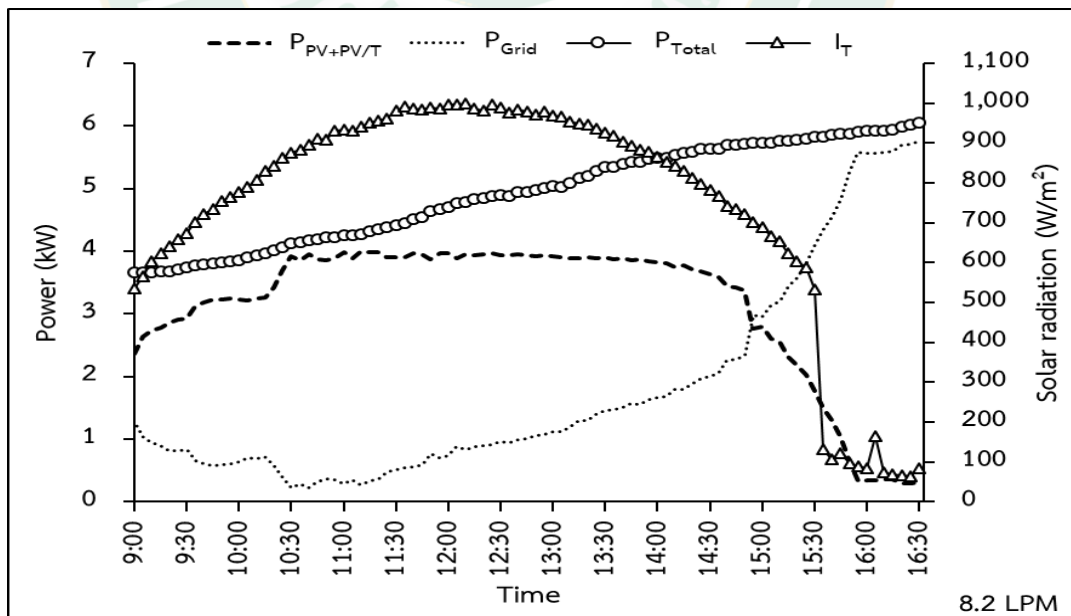
4. กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

จากภาพที่ 84 ในกรณีอัตราการไหล 6.8 LPM พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T รวมกันสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.97 kW เมื่อคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิตคือ 23.49 kWh/รอบการผลิต ซึ่งไม่เพียงพอต่อการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 6.17 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 39.01 kWh/รอบการผลิต จึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มเท่ากับ 15.52 kWh/รอบการผลิต จากภาพที่ 85 กรณีอัตราการไหล 8.2 LPM พบว่าระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารวมกันได้สูงสุด 3.99 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิต 23.82 kWh/รอบการผลิต และไม่เพียงพอต่อการใช้งานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้พลังงานสูงสุด 6.06 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิตเท่ากับ 37.29 kWh/รอบการผลิต จึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่ม 13.47 kWh/รอบการผลิต จากภาพที่ 86 กรณีอัตราการไหล 9.5 LPM พบว่าระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารวมกันได้สูงสุด 4.03 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 23.83 kWh/รอบการผลิต และไม่เพียงพอต่อการใช้งานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้พลังงานสูงสุด 5.99 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 37.59 kWh/รอบการผลิต จึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่ม 13.76 kWh/รอบการผลิต จากข้อมูลที่ได้พบว่า ที่อัตราการไหล 8.2 LPM มีส่วนทำให้

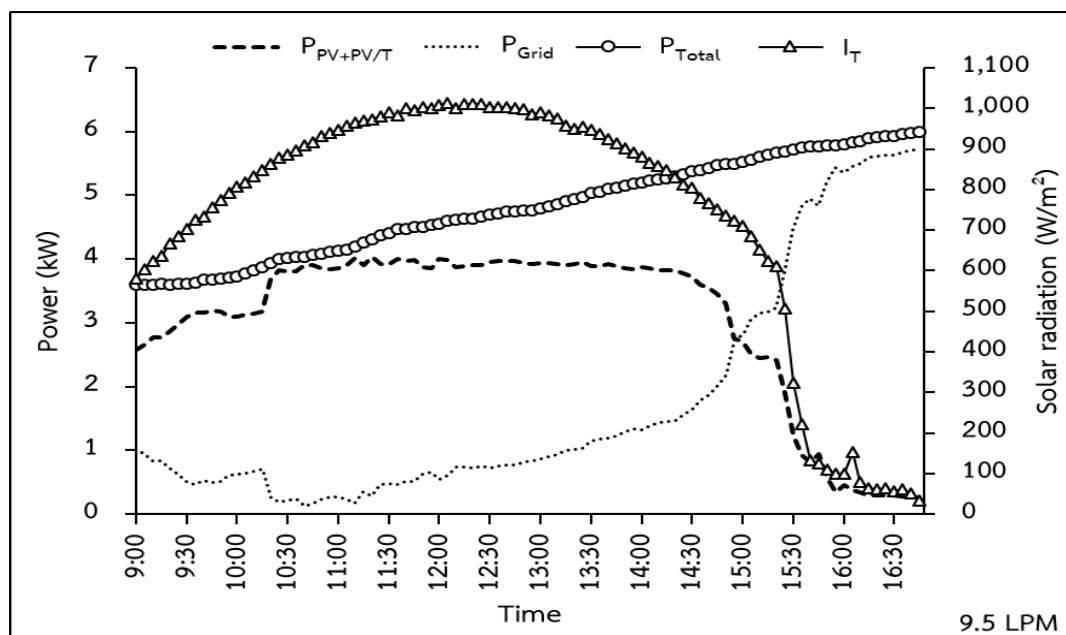
การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้ต่ำสุด รองลงมาเป็นอัตราการไหล 9.5 และ 6.8 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 84 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหล 6.8 LPM)



ภาพที่ 85 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหล 8.2 LPM)

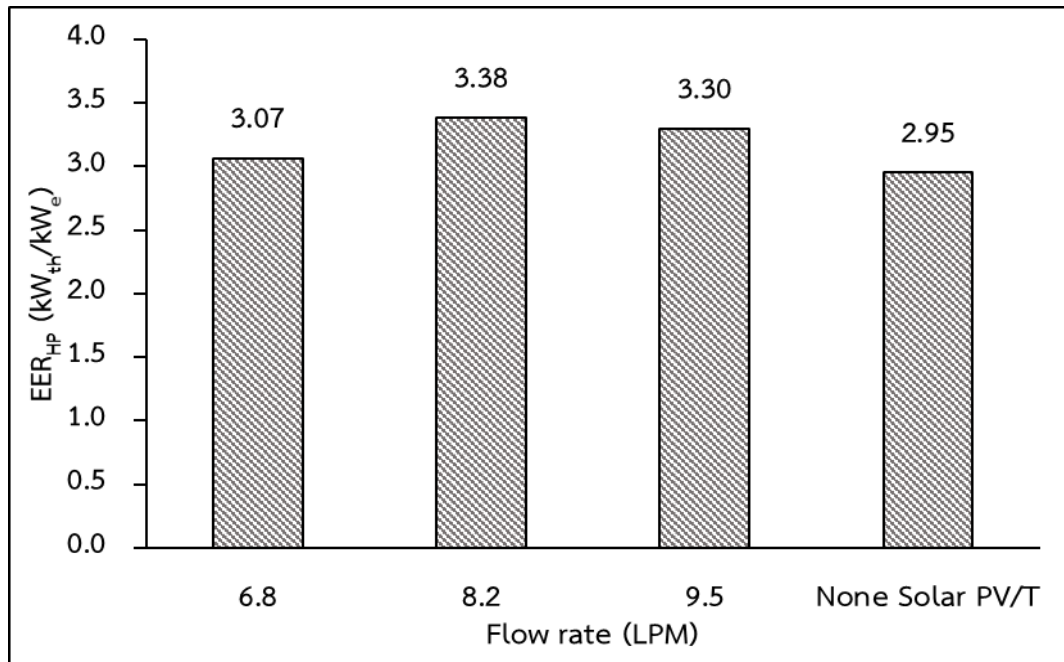


ภาพที่ 86 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหล 9.5 LPM)

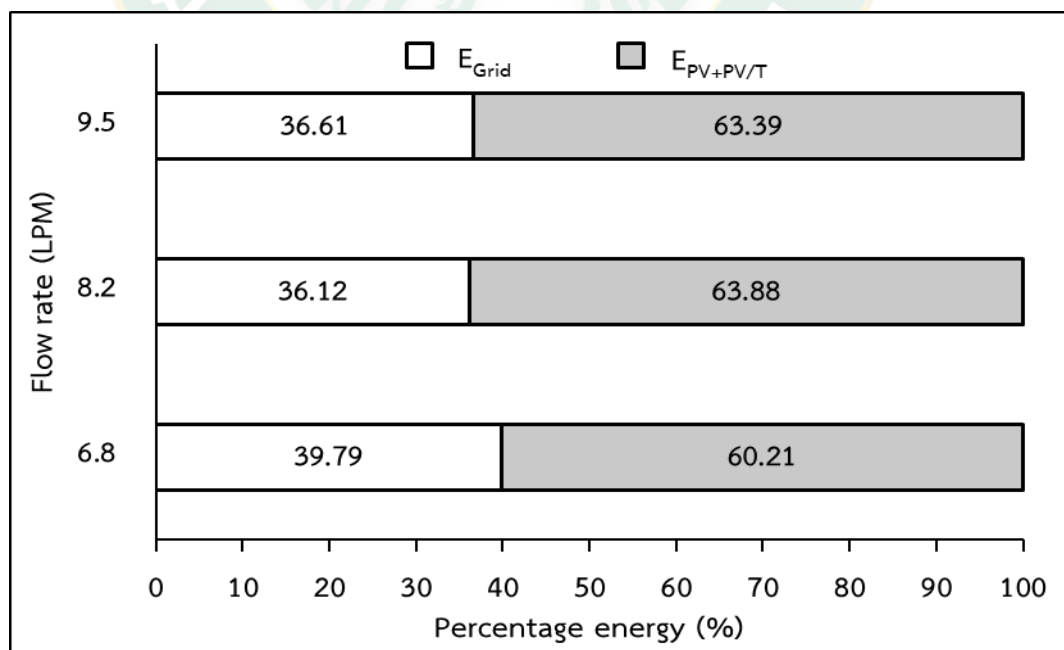
5. อัตราการไหลที่เหมาะสมแก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

การทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ด้วยการปรับอัตราการไหลผ่านระบบ Solar PV/T แบ่งออกเป็น 3 ค่า คือ 6.8 8.2 และ 9.5 LPM จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า กรณีอัตราการไหล 8.2 LPM เป็นอัตราการไหลที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบได้สูงสุด โดยมีค่า EER สูงสุด 4.73 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.38 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ รองลงมาคืออัตราการไหล 9.5 และ 6.8 LPM ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 และ 3.07 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปั๊มความร้อนที่ไม่ได้เสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีค่า EER เฉลี่ยเท่ากับ 2.95 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ พบว่าระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump มีสมรรถนะที่ดีกว่าแสดงดังภาพที่ 87 สำหรับการใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มพบว่า อัตราการไหล 8.2 LPM มีการใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตมาจากระบบ Solar PV และ ระบบ Solar PV/T รวมกันเข้ามาช่วยลดพลังงานไฟฟ้าโดยคิดเป็น 63.88% จากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จึงทำให้มีการใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่ำสุดเท่ากับ 36.12% ตามด้วยอัตราการไหล 9.5 LPM คิดเป็น 36.61% และอัตราการไหล 6.8 LPM คิดเป็น 39.79% แสดงดังภาพที่ 88 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลผ่านระบบ Solar PV/T ที่เหมาะสมกับระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump เพื่อนำไปปฏิบัติใช้งานจริงในกระบวนการผลิตน้ำร้อนให้แก่โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ คือ อัตราการไหลที่ 8.2 LPM เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่เพิ่ม

ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และเป็นอัตราการไหลที่เพิ่มสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ได้ดีที่สุดในทั้ง 3 อัตราการไหล



ภาพที่ 87 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราการไหล

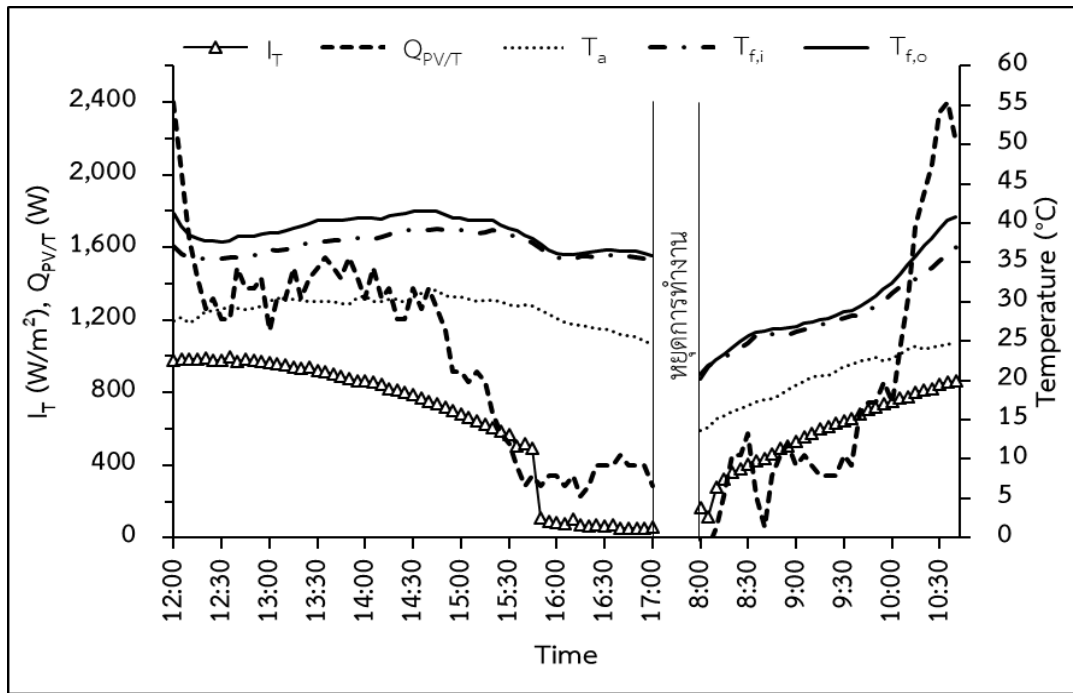


ภาพที่ 88 เปอร์เซนต์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหล

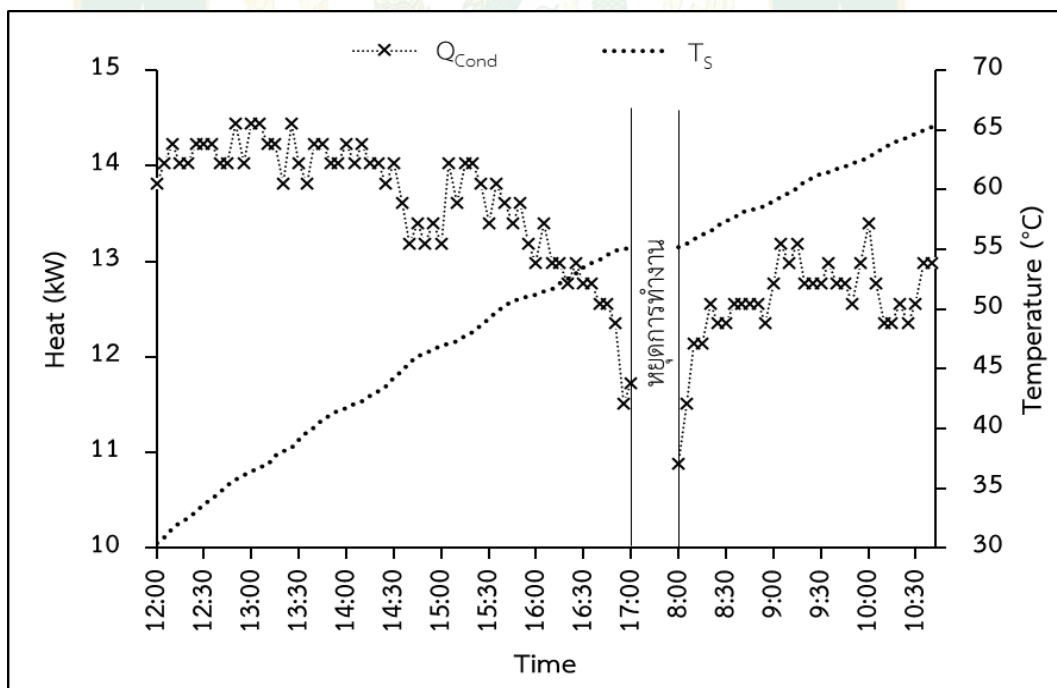
ทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ตามการใช้งานจริง

โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการได้เริ่มกระบวนการลวกและชุดขนสุกรในเวลา 12:30 น. จากระบบเดิมที่ใช้ Heater ในการผลิตน้ำร้อนได้ดำเนินในช่วงเวลาประมาณ 6:00 – 10:30 น. ซึ่งใช้เวลาผลิตน้ำร้อนประมาณ 4.5 h จากการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 117.53 kWh/day จึงทำให้ทางโรงฆ่าสัตว์แห่งนี้ใช้พลังงานในปริมาณมากและมีค่าใช้จ่ายที่สูงตามมา ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนมาใช้ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จำต้องมีการหาช่วงเวลาที่เหมาะสมกับกระบวนการลวกและชุดขนสุกร ซึ่งได้มีการแบ่งเวลาในการทำงานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ออกเป็น 2 ช่วงเวลา เช่น ช่วงแรกเปิดใช้งานระบบในช่วงเวลา 12:00 – 17:00 น. และช่วงที่สองจะเปิดใช้งานระบบต่อในวันถัดไปในช่วงเวลา 8:00 น. จนได้อุณหภูมิน้ำ 65 °C โดยในการทดสอบระบบได้ทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 มีรายละเอียดดังนี้

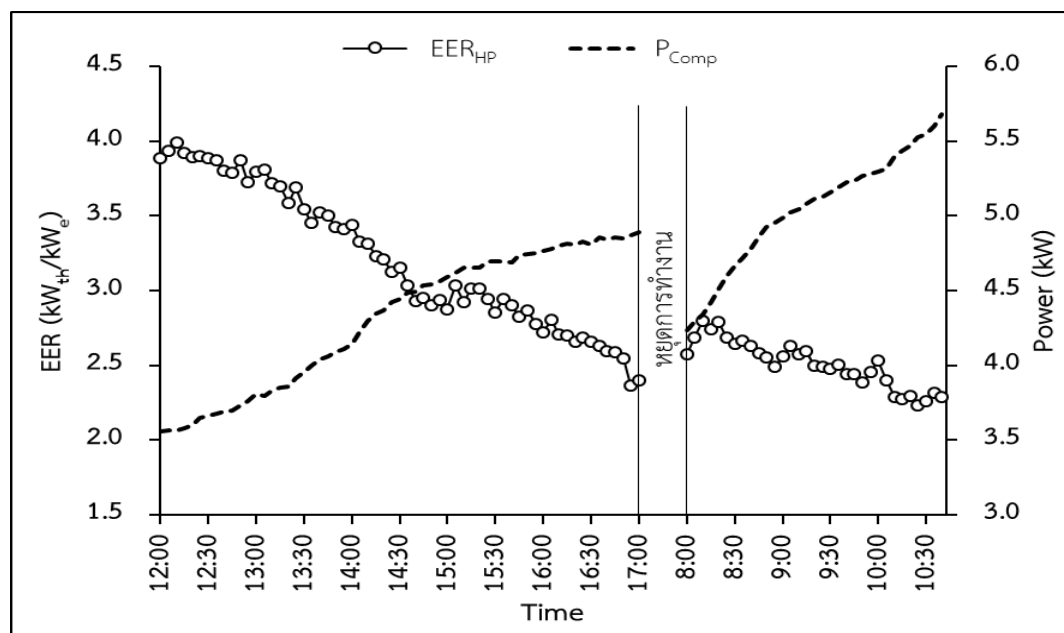
จากภาพที่ 89 พบว่าในวันที่ทดสอบมีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดที่ 998 W/m² ในเวลา 12:35 น. อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ 25.98 °C ส่วนความร้อนที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งมีค่าสูงสุด 2,403.34 W ในเวลา 12:00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ค่ารังสีอาทิตย์กระทบต่อแผง Solar PV/T เต็มที่ จึงทำให้ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกและขาเข้ามีค่าที่สูง และส่งผลต่อความร้อนที่ผลิตได้สูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 961.68 W หรือคิดเป็นความร้อนที่ผลิตได้เท่ากับ 26.01 MJ/รอบการผลิต จากภาพที่ 90 พบว่าความร้อนของปั๊มความร้อนที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 14.44 kW มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.27 kW พบว่าความร้อนที่ผลิตได้จะลดลงเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิในถังที่เพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 17:00 น. รวมระยะเวลาทำงาน 5 h ระบบจะหยุดทำงานและสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 55.2 °C ในวันถัดไประบบจะเริ่มทำงานในเวลา 08:00 – 10:40 น. ความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ก็ยังคงลดลงตามอุณหภูมิในถังที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสารทำงาน และส่งผลต่อผลต่างอุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลงและทำให้การผลิตความร้อนของปั๊มความร้อนมีค่าที่ลดลง จากภาพที่ 91 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอจะมีค่าตั้งแต่ 3.55 – 5.67 kW มีค่าเฉลี่ย 4.56 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 35.76 kWh/รอบการผลิต ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) มีค่าสูงสุดที่ 3.99 kW_{th}/kW_e มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.97 kW_{th}/kW_e โดยเมื่อระบบหยุดทำงานในเวลา 10:40 น. จะสามารถผลิตน้ำร้อนขนาด 2,500 L ได้อุณหภูมิเท่ากับ 65.5 °C ใช้เวลาทั้งหมด 7 h 40 min



ภาพที่ 89 ค่ำรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และความร้อนที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T

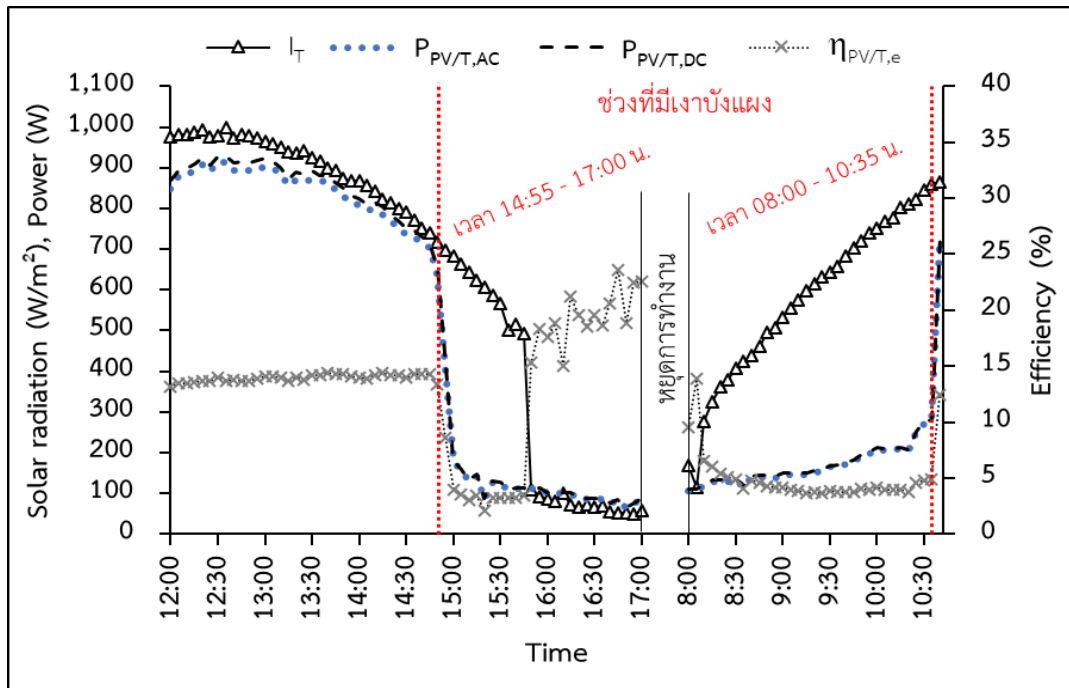


ภาพที่ 90 อุณหภูมิน้ำในถังและอัตราการถ่ายเทความร้อนของบ่มีความร้อน

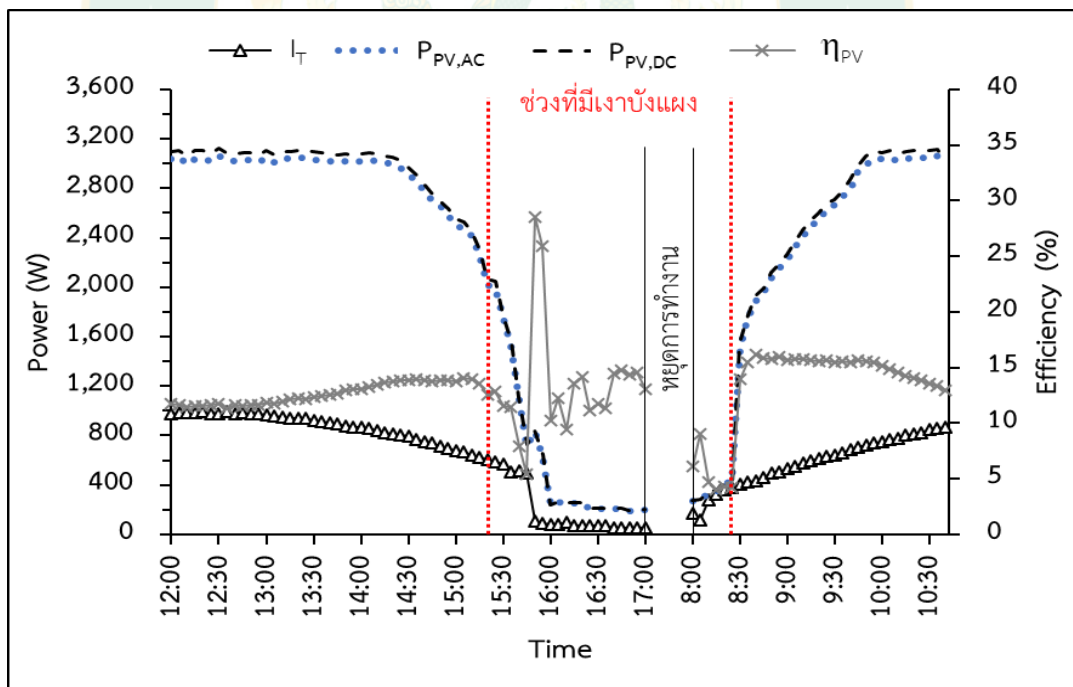


ภาพที่ 91 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

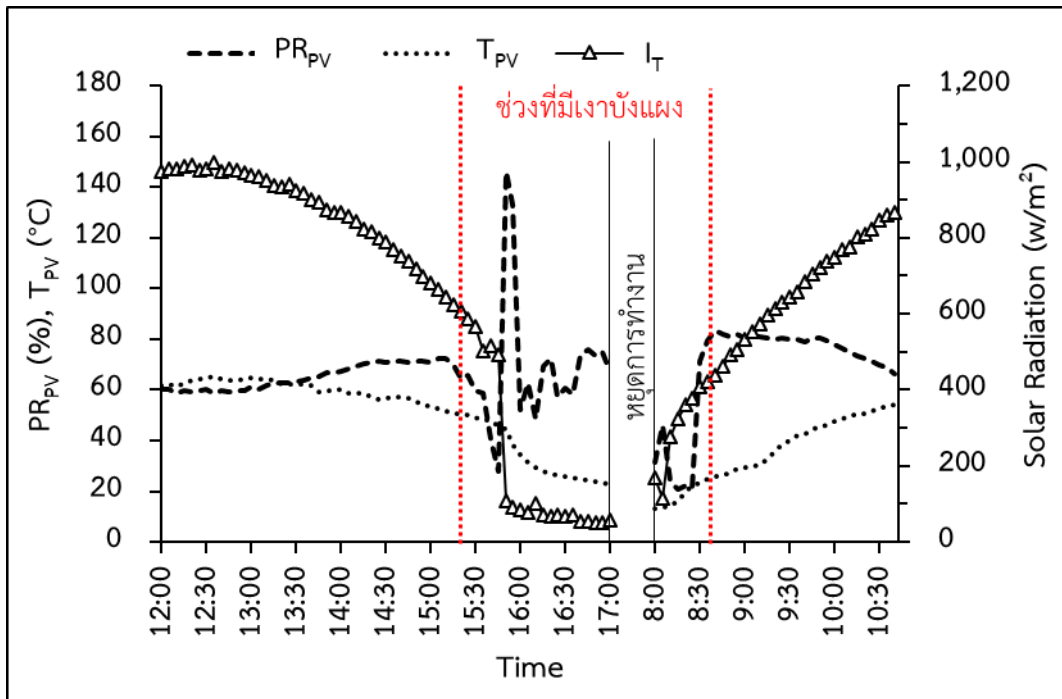
จากภาพที่ 92 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T โดยช่วงเวลาที่แผง Solar PV/T โดนแดดเต็มที่ตั้งแต่เวลา 12:00 – 14:50 น. และ เวลา 10:40 น. เนื่องจากว่ามีเงาจากต้นไม้บังแผง Solar PV/T ในบางช่วงเวลา ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยพบว่ากำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 930 W มีค่าเฉลี่ย 416 W เมื่อแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้วพบว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 913 W มีค่าเฉลี่ย 408 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T หากพิจารณาเฉพาะในช่วงที่ไม่โดนเงาจากต้นไม้บังจะมีค่าสูงสุด 14.40% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.89% สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV พบว่าช่วงเวลา 12:00 – 15:15 น. และ 8:30 – 10:40 น. ทำให้มีกำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 3,125 W มีค่าเฉลี่ย 2,200 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว พบว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 3,065 W มีค่าเฉลี่ย 2,158 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV (ช่วงที่ไม่โดนเงาบัง) จะมีค่าสูงสุด 16.22% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.64% แสดงดังภาพที่ 93 โดยจากภาพที่ 94 แสดงค่าสมรรถนะของระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T ซึ่งค่าสมรรถนะของระบบ Solar PV จะมีค่าสูงสุด 83.35% มีค่าเฉลี่ย 70.17% และสมรรถนะของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด 81.34% มีค่าเฉลี่ย 78.41% (ช่วงที่ไม่มีเงา) โดยพบว่าอุณหภูมิแผงที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ Solar PV ที่ต่ำกว่าระบบ Solar PV/T เนื่องจากระบบ Solar PV/T มีน้ำเข้ามาระบายหรือลดความร้อนของแผงจึงทำให้ระบบ Solar PV/T มีสมรรถนะที่สูงกว่า



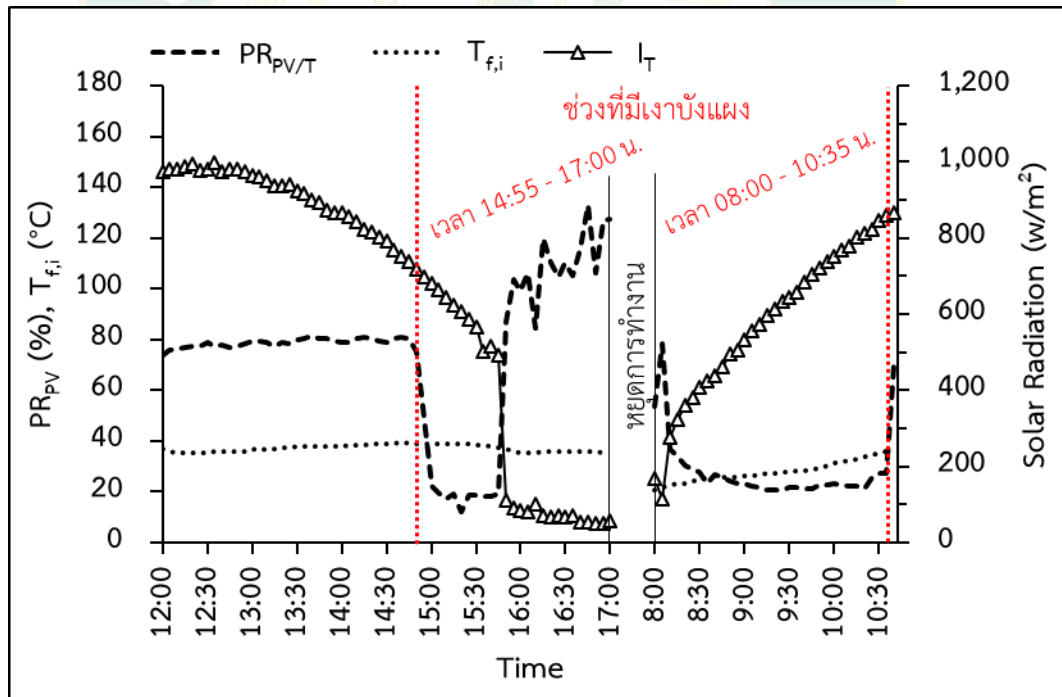
ภาพที่ 92 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T



ภาพที่ 93 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV



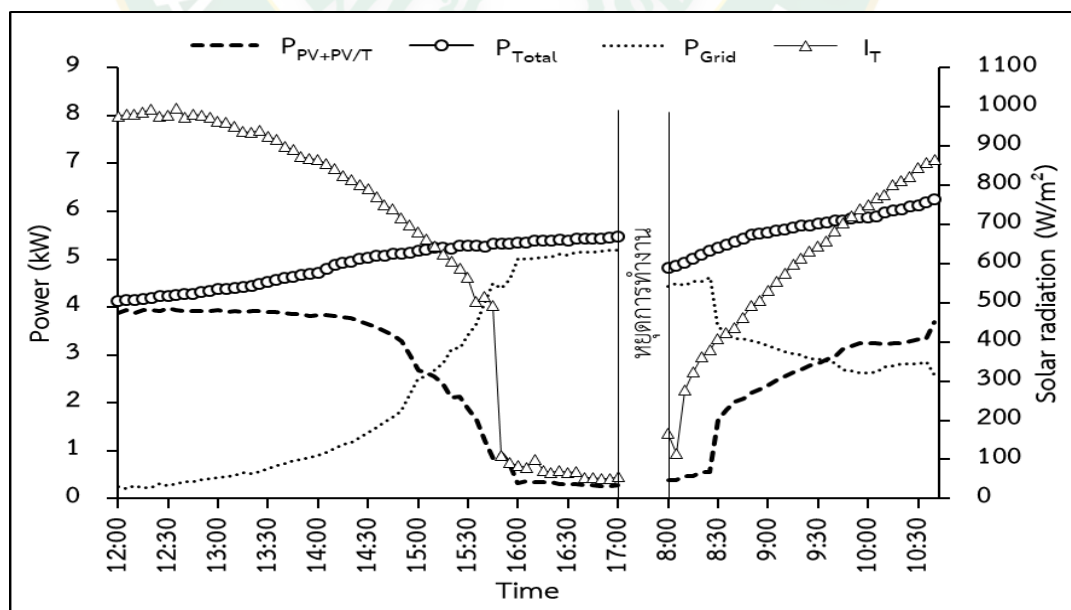
(ก) สมรรถนะของระบบ Solar PV



(ข) สมรรถนะของระบบ Solar PV/T

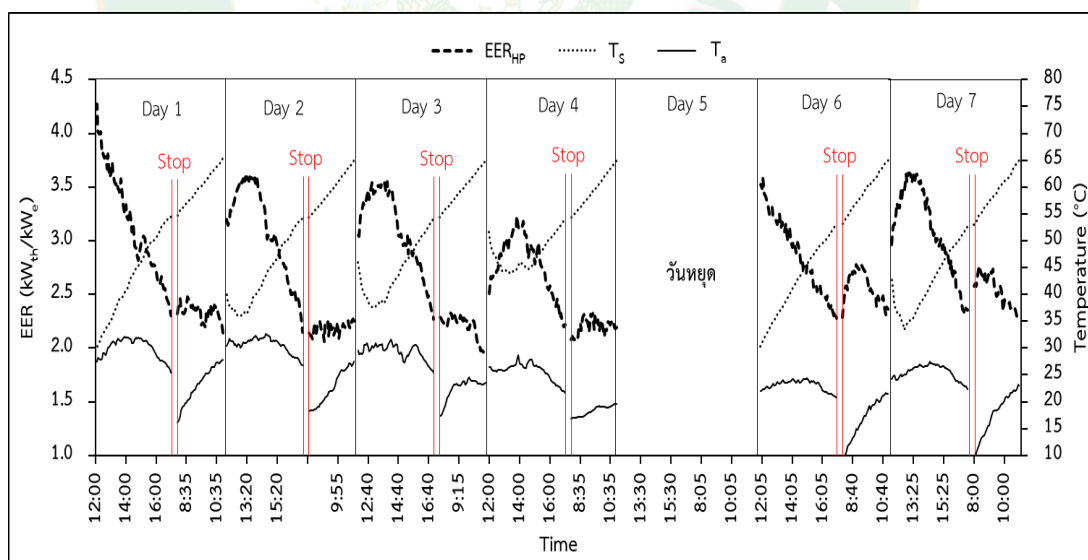
ภาพที่ 94 สมรรถนะของระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T

จากภาพที่ 95 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงขึ้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก ระบบ Solar PV และ Solar PV/T รวมกันจะสูงขึ้นด้วย จึงเป็นผลดีต่อทางโรงฆ่าสัตว์เนื่องจากทำให้ ประหยัดค่าไฟฟ้า แต่เมื่อช่วงเวลาที่ค่ารังสีอาทิตย์ลดลงระบบจะทำการดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า พื้นฐานเข้ามาช่วยมากขึ้น ประกอบกับอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่สูงขึ้นก็จะทำให้ระบบใช้ กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยจากผลที่ได้พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ต้องการกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 4.13 – 6.26 kW ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในปั๊มน้ำ ทุกตัวและอุปกรณ์อื่น ๆ คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ 40.32 kWh/รอบการผลิต สำหรับ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อป้อน ให้แก่ระบบได้สูงสุด 3.98 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 20.10 kWh/รอบการผลิต พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อระบบ จึงต้องมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า พื้นฐานเข้ามาช่วยเพิ่ม 20.22 kWh/รอบการผลิต เมื่อคิดเป็นค่าความร้อนสะสมที่ถังเก็บน้ำร้อนผลิต ได้ในหนึ่งรอบการผลิต 367.4 MJ/รอบการผลิต สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบทั้งหมดคิดเป็น พลังงานเชิงความร้อนเท่ากับ 145.161 MJ/รอบการผลิต ในขณะที่ความร้อนที่ได้รับจากค่ารังสี อาทิตย์คิดเป็น 596.77 MJ/รอบการผลิต และระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (ระบบ Solar PV กับระบบ Solar PV/T รวมกัน) ที่ผลิตได้คิดเป็นพลังงานเชิงความร้อนเท่ากับ 72.37 MJ/รอบการผลิต ซึ่งจาก สมการที่ 28 จะได้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (η_{Sys}) เท่ากับ 59.28%

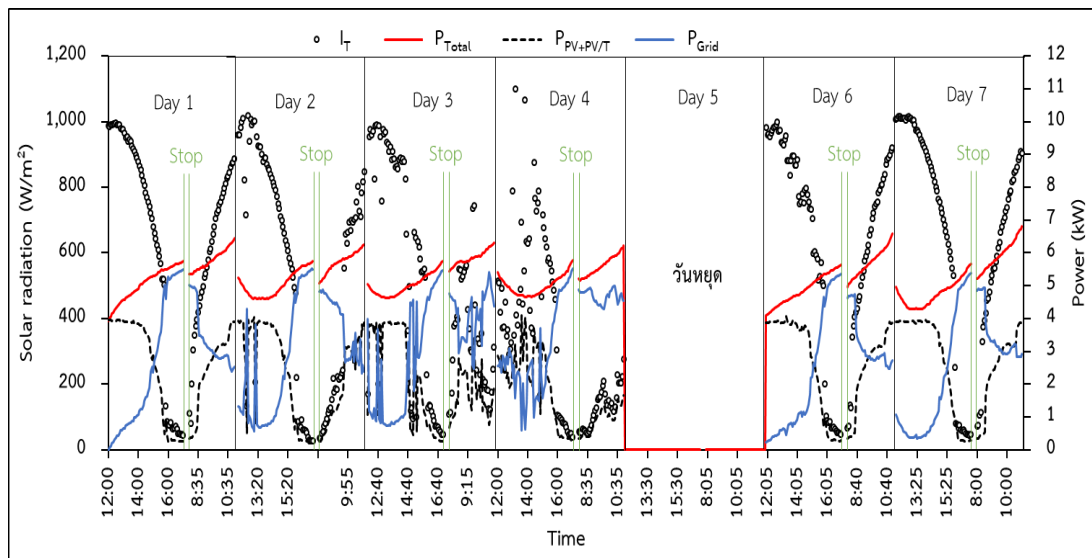


ภาพที่ 95 กำลังไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและผลิตได้ของ ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

ผลการทดสอบการทำงานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump แบบต่อเนื่องกัน ทั้ง 7 วัน โดยทำการเปิดระบบตั้งแต่เวลา 12:00 – 17:00 น. และทำงานต่อในวันถัดไปเวลา 8:00 น. จนได้อุณหภูมิน้ำ 65 °C ทดสอบตั้งแต่วันที่ 17-24 ธันวาคม พ.ศ. 2563 (ภายใน 7 วันจะมีวันหยุด 1 วัน) แสดงดังภาพที่ 96 และภาพที่ 97 พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าอยู่ระหว่าง 9.4 – 32.6 °C ส่วนค่ารังสีอาทิตย์มีค่าอยู่ระหว่าง 26 W/m² (เนื่องจากมีเงาในบางช่วงเวลา) ถึง 1,123 W/m² ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) มีค่าตั้งแต่ 1.94 – 4.27 kW_{th}/kW_e โดยพบว่าในช่วงที่อุณหภูมิในถังต่ำจะทำให้ EER มีค่าที่สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในถังมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ EER มีค่าที่ลดลงเรื่อย ๆ สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอและปั๊มน้ำต่าง ๆ ในระบบใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 6.80 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบทั้ง 7 วันเท่ากับ 257.9 kWh/week และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (ระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T ผลิตไฟฟ้ารวมกัน) จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 4.11 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้ง 7 วันรวมกันเท่ากับ 113.5 kWh/week ดังนั้น ระบบจึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มที่มีค่าสูงสุด 5.51 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 144.4 kWh/week



ภาพที่ 96 อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิในถัง และค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (ทดสอบระบบ 7 วันต่อเนื่อง)



ภาพที่ 97 กำลังไฟฟ้าดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและผลิตได้ของ
ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump
(ทดสอบระบบ 7 วันต่อเนื่อง)

วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

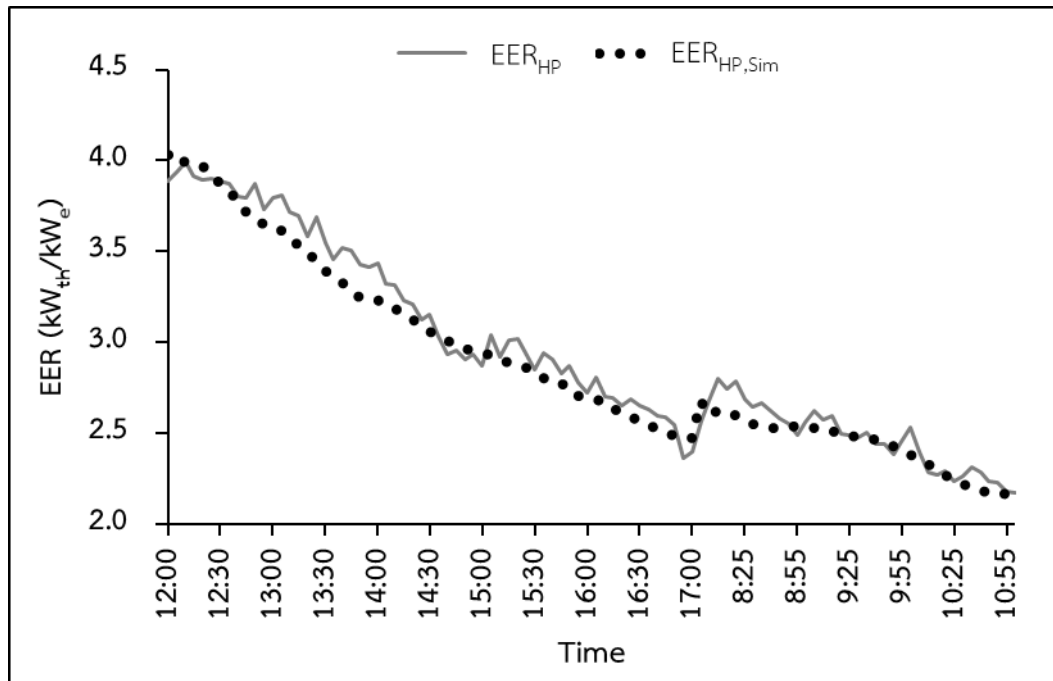
หลังจากทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ตามการใช้งานจริงแล้วสามารถ
สร้างสมการทำนายกำลังไฟฟ้าและ EER ของปั๊มความร้อนเสริมด้วยแผง Solar PV/T ได้ เพื่อจะ
สามารถทำนายหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระยะหนึ่งปีของระบบดังกล่าว ซึ่งสมการทำนายค่า EER
สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 40

$$EER_{HP,Sim} = 81.8378 \times (I_T^{0.016628}) \times (T_a^{0.19456}) \times (T_{f,o}^{-0.30281}) \times (T_s^{-0.77417}) \quad \text{สมการที่ 40}$$

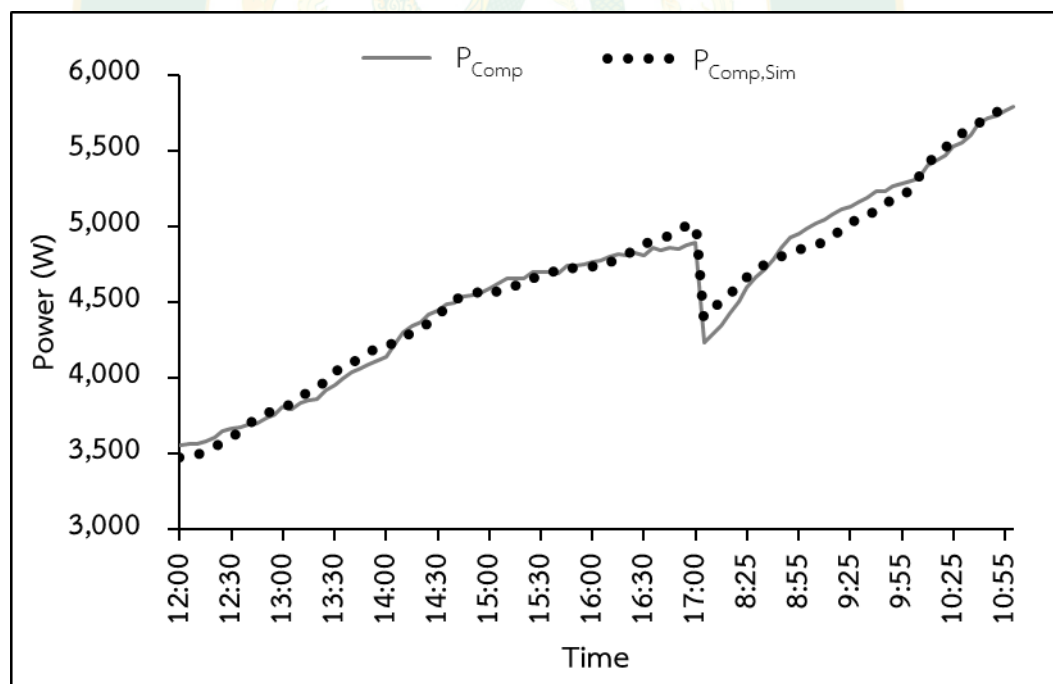
ส่วนสมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 41

$$P_{Comp,Sim} = 267.31 \times (T_{f,o}^{0.20834}) \times (T_s^{0.56875}) \times (EER_{HP}^{-0.11192}) \quad \text{สมการที่ 41}$$

สมการที่ 40 และ 41 ได้จากการนำเอาข้อมูลผลทดสอบปั๊มความร้อนของวันที่ 11 – 12
ธันวาคม 2563 แสดงดังตารางที่ ข.10 และ ข. 11 ในภาคผนวก เพื่อมาทำการวิเคราะห์การถดถอย
เชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) และเมื่อคำนวณสมการทำนายเพื่อเปรียบเทียบกับผล
การทดลองพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน จากภาพที่ 98 พบว่าสมการทำนายค่า
EER ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump มีความคลาดเคลื่อน 2.79% และสมการทำนาย
กำลังไฟฟ้าของปั๊มความร้อนมีความคลาดเคลื่อน 1.31% แสดงดังภาพที่ 99

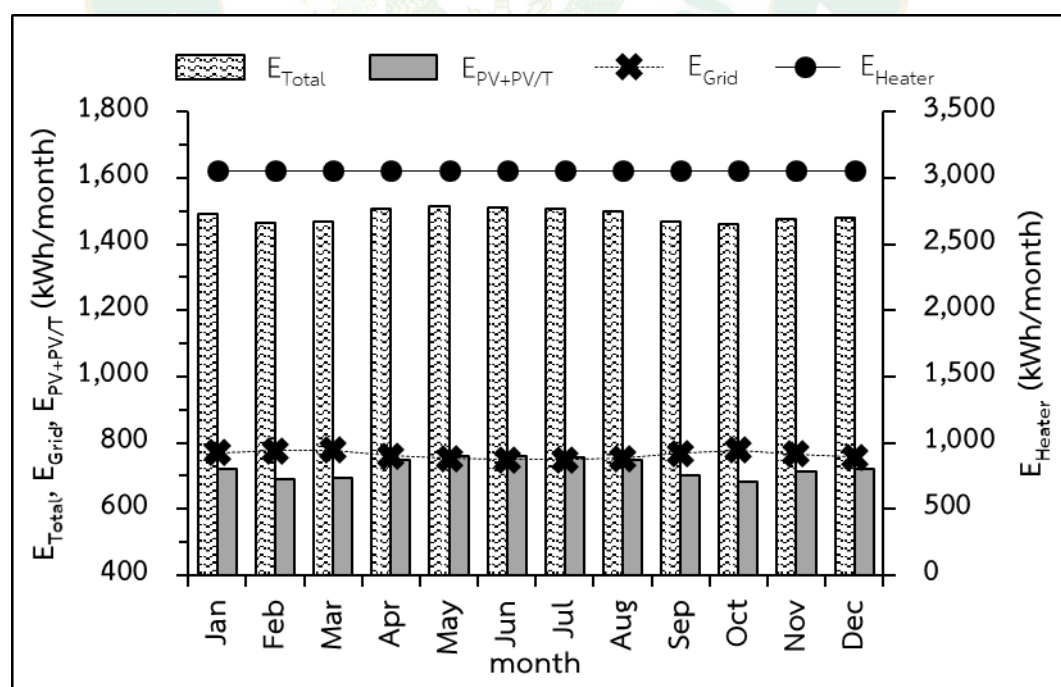


ภาพที่ 98 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายค่า EER



ภาพที่ 99 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ด้วยการใช้น้ำที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนมาคำนวณ โดยจากเดิมที่ใช้ขดลวดความร้อนผลิตน้ำร้อน และใช้พลังงานไฟฟ้า 3,005.78 kWh/month หรือ 36,669.36 kWh/year จากภาพที่ 100 แสดงลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (รายละเอียดการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก.4) พบว่า เดือนพฤษภาคม เป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานสูงสุด 761.53 kWh/month สำหรับเดือนตุลาคม เป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด 682.43 kWh/month ซึ่งหากคิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี พบว่าระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จะใช้พลังงานไฟฟ้า 9,156.67 kWh/year เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ heater จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 27,512.69 kWh/year คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 125,457.87 Baht/year พบว่าระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 75% โดยใช้เงินลงทุนสร้างระบบ 708,060 Baht คิดเป็นระยะคืนทุนคือ 6.07 year อัตราผลตอบแทน (IRR) 14.24% มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 409,011.73 Baht ทางด้านค่าดัชนีการใช้จ่ายพลังงาน (SEC) ของปี พ.ศ. 2560 – 2561 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.33 kWh/ตัว หรือคิดเป็นค่าใช้จ่าย 33.41 Baht/ตัว จะลดลงเหลือ 1.83 kWh/ตัว คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 8.36 Baht/ตัว รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 100 จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน กรณีใช้ Solar PV/T Boosted Heat Pump

ตารางที่ 5 รายละเอียดการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ขดลวดความร้อน (Heater)	ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump
กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)	27	5.69
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (kWh/day)	117.53	29.35
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี (kWh/year)	36,669.36	9,156.67
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (Baht/kWh)	4.56	
ค่าใช้จ่าย (Baht/year)	167,212.28	41,754.41
ผลประหยัดได้ (kWh/year)	27,512.69	
ผลประหยัดได้ (Baht/year)	125,457.87 (ลดลง 75%)	
เงินลงทุน (Baht)	708,060	
ระยะคืนทุน (year)	6.07	
NPV (Baht) คิดอัตราดอกเบี้ย 6.22% (ธนาคารกรุงไทย, 2564)	409,011.73	
IRR	14.24%	
SEC (kWh/ตัว)	7.33	1.83
SEC (Baht/ตัว)	33.41	8.38

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) รวมถึงแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) จากการทดสอบพบว่าปั๊มความร้อนมีค่า EER เฉลี่ย $2.95 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ แผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 54.13% และ แผง Solar PV มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 15.10%

ส่วนที่ 2 เป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบขนาดและจำนวนของระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์ซึ่งพบว่า ระบบที่เหมาะสมประกอบไปด้วยปั๊มความร้อนขนาด $17.8 \text{ kW}_{\text{th}}$ ใช้สารทำงาน R134a แผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ ขนาดกำลังไฟฟ้า 295 W จำนวน 4 แผง ต่อเข้ากับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 W จำนวน 14 แผง

ส่วนที่ 3 เมื่อทำการติดตั้งระบบแล้วจะทำการทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ที่เหมาะสมกับการใช้งาน จากการทดสอบพบว่าที่อัตราการไหล 8.2 LPM เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) สูงสุดเท่ากับ $4.74 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ มีค่าเฉลี่ย $3.38 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T ผลิตรวมกันได้สูงสุด 3.99 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 23.82 kWh/รอบการผลิต หรือคิดเป็น 63.88% ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตเข้ามาช่วยลดพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด 6.06 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 37.29 kWh/รอบการผลิต จึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่ม 13.47 kWh/รอบการผลิต หรือคิดเป็น 36.12% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

ส่วนที่ 4 เป็นการศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump เมื่อใช้งานจริงโดยระบบจะเริ่มทำงานตั้งแต่เวลา 12:00 - 17:00 น. สามารถผลิตน้ำร้อนได้ $55.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และจะหยุดทำงานก่อนจะกลับมาเริ่มทำงานใหม่ในวันถัดในเวลา 08:00 - 10:40 น. ซึ่งทำให้ได้น้ำร้อนปริมาณ 2,500 ลิตรที่อุณหภูมิ $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 7 h 40 min ในการผลิตน้ำร้อนต่อรอบการผลิต มี

ค่า EER ของปั๊มความร้อนสูงสุด $3.99 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ มีค่าเฉลี่ย $2.97 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ ค่าสมรรถนะทางไฟฟ้า (PR) ของระบบ Solar PV และระบบ Solar PV/T มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 70.17% และ 78.41% ตามลำดับ ในขณะที่ระบบมีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 40.32 kWh/รอบการผลิต โดยได้จากระบบ Solar PV/T และระบบ Solar PV รวมกัน 20.10 kWh/รอบการผลิต ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่มอีก 20.22 kWh/รอบการผลิต และระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump มีประสิทธิภาพรวม 59.28%

ส่วนที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการใช้พลังงานตลอดทั้งปีของระบบ จากการศึกษาพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 27,512.69 kWh/year คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 125,457.87 Baht/year หรือลดลง 75% เมื่อเทียบกับระบบผลิตน้ำร้อนเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า สามารถลดดัชนีการใช้พลังงาน (SEC) ลงได้จากเดิมมีค่า 7.33 kWh/ตัว หรือ 33.41 Baht/ตัว เหลือ 1.83 kWh/ตัว หรือ 8.36 Baht/ตัว โดยระบบดังกล่าวใช้เงินลงทุน 708,060 Baht คิดเป็นระยะคืนทุน 6.07 year มีอัตราผลตอบแทน (IRR) 14.24%



ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในรอบ ๆ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการมีต้นไม้สูงเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดมีเงาบังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแผง Solar PV/T ในบางช่วงเวลา จึงทำให้ไม่สามารถลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่

2. อีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นกับระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump คือ ตะกรัน ปัญหาดังกล่าวเกิดจากน้ำประปาที่ประกอบไปด้วยแร่ธาตุหลายชนิด เมื่อเจอความร้อนสูง ๆ จะทำให้เกิดมีคราบตะกรันบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือเครื่องควบแน่นในปั๊มความร้อน ซึ่งส่งผลให้ระบบต้นทำให้ผลิตน้ำร้อนถึงอุณหภูมิ 65°C ได้ช้าลง และระบบต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นไปอีกด้วย ซึ่งวิธีแก้ไขคือ โรงฆ่าสัตว์ควรติดตั้งระบบเครื่องกรองน้ำเข้าช่วยเพื่อลดปัญหาตะกรันในระบบ

ดังนั้น หากมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว จะทำให้ทางโรงฆ่าสัตว์สามารถลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าลงมากขึ้นไปอีก และสามารถใช้งานระบบได้อย่างยาวนาน







ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ก.1 ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump โดยระบบใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T คือ 8.2 LPM ปริมาณน้ำในถังเก็บ 2,500 L ณ เวลา 13:00 น. ของวันที่ 11 ธันวาคม 2563 ซึ่งเป็นวันที่ทำการทดลองระบบในการใช้งานจริงของโรงฆ่าสัตว์

1. การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Condenser) ของปั๊มความร้อน

$$Q_{\text{Cond}} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{\text{Cond,o}} - T_{\text{Cond,i}}) = 0.5 \times 4.187 \times (39.6 - 32.7)$$

$$= 14.445 \text{ kW}$$

2. การคำนวณค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน

$$EER_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{P_{\text{Comp}}} = \frac{14.445}{3.807} = 3.794 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$$

3. การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อน

$$Q_S = M_S C_{p,f} (T_S^{t+\Delta t} - T_S^t) = 2,500 \times 4.187 \times (36.8 - 36.35) = 4.710 \text{ MJ}$$

4. การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์

$$P_{\text{PV+PV/T}} = (P_{\text{PV}} + P_{\text{PV/T}}) \times \Delta t$$

$$= (3.050 + 0.900) \times 300 = 1.185 \text{ MJ}$$

5. การคำนวณพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

$$\text{Input} = \left[(A_{\text{PV}} + A_{\text{PV/T}}) \times I_T + P_{\text{Total}} \right] \times \Delta t$$

$$= \left[[(27.16 + 6.792) \times 946] + 4,390 \right] \times 300 = 11.136 \text{ MJ}$$

6. การคำนวณประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

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

$$= \frac{4.710 + 1.185}{11.136} = 0.53 \text{ หรือ } 53\%$$

ภาคผนวก ก.2 การคำนวณหาขนาดความร้อนของปั๊มความร้อนที่จะนำไปติดตั้ง ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ โดยจากข้อมูลเบื้องต้น พบว่า โรงฆ่าสัตว์ต้องการใช้น้ำร้อนปริมาณ 2,500 L เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิตั้งแต่ 30 °C ถึง 65 °C โดยช่วงเวลาที่มิต่างค่ารังสีอาทิตย์โดยเฉลี่ยต่อวันคือประมาณ 6 h/day สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_s &= (MCp)_s \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s^t)}{\Delta t} \\
 &= 2,500 \times 4.187 \times \frac{(65 - 30)}{(6 \times 3,600)} \\
 &= 16.96 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากขนาดปั๊มความร้อนที่สามารถเลือกไปใช้ได้มีขนาด 8.2 kW 13.5 kW และ 17.8 kW พบว่าจากการคำนวณความร้อนที่ได้เท่ากับ 16.96 kW ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับขนาด 17.8 kW ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW ไปติดตั้งในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ

ภาคผนวก ก.3 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ก่อนทำการติดตั้งระบบจริง โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของเดือน มกราคม เวลา 12:00 น. ซึ่งมี $I_T = 867 \text{ W/m}^2$ $T_a = 27.62 \text{ }^\circ\text{C}$ และใช้อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นคือ $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การทำนายอัตราการการถ่ายเทความร้อนของแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} Q_{PV/T} &= A_{PV/T} [(0.328 I_T) - (7.2997 (T_{f,i} - T_a))] \\ &= 6.792 \times [(0.328 \times 801) - (7.2997 \times (35 - 27.62))] \\ &= 1,870.21 \text{ W} \end{aligned}$$

2. การทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} T_{PV/T,Sim} &= 0.05831 \times (I_T^{0.27576}) \times (T_a^{1.5262}) \times (T_{f,i}^{-0.092972}) \\ &= 0.05831 \times (867^{0.27576}) \times (27.62^{1.5262}) \times (35^{-0.092972}) \\ &= 42.85 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} P_{PV/T,Sim} &= 0.82707 \times (I_T^{0.56327}) \times (T_a^{-0.47834}) \times (T_{f,i}^{-0.47705}) \times (T_{PV/T}^{1.3394}) \\ &= 0.82707 \times (867^{0.56327}) \times (27.62^{-0.47834}) \times (35^{-0.47705}) \times \\ &\quad (42.85^{1.3394}) = 860 \text{ W} \end{aligned}$$

4. การทำนายอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned} T_{PV,Sim} &= 0.17661 \times (I_T^{0.41565}) \times (T_a^{0.86861}) \\ &= 0.17661 \times (867^{0.41565}) \times (27.62^{0.86861}) = 55.46 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

5. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned} P_{PV,Sim} &= 14.046 \times (I_T^{0.57571}) \times (T_a^{0.039103}) \times (T_{PV}^{-0.32111}) \\ &= 14.046 \times (867^{0.57571}) \times (27.62^{0.039103}) \times (55.46^{-0.32111}) \end{aligned}$$

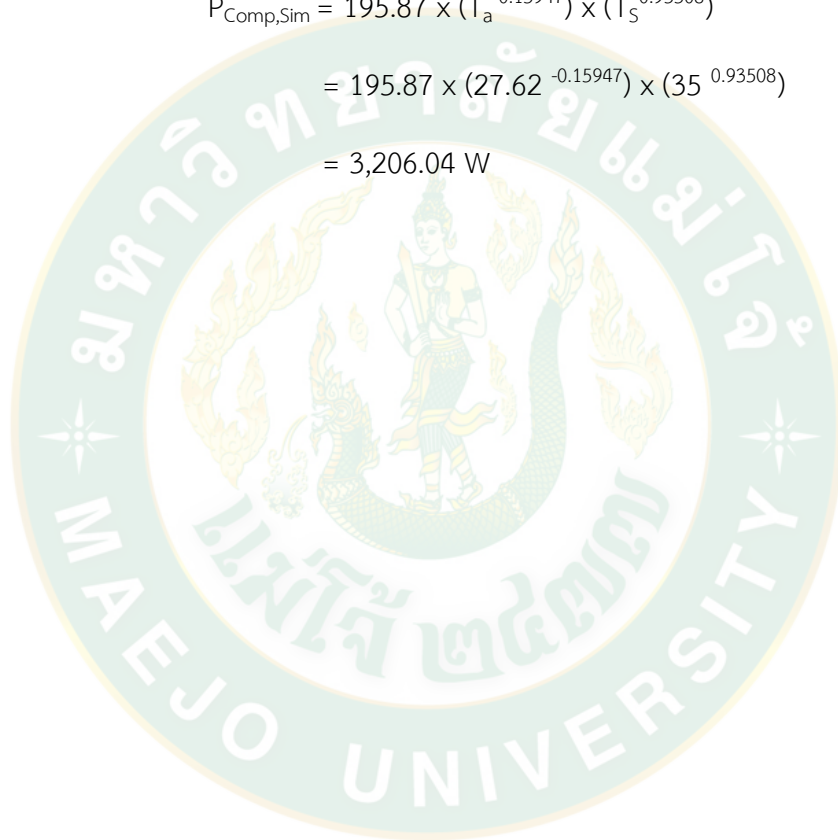
$$= 3,030 \text{ W}$$

6. การทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน

$$\begin{aligned} \text{EER}_{\text{HP,Sim}} &= 4.4333 - [0.0829 (T_s - T_a)] \\ &= 4.4333 - [0.0829 (35 - 27.62)] = 3.82 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e \end{aligned}$$

7. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

$$\begin{aligned} P_{\text{Comp,Sim}} &= 195.87 \times (T_a^{-0.15947}) \times (T_s^{0.93508}) \\ &= 195.87 \times (27.62^{-0.15947}) \times (35^{0.93508}) \\ &= 3,206.04 \text{ W} \end{aligned}$$



ภาคผนวก ก.4 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump หลังจากที่ทำการศึกษาทดสอบระบบต่อการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการสำเร็จ โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของเดือน ตุลาคม ณ เวลา 12:00 น. ซึ่งมีค่า $I_T = 770 \text{ W/m}^2$ $T_a = 30.05 \text{ }^\circ\text{C}$ และใช้อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นคือ $30 \text{ }^\circ\text{C}$ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} Q_{PV/T} &= A_{PV/T} [(0.328 I_T) - (7.2997 (T_{f,i} - T_a))] \\ &= 6.792 \times [(0.328 \times 770) - (7.2997 \times (30 - 30.05))] \\ &= 1,715.82 \text{ W} \end{aligned}$$

2. การทำนายอุณหภูมิน้ำขาออกแผง Solar PV/T กำหนด $\dot{m}_f = 0.135 \text{ kg/s}$ (จากค่าอัตราการไหลมาตรฐาน $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$)

$$\begin{aligned} T_{f,o} &= T_{f,i} + (Q_{PV/T} / \dot{m}_f C_{p,f}) \\ &= 30 + (1,715 / (0.135 \times 4,187)) \\ &= 33.02 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3. การทำนายค่า EER กำหนด $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} EER_{HP,Sim} &= 81.8378 \times (I_T^{0.016628}) \times (T_a^{0.19456}) \times (T_{f,o}^{-0.30281}) \times (T_s^{-0.77417}) \\ &= 81.8378 \times (770^{0.016628}) \times (30.05^{0.19456}) \times (33.02^{-0.30281}) \\ &\quad \times (30^{-0.77417}) = 4.42 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e \end{aligned}$$

4. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

$$\begin{aligned} P_{Comp,Sim} &= 267.31 \times (T_{f,o}^{0.20834}) \times (T_s^{0.56875}) \times (EER_{HP}^{-0.11192}) \\ &= 267.31 \times (33.02^{0.20834}) \times (30^{0.56875}) \times (4.42^{-0.11192}) \\ &= 3,245.98 \text{ W} \end{aligned}$$

5. การทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned}
 T_{PV/T,Sim} &= 0.05831 \times (I_T^{0.27576}) \times (T_a^{1.5262}) \times (T_{f,i}^{-0.092972}) \\
 &= 0.05831 \times (770^{0.27576}) \times (30.05^{1.5262}) \times (30^{-0.092972}) \\
 &= 47.86 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

3. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned}
 P_{PV/T,Sim} &= 0.82707 \times (I_T^{0.56327}) \times (T_a^{-0.47834}) \times (T_{f,i}^{-0.47705}) \times (T_{PV/T}^{1.3394}) \\
 &= 0.82707 \times (770^{0.56327}) \times (30.05^{-0.47834}) \times (30^{-0.47705}) \\
 &\quad \times (42.85^{1.3394}) = 964 \text{ W}
 \end{aligned}$$

4. การทำนายอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
 T_{PV,Sim} &= 0.17661 \times (I_T^{0.41565}) \times (T_a^{0.86861}) \\
 &= 0.17661 \times (770^{0.41565}) \times (30.05^{0.86861}) = 56.8 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

5. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
 P_{PV,Sim} &= 14.046 \times (I_T^{0.57571}) \times (T_a^{0.039103}) \times (T_{PV}^{-0.32111}) \\
 &= 14.046 \times (770^{0.57571}) \times (30.05^{0.039103}) \times (56.8^{-0.32111}) \\
 &= 3,245 \text{ W}
 \end{aligned}$$

6. การหาลำดับไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (P_{Grid})

$$\begin{aligned}
 P_{Grid} &= P_{Total} - (P_{PV} + P_{PV/T}) \\
 &= 3,245.98 - (3,245 + 964) \\
 &= - 536 \text{ W}
 \end{aligned}$$

(แสดงว่า ณ ช่วงเวลานี้ไม่มีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาใช้)

7. ผลการทำนายพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปีของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ Heater

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump และระบบ Heater

month	E_{grid}	E_{Heater}	Saving Energy
	kWh/month	kWh/month	kWh/month
JAN	771.08	3,055.78	2,284.70
FEB	776.45	3,055.78	2,279.33
MAR	777.45	3,055.78	2,278.33
APR	760.70	3,055.78	2,295.08
MAY	751.97	3,055.78	2,303.81
JUN	749.45	3,055.78	2,306.33
JUL	748.88	3,055.78	2,306.90
AUG	752.33	3,055.78	2,303.45
SEP	767.64	3,055.78	2,288.14
OCT	777.41	3,055.78	2,278.37
NOV	765.64	3,055.78	2,290.14
DEC	757.66	3,055.78	2,298.12
Total Energy (kWh/year)	9,156.67	36,669.36	27,512.69

การวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์

กรณีการใช้ขดลวดความร้อนในการผลิตน้ำร้อน

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 117.53 && \text{kWh/day} \\ &= 117.53 \times 26 \times 12 \\ &= 36,669.36 && \text{kWh/year} \end{aligned}$$

กรณีการใ้ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 29.35 && \text{kWh/day} \\ &= 29.35 \times 26 \times 12 \\ &= 9,156.67 && \text{kWh/year} \\ \text{ผลประหยัดได้} &= 36,669.36 - 9,156.67 \\ &= 27,512.69 && \text{kWh/year} \\ \text{คิดเป็นค่าใช้จ่าย} &= 27,512.69 \times 4.56 \\ &= 125,457.8727 && \text{Baht/year} \\ \text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี (ค่าบำรุงรักษาคิดเป็น 7% ของพลังงานไฟฟ้าที่} & & & \\ \text{ประหยัดได้)} &= (27,512.69 \times 4.56) - [(27,512.69 \times 7\%) \times 4.56] \\ &= 116,675.82 && \text{Baht} \end{aligned}$$

เงินลงทุนระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

$$= 708,060 \quad \text{Baht}$$

ระยะคืนทุน

$$= 708,060 / 116,675.82$$

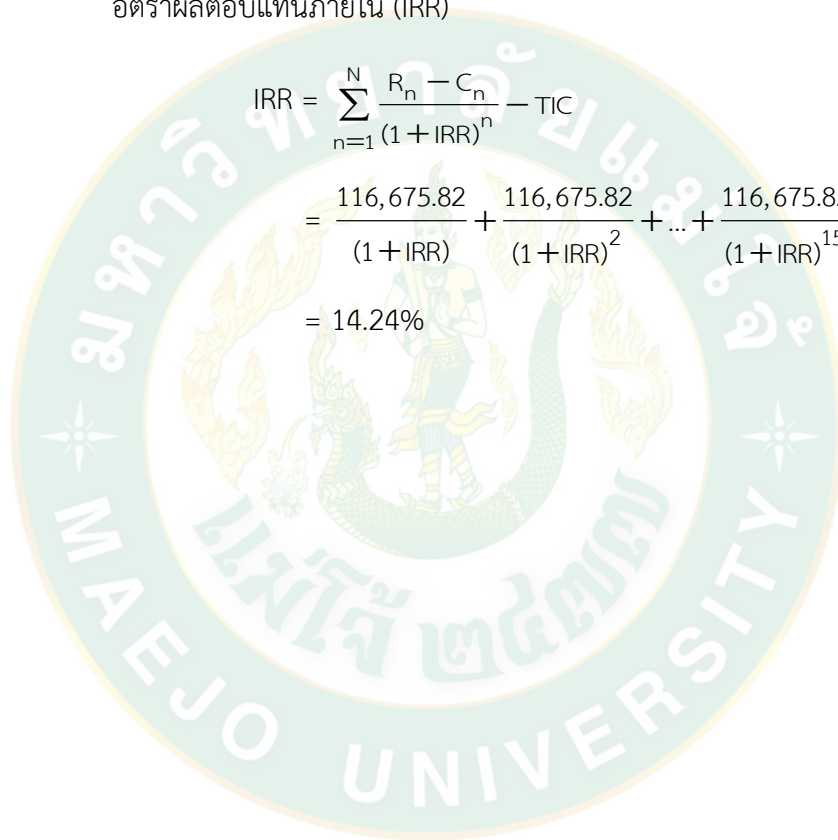
$$= 6.07 \quad \text{Year}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) กำหนด $i = 6.35\%$

$$\begin{aligned} \text{NPV} &= \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - \text{TIC} \\ &= \frac{116,675.82}{(1+0.622)} + \frac{116,675.82}{(1+0.622)^2} + \dots + \frac{116,675.82}{(1+0.622)^{15}} - 708,060 \\ &= 409,011.73 \text{ Baht} \end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

$$\begin{aligned} \text{IRR} &= \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+\text{IRR})^n} - \text{TIC} \\ &= \frac{116,675.82}{(1+\text{IRR})} + \frac{116,675.82}{(1+\text{IRR})^2} + \dots + \frac{116,675.82}{(1+\text{IRR})^{15}} - 708,060 \\ &= 14.24\% \end{aligned}$$





ตารางที่ ข.1 การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ

$T_{f,i \text{ set}}$	\dot{m}_f	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$(T_{f,i} - T_a)/I_T$	η_{Th}
35	0.034	846.54	33.7	34.4	37.7	0.00083	0.33
	0.034	848.67	33.8	34.3	37.5	0.00059	0.32
	0.034	851.35	33.9	34.3	37.3	0.00047	0.30
	0.034	855.51	34.0	34.3	37.2	0.00035	0.28
average	0.034	850.52	33.9	34.3	37.4	0.00056	0.31
40	0.034	839.75	33.5	39.2	42.1	0.00679	0.29
	0.034	822.80	33.6	39.3	42.2	0.00693	0.30
	0.034	823.58	33.8	38.9	41.8	0.00619	0.29
	0.034	807.09	33.9	39.4	42.2	0.00681	0.29
average	0.034	817.82	33.8	39.2	42.1	0.00668	0.29
45	0.034	830.65	33.6	44.4	46.8	0.01300	0.24
	0.034	825.29	33.8	44.7	47.3	0.01321	0.26
	0.034	835.36	33.9	46.7	49.0	0.01532	0.23
	0.034	836.57	33.9	46.5	48.9	0.01506	0.24
average	0.034	831.97	33.8	45.6	48.0	0.01415	0.24
50	0.034	810.23	31.1	50.1	51.5	0.02345	0.14
	0.034	808.94	31.2	50.1	51.5	0.02336	0.14
	0.034	808.57	31.2	50.0	51.5	0.02325	0.16
	0.034	796.75	31.5	50.1	51.4	0.02334	0.14
average	0.034	806.12	31.3	50.1	51.5	0.02335	0.15

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

$T_{f,i \text{ set}}$	\dot{m}_f	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$(T_{f,i} - T_a)/I_T$	η_{Th}
55	0.034	831.58	32.5	54.2	55.5	0.02610	0.13
	0.034	837.21	32.6	54.3	55.6	0.02592	0.13
	0.034	832.69	32.1	54.1	55.4	0.02642	0.13
	0.034	834.53	32.2	54.0	55.3	0.02612	0.13
average	0.034	834.00	32.4	54.2	55.5	0.02614	0.13
60	0.034	838.04	33.4	59.6	60.7	0.03126	0.11
	0.034	836.57	33.2	59.6	60.7	0.03156	0.11
	0.034	833.05	33.3	59.5	60.6	0.03145	0.11
	0.034	830.65	33.3	59.5	60.6	0.03154	0.11
average	0.034	834.58	33.3	59.6	60.7	0.03145	0.11
65	0.034	840.17	31.8	64.5	64.9	0.03892	0.04
	0.034	842.76	32.2	64.1	64.6	0.03785	0.05
	0.034	851.35	32.3	64.0	64.4	0.03724	0.04
	0.034	841.92	32.7	64.0	64.5	0.03718	0.05
average	0.034	844.05	32.3	64.2	64.6	0.03780	0.04

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ (วันที่ 16 พ.ย. 2562)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	T_s	T_p	$P_{PV/T}$
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W
9:00	438	23.8	25.8	28.0	25.3	29.3	134.8
9:10	461	24.4	27.5	29.2	26.4	32.8	139.7
9:20	493	26.3	26.0	29.7	28.7	34.7	151.0
9:30	539	26.5	26.7	29.1	25.6	36.7	165.7
9:40	570	27.5	26.2	30.1	27.4	38.4	175.3
9:50	599	28.3	28.5	30.9	27.2	41.4	183.2
10:00	624	28.5	28.2	31.8	28.4	42.7	190.5
10:10	649	28.8	29.2	32.9	30.9	43.8	197.1
10:20	676	29.1	30.6	32.9	30.8	44.9	204.8
10:30	694	29.3	31.2	33.9	31.4	45.2	209.6
10:40	718	29.1	31.2	34.0	31.3	46.8	215.9
10:50	733	29.8	31.8	34.8	33.0	46.4	219.5
11:00	754	30.7	32.9	35.7	33.4	49.0	224.0
11:10	774	30.4	33.2	36.2	31.8	48.7	229.9
11:20	788	30.6	33.4	37.8	36.1	49.1	232.9
11:30	802	30.5	33.4	38.2	34.4	49.8	236.3
11:40	816	30.7	35.4	38.4	35.0	49.1	240.2
11:50	824	31.2	34.5	39.4	35.6	51.6	241.6
12:00	824	31.5	35.7	40.1	38.5	52.5	241.1
12:10	831	31.8	37.3	41.1	39.0	53.5	243.1
12:20	835	32.6	38.4	41.7	37.2	54.0	243.5
12:30	837	32.8	38.1	42.0	38.8	54.6	243.7
12:40	825	32.7	39.4	43.0	39.4	54.8	241.8
12:50	829	33.3	39.3	44.1	41.5	54.7	242.7
13:00	826	33.5	40.5	43.7	40.3	55.6	241.7
13:10	809	33.7	41.4	44.8	41.2	54.8	237.1

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	T_s	T_p	$P_{PV/T}$
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W
13:20	796	33.9	42.2	45.4	43.6	54.8	232.9
13:30	788	34.0	42.4	46.0	42.2	53.2	232.2
13:40	775	34.3	43.6	46.7	43.5	55.5	228.6
13:50	757	34.3	43.8	47.1	44.2	55.2	224.7
14:00	738	34.5	44.2	47.6	45.2	55.3	219.1
14:10	715	34.3	44.8	47.8	45.2	54.7	215.2
14:20	691	34.6	45.4	48.3	45.9	53.7	209.5
14:30	670	34.5	45.9	48.5	46.5	53.1	200.8
14:40	641	35.0	46.4	49.0	47.1	54.8	196.7
14:50	622	35.4	47.0	49.4	47.2	53.1	192.5
15:00	585	34.8	47.4	49.6	47.5	53.0	183.1
15:10	546	35.0	47.9	49.8	48.1	52.9	172.9
15:20	507	34.4	48.2	49.8	48.7	51.1	161.9
15:30	477	34.2	48.5	50.0	49.0	51.0	154.1
15:40	437	34.4	48.9	49.9	49.2	50.9	142.3
15:50	403	34.4	49.4	50.4	49.3	48.8	134.9
16:00	365	34.5	49.3	50.2	49.3	48.9	124.3

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T แบบไม่มีกระจกครอบ

$T_{f,i \text{ set}}$	\dot{m}_f	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$(T_{f,i} - T_a)/I_T$	η_{Th}
35	0.033	836.50	31.3	34.5	36.6	0.00383	0.21
	0.033	836.97	31.3	34.5	36.6	0.00382	0.21
	0.033	841.54	31.3	34.5	36.6	0.00380	0.21
	0.033	846.57	31.9	34.5	36.6	0.00307	0.21
average	0.033	840.39	31.5	34.5	36.6	0.00363	0.21
40	0.033	857.173	33.5	39.4	41.3	0.00688	0.19
	0.033	855.93	33.5	39.5	41.4	0.00701	0.19
	0.033	853.92	33.5	39.5	41.4	0.00703	0.19
	0.033	851.99	33.5	39.5	41.4	0.00704	0.19
average	0.033	853.95	33.5	39.5	41.4	0.00699	0.19
45	0.033	796.64	32.1	44.2	45.3	0.01519	0.12
	0.033	795.63	32.1	44.2	45.3	0.01521	0.12
	0.033	795.79	32.1	44.2	45.3	0.01521	0.12
	0.033	795.32	32.1	44.2	45.2	0.01521	0.11
average	0.033	795.85	32.1	44.2	45.3	0.01520	0.11
50	0.033	828.61	33.9	49.1	50.1	0.01834	0.10
	0.033	823.58	34.0	49.3	50.3	0.01858	0.10
	0.033	818.00	33.7	49.3	50.3	0.01907	0.10
	0.033	811.97	33.9	49.3	50.3	0.01897	0.10
average	0.033	820.54	33.9	49.3	50.3	0.01874	0.10

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

$T_{f,i \text{ set}}$	\dot{m}_f	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$(T_{f,i} - T_a)/I_T$	η_{Th}
55	0.033	797.65	31.4	54.1	54.6	0.02846	0.05
	0.033	799.74	31.3	54.1	54.6	0.02851	0.05
	0.033	800.59	31.3	54.1	54.6	0.02848	0.05
	0.033	807.40	31.3	53.9	54.4	0.02799	0.05
average	0.033	801.34	31.3	54.1	54.6	0.02836	0.05
60	0.033	827.14	31.3	60.1	60.2	0.03482	0.01
	0.033	831.09	31.3	60.1	60.2	0.03465	0.01
	0.033	827.68	31.5	60.1	60.2	0.03455	0.01
	0.033	825.20	31.4	60.3	60.4	0.03502	0.01
average	0.033	827.78	31.4	60.2	60.3	0.03476	0.01
65	0.033	794.86	32.4	64.5	64.5	0.04038	0.00
	0.033	799.27	32.4	64.4	64.4	0.04004	0.00
	0.033	801.98	32.5	64.3	64.4	0.03965	0.01
	0.033	800.20	32.4	64.2	64.2	0.03974	0.00
average	0.033	799.08	32.4	64.4	64.4	0.03995	0.00

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบไม่มีกระจกครอบ (วันที่ 25 พ.ย 2562)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	T_s	T_p	$P_{PV/T}$
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	W
9:00	426.86	23.9	25	26.6	24.2	29	101.9
9:10	457.90	24.5	25.3	27.5	25.5	30.8	111.8
9:20	493.20	25	25.9	27.3	26	31.8	120
9:30	527.03	25.3	26.9	28	26.7	31.9	129
9:40	551.88	26	26.2	28.6	25.6	32.9	133.6
9:50	586.48	26.4	27.6	28.9	25.9	35.1	143.9
10:00	615.74	27.1	26.4	29.1	27.1	35.2	149.8
10:10	643.61	27.7	27.4	30.2	27.9	36.9	155.9
10:20	665.98	28.2	28	30.4	27.2	38.2	161.7
10:30	689.66	29.1	28.8	30.7	28.1	39.8	166.4
10:40	711.18	29.3	29.4	31.4	29.3	40.7	171.6
10:50	725.97	29.3	28.9	31.9	30.6	41.1	174.9
11:00	746.33	29.9	30.2	32.6	30	42.7	179
11:10	762.66	30.1	30.1	33.5	30.9	41.8	183.1
11:20	773.96	30.6	30.4	33.9	30.5	44	185.8
11:30	788.43	30.5	31.6	34.1	32	44	188.7
11:40	792.23	31.5	31.4	35.2	32.1	45.5	189.3
11:50	796.95	31.6	32.3	35.5	32	44.8	190.9
12:00	795.79	31.8	32.4	36.4	33	46.2	192.2
12:10	802.37	32.3	33.8	36.8	33.6	45.5	194
12:20	798.73	33.2	33.6	36.7	35.4	46.7	193.7
12:30	804.92	32.9	35.5	38.1	35.6	47.5	193.1
12:40	791.92	33.7	35.7	38.6	36.6	46.9	192
12:50	788.82	33.4	35.3	39.2	35.6	46.9	192.5
13:00	788.43	33.4	36.2	39	36.8	48.2	191.7
13:10	773.42	33.3	36.6	40	37	46.3	190.7

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	T_s	T_p	$P_{PV/T}$
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W
13:20	760.03	33.2	37.6	40.3	37.7	46.8	188
13:30	761.34	33.4	37.6	40.5	38.9	46.6	186.6
13:40	733.09	33.5	38.6	41.1	38.8	47.7	182.2
13:50	723.64	33.9	38.8	41.6	38.8	47.8	179.4
14:00	703.75	34.1	39.3	42.2	39.7	48.4	174.9
14:10	679.75	34	39.4	42.3	39.5	48.6	165.1
14:20	671.24	33.7	40	42.7	40.2	47.1	166.7
14:30	641.98	33.5	40.7	43.1	41.3	46.3	165
14:40	611.09	33.8	41.1	43.1	41.3	46.7	157.6
14:50	576.18	33.5	41.2	43.3	41.2	46.4	147.5
15:00	548.39	33.8	41.6	43.5	42.2	46.8	143.6
15:10	509.07	34.3	42	43.8	41.9	45.9	134.5
15:20	476.41	33.2	42.3	44	42.7	45.3	128.6
15:30	450.86	33.5	42.8	44.4	42.6	44.5	122.6
15:40	400.78	33.8	43.4	44.6	41.5	44.1	111.3
15:50	369.04	33.4	43.5	44.7	41.9	43.6	104.9
16:00	324.61	32.8	44	44.8	41.3	42.6	96.16

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (วันที่ 28 พ.ย 2562)

Time	I_T	T_a	T_{PV}	P_{PV}	Time	I_T	T_a	T_{PV}	P_{PV}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W		W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W
9:00	459	12.5	20.50	172	12:20	878	21.9	47.40	218
9:10	522	13.7	22.70	192	12:30	880	22.3	48.30	217
9:20	558	13.1	24.00	201	12:40	877	22.2	48.50	217
9:30	582	13.2	26.50	210	12:50	862	22.7	47.10	217
9:40	623	14.5	29.50	217	13:00	859	23.0	46.00	217
9:50	654	15.8	31.60	216	13:10	832	23.3	47.10	218
10:00	704	15.0	32.80	219	13:20	819	23.4	47.50	220
10:10	719	16.1	34.80	219	13:30	807	24.5	47.90	219
10:20	753	16.6	36.40	220	13:40	794	24.6	46.30	218
10:30	773	16.9	37.90	216	13:50	778	24.0	45.60	217
10:40	811	17.3	38.70	217	14:00	759	24.5	44.70	217
10:50	821	18.1	40.80	220	14:10	743	23.9	44.20	217
11:00	834	18.6	42.40	219	14:20	712	24.6	43.60	223
11:10	851	18.5	42.10	217	14:30	679	25.5	44.50	221
11:20	858	20.1	44.70	219	14:40	643	24.6	42.50	218
11:30	867	20.6	44.40	219	14:50	602	25.0	41.90	207
11:40	872	20.6	45.60	218	15:00	570	24.3	38.80	198
11:50	884	20.8	45.10	217	15:10	533	24.9	38.50	192
12:00	879	21.5	46.90	219	15:20	494	24.3	37.40	164
12:10	889	21.0	46.40	219	15:30	452	24.6	36.80	146

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน (วันที่ 30 พ.ย 2562)

Time	I_T	T_a	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W
9:00	447	13.2	26.0	30.9	30.0	3,178
9:10	491	13.6	26.5	31.9	30.6	3,206
9:20	524	14.0	26.8	32.4	31.1	3,227
9:30	563	14.0	27.5	32.8	31.9	3,269
9:40	597	15.7	28.0	34.3	32.6	3,311
9:50	635	15.4	28.5	34.4	33.3	3,339
10:00	665	16.5	28.9	34.9	34.1	3,372
10:10	689	18.0	29.7	35.6	34.8	3,407
10:20	709	17.2	30.5	36.2	35.6	3,470
10:30	732	18.1	31.6	37.3	36.6	3,538
10:40	750	17.8	32.5	38.3	37.6	3,577
10:50	779	19.7	33.2	39.2	38.3	3,636
11:00	790	20.4	33.9	40.0	39.1	3,683
11:10	804	20.2	34.7	40.7	39.9	3,736
11:20	818	19.8	35.6	41.4	40.8	3,790
11:30	841	20.3	36.5	42.5	41.7	3,850
11:40	851	21.8	37.4	43.6	42.6	3,934
11:50	853	21.8	38.2	44.7	43.5	4,027
12:00	856	21.9	39.0	45.5	44.4	4,107
12:10	859	22.1	39.8	46.5	45.3	4,139
12:20	857	22.4	40.6	47.1	46.1	4,207
12:30	856	22.6	41.7	47.9	47.2	4,272
12:40	849	22.9	42.6	49.1	48.1	4,341
12:50	841	23.6	43.5	49.8	49.0	4,403
13:00	834	23.7	44.3	50.8	49.9	4,432
13:10	819	24.2	45.2	51.7	50.8	4,525
13:20	806	24.6	46.2	52.5	51.8	4,604
13:30	792	24.3	46.9	53.3	52.6	4,669
13:40	762	24.9	47.9	54.5	53.5	4,736
13:50	743	24.6	48.9	55.1	54.6	4,799

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W
14:00	709	25.4	49.8	55.8	55.4	4,869
14:10	690	26.1	50.6	56.7	56.2	4,929
14:20	658	24.9	51.6	57.6	57.2	5,001
14:30	631	25.2	52.6	58.4	58.1	5,060
14:40	592	25.9	53.4	59.3	58.9	5,123
14:50	563	26.3	54.3	60.2	59.8	5,156
15:00	528	26.2	55.1	60.5	60.6	5,227
15:10	502	24.9	56.0	61.2	61.4	5,265
15:20	452	25.8	56.8	61.5	62.2	5,327
15:30	414	26.1	57.8	62.3	63.1	5,384
15:40	380	25.3	58.6	63.1	63.8	5,446
15:50	340	25.3	59.2	63.8	64.5	5,498
16:00	302	25.9	60.0	64.4	65.3	5,536

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T 6.8 LPM) วันที่ 02 ธันวาคม.2563

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{Comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
9:00	557	20.6	22.6	23.4	28.7	34.8	30.3	2,946	153	150	2,475	2,430	3,526
9:05	578	20.8	22.5	23	28.8	35	30.45	2,978	157	154	2,511	2,471	3,558
9:10	597	21.0	22.5	23	29.1	35.3	31.25	3,050	167	164	2,569	2,522	3,630
9:15	610	21.4	22.5	23	29.4	35.5	31.55	3,093	167	163	2,657	2,608	3,673
9:20	626	22.1	22.6	23.1	29.5	35.7	31.95	3,189	177	174	2,730	2,680	3,770
9:25	646	22.5	23	23.4	29.6	35.9	32.45	3,233	175	171	2,756	2,708	3,813
9:30	655	22.9	23.2	23.8	29.8	36	33	3,296	188	184	2,792	2,738	3,876
9:35	667	22.7	23.4	24.1	29.8	36.1	33.4	3,317	198	193	2,843	2,786	3,897
9:40	681	22.9	24	24.7	30.3	36.5	33.9	3,408	199	195	2,951	2,897	3,988
9:45	703	23.3	24.3	25.2	30.3	36.5	34.3	3,403	199	195	3,023	2,968	3,983
9:50	725	23.2	24.7	25.9	30.5	36.7	34.4	3,437	203	198	3,047	2,994	4,017
9:55	743	23.4	25.1	26.5	30.7	37	34.5	3,473	206	202	3,106	3,048	4,053
10:00	753	23.8	25.8	27.4	31.9	38.1	34.9	3,459	221	217	3,084	3,028	4,039
10:05	773	23.5	26.9	28.8	32.8	39	35.2	3,497	207	204	3,119	3,058	4,077
10:10	785	23.8	27.8	29.8	33.1	39.4	35.75	3,582	191	187	3,082	3,022	4,162
10:15	805	23.9	28.5	30.8	33.4	39.9	36.25	3,631	223	217	3,089	3,028	4,212
10:20	816	24.2	29.2	31.8	33.9	40	36.65	3,667	456	447	3,090	3,034	4,247
10:25	825	24.8	29.8	32.7	34.2	40.5	37.1	3,693	650	639	3,091	3,032	4,273
10:30	831	24.5	30.4	33.4	34.3	40.8	37.65	3,729	829	814	3,096	3,035	4,309
10:35	855	24.8	30.5	34	34.5	40.9	38.05	3,739	857	836	3,100	3,039	4,319
10:40	856	25.0	30.7	34.1	34.7	41.1	38.45	3,754	864	843	3,118	3,057	4,334
10:45	879	25.1	31.2	34.5	34.7	41.2	38.95	3,767	885	870	3,034	2,974	4,347
10:50	885	25.5	31.3	34.5	35	41.5	39.35	3,821	869	855	3,010	2,951	4,401
10:55	898	25.8	31.3	34.8	35	41.5	39.35	3,863	872	856	3,113	3,053	4,443
11:00	905	25.8	31.9	35.4	35.6	42	39.75	3,896	881	863	3,111	3,050	4,476
11:05	921	26.2	32.2	35.5	36.3	42.6	40.05	3,931	908	888	3,018	2,962	4,511
11:10	929	26.6	32.7	35.8	37.9	44.1	40.6	3,939	909	890	3,119	3,061	4,519
11:15	939	26.3	33.2	36.3	38.3	44.6	40.9	3,987	920	902	3,021	2,962	4,567
11:20	947	26.0	33.7	36.8	38.5	44.8	41.4	4,033	917	899	3,124	3,065	4,613

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{Comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
11:25	959	26.6	33.9	37.2	38.6	44.8	41.9	4,105	929	910	3,119	3,062	4,685
11:30	962	27.1	34	37.6	38.7	45.1	42.45	4,144	927	911	3,114	3,056	4,724
11:35	962	27.1	34.2	37.7	38.9	45.4	42.95	4,193	919	902	3,111	3,056	4,773
11:40	968	27.4	34.5	37.8	39	45.5	43.3	4,223	886	873	3,115	3,059	4,803
11:45	969	27.6	34.8	38	39.2	45.6	43.8	4,263	906	886	3,102	3,043	4,843
11:50	971	28.1	35	38.3	39.1	45.8	44	4,269	908	890	3,093	3,036	4,849
11:55	977	28.3	35.2	38.5	39.5	46	44.5	4,280	936	922	3,097	3,036	4,860
12:00	970	28.3	35.3	38.6	39.8	46.3	44.6	4,296	930	910	3,096	3,040	4,876
12:05	972	28.9	35.8	39.1	40.3	46.8	44.9	4,315	906	887	3,080	3,019	4,895
12:10	967	28.9	36.3	39.4	41.7	48	45.4	4,361	913	891	3,126	3,069	4,941
12:15	975	28.9	36.7	39.8	42.5	49.1	45.8	4,379	912	893	3,076	3,016	4,959
12:20	973	28.9	37.2	40.1	42.8	49.5	46	4,396	927	905	3,072	3,015	4,976
12:25	978	28.6	37.3	40.8	43.2	49.6	46.55	4,439	911	891	3,082	3,027	5,019
12:30	976	28.2	37.6	40.9	43.6	49.9	47.3	4,461	921	900	3,083	3,026	5,041
12:35	978	28.4	37.6	40.8	43.5	50	47.75	4,459	913	897	3,086	3,025	5,039
12:40	972	28.7	38	41.1	43.6	50.2	48.1	4,487	909	896	3,082	3,022	5,067
12:45	979	28.5	38.1	41.2	44	50.3	48.7	4,528	911	896	3,084	3,024	5,108
12:50	974	28.5	38	41.2	43.8	50.5	48.8	4,520	904	886	3,075	3,019	5,100
12:55	968	29.1	38.2	41.4	44.3	50.7	49.3	4,542	907	893	3,118	3,064	5,122
13:00	964	29.5	38.4	41.4	44.6	51.1	49.6	4,573	914	900	3,119	3,063	5,154
13:05	956	29.5	38.5	41.5	45.2	51.7	49.7	4,617	875	851	3,116	3,058	5,197
13:10	953	29.4	39	42	46.3	52.5	50.1	4,626	883	867	3,113	3,061	5,206
13:15	951	29.4	39.4	42.3	47.1	53.4	50.4	4,620	880	860	3,097	3,043	5,200
13:20	936	29.6	39.4	42.6	47.6	53.9	50.8	4,639	877	864	3,102	3,042	5,219
13:25	934	29.5	40.1	42.8	47.6	54.2	51.25	4,668	870	854	3,104	3,047	5,248
13:30	927	29.4	40.1	43.1	47.9	54.5	52	4,671	874	853	3,095	3,034	5,251
13:35	912	29.5	40.1	43.1	47.9	54.5	52.6	4,712	850	837	3,080	3,022	5,292
13:40	903	29.8	40.3	43.2	48.1	54.7	53	4,763	857	840	3,077	3,019	5,343
13:45	894	30.1	40.2	43.1	48.3	54.8	53.35	4,794	807	788	3,062	3,007	5,374
13:50	888	30.3	40.2	43	48.2	54.9	53.8	4,815	834	814	3,070	3,015	5,395
13:55	866	30.7	40.3	43.1	48.5	55.2	53.9	4,845	814	798	3,068	3,009	5,425
14:00	859	30.5	40.4	43	48.7	55.4	54.1	4,892	804	790	3,111	3,051	5,472
14:05	854	30.1	40.6	42.8	49.5	56	54.25	4,945	797	783	3,095	3,035	5,525

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{Comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
14:10	831	30.0	40.9	43.1	50.8	57.5	54.7	4,939	790	779	3,081	3,019	5,519
14:15	822	30.0	41.3	43.4	51.6	58.2	55.2	4,938	786	771	3,098	3,044	5,518
14:20	811	30.3	41.6	43.7	51.9	58.3	55.55	4,966	761	744	3,001	2,946	5,546
14:25	794	30.6	41.5	43.5	51.8	58.5	56.15	4,967	739	725	2,933	2,879	5,547
14:30	776	30.4	41.6	43.5	52.2	58.6	56.75	5,007	725	714	2,873	2,822	5,587
14:35	750	30.5	41.8	43.7	52.4	58.9	57.25	5,020	713	702	2,752	2,697	5,600
14:40	735	30.1	41.7	43.7	52.4	58.9	57.65	5,026	695	681	2,674	2,620	5,606
14:45	708	29.7	41.4	43.2	52.4	58.8	57.95	5,064	607	596	2,600	2,553	5,644
14:50	691	29.9	41.3	43.1	52.4	58.8	58.1	5,089	206	202	2,545	2,495	5,669
14:55	663	29.7	41.4	43.1	52.6	59.1	58.2	5,109	165	162	2,461	2,420	5,689
15:00	650	29.6	41.4	43	53.2	59.6	58.7	5,125	165	162	2,444	2,400	5,705
15:05	643	29.8	41.4	42.8	54	60.4	58.75	5,169	173	169	2,313	2,269	5,749
15:10	599	30.1	41.7	42.7	55.3	61.8	59.05	5,189	159	156	2,140	2,099	5,769
15:15	596	30.0	41.9	42.6	55.7	62.2	59.65	5,224	159	156	2,106	2,068	5,804
15:20	579	29.9	41.6	42.1	55.8	62.2	60	5,246	146	144	2,001	1,961	5,827
15:25	562	29.3	41.4	41.8	56	62.3	60.7	5,299	195	192	1,618	1,589	5,880
15:30	313	29.5	41.2	41.5	56.1	62.3	61.1	5,282	146	143	1,377	1,353	5,862
15:35	183	29.5	40.8	41.1	56.2	62.3	61.45	5,295	133	131	1,121	1,100	5,875
15:40	131	29.2	40.5	40.6	56.2	62.3	61.75	5,294	126	124	721	707	5,874
15:45	121	29.1	40.3	40.1	56	62.3	61.95	5,280	114	112	570	558	5,860
15:50	107	28.8	39.9	39.6	56.3	62.5	62	5,316	114	113	275	269	5,896
15:55	101	28.2	39.7	39.3	56.3	62.3	62.2	5,321	106	104	294	288	5,901
16:00	98	27.8	39.8	39	57.5	63.5	62.45	5,324	106	104	283	278	5,904
16:05	166	27.5	39.9	39.1	58.8	64.5	62.8	5,379	121	119	334	327	5,959
16:10	93	27.2	40.1	39.2	58.8	64.6	63.05	5,439	106	104	273	266	6,019
16:15	85	27.0	40.1	39.2	58.8	64.6	63.35	5,480	109	107	259	254	6,060
16:20	78	26.9	40.1	39.2	58.8	64.7	63.7	5,487	97	95	257	252	6,067
16:25	84	26.7	40.2	39.4	59.2	64.9	64.1	5,554	97	95	262	255	6,134
16:30	91	26.5	40.3	39.4	59.2	64.9	64.4	5,535	101	100	217	211	6,115
16:35	70	26.3	40.5	39.5	59.7	65.3	64.8	5,596	89	87	223	217	6,176
16:40	44	26.1	40.2	39.3	59.7	65.1	65	5,585	86	84	214	208	6,165

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T 8.2 LPM) วันที่ 30 พฤศจิกายน 2563

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
9:00	536	20.4	22.3	23.4	28.4	35.1	30	3,079	149	146	2,262	2,221	3,661
9:05	567	20.6	22.6	23.2	28.5	35.2	30.45	3,078	162	159	2,515	2,472	3,660
9:10	603	20.9	22.3	22.8	28.6	35.3	30.75	3,089	169	166	2,612	2,565	3,671
9:15	625	21.8	22.5	23.1	28.7	35.6	31.55	3,092	169	166	2,657	2,609	3,674
9:20	640	22.4	22.5	23.3	28.7	35.7	32	3,093	168	165	2,748	2,701	3,675
9:25	660	22.5	22.8	23.5	28.8	35.7	32.65	3,131	169	166	2,791	2,738	3,713
9:30	675	22.6	23	23.9	29	35.9	33.2	3,164	167	164	2,809	2,754	3,746
9:35	701	23	23.3	24.5	28.9	36	33.4	3,194	170	167	3,006	2,952	3,776
9:40	722	22.8	23.9	25.2	29.2	36.1	33.8	3,202	162	159	3,080	3,019	3,784
9:45	736	22.9	24.7	25.9	29.4	36.4	34.2	3,226	177	173	3,110	3,053	3,808
9:50	754	23.1	25.1	26.7	29.7	36.8	34.25	3,242	189	186	3,105	3,044	3,824
9:55	766	23.5	25.6	27.5	30.6	37.5	34.6	3,261	191	187	3,108	3,053	3,843
10:00	777	24	26.5	28.6	31.3	38.3	34.85	3,276	193	191	3,087	3,033	3,858
10:05	791	24.1	27.2	29.8	32.6	39.3	35.4	3,323	193	191	3,073	3,016	3,905
10:10	809	24.2	28	30.6	32.9	39.5	35.75	3,356	207	204	3,105	3,044	3,938
10:15	830	24.4	28.5	31.5	33.2	39.9	36.35	3,392	203	201	3,116	3,057	3,974
10:20	842	25.1	29	32.6	33.4	40.1	36.8	3,430	363	357	3,119	3,059	4,012
10:25	863	25.2	29.6	33.4	33.7	40.5	37.55	3,485	638	627	3,123	3,064	4,067
10:30	875	25.4	30.6	33.7	33.7	40.5	37.95	3,553	870	854	3,113	3,058	4,135
10:35	884	25.6	31.3	33.8	33.9	40.7	38.35	3,560	899	886	3,026	2,971	4,142
10:40	895	25.7	32	33.9	33.9	40.9	38.8	3,599	906	890	3,126	3,066	4,181
10:45	911	26.5	31.9	34.2	34.2	41.1	39.15	3,608	905	893	3,030	2,974	4,190
10:50	908	26.1	32.5	34.4	34.7	41.5	39.25	3,642	919	902	3,009	2,955	4,224
10:55	931	26.2	32.6	34.6	35.2	42.1	39.65	3,645	927	911	3,025	2,970	4,227
11:00	933	26.6	33.2	35.1	36.7	43.2	40	3,680	931	914	3,120	3,064	4,262
11:05	932	26.8	33.7	35.7	37.5	44.1	40.25	3,667	949	931	3,020	2,964	4,250
11:10	942	26.8	34.1	36.2	37.9	44.6	40.95	3,691	941	927	3,133	3,070	4,273
11:15	950	27.2	34.5	36.5	38.1	44.9	41.3	3,738	938	922	3,123	3,067	4,320
11:20	956	27.4	34.7	36.9	38.2	45	41.95	3,771	939	922	3,120	3,059	4,353
11:25	963	27.1	34.9	37.2	38.5	45.2	42.4	3,800	942	927	3,027	2,969	4,382
11:30	982	27.2	35.5	37.3	38.6	45.4	42.85	3,833	945	929	3,032	2,972	4,415

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_{fj}	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W	W	W	W	W	W
11:35	991	27.5	35.3	37.6	38.6	45.6	43.4	3,867	948	928	3,026	2,971	4,449
11:40	987	28.1	35.7	38	39	45.9	43.85	3,936	928	906	3,118	3,057	4,518
11:45	985	28.1	36.2	38.1	39.1	46	44.2	3,966	919	906	3,107	3,051	4,548
11:50	989	28.3	36.1	38.5	39.3	46.3	44.4	4,055	925	911	3,020	2,961	4,638
11:55	986	27.9	36.3	38.6	39.8	46.7	44.8	4,090	938	918	3,107	3,050	4,673
12:00	996	28.3	36.6	39	40.4	47.4	45.05	4,122	920	905	3,111	3,056	4,704
12:05	997	28.2	37.2	39.4	41.2	48.2	45.25	4,184	945	927	3,013	2,959	4,766
12:10	998	28.8	37.3	40.1	42.6	49.4	45.65	4,204	929	914	3,091	3,035	4,786
12:15	986	28.6	38	40.4	42.9	49.8	46.2	4,244	923	907	3,095	3,033	4,826
12:20	983	28.9	38.1	40.7	43.2	50.1	46.75	4,260	943	920	3,081	3,027	4,843
12:25	997	29	38.1	40.9	43.5	50.4	47.55	4,292	958	935	3,093	3,033	4,874
12:30	989	29.3	38.5	41.2	43.5	50.5	48.1	4,314	930	913	3,084	3,025	4,896
12:35	978	29.1	38.6	41.2	43.8	50.7	48.65	4,307	916	901	3,094	3,038	4,889
12:40	983	28.9	38.4	41.2	43.8	50.8	49.05	4,363	920	902	3,107	3,046	4,945
12:45	979	28.8	38.7	41.5	43.9	50.8	49.4	4,370	915	896	3,101	3,041	4,952
12:50	972	29.2	38.6	41.3	44	51	49.75	4,401	908	897	3,083	3,027	4,983
12:55	979	29	38.8	41.5	44.3	51.3	49.85	4,425	902	889	3,105	3,045	5,007
13:00	969	28.8	39.3	41.7	44.8	51.9	50.15	4,453	907	886	3,089	3,031	5,035
13:05	966	28.7	39.5	41.8	45.3	52.4	50.45	4,448	892	877	3,089	3,027	5,030
13:10	953	28.8	39.6	42.1	46.5	53.5	50.65	4,503	878	864	3,082	3,025	5,085
13:15	948	29	39.8	42.6	47.4	54.3	51.1	4,596	894	871	3,071	3,015	5,178
13:20	945	28.8	40.4	42.9	47.9	54.9	51.45	4,624	894	874	3,090	3,029	5,206
13:25	937	29	40.5	42.9	48.1	55.1	52.05	4,707	886	866	3,075	3,017	5,289
13:30	927	29.4	40.6	43.2	48.3	55.3	52.85	4,772	870	856	3,108	3,048	5,354
13:35	919	29.6	40.8	43.5	48.5	55.5	53.35	4,766	861	847	3,089	3,027	5,348
13:40	903	29.3	40.9	43.3	48.3	55.4	53.85	4,811	860	844	3,099	3,037	5,393
13:45	892	29.5	40.4	43.1	48.7	55.8	54.35	4,850	845	833	3,081	3,022	5,432
13:50	883	29.7	40.6	43.2	48.8	55.7	54.65	4,842	843	833	3,097	3,038	5,424
13:55	877	29.3	40.6	43.3	48.9	56	54.95	4,889	826	814	3,083	3,022	5,471
14:00	866	28.9	40.8	43.2	49.2	56.2	55.25	4,911	823	807	3,079	3,020	5,493

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_S	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
14:05	854	28.9	40.9	43.1	49.6	56.5	55.55	4,909	814	802	3,057	3,000	5,491
14:10	844	29	40.8	43.1	50.2	57.2	55.75	4,956	799	786	3,017	2,962	5,539
14:15	830	28.8	41	43.2	51.1	58	55.9	4,989	786	772	3,072	3,010	5,571
14:20	813	28.8	41.5	43.6	52.1	59	56.15	5,012	774	755	3,005	2,949	5,594
14:25	799	28.9	41.5	43.8	52.7	59.5	56.7	5,057	746	732	2,997	2,942	5,639
14:30	783	29.3	41.4	44.1	52.9	59.7	57.05	5,059	736	722	2,976	2,917	5,641
14:35	767	29.5	41.2	44	53.3	60	57.85	5,055	713	700	2,935	2,880	5,637
14:40	741	29.1	41.6	44	53	59.9	58.45	5,114	695	681	2,812	2,756	5,696
14:45	735	29.2	41.6	43.6	53.3	60	58.9	5,115	702	689	2,783	2,733	5,697
14:50	722	29.2	41.3	43.4	53.3	60.1	59.25	5,131	689	677	2,753	2,697	5,713
14:55	701	29	41.4	43.3	53.4	60.1	59.5	5,155	200	197	2,616	2,567	5,737
15:00	689	28.9	41	42.8	53.7	60.2	59.8	5,157	227	223	2,621	2,570	5,739
15:05	667	29.1	40.8	42.3	53.6	60.4	59.9	5,158	140	138	2,520	2,470	5,740
15:10	653	28.9	40.5	41.9	54.2	60.9	60.15	5,187	140	138	2,468	2,422	5,769
15:15	623	29.1	40.3	41.7	54.9	61.4	60.35	5,188	58	57	2,306	2,261	5,770
15:20	604	28.7	40.4	41.5	56	62.4	60.65	5,191	129	126	2,110	2,066	5,773
15:25	589	28.6	40.4	41.2	56.5	62.9	61	5,217	140	138	1,918	1,884	5,799
15:30	534	28.6	40.4	40.8	56.6	63.1	61.35	5,246	121	119	1,676	1,645	5,828
15:35	132	28.3	40	40.5	56.9	63.2	61.75	5,244	111	109	1,421	1,392	5,826
15:40	107	28.4	39.8	40	57	63.3	62.3	5,278	84	82	1,245	1,220	5,860
15:45	121	28	39.2	39.6	57.1	63.2	62.8	5,289	116	113	956	937	5,872
15:50	96	27.6	38.5	39.3	57.1	63.5	63.05	5,301	103	101	537	526	5,883
15:55	90	27.2	38.2	39	57.2	63.3	63.2	5,327	103	101	226	221	5,910
16:00	85	26.8	38.1	38.8	57.2	63.3	63.4	5,336	94	92	261	256	5,918
16:05	165	26.5	38	38.8	57.4	63.5	63.6	5,338	98	96	259	254	5,920
16:10	74	26.3	37.8	38.7	57.7	63.7	63.8	5,345	98	96	261	255	5,927
16:15	70	26.1	38	38.8	59.1	64.8	64.2	5,363	94	92	265	260	5,945
16:20	67	25.9	38.3	39.2	59.9	65.6	64.5	5,403	90	88	216	210	5,985
16:25	65	25.7	38.6	39.3	60	65.8	64.8	5,432	85	83	223	219	6,014
16:30	83	25.7	38.5	39.4	60.1	65.8	65	5,476	83	81	231	226	6,058

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T 9.5 LPM) วันที่ 01 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
9:00	582	21.1	22.5	23.3	28.7	34.6	30.05	3,015	141	138	2,493	2,444	3,599
9:05	603	21.3	22.5	23	29.2	35.2	30.7	3,018	141	138	2,564	2,518	3,602
9:10	624	21.7	22.3	22.7	29.2	35.3	31	3,021	141	138	2,677	2,630	3,605
9:15	636	22.3	22.4	22.8	29.5	35.7	31.35	3,022	135	132	2,698	2,644	3,607
9:20	667	22.5	22.5	23.1	29.8	36	31.8	3,018	155	152	2,778	2,724	3,602
9:25	685	22.7	22.9	23.6	30.1	36.2	32.25	3,032	144	142	2,896	2,841	3,616
9:30	704	22.5	23.2	24.1	30.6	36.7	32.6	3,036	141	138	3,014	2,961	3,620
9:35	726	22.8	23.4	24.6	31	36.9	33.05	3,049	177	174	3,049	2,989	3,634
9:40	734	22.7	24.2	25.3	31.5	37.6	33.2	3,095	141	139	3,071	3,017	3,680
9:45	757	22.9	25	26.1	31.7	37.8	33.75	3,098	127	125	3,118	3,061	3,682
9:50	774	23.2	25.6	27	31.9	38	34.2	3,115	144	142	3,102	3,041	3,699
9:55	791	23.5	26.1	27.8	32.4	38.3	34.4	3,122	122	120	3,024	2,969	3,706
10:00	807	23.7	26.7	28.5	32.6	38.8	34.9	3,144	138	135	3,018	2,962	3,728
10:05	818	24.2	27.3	29.5	32.9	39.3	35.3	3,186	158	155	3,028	2,973	3,770
10:10	832	24.1	27.9	30.5	33.3	39.6	35.45	3,242	178	175	3,034	2,975	3,827
10:15	849	24.1	28.5	31.3	33.7	40.1	36.1	3,293	210	206	3,022	2,968	3,877
10:20	863	23.94	29	32.1	33.7	40.1	36.65	3,353	716	699	3,033	2,980	3,937
10:25	879	24.5	29.5	32.5	34	40.4	37.15	3,426	822	807	3,071	3,012	4,010
10:30	886	25	30.1	32.8	34.2	40.5	37.55	3,442	884	867	2,995	2,935	4,026
10:35	898	25	31.1	32.9	34.2	40.6	38.15	3,450	899	881	2,977	2,923	4,034
10:40	909	24.9	31.6	33.4	34.4	40.9	38.45	3,450	904	888	3,071	3,015	4,034
10:45	916	25	32	33.4	34.5	41.1	38.85	3,482	907	889	3,072	3,012	4,067
10:50	932	24.8	32.3	33.7	34.7	41.4	39.2	3,505	932	911	3,001	2,943	4,089
10:55	939	25.3	32.6	34.1	35	41.6	39.25	3,530	935	917	2,989	2,931	4,114
11:00	947	25.4	33.1	34.4	35.5	42	39.65	3,552	936	916	2,998	2,944	4,136
11:05	957	25.7	33.4	34.9	36.8	43.4	40.1	3,571	951	934	3,035	2,980	4,155
11:10	964	26.1	33.7	35.4	37.5	44	40.4	3,618	966	947	3,126	3,079	4,202
11:15	970	26.7	34.2	36	38.1	44.7	40.85	3,674	962	947	3,024	2,964	4,258
11:20	972	26.4	34.6	36.2	38.1	44.7	41.6	3,727	958	943	3,130	3,087	4,311

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
11:25	980	26.7	34.4	36.5	38.5	45	42	3,793	958	943	3,032	2,974	4,378
11:30	990	26.9	35.2	37	38.6	45.3	42.55	3,822	961	943	3,018	2,982	4,406
11:35	983	27	35.4	37.2	38.8	45.5	43.1	3,884	940	925	3,129	3,079	4,468
11:40	1002	27.8	35.5	37.4	38.9	45.6	43.25	3,892	927	909	3,120	3,060	4,476
11:45	995	27.9	35.7	37.7	39	45.8	43.95	3,913	933	911	3,131	3,069	4,498
11:50	1004	27.7	36	38	39.2	46	44.25	3,926	930	913	3,023	2,964	4,510
11:55	1000	27.6	36.2	38.1	39.3	46.3	44.6	3,946	921	901	3,023	2,962	4,530
12:00	1008	27.7	36.5	38.3	40	46.8	44.75	3,969	949	934	3,126	3,067	4,553
12:05	1013	28.2	36.7	38.7	40.8	47.6	45.1	4,017	953	933	3,119	3,058	4,601
12:10	1001	28.4	36.8	38.9	41.8	48.5	45.5	4,030	922	905	3,025	2,970	4,614
12:15	1012	28.2	37.5	39.4	42.4	49.1	45.8	4,047	950	927	3,031	2,971	4,631
12:20	1012	28.1	37.6	39.8	43	49.6	46.2	4,052	966	948	3,022	2,963	4,636
12:25	1010	28.5	38.1	40.3	43	49.8	46.6	4,076	963	947	3,014	2,957	4,660
12:30	1003	28.9	38.3	40.6	43.5	50.2	47.2	4,108	940	916	3,106	3,045	4,692
12:35	1003	28.1	38.6	40.8	43.6	50.4	48.15	4,133	935	914	3,109	3,050	4,718
12:40	1004	28.1	38.5	40.9	43.8	50.5	48.5	4,157	938	914	3,119	3,062	4,741
12:45	1001	28.3	38.8	40.9	43.7	50.5	48.95	4,162	941	926	3,096	3,041	4,746
12:50	998	28.5	38.6	40.7	43.8	50.6	49.25	4,183	925	910	3,084	3,029	4,767
12:55	985	28.8	38.8	40.9	44.1	51	49.55	4,181	924	901	3,088	3,028	4,765
13:00	991	29	38.3	41.1	44.6	51.1	49.95	4,213	930	914	3,081	3,020	4,797
13:05	983	29.4	38.7	41.4	45	51.6	50	4,252	914	897	3,093	3,035	4,836
13:10	976	29.7	39.3	41.5	45.5	52.2	50.4	4,280	927	906	3,080	3,019	4,865
13:15	959	29.3	39.2	41.9	46.7	53.3	50.6	4,319	900	882	3,091	3,029	4,904
13:20	949	29.5	39.4	42.1	47.4	54	51.1	4,355	904	883	3,100	3,040	4,939
13:25	954	29.4	40	42.3	47.9	54.4	51.65	4,397	902	886	3,130	3,070	4,981
13:30	947	29.8	40.1	42.6	48.1	54.8	51.95	4,456	900	878	3,076	3,019	5,040
13:35	937	29.7	40.3	42.6	48.4	54.9	52.6	4,477	896	875	3,075	3,016	5,061
13:40	924	29.3	40.4	42.5	48.4	55.2	53.35	4,524	883	869	3,113	3,053	5,108
13:45	915	29.5	40.4	42.6	48.5	55.2	53.65	4,529	866	847	3,093	3,037	5,113
13:50	902	29.3	40.3	42.2	48.4	55.2	54	4,562	855	841	3,082	3,021	5,146
13:55	892	29.1	40.4	42.5	48.7	55.3	54.3	4,600	841	826	3,067	3,013	5,184

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
14:00	882	29.2	40.5	42.5	48.9	55.6	54.45	4,620	837	827	3,110	3,050	5,204
14:05	867	29.3	40.6	42.4	49	55.9	54.75	4,650	832	812	3,098	3,042	5,234
14:10	858	29.1	40.7	42.5	49.5	56.3	54.95	4,671	823	812	3,066	3,012	5,255
14:15	849	29.5	40.7	42.6	50.6	57.2	55.25	4,690	826	811	3,067	3,016	5,274
14:20	831	29.3	41.2	42.9	51.5	58.2	55.6	4,713	804	788	3,098	3,037	5,297
14:25	813	29.2	41.4	43.2	52.2	58.8	56.15	4,749	784	768	3,055	3,001	5,333
14:30	804	29.1	41.5	43.4	52.4	59.1	56.55	4,799	771	758	3,024	2,971	5,383
14:35	780	29.2	41.7	43.4	52.4	59.2	57.05	4,817	748	734	2,916	2,867	5,401
14:40	767	29.6	41.7	43.7	52.7	59.3	57.65	4,848	731	718	2,884	2,839	5,432
14:45	751	29.5	41.7	43.7	52.8	59.4	58.15	4,889	668	654	2,854	2,799	5,474
14:50	736	29.3	41.7	43.4	53.1	59.5	58.55	4,904	648	633	2,729	2,681	5,488
14:55	723	29.4	41.5	43.1	53	59.4	58.95	4,915	147	144	2,657	2,606	5,499
15:00	710	29.3	41.4	42.8	53	59.9	59.25	4,949	146	143	2,617	2,570	5,533
15:05	684	29.3	41	42.7	53.3	59.9	59.3	4,973	72	71	2,496	2,445	5,557
15:10	651	29.3	40.1	41.9	53.6	60.2	59.4	5,015	180	176	2,321	2,277	5,600
15:15	623	29.2	39.3	40.9	54.4	60.5	59.85	5,048	257	253	2,255	2,211	5,632
15:20	612	28.8	39.2	40.4	55.6	61.5	59.85	5,082	333	328	2,138	2,096	5,666
15:25	507	28.5	39.6	40.8	56.3	62.6	60.35	5,100	281	277	1,651	1,619	5,684
15:30	323	28.2	39.9	41.1	56.7	62.8	60.75	5,128	250	245	1,014	995	5,712
15:35	223	28	40.3	41	56.5	62.7	61	5,162	208	206	742	726	5,747
15:40	133	27.8	39.9	40.7	56.9	63.1	61.7	5,177	158	155	670	657	5,761
15:45	124	27.6	39.7	40.4	56.9	63	62	5,186	146	143	810	793	5,770
15:50	111	27.4	39.2	40.1	56.8	62.9	62.4	5,196	135	132	441	432	5,781
15:55	101	27.3	38.6	39.6	56.8	63	62.65	5,206	121	119	233	227	5,790
16:00	100	26.6	38.3	39.2	56.8	63	62.9	5,219	122	119	339	332	5,803
16:05	154	26.3	38.3	39.2	56.9	63.1	63.05	5,243	109	107	273	267	5,828
16:10	79	26.1	38.3	39.3	57.2	63.2	63.15	5,262	98	96	260	254	5,847
16:15	64	25.8	38.3	39.3	58.3	63.9	63.35	5,313	89	87	215	211	5,897
16:20	62	25.7	38.4	39.3	59.2	64.7	63.55	5,328	89	88	213	209	5,912
16:25	64	25.5	38.6	39.5	59.4	64.9	63.9	5,341	89	87	212	208	5,925
16:30	57	25.4	38.8	39.6	59.5	65	64.3	5,340	89	87	214	209	5,924
16:35	62	25.2	38.6	39.4	59.8	65.4	64.6	5,380	76	75	214	209	5,965
16:40	52	25	38.6	39.6	60.1	65.6	64.9	5,396	74	72	200	195	5,980
16:45	34	24.9	38.5	39.5	60.5	65.9	65	5,403	68	67	207	203	5,987

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 11 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_S	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
12:00	975	27.6	37.1	41.3	29.2	35.8	30.4	3,555	869	848	3,101	3,039	4,137
12:05	981	28.0	36.1	39.6	29.7	36.4	30.9	3,566	895	881	3,108	3,052	4,148
12:10	982	27.3	35.6	38.5	30.0	36.8	31.65	3,565	897	881	3,059	2,994	4,147
12:15	987	28.0	35.5	38	30.1	36.8	32.1	3,580	910	894	3,102	3,041	4,162
12:20	993	28.8	35.5	37.7	30.3	37.0	32.55	3,602	923	908	3,102	3,040	4,184
12:25	977	28.9	35.4	37.7	30.5	37.3	33.1	3,650	906	890	3,082	3,022	4,232
12:30	980	29.1	35.5	37.6	31.0	37.8	33.65	3,662	930	913	3,125	3,065	4,244
12:35	998	29.5	35.7	37.8	31.3	38.1	34.1	3,675	928	912	3,086	3,025	4,257
12:40	974	29.2	35.7	38.3	31.6	38.3	34.65	3,691	911	893	3,079	3,021	4,273
12:45	982	29.1	36	38.4	31.7	38.4	35.25	3,699	914	893	3,087	3,025	4,281
12:50	980	29.2	36	38.4	31.9	38.8	35.75	3,732	911	893	3,087	3,028	4,314
12:55	973	29.5	36.1	38.6	32.3	39.0	36.1	3,761	918	901	3,072	3,015	4,343
13:00	964	30.0	36.7	38.7	32.7	39.6	36.35	3,807	923	900	3,105	3,050	4,390
13:05	960	30.5	36.5	38.8	33.2	40.1	36.8	3,793	916	899	3,068	3,008	4,375
13:10	951	30.2	36.7	39	33.7	40.5	37	3,830	901	884	3,098	3,043	4,412
13:15	939	30.4	36.8	39.4	34.9	41.7	37.75	3,850	873	856	3,099	3,041	4,432
13:20	936	30.2	37.3	39.6	35.8	42.4	38.1	3,855	888	872	3,102	3,043	4,437
13:25	942	30.0	37.5	40	35.9	42.8	38.4	3,914	884	872	3,108	3,051	4,496
13:30	924	30.1	37.7	40.3	36.3	43.0	39.1	3,954	891	868	3,093	3,033	4,536
13:35	916	30.1	37.7	40.4	36.6	43.2	39.75	3,999	882	869	3,087	3,027	4,581
13:40	900	30.1	37.8	40.4	36.6	43.4	40.1	4,041	880	864	3,076	3,019	4,623
13:45	893	29.7	37.8	40.3	36.8	43.6	40.8	4,061	865	845	3,066	3,007	4,643
13:50	875	29.8	37.8	40.5	37.0	43.7	41.15	4,090	850	832	3,083	3,024	4,672
13:55	868	30.5	38.1	40.6	37.2	43.9	41.55	4,110	833	813	3,066	3,011	4,692
14:00	867	30.8	38.3	40.6	37.3	44.1	41.75	4,142	825	809	3,077	3,021	4,724
14:05	856	30.1	38	40.6	37.9	44.6	42.05	4,219	809	795	3,085	3,030	4,801
14:10	843	30.0	38.2	40.5	38.5	45.3	42.3	4,296	814	798	3,083	3,021	4,878
14:15	824	30.4	38.5	40.9	40.3	47.0	42.8	4,343	803	786	3,065	3,009	4,926
14:20	815	30.3	39	41.1	40.6	47.3	43.15	4,369	783	771	3,055	2,997	4,951
14:25	801	29.9	39.1	41.2	41.0	47.6	43.5	4,420	770	750	3,026	2,968	5,002

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_S	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
14:30	791	30.7	39.1	41.5	41.2	47.9	44.3	4,443	751	738	2,967	2,911	5,026
14:35	770	31.0	39.3	41.5	41.7	48.2	44.85	4,488	747	729	2,911	2,856	5,070
14:40	751	31.3	39.1	41.5	41.8	48.1	45.5	4,496	729	718	2,834	2,775	5,079
14:45	739	31.5	39.3	41.5	42.1	48.5	46.05	4,536	715	702	2,753	2,705	5,118
14:50	718	30.8	39.1	41.1	42.0	48.3	46.3	4,542	653	638	2,701	2,656	5,124
14:55	699	30.6	39.1	40.7	42.1	48.5	46.65	4,565	410	403	2,635	2,585	5,147
15:00	682	30.7	39.1	40.7	42.4	48.7	46.9	4,591	182	179	2,550	2,498	5,173
15:05	664	30.4	38.9	40.4	42.1	48.8	47.1	4,619	158	154	2,529	2,481	5,201
15:10	645	30.0	38.7	40.3	43.1	49.6	47.35	4,655	133	130	2,451	2,413	5,237
15:15	624	30.2	38.9	40.4	44.4	51.1	47.8	4,657	146	143	2,304	2,259	5,239
15:20	607	30.2	39.1	40.3	45.0	51.7	48.1	4,651	86	85	2,063	2,020	5,233
15:25	587	30.1	38.8	39.8	45.2	51.8	48.6	4,694	131	128	2,043	2,000	5,277
15:30	566	29.6	38.5	39.4	45.3	51.7	49.25	4,697	126	124	1,779	1,745	5,279
15:35	503	29.4	38.3	39	45.6	52.2	49.75	4,698	111	109	1,563	1,532	5,280
15:40	516	29.6	38	38.5	45.7	52.2	50.3	4,688	114	112	1,107	1,087	5,270
15:45	493	29.4	37.5	38.1	46.0	52.4	50.7	4,739	114	112	728	714	5,321
15:50	110	28.9	36.8	37.3	45.8	52.3	50.8	4,743	114	113	849	830	5,325
15:55	92	28.4	36	36.6	46.0	52.3	51.15	4,749	114	112	647	633	5,331
16:00	85	27.9	35.6	36.2	46.3	52.5	51.25	4,767	101	99	236	230	5,349
16:05	80	27.5	35.5	36	46.4	52.8	51.45	4,777	102	100	264	258	5,359
16:10	100	27.2	35.4	36	48.1	54.3	51.7	4,801	102	100	258	252	5,383
16:15	71	27.0	35.8	36.2	48.7	54.9	52.2	4,811	102	100	260	254	5,394
16:20	67	26.8	35.8	36.3	48.9	55.0	52.55	4,809	89	87	257	252	5,392
16:25	71	26.6	35.7	36.4	48.9	55.1	53	4,827	89	87	214	209	5,409
16:30	67	26.5	35.9	36.6	49.3	55.4	53.45	4,808	89	87	214	210	5,391
16:35	70	26.3	35.9	36.6	49.4	55.5	53.85	4,858	89	87	216	211	5,440
16:40	55	25.9	35.7	36.5	49.6	55.6	54.15	4,844	76	75	214	209	5,426
16:45	53	25.7	35.8	36.5	49.6	55.6	54.5	4,856	85	83	212	208	5,438
16:50	51	25.5	35.7	36.4	49.9	55.8	54.9	4,848	65	63	197	192	5,430
16:55	50	25.0	35.5	36.2	50.2	55.7	55	4,873	76	75	198	194	5,455
17:00	57	24.7	35.4	35.9	50.5	56.1	55.2	4,888	87	86	203	199	5,470

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 12 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W	W	W	W	W	W
8:00	168	13.7	20.8	20.1	50.5	55.7	55.2	4,233	109	106	279	272	4,815
8:05	115	14.0	21.9	21.8	51.3	56.8	55.5	4,293	109	107	281	274	4,875
8:10	276	15.1	22.5	22.6	51.7	57.5	55.9	4,339	122	120	351	343	4,921
8:15	325	15.5	23	23.4	51.9	57.7	56.2	4,426	132	130	354	346	5,008
8:20	362	16.1	23.4	24.2	52.0	58.0	56.55	4,505	132	130	426	418	5,087
8:25	380	16.4	24.1	24.9	52.2	58.1	57.05	4,594	132	130	429	421	5,176
8:30	408	16.8	24.7	25.7	52.4	58.3	57.4	4,667	136	133	1,546	1,511	5,249
8:35	423	17.3	25.7	26.1	52.4	58.4	57.7	4,715	118	115	1,777	1,744	5,297
8:40	438	17.5	26.2	26.3	52.6	58.6	58.1	4,781	142	139	1,927	1,889	5,363
8:45	462	17.7	25.9	26.5	52.7	58.7	58.25	4,861	143	140	1,992	1,957	5,443
8:50	494	18.1	25.7	26.5	52.8	58.8	58.55	4,924	143	140	2,116	2,077	5,507
8:55	506	18.9	25.8	26.7	53.2	59.1	58.6	4,954	142	139	2,190	2,148	5,536
9:00	533	19.4	26.2	26.9	53.9	60.0	59.05	4,986	149	145	2,262	2,221	5,569
9:05	555	19.9	26.5	27.3	54.3	60.6	59.35	5,021	150	147	2,373	2,327	5,603
9:10	574	20.4	26.7	27.4	54.8	61.0	59.75	5,046	150	146	2,460	2,412	5,628
9:15	598	20.6	27.1	27.7	54.9	61.2	60.15	5,078	150	146	2,545	2,498	5,660
9:20	614	20.6	27.3	27.9	55.1	61.2	60.7	5,115	154	151	2,602	2,545	5,697
9:25	632	21.2	27.7	28.3	55.3	61.4	61	5,130	157	154	2,684	2,628	5,712
9:30	644	21.7	27.9	28.7	55.4	61.5	61.35	5,159	168	166	2,709	2,663	5,741
9:35	659	22.0	28.2	28.9	55.5	61.7	61.5	5,189	170	167	2,785	2,734	5,771
9:40	684	22.5	28.3	29.5	55.6	61.7	61.75	5,229	175	172	2,868	2,796	5,811
9:45	704	22.7	28.8	30.1	55.9	62.0	61.9	5,231	181	177	2,992	2,938	5,813
9:50	721	22.9	29.5	30.8	56.6	62.6	62.25	5,265	196	192	3,057	2,997	5,848
9:55	739	22.5	30.1	31.6	57.1	63.3	62.4	5,282	201	196	3,104	3,042	5,864
10:00	750	22.8	31.1	32.4	57.5	63.9	62.7	5,294	211	208	3,087	3,034	5,877
10:05	769	23.4	31.8	33.6	57.8	63.9	63.15	5,317	208	205	3,108	3,051	5,899
10:10	777	23.9	32.4	34.7	58.2	64.1	63.5	5,399	208	205	3,075	3,018	5,981
10:15	802	24.4	32.9	35.9	58.3	64.2	63.9	5,437	214	210	3,097	3,041	6,019

ตารางที่ ข.11 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$T_{Cond,i}$	$T_{Cond,o}$	T_s	P_{comp}	$P_{PVT,DC}$	$P_{PVT,AC}$	$P_{PV,DC}$	$P_{PV,AC}$	P_{Total}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W	W	W	W	W	W
10:20	811	23.9	33.8	37.1	58.5	64.5	64.1	5,471	208	204	3,104	3,043	6,053
10:25	822	24.2	34.4	38	59.0	64.9	64.45	5,529	253	248	3,102	3,046	6,111
10:30	846	24.4	35.2	39.3	58.9	64.9	64.70	5,550	274	270	3,107	3,051	6,132
10:35	859	24.7	36.1	40.3	58.8	65.0	64.95	5,604	282	277	3,116	3,061	6,186
10:40	866	24.6	37	40.8	59.1	65.3	65.25	5,677	732	717	3,037	2,978	6,259



ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 17 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
12:00	988	27.4	29.45	3.95	3.93	14.24	3.35	4.249
12:05	984	27.5	29.9	3.94	4.01	14.65	3.43	4.271
12:10	990	28.1	30.7	3.95	4.07	14.03	3.49	4.021
12:15	991	28.0	31.1	3.94	4.14	14.24	3.56	3.999
12:20	992	27.8	31.55	3.95	4.18	14.45	3.60	4.013
12:25	994	28.0	32.4	3.95	4.26	14.03	3.68	3.809
12:30	996	29.1	32.8	3.93	4.31	14.24	3.73	3.819
12:35	992	29.1	33.25	3.94	4.36	14.24	3.78	3.771
12:40	992	28.7	33.6	3.97	4.41	14.45	3.82	3.777
12:45	990	29.5	33.95	3.96	4.46	14.24	3.88	3.667
12:50	979	30.0	34.1	3.90	4.49	14.86	3.90	3.808
12:55	977	30.2	34.7	3.95	4.55	14.24	3.97	3.589
13:00	976	30.7	35.2	3.92	4.58	14.45	4.00	3.614
13:05	967	31.1	35.5	3.91	4.57	14.86	3.98	3.730
13:10	953	31.2	36.25	3.89	4.62	14.65	4.04	3.628
13:15	954	31.1	36.7	3.90	4.65	14.45	4.07	3.551
13:20	941	30.5	37.4	3.89	4.68	14.45	4.10	3.522
13:25	947	31.2	38	3.90	4.71	14.65	4.13	3.550
13:30	941	31.7	38.6	3.90	4.72	14.45	4.14	3.490
13:35	925	31.4	39.1	3.87	4.76	14.45	4.18	3.458
13:40	917	31.3	39.15	3.92	4.80	15.07	4.21	3.576
13:45	908	31.4	39.45	3.84	4.83	14.86	4.24	3.502
13:50	899	31.7	39.85	3.86	4.85	14.24	4.27	3.334
13:55	889	32.1	40.2	3.84	4.88	14.03	4.30	3.261
14:00	880	31.9	40.7	3.84	4.92	14.45	4.33	3.333
14:05	864	32.0	41	3.82	5.00	14.24	4.41	3.225
14:10	852	31.9	41.65	3.80	5.04	14.24	4.45	3.196
14:15	836	31.7	42.35	3.82	5.05	14.65	4.46	3.283
14:20	821	31.6	43	3.77	5.11	14.45	4.53	3.190
14:25	806	31.0	43.65	3.64	5.13	14.03	4.55	3.085
14:30	784	31.0	43.85	3.57	5.16	14.45	4.58	3.155
14:35	768	31.6	44.35	3.55	5.19	13.61	4.61	2.951
14:40	756	32.0	44.8	3.47	5.22	13.61	4.64	2.931
14:45	741	31.8	45	3.36	5.25	13.40	4.67	2.870

ตารางที่ ข.12 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
14:50	722	32.0	45.35	2.88	5.27	13.19	4.69	2.815
14:55	706	31.8	45.5	2.75	5.27	13.61	4.69	2.902
15:00	681	31.8	46	2.94	5.29	14.03	4.71	2.980
15:05	660	31.6	46.45	2.58	5.31	14.24	4.72	3.014
15:10	644	31.2	47.05	2.47	5.33	14.45	4.74	3.045
15:15	623	31.3	47.7	2.32	5.36	14.45	4.78	3.022
15:20	611	31.4	48.1	2.22	5.40	14.03	4.82	2.913
15:25	591	31.3	48.65	1.97	5.42	14.03	4.84	2.898
15:30	567	30.8	49.05	1.86	5.45	14.03	4.87	2.879
15:35	520	30.6	49.45	1.66	5.48	13.82	4.90	2.819
15:40	520	30.4	49.7	0.88	5.48	13.61	4.90	2.779
15:45	503	30.3	49.75	0.47	5.50	13.61	4.92	2.768
15:50	133	29.7	50	0.89	5.49	13.61	4.91	2.773
15:55	85	29.2	50.2	0.50	5.50	13.61	4.92	2.768
16:00	79	28.7	50.55	0.26	5.54	13.40	4.95	2.705
16:05	74	28.4	50.9	0.35	5.54	13.19	4.96	2.660
16:10	82	28.1	51.35	0.35	5.58	12.98	5.00	2.595
16:15	66	27.7	51.95	0.29	5.59	12.98	5.00	2.594
16:20	63	27.7	52.5	0.29	5.62	13.40	5.04	2.660
16:25	66	27.7	52.9	0.29	5.63	13.19	5.05	2.610
16:30	72	27.4	53.2	0.29	5.66	12.98	5.08	2.557
16:35	64	27.3	53.45	0.26	5.66	12.98	5.08	2.557
16:40	50	27.0	53.7	0.27	5.67	12.56	5.09	2.467
16:45	49	26.7	54	0.26	5.70	12.56	5.12	2.453
16:50	46	26.4	54.15	0.25	5.69	12.35	5.11	2.416
16:55	48	26.0	54.25	0.27	5.73	12.14	5.15	2.358
17:00	44	25.5	54.6	0.27	5.76	11.93	5.18	2.304

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 18 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
8:00	113	16.1	54.75	0.35	5.36	11.10	4.78	2.323
8:05	80	16.5	54.8	0.36	5.36	11.51	4.77	2.412
8:10	201	17.4	55.5	0.38	5.36	11.72	4.77	2.456
8:15	304	18.4	55.6	0.46	5.38	11.30	4.80	2.356
8:20	348	19.0	56.15	0.48	5.44	11.30	4.85	2.329
8:25	377	19.3	56.4	0.55	5.45	11.30	4.87	2.322
8:30	398	19.8	56.75	0.69	5.48	11.51	4.90	2.350
8:35	418	19.7	56.9	1.75	5.49	11.72	4.91	2.389
8:40	440	20.2	57.2	2.00	5.49	12.14	4.91	2.473
8:45	464	20.4	57.4	2.08	5.55	12.14	4.96	2.446
8:50	482	20.8	57.65	2.13	5.55	11.93	4.96	2.404
8:55	498	21.6	57.9	2.17	5.59	11.93	5.01	2.381
9:00	525	21.8	58.2	2.32	5.56	11.93	4.98	2.396
9:05	536	22.1	58.5	2.38	5.62	11.72	5.04	2.328
9:10	556	22.3	58.8	2.47	5.62	11.93	5.04	2.369
9:15	580	22.9	59.3	2.55	5.65	11.93	5.07	2.353
9:20	604	23.4	59.65	2.63	5.71	12.14	5.12	2.370
9:25	612	23.4	59.8	2.72	5.74	12.35	5.15	2.397
9:30	636	23.8	60	2.75	5.78	12.14	5.20	2.336
9:35	657	23.9	60.25	2.84	5.78	11.51	5.20	2.214
9:40	679	24.4	60.45	2.89	5.83	11.72	5.25	2.235
9:45	705	24.8	60.75	3.03	5.87	11.72	5.29	2.216
9:50	721	25.3	61.05	3.06	5.93	11.72	5.34	2.194
9:55	731	25.2	61.35	3.13	5.94	12.56	5.36	2.343
10:00	746	25.2	61.7	3.17	5.96	12.35	5.38	2.297
10:05	755	25.5	62.05	3.18	5.97	12.77	5.39	2.370
10:10	769	26.0	62.4	3.19	5.99	12.98	5.40	2.402
10:15	785	26.4	62.6	3.23	6.03	12.56	5.45	2.304
10:20	701.0	25.7	62.4	3.31	5.99	11.93	5.41	2.207
10:25	708.5	25.9	62.7	2.44	6.02	11.93	5.44	2.195
10:30	754.0	26.2	62.9	3.32	6.03	12.14	5.45	2.227
10:35	803.5	26.7	63.4	3.36	6.07	12.35	5.49	2.252
10:40	726.0	27.1	63.75	3.51	6.09	12.14	5.51	2.205

ตารางที่ ข.13 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
10:45	710.5	27.2	64	2.77	6.13	12.14	5.55	2.187
10:50	783.0	26.7	64.4	3.82	6.16	12.56	5.58	2.252
10:55	816.0	27.1	64.7	3.63	6.22	12.77	5.64	2.265
11:00	848.5	27.4	65.1	3.87	6.26	12.77	5.68	2.250
12:00	171	29.6	45.95	1.07	5.04	13.61	4.46	3.053
12:05	954	28.9	44.25	3.81	4.99	13.40	4.41	3.039
12:10	978	29.1	42.65	3.79	4.92	14.03	4.34	3.234
12:15	961	28.8	41.4	3.83	4.85	14.03	4.27	3.287
12:20	970	29.2	40.65	3.88	4.83	14.24	4.25	3.352
12:25	827	30.5	39.9	3.52	4.80	14.03	4.21	3.329
12:30	989	30.6	39.65	3.88	4.78	14.03	4.19	3.345
12:35	990	31.0	39.6	3.86	4.75	14.24	4.16	3.420
12:40	201	30.1	38.5	1.07	4.74	14.45	4.16	3.471
12:45	988	29.3	38.15	3.80	4.72	14.03	4.14	3.389
12:50	955	29.7	37.85	3.86	4.68	14.24	4.10	3.471
12:55	758	30.4	37.7	1.91	4.66	14.45	4.08	3.543
13:00	978	30.1	37.5	3.83	4.66	14.03	4.08	3.436
13:05	964	30.3	37.45	3.87	4.66	14.03	4.07	3.443
13:10	969	31.0	37.9	3.87	4.63	14.03	4.05	3.463
13:15	937	30.3	37.8	3.91	4.63	14.24	4.05	3.513
13:20	931	30.4	38.25	3.90	4.64	14.24	4.06	3.509
13:25	910	30.5	38.55	3.87	4.63	14.24	4.05	3.515
13:30	924	30.5	38.85	3.91	4.65	14.24	4.07	3.495
13:35	885	30.7	38.8	3.81	4.65	14.45	4.07	3.548
13:40	910	29.8	38.4	3.86	4.65	14.45	4.07	3.547
13:45	886	29.6	38.45	3.85	4.65	14.45	4.07	3.553
13:50	863	29.8	39.2	3.83	4.69	14.24	4.11	3.467
13:55	864	30.1	39.5	3.84	4.71	14.65	4.13	3.550
14:00	857	30.6	40.35	3.88	4.74	14.24	4.16	3.421
14:05	884	31.1	41.1	3.84	4.76	14.45	4.18	3.459
14:10	891	31.6	41.45	3.85	4.80	14.45	4.21	3.428
14:15	879	30.9	42	3.82	4.83	14.65	4.24	3.453
14:20	886	30.3	42.25	3.88	4.86	14.45	4.28	3.377
14:25	879	30.4	42.55	3.84	4.89	14.45	4.30	3.356
14:30	827	30.8	42.9	3.82	4.92	14.03	4.33	3.236

ตารางที่ ข.13 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
14:35	658	30.5	43.25	3.01	4.96	13.82	4.37	3.158
14:40	364	29.3	43.6	1.70	4.97	13.40	4.39	3.055
14:45	497	28.8	44	2.82	4.98	13.40	4.40	3.045
14:50	119	29.2	44.75	0.54	5.03	13.61	4.45	3.061
14:55	129	28.5	45.25	0.59	5.01	13.19	4.43	2.981
15:00	95	27.5	45.8	0.45	5.04	13.19	4.46	2.960
15:05	662	27.3	46	3.21	5.02	13.19	4.43	2.975
15:10	646	28.1	46.35	2.84	5.05	13.19	4.47	2.953
15:15	99	28.7	46.45	0.56	5.06	13.61	4.48	3.039
15:20	636	28.5	46.85	2.27	5.09	12.98	4.51	2.879
15:25	617	29.2	46.95	2.29	5.11	13.61	4.52	3.008
15:30	583	29.8	47.55	2.14	5.14	13.40	4.55	2.942
15:35	543	30.3	47.85	1.71	5.19	13.19	4.60	2.865
15:40	547	30.4	48.2	1.45	5.22	13.40	4.63	2.891
15:45	552	30.5	48.85	1.14	5.23	13.19	4.65	2.836
15:50	527	30.5	49.2	1.05	5.29	13.40	4.70	2.849
15:55	230	30.2	49.6	0.74	5.30	13.19	4.72	2.796
16:00	129	29.7	49.95	0.69	5.34	13.19	4.76	2.771
16:05	136	29.1	50.35	0.80	5.36	13.40	4.78	2.805
16:10	133	28.7	50.7	0.63	5.39	13.19	4.81	2.744
16:15	116	28.3	51	0.50	5.41	12.77	4.82	2.647
16:20	102	28.0	51.35	0.49	5.41	12.77	4.83	2.643
16:25	88	27.7	51.65	0.37	5.43	12.35	4.85	2.549
16:30	73	27.3	52	0.36	5.46	12.35	4.87	2.534
16:35	72	26.8	52.35	0.35	5.48	12.14	4.90	2.477
16:40	71	26.6	52.65	0.30	5.55	12.35	4.97	2.488
16:45	61	26.2	53.35	0.28	5.60	12.14	5.01	2.422
16:50	55	25.9	53.6	0.27	5.66	11.93	5.08	2.351
16:55	48	25.7	53.8	0.26	5.71	11.93	5.13	2.326
17:00	47	25.4	54.2	0.27	5.74	11.72	5.16	2.271

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 19 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
8:00	36.0	18.2	54.35	0.26	5.08	9.63	4.50	2.141
8:05	34.5	18.3	54.5	0.27	5.12	9.63	4.54	2.120
8:10	49.5	18.3	54.8	0.34	5.14	9.63	4.56	2.111
8:15	56.0	18.4	55.1	0.34	5.21	9.63	4.63	2.081
8:20	71.0	18.5	55.35	0.48	5.25	10.26	4.66	2.200
8:25	80.5	18.6	55.7	0.55	5.32	10.47	4.74	2.208
8:30	94.5	18.8	55.95	0.62	5.37	10.26	4.79	2.143
8:35	110.0	19.0	56.2	0.79	5.44	10.89	4.86	2.239
8:40	122.5	19.1	56.45	0.91	5.51	11.10	4.93	2.250
8:45	128.5	19.5	56.65	0.96	5.52	11.10	4.94	2.248
8:50	154.5	19.7	57.1	1.07	5.60	10.89	5.02	2.168
8:55	216.5	20.1	57.4	1.17	5.62	10.89	5.04	2.162
9:00	177.0	20.5	57.65	1.16	5.65	10.47	5.07	2.066
9:05	187.0	20.7	58	1.22	5.66	11.30	5.08	2.225
9:10	184.0	21.0	58.15	1.22	5.70	11.30	5.12	2.208
9:15	224.5	21.3	58.5	1.36	5.72	11.51	5.14	2.240
9:20	215.5	21.8	58.6	1.42	5.74	10.89	5.16	2.112
9:25	221.0	21.9	59.1	1.58	5.74	11.51	5.16	2.233
9:30	233.5	21.9	59.2	1.64	5.77	11.30	5.19	2.178
9:35	244.0	22.2	59.65	1.70	5.83	11.51	5.24	2.196
9:40	553.5	22.3	59.85	2.83	5.81	11.10	5.23	2.122
9:45	658.0	23.1	60.1	3.14	5.82	11.30	5.24	2.158
9:50	630.0	24.2	60.5	3.08	5.82	11.72	5.24	2.237
9:55	664.0	24.8	60.8	3.13	5.86	11.51	5.28	2.181
10:00	695.0	24.9	61.2	3.13	5.90	11.10	5.31	2.088
10:05	669.5	25.6	61.65	3.12	5.87	11.51	5.29	2.176
10:10	699.5	25.9	61.85	2.98	5.90	11.51	5.32	2.165
10:15	693.0	25.8	62.15	2.66	5.95	11.93	5.37	2.224
10:20	701.0	25.7	62.4	3.31	5.99	11.93	5.41	2.207
10:25	708.5	25.9	62.7	2.44	6.02	11.93	5.44	2.195
10:30	754.0	26.2	62.9	3.32	6.03	12.14	5.45	2.227
10:35	803.5	26.7	63.4	3.36	6.07	12.35	5.49	2.252
10:40	726.0	27.1	63.75	3.51	6.09	12.14	5.51	2.205

ตารางที่ ข.14 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
10:45	710.5	27.2	64	2.77	6.13	12.14	5.55	2.187
10:50	783.0	26.7	64.4	3.82	6.16	12.56	5.58	2.252
10:55	816.0	27.1	64.7	3.63	6.22	12.77	5.64	2.265
11:00	848.5	27.4	65.1	3.87	6.26	12.77	5.68	2.250
12:00	171	29.6	45.95	1.07	5.04	13.61	4.46	3.053
12:05	954	28.9	44.25	3.81	4.99	13.40	4.41	3.039
12:10	978	29.1	42.65	3.79	4.92	14.03	4.34	3.234
12:15	961	28.8	41.4	3.83	4.85	14.03	4.27	3.287
12:20	970	29.2	40.65	3.88	4.83	14.24	4.25	3.352
12:25	827	30.5	39.9	3.52	4.80	14.03	4.21	3.329
12:30	989	30.6	39.65	3.88	4.78	14.03	4.19	3.345
12:35	990	31.0	39.6	3.86	4.75	14.24	4.16	3.420
12:40	201	30.1	38.5	1.07	4.74	14.45	4.16	3.471
12:45	988	29.3	38.15	3.80	4.72	14.03	4.14	3.389
12:50	955	29.7	37.85	3.86	4.68	14.24	4.10	3.471
12:55	758	30.4	37.7	1.91	4.66	14.45	4.08	3.543
13:00	978	30.1	37.5	3.83	4.66	14.03	4.08	3.436
13:05	964	30.3	37.45	3.87	4.66	14.03	4.07	3.443
13:10	969	31.0	37.9	3.87	4.63	14.03	4.05	3.463
13:15	937	30.3	37.8	3.91	4.63	14.24	4.05	3.513
13:20	931	30.4	38.25	3.90	4.64	14.24	4.06	3.509
13:25	910	30.5	38.55	3.87	4.63	14.24	4.05	3.515
13:30	924	30.5	38.85	3.91	4.65	14.24	4.07	3.495
13:35	885	30.7	38.8	3.81	4.65	14.45	4.07	3.548
13:40	910	29.8	38.4	3.86	4.65	14.45	4.07	3.547
13:45	886	29.6	38.45	3.85	4.65	14.45	4.07	3.553
13:50	863	29.8	39.2	3.83	4.69	14.24	4.11	3.467
13:55	864	30.1	39.5	3.84	4.71	14.65	4.13	3.550
14:00	857	30.6	40.35	3.88	4.74	14.24	4.16	3.421
14:05	884	31.1	41.1	3.84	4.76	14.45	4.18	3.459
14:10	891	31.6	41.45	3.85	4.80	14.45	4.21	3.428
14:15	879	30.9	42	3.82	4.83	14.65	4.24	3.453
14:20	886	30.3	42.25	3.88	4.86	14.45	4.28	3.377

ตารางที่ ข.14 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
14:25	879	30.4	42.55	3.84	4.89	14.45	4.30	3.356
14:30	827	30.8	42.9	3.82	4.92	14.03	4.33	3.236
14:35	658	30.5	43.25	3.01	4.96	13.82	4.37	3.158
14:40	364	29.3	43.6	1.70	4.97	13.40	4.39	3.055
14:45	497	28.8	44	2.82	4.98	13.40	4.40	3.045
14:50	119	29.2	44.75	0.54	5.03	13.61	4.45	3.061
14:55	129	28.5	45.25	0.59	5.01	13.19	4.43	2.981
15:00	95	27.5	45.8	0.45	5.04	13.19	4.46	2.960
15:05	662	27.3	46	3.21	5.02	13.19	4.43	2.975
15:10	646	28.1	46.35	2.84	5.05	13.19	4.47	2.953
15:15	99	28.7	46.45	0.56	5.06	13.61	4.48	3.039
15:20	636	28.5	46.85	2.27	5.09	12.98	4.51	2.879
15:25	617	29.2	46.95	2.29	5.11	13.61	4.52	3.008
15:30	583	29.8	47.55	2.14	5.14	13.40	4.55	2.942
15:35	543	30.3	47.85	1.71	5.19	13.19	4.60	2.865
15:40	547	30.4	48.2	1.45	5.22	13.40	4.63	2.891
15:45	552	30.5	48.85	1.14	5.23	13.19	4.65	2.836
15:50	527	30.5	49.2	1.05	5.29	13.40	4.70	2.849
15:55	230	30.2	49.6	0.74	5.30	13.19	4.72	2.796
16:00	129	29.7	49.95	0.69	5.34	13.19	4.76	2.771
16:05	136	29.1	50.35	0.80	5.36	13.40	4.78	2.805
16:10	133	28.7	50.7	0.63	5.39	13.19	4.81	2.744
16:15	116	28.3	51	0.50	5.41	12.77	4.82	2.647
16:20	102	28.0	51.35	0.49	5.41	12.77	4.83	2.643
16:25	88	27.7	51.65	0.37	5.43	12.35	4.85	2.549
16:30	73	27.3	52	0.36	5.46	12.35	4.87	2.534
16:35	72	26.8	52.35	0.35	5.48	12.14	4.90	2.477
16:40	71	26.6	52.65	0.30	5.55	12.35	4.97	2.488
16:45	61	26.2	53.35	0.28	5.60	12.14	5.01	2.422
16:50	55	25.9	53.6	0.27	5.66	11.93	5.08	2.351
16:55	48	25.7	53.8	0.26	5.71	11.93	5.13	2.326
17:00	47	25.4	54.2	0.27	5.74	11.72	5.16	2.271

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 20 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
8:00	108	17.3	54.3	0.68	5.43	11.10	4.85	2.287
8:05	114	17.5	54.75	0.79	5.47	11.10	4.89	2.268
8:10	173	17.9	55.15	0.87	5.51	11.10	4.93	2.252
8:15	275	18.6	55.35	0.98	5.55	11.10	4.97	2.234
8:20	376	19.3	55.7	1.04	5.60	11.30	5.02	2.254
8:25	385	20.2	56	1.10	5.65	11.30	5.06	2.233
8:30	404	20.8	56.35	1.56	5.70	11.30	5.12	2.209
8:35	396	21.2	56.5	1.41	5.71	11.72	5.13	2.285
8:40	550	21.8	56.9	2.77	5.71	11.93	5.13	2.327
8:45	549	22.4	57.15	2.57	5.74	11.93	5.16	2.314
8:50	520	22.7	57.35	2.31	5.74	11.72	5.15	2.275
8:55	530	23.2	57.65	2.30	5.71	11.93	5.13	2.326
9:00	542	23.2	58.15	2.33	5.71	11.72	5.13	2.287
9:05	556	23.3	58.45	2.42	5.72	11.51	5.14	2.239
9:10	561	23.2	58.55	2.44	5.74	11.51	5.15	2.235
9:15	428	23.1	58.75	1.79	5.74	11.51	5.15	2.234
9:20	368	23.0	59.1	1.52	5.76	11.93	5.18	2.304
9:25	306	23.3	59.4	1.46	5.81	11.93	5.23	2.281
9:30	298	23.7	59.65	1.20	5.85	11.72	5.27	2.224
9:35	736	23.8	59.85	3.24	5.82	11.93	5.24	2.276
9:40	744	23.2	60.3	3.40	5.86	11.93	5.28	2.260
9:45	442	23.5	60.5	2.24	5.88	11.93	5.30	2.251
9:50	243	24.1	60.65	1.52	5.88	11.51	5.30	2.174
9:55	339	24.5	61.05	1.87	5.88	11.51	5.30	2.172
10:00	324	24.1	61.25	1.95	5.92	11.93	5.34	2.237
10:05	230	23.8	61.7	1.59	5.90	11.93	5.31	2.245
10:10	355	23.8	61.9	2.79	5.95	12.14	5.37	2.260
10:15	214	23.8	62.3	1.17	6.00	12.14	5.42	2.240
10:20	199	23.8	62.5	1.43	6.00	11.72	5.42	2.162
10:25	208	23.7	62.8	1.32	6.05	11.30	5.47	2.068
10:30	184	23.4	63.3	1.25	6.10	11.30	5.52	2.050
10:35	180	23.3	63.6	1.09	6.10	11.30	5.52	2.049
10:40	124	23.3	63.7	0.77	6.19	11.10	5.61	1.980
10:45	123	23.2	64	0.97	6.19	11.10	5.61	1.977

ตารางที่ ข.15 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
10:50	176	23.2	64.2	1.29	6.22	11.10	5.64	1.968
10:55	246	23.3	64.6	1.57	6.24	11.10	5.65	1.962
11:00	314	23.5	65	1.92	6.30	11.10	5.72	1.939
12:00	514	26.5	51.65	2.87	5.42	12.14	4.84	2.510
12:05	510	26.4	49.5	2.75	5.30	12.56	4.71	2.665
12:10	420	26.1	48.4	2.52	5.24	12.35	4.66	2.651
12:15	493	25.7	47.7	2.87	5.22	12.35	4.64	2.661
12:20	372	25.7	47.45	2.31	5.16	12.35	4.58	2.695
12:25	376	25.7	47.2	2.34	5.09	12.14	4.51	2.691
12:30	451	25.6	46.25	2.61	5.05	12.14	4.47	2.718
12:35	346	25.9	45.6	2.19	5.02	12.14	4.44	2.736
12:40	366	25.9	45.35	2.37	4.98	12.56	4.39	2.859
12:45	290	26.0	45.45	1.87	4.95	12.56	4.37	2.876
12:50	307	26.0	44.45	1.95	4.91	12.35	4.32	2.857
12:55	327	25.7	44.45	2.02	4.86	12.35	4.28	2.884
13:00	789	25.7	44.6	2.63	4.82	12.77	4.24	3.010
13:05	350	25.9	44.5	2.23	4.80	12.56	4.22	2.977
13:10	1099	25.9	44.1	3.20	4.77	12.56	4.19	2.997
13:15	411	26.3	44	2.48	4.74	12.14	4.16	2.918
13:20	381	26.5	44.05	2.33	4.71	12.56	4.13	3.043
13:25	449	26.6	44.05	2.37	4.72	12.56	4.14	3.036
13:30	488	26.6	44.35	2.53	4.71	12.56	4.13	3.041
13:35	694	26.7	44.15	4.11	4.70	12.77	4.12	3.101
13:40	445	26.8	44.3	2.70	4.71	12.77	4.13	3.092
13:45	547	27.0	44.4	3.35	4.69	12.77	4.11	3.107
13:50	1066	27.6	44.95	4.04	4.66	13.19	4.08	3.232
13:55	636	28.6	45.4	3.24	4.67	12.77	4.08	3.127
14:00	629	27.2	46	2.38	4.69	12.77	4.10	3.112
14:05	645	26.9	45.85	2.21	4.69	12.77	4.10	3.111
14:10	425	27.0	45.7	2.07	4.69	12.77	4.10	3.112
14:15	373	26.4	45.6	1.96	4.66	12.98	4.08	3.180
14:20	354	26.2	45.35	1.94	4.69	12.56	4.10	3.060
14:25	877	26.3	44.9	3.70	4.69	12.56	4.11	3.055
14:30	766	26.9	44.7	3.21	4.72	12.35	4.14	2.983
14:35	727	27.5	44.75	3.10	4.74	11.81	4.16	2.838
14:40	753	27.9	44.8	3.19	4.75	12.35	4.17	2.963

ตารางที่ ข.15 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
14:45	789	27.9	45.1	3.29	4.77	12.35	4.19	2.950
14:50	168	27.8	45.45	1.11	4.80	12.35	4.22	2.926
14:55	468	26.8	46.05	2.50	4.82	12.35	4.24	2.915
15:00	717	26.6	46.5	3.30	4.86	11.93	4.28	2.789
15:05	678	26.8	46.75	3.01	4.88	12.35	4.30	2.873
15:10	643	26.7	47.1	2.89	4.92	12.56	4.34	2.895
15:15	618	26.4	47.3	2.42	4.93	12.98	4.35	2.985
15:20	576	26.4	47.6	2.22	4.97	12.35	4.38	2.818
15:25	586	26.2	47.8	2.09	4.96	12.14	4.37	2.776
15:30	569	26.1	48.1	2.01	4.99	12.14	4.41	2.754
15:35	545	25.9	48.5	1.69	5.02	12.14	4.44	2.738
15:40	511	25.5	49	1.29	5.10	12.14	4.51	2.690
15:45	486	25.2	49.3	1.21	5.13	11.93	4.55	2.622
15:50	459	25.2	49.9	1.01	5.14	11.72	4.56	2.570
15:55	304	24.9	50.1	0.87	5.18	11.72	4.60	2.548
16:00	107	24.4	50.3	0.54	5.21	11.93	4.63	2.576
16:05	104	24.1	50.6	0.35	5.24	11.72	4.66	2.516
16:10	96	23.7	50.95	0.40	5.26	11.72	4.67	2.509
16:15	92	23.5	51	0.43	5.28	11.51	4.69	2.453
16:20	84	23.3	51.45	0.38	5.32	11.51	4.74	2.429
16:25	80	23.1	51.85	0.37	5.32	11.30	4.74	2.386
16:30	77	23.0	52.15	0.36	5.35	11.72	4.77	2.457
16:35	69	22.8	52.45	0.37	5.43	11.51	4.85	2.375
16:40	55	22.6	52.65	0.35	5.45	11.10	4.87	2.280
16:45	48	22.3	53.05	0.33	5.54	11.51	4.96	2.322
16:50	51	22.0	53.3	0.35	5.64	11.30	5.05	2.237
16:55	50	21.9	53.65	0.29	5.71	11.30	5.13	2.203
17:00	40	21.7	54.2	0.26	5.77	11.51	5.19	2.219

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 21 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
8:00	54	16.9	54.35	0.34	5.20	9.63	4.62	2.084
8:05	54	17.0	54.5	0.35	5.16	9.63	4.58	2.104
8:10	53	17.0	54.8	0.40	5.21	9.63	4.63	2.081
8:15	63	17.0	55.1	0.42	5.22	9.63	4.63	2.078
8:20	60	17.0	55.35	0.41	5.22	9.63	4.64	2.078
8:25	58	17.1	55.7	0.41	5.24	9.63	4.66	2.068
8:30	53	17.2	55.95	0.40	5.25	10.26	4.67	2.198
8:35	51	17.2	56.2	0.40	5.29	10.47	4.70	2.225
8:40	56	17.2	56.45	0.40	5.31	10.26	4.73	2.170
8:45	63	17.2	56.65	0.42	5.35	10.89	4.76	2.285
8:50	75	17.4	57.1	0.54	5.38	11.10	4.80	2.311
8:55	92	17.5	57.4	0.66	5.38	11.10	4.80	2.312
9:00	107	17.7	57.65	0.84	5.41	10.89	4.82	2.256
9:05	121	17.9	58	0.92	5.43	10.89	4.85	2.244
9:10	128	18.0	58.15	0.92	5.46	10.47	4.88	2.146
9:15	154	18.1	58.5	1.05	5.47	11.30	4.89	2.312
9:20	160	18.2	58.6	1.11	5.51	11.30	4.93	2.292
9:25	162	18.3	59.1	1.11	5.54	11.51	4.96	2.323
9:30	175	18.6	59.2	1.22	5.58	10.89	5.00	2.178
9:35	195	18.8	59.65	1.28	5.59	11.51	5.01	2.298
9:40	208	19.1	59.85	1.35	5.66	11.30	5.07	2.228
9:45	170	19.1	60.1	1.16	5.67	11.51	5.09	2.264
9:50	146	19.2	60.5	1.07	5.72	11.10	5.13	2.161
9:55	136	19.1	60.8	1.01	5.74	11.30	5.16	2.192
10:00	151	19.1	61.2	1.10	5.77	11.72	5.18	2.261
10:05	134	19.0	61.65	1.02	5.84	11.51	5.26	2.191
10:10	142	19.1	61.85	1.02	5.86	11.10	5.28	2.102
10:15	127	19.0	62.15	0.92	5.89	11.51	5.31	2.170
10:20	118	18.9	62.4	0.91	5.90	11.51	5.32	2.165
10:25	130	18.9	62.7	0.93	5.91	11.93	5.32	2.242
10:30	159	19.0	62.9	1.19	5.91	11.93	5.33	2.239

ตารางที่ ข.16 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
10:35	230	19.1	63.4	1.54	5.96	11.93	5.38	2.218
10:40	204	19.2	63.75	1.44	5.99	12.14	5.40	2.247
10:45	203	19.4	64	1.36	6.04	12.35	5.46	2.261
10:50	204	19.5	64.4	1.36	6.13	12.14	5.55	2.189
10:55	224	19.5	64.7	1.57	6.14	12.14	5.55	2.186
11:00	277	19.6	65.1	1.67	6.22	12.35	5.63	2.192



ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 22 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
12:00	981	21.9	30.3	3.86	4.08	12.35	3.50	3.527
12:05	960	22.1	30.85	3.86	4.12	12.35	3.54	3.491
12:10	962	22.4	31.5	3.86	4.14	12.77	3.56	3.584
12:15	954	22.4	31.95	3.90	4.18	12.35	3.59	3.437
12:20	965	22.6	32.2	3.89	4.21	12.35	3.62	3.408
12:25	975	22.8	32.7	3.87	4.25	12.35	3.67	3.364
12:30	982	22.6	33.25	3.90	4.29	12.35	3.70	3.335
12:35	985	22.5	33.75	3.91	4.32	12.14	3.74	3.244
12:40	990	22.7	34	3.90	4.33	12.35	3.75	3.293
12:45	1000	23.0	34.55	3.94	4.38	12.56	3.80	3.307
12:50	971	23.4	35	3.93	4.41	12.35	3.83	3.223
12:55	973	23.0	35.35	3.84	4.43	12.35	3.85	3.207
13:00	936	23.2	35.8	3.86	4.45	12.35	3.87	3.192
13:05	935	23.7	36.1	3.88	4.50	12.35	3.92	3.152
13:10	928	23.6	36.5	3.86	4.51	12.56	3.93	3.198
13:15	946	23.3	36.9	3.89	4.52	12.77	3.94	3.245
13:20	956	23.6	37.3	4.08	4.55	12.35	3.96	3.116
13:25	883	23.8	37.5	3.90	4.54	12.56	3.96	3.172
13:30	881	24.0	37.95	3.80	4.57	12.35	3.99	3.099
13:35	838	23.5	38.35	3.80	4.59	12.35	4.01	3.081
13:40	882	23.6	38.8	3.81	4.62	12.77	4.04	3.164
13:45	897	23.5	39.25	3.93	4.64	12.14	4.06	2.990
13:50	894	23.7	39.55	3.84	4.67	12.77	4.09	3.123
13:55	867	23.7	40.1	3.88	4.67	12.77	4.09	3.122
14:00	866	23.8	40.5	3.85	4.72	12.35	4.14	2.986
14:05	884	24.2	40.9	3.80	4.71	12.14	4.13	2.939
14:10	772	24.2	41.5	3.63	4.72	12.35	4.13	2.988
14:15	749	23.8	41.9	3.63	4.75	12.35	4.16	2.967
14:20	755	23.6	42.2	3.63	4.79	12.14	4.20	2.888
14:25	782	23.9	42.6	3.79	4.80	12.56	4.21	2.981
14:30	754	24.0	43.15	3.68	4.83	12.56	4.24	2.960
14:35	792	23.5	43.45	3.79	4.86	12.35	4.28	2.884
14:40	797	23.7	43.8	3.74	4.91	11.93	4.33	2.758
14:45	778	24.1	44.2	3.71	4.93	12.14	4.35	2.792

ตารางที่ ข.17 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
14:50	757	24.2	44.55	3.60	4.97	11.93	4.39	2.721
14:55	735	24.2	45.05	3.30	4.98	11.93	4.40	2.711
15:00	734	24.3	45.4	2.84	5.02	11.93	4.44	2.687
15:05	706	24.4	45.8	2.82	5.05	12.35	4.47	2.765
15:10	598	24.0	46.15	2.46	5.10	12.35	4.51	2.736
15:15	604	23.6	46.5	2.58	5.13	12.35	4.55	2.714
15:20	594	23.8	46.85	2.31	5.17	12.35	4.58	2.695
15:25	583	23.7	47.1	2.21	5.19	12.56	4.61	2.728
15:30	519	23.9	47.55	1.96	5.22	11.93	4.64	2.572
15:35	528	23.5	47.8	1.68	5.25	12.14	4.67	2.603
15:40	570	23.4	48.1	1.55	5.29	12.14	4.71	2.580
15:45	510	23.5	48.4	1.11	5.31	11.93	4.72	2.526
15:50	500	23.5	48.9	0.68	5.35	12.35	4.77	2.590
15:55	201	23.1	49	0.98	5.35	12.35	4.77	2.589
16:00	102	22.6	49.15	0.75	5.36	11.93	4.78	2.496
16:05	88	22.2	49.5	0.44	5.38	11.93	4.80	2.486
16:10	83	22.0	49.75	0.35	5.39	11.93	4.81	2.483
16:15	87	21.8	49.95	0.35	5.41	11.93	4.83	2.472
16:20	66	21.8	50.3	0.30	5.45	11.93	4.87	2.450
16:25	67	21.6	50.6	0.30	5.47	12.14	4.89	2.482
16:30	71	21.4	50.9	0.31	5.49	11.72	4.91	2.387
16:35	65	21.4	51.4	0.30	5.53	11.72	4.95	2.370
16:40	58	21.4	51.7	0.29	5.55	11.93	4.97	2.403
16:45	53	21.3	52.1	0.26	5.56	11.72	4.98	2.353
16:50	53	21.1	52.4	0.27	5.58	11.51	5.00	2.302
16:55	50	21.0	52.7	0.27	5.61	11.72	5.02	2.334
17:00	47	20.8	53.15	0.27	5.63	11.51	5.05	2.281

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 23 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
8:00	68	9.4	53.25	0.36	4.97	10.05	4.39	2.288
8:05	72	9.6	53.7	0.36	5.04	10.89	4.45	2.444
8:10	136	10.0	53.9	0.39	5.07	11.51	4.48	2.568
8:15	128	11.0	54.4	0.40	5.12	11.72	4.54	2.582
8:20	345	11.6	54.7	0.48	5.19	11.72	4.61	2.546
8:25	378	12.0	55.05	0.52	5.21	12.35	4.63	2.666
8:30	404	12.3	55.35	0.51	5.25	12.56	4.67	2.692
8:35	421	12.8	55.85	1.64	5.27	12.77	4.69	2.724
8:40	430	13.3	56.25	1.86	5.33	12.77	4.75	2.691
8:45	455	13.6	56.55	2.04	5.36	12.98	4.77	2.718
8:50	468	14.3	56.85	2.17	5.40	12.98	4.82	2.695
8:55	500	14.9	57.2	2.29	5.42	13.40	4.83	2.772
9:00	527	14.8	57.6	2.40	5.46	13.40	4.87	2.749
9:05	546	15.5	57.55	2.48	5.49	13.40	4.91	2.730
9:10	577	15.9	57.95	2.53	5.56	13.61	4.97	2.736
9:15	591	16.0	58.25	2.70	5.56	13.82	4.98	2.776
9:20	604	16.6	58.65	2.73	5.60	13.82	5.02	2.752
9:25	623	17.3	59.05	2.83	5.65	13.82	5.07	2.726
9:30	655	17.4	59.5	2.86	5.69	13.82	5.10	2.707
9:35	671	17.7	59.9	2.98	5.72	13.82	5.14	2.688
9:40	705	18.3	60.3	3.01	5.77	13.61	5.19	2.621
9:45	722	19.3	60.25	3.07	5.80	13.19	5.21	2.530
9:50	740	18.6	60.6	3.11	5.83	13.40	5.25	2.552
9:55	751	19.1	60.75	3.12	5.87	13.40	5.28	2.536
10:00	756	19.4	61.1	3.08	5.92	13.40	5.34	2.510
10:05	783	19.4	61.4	3.16	5.93	13.40	5.35	2.504
10:10	793	19.9	61.55	3.16	5.98	13.40	5.40	2.481
10:15	806	20.4	62	3.15	6.01	12.98	5.43	2.389
10:20	809	20.2	62.45	3.15	6.06	13.61	5.47	2.486
10:25	824	20.0	62.85	3.18	6.08	13.40	5.50	2.436
10:30	841	20.2	63.25	3.19	6.13	13.61	5.55	2.452
10:35	869	20.7	63.5	3.60	6.16	13.61	5.58	2.438

ตารางที่ ข.18 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
10:40	883	21.1	63.85	3.68	6.23	14.03	5.64	2.485
10:45	891	21.3	64.2	3.83	6.30	13.61	5.71	2.381
10:50	899	21.6	64.5	3.89	6.37	13.40	5.79	2.316
10:55	913	21.5	64.75	3.85	6.48	14.03	5.90	2.377
11:00	921	21.5	65	3.87	6.60	14.24	6.01	2.367
12:00	1009	24.3	42.65	3.89	4.96	12.98	4.37	2.968
12:05	1010	24.8	40.05	3.89	4.85	13.40	4.27	3.140
12:10	1016	24.9	38.4	3.90	4.77	13.19	4.18	3.152
12:15	1016	24.1	37.2	3.93	4.71	13.40	4.13	3.245
12:20	1009	24.1	36.65	3.91	4.64	13.61	4.06	3.354
12:25	1009	24.2	36.6	3.91	4.57	13.19	3.99	3.309
12:30	1009	24.7	36.5	3.93	4.50	12.98	3.92	3.311
12:35	1011	25.1	35.6	3.91	4.45	13.40	3.87	3.460
12:40	1005	24.8	34.85	3.90	4.40	12.98	3.82	3.398
12:45	1013	24.9	34.1	3.90	4.35	13.19	3.77	3.502
12:50	1016	25.0	33.35	3.91	4.31	12.98	3.73	3.482
12:55	1011	25.1	34.15	3.92	4.29	13.40	3.70	3.618
13:00	1009	25.5	34.65	3.94	4.29	13.19	3.71	3.552
13:05	1004	25.9	34.75	3.91	4.28	13.40	3.70	3.624
13:10	1006	25.7	35.2	3.92	4.28	13.40	3.70	3.623
13:15	990	25.9	35.1	3.88	4.29	13.40	3.71	3.614
13:20	973	25.9	35.35	3.85	4.31	13.19	3.72	3.542
13:25	975	26.3	35.55	3.95	4.30	13.40	3.72	3.606
13:30	968	26.4	36.1	3.93	4.30	13.19	3.72	3.549
13:35	959	26.5	36.65	3.93	4.30	13.40	3.71	3.608
13:40	947	26.4	37.1	3.92	4.29	13.40	3.71	3.615
13:45	938	26.7	37.75	3.89	4.30	13.19	3.72	3.545
13:50	929	26.9	38.15	3.89	4.32	13.19	3.73	3.532
13:55	921	26.8	38.55	3.90	4.35	13.40	3.77	3.556
14:00	910	26.7	38.95	3.95	4.38	13.19	3.80	3.469
14:05	896	26.5	39.3	3.90	4.43	13.40	3.85	3.481
14:10	885	26.7	39.65	3.89	4.44	12.98	3.86	3.366
14:15	876	26.7	40.1	3.89	4.47	12.77	3.89	3.285
14:20	863	26.6	40.4	3.83	4.53	13.40	3.95	3.394
14:25	851	27.0	40.95	3.82	4.57	13.19	3.98	3.311

ตารางที่ ข.18 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
14:30	836	27.5	41.5	3.81	4.61	13.19	4.03	3.273
14:35	816	27.1	41.85	3.75	4.66	12.56	4.07	3.084
14:40	800	27.1	42.45	3.70	4.69	12.77	4.10	3.112
14:45	788	27.0	42.9	3.62	4.70	12.56	4.12	3.049
14:50	764	26.9	43.25	3.56	4.74	12.77	4.16	3.073
14:55	757	26.8	43.6	3.17	4.78	12.56	4.20	2.991
15:00	737	27.0	44.15	3.26	4.81	12.77	4.23	3.021
15:05	722	26.8	44.45	3.10	4.84	12.56	4.26	2.947
15:10	703	26.4	44.9	2.67	4.86	12.77	4.28	2.984
15:15	684	26.4	45.4	2.64	4.88	12.98	4.30	3.019
15:20	665	26.6	45.8	2.59	4.88	12.56	4.30	2.920
15:25	649	26.6	46.15	2.46	4.93	12.98	4.35	2.986
15:30	626	26.2	46.6	2.30	4.93	12.56	4.35	2.887
15:35	604	26.3	46.85	2.03	4.95	12.56	4.37	2.877
15:40	582	26.1	47.3	1.73	4.97	12.77	4.39	2.908
15:45	553	26.0	47.7	1.21	4.99	12.35	4.40	2.804
15:50	530	25.7	48.2	1.17	5.03	12.14	4.45	2.731
15:55	253	25.4	48.5	0.98	5.04	12.56	4.46	2.815
16:00	80	25.0	48.7	0.83	5.09	11.93	4.51	2.647
16:05	79	24.5	49	0.48	5.13	12.35	4.55	2.717
16:10	68	24.1	49.25	0.28	5.15	12.35	4.56	2.707
16:15	75	23.9	49.5	0.28	5.18	11.72	4.60	2.550
16:20	61	23.8	49.8	0.30	5.26	11.93	4.68	2.552
16:25	57	23.6	50.1	0.28	5.29	11.93	4.71	2.533
16:30	61	23.7	50.45	0.30	5.33	11.93	4.74	2.515
16:35	55	23.5	50.85	0.27	5.38	11.72	4.80	2.444
16:40	50	23.2	51.1	0.27	5.45	11.51	4.86	2.368
16:45	47	23.1	51.4	0.27	5.51	11.51	4.93	2.336
16:50	47	22.9	51.9	0.27	5.58	11.93	5.00	2.388
16:55	44	22.8	52.2	0.28	5.63	11.93	5.05	2.362
17:00	46	22.4	52.7	0.27	5.65	11.93	5.07	2.354

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในโรง
ฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ของวันที่ 24 ธันวาคม 2563

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
8:00	72	9.4	52.95	0.36	5.20	11.93	4.62	2.582
8:05	74	10.0	53.2	0.35	5.25	12.14	4.67	2.599
8:10	105	10.5	53.6	0.41	5.30	12.14	4.71	2.576
8:15	115	11.4	54.15	0.45	5.32	12.77	4.74	2.693
8:20	331	12.0	54.65	0.48	5.35	13.19	4.77	2.766
8:25	375	12.6	55	0.49	5.41	13.19	4.83	2.730
8:30	393	13.2	55.15	0.55	5.48	13.19	4.90	2.692
8:35	417	13.5	55.5	1.64	5.52	13.19	4.94	2.671
8:40	457	13.8	56.05	2.01	5.54	12.98	4.96	2.617
8:45	460	14.1	56.25	2.10	5.56	13.40	4.98	2.689
8:50	482	14.8	56.65	2.20	5.63	13.19	5.04	2.615
8:55	511	15.4	56.95	2.31	5.63	13.40	5.05	2.652
9:00	531	15.6	57.3	2.37	5.68	13.82	5.10	2.712
9:05	550	16.4	57.7	2.46	5.73	14.03	5.15	2.725
9:10	555	17.3	57.8	2.44	5.77	14.03	5.19	2.702
9:15	573	18.2	58.1	2.58	5.79	14.24	5.20	2.735
9:20	589	18.4	58.3	2.66	5.82	13.40	5.24	2.558
9:25	615	18.3	58.45	2.73	5.88	13.40	5.29	2.531
9:30	632	18.4	58.95	2.85	5.89	13.19	5.31	2.483
9:35	664	18.5	59.45	2.89	5.94	13.40	5.36	2.501
9:40	681	18.9	59.9	2.99	5.98	13.82	5.39	2.562
9:45	696	19.3	60.2	3.10	6.02	14.03	5.44	2.581
9:50	707	19.5	60.55	3.11	6.04	13.82	5.46	2.530
9:55	729	19.8	60.85	3.19	6.11	12.98	5.52	2.349
10:00	738	20.2	61.05	3.22	6.13	13.61	5.55	2.452
10:05	764	20.8	61.2	3.22	6.18	13.61	5.59	2.433
10:10	784	20.9	61.4	3.23	6.21	13.61	5.63	2.417
10:15	790	20.8	61.65	3.15	6.23	13.61	5.65	2.408

ตารางที่ ข.19 (ต่อ)

Time	I_T	T_a	T_s	$P_{PV+PV/T}$	P_{total}	Q_{Cond}	P_{Comp}	EER_{HP}
	W/m^2	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kW	kW	kW	kW	kW_{th}/kW_e
10:20	818	21.1	61.85	3.15	6.28	13.82	5.70	2.426
10:25	824	21.7	62.35	3.15	6.31	13.61	5.73	2.376
10:30	844	21.7	62.8	3.17	6.38	13.82	5.80	2.382
10:35	850	22.0	63.25	3.26	6.45	14.03	5.87	2.390
10:40	861	22.2	63.75	3.70	6.55	14.24	5.96	2.387
10:45	883	22.0	64.2	3.77	6.62	14.24	6.04	2.358
10:50	892	22.4	64.4	3.86	6.69	14.03	6.11	2.295
10:55	909	23.2	64.75	3.88	6.71	14.24	6.13	2.322
11:00	904	23.1	65	3.89	6.80	14.45	6.22	2.324



ภาคผนวก ค.
ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

- ชื่อผู้แต่ง: Saysana Chanthaseng
Sulaksana Mongkon
- ชื่อบทความ: Electrical and thermal performances comparison of glazed and unglazed photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels
- งานประชุมวิชาการ: The 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology
- สถานที่จัด: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุตสาหกรรม จังหวัดชุมพร (Online Presentation), วันที่ 28 – 29 พฤษภาคม 2563, หน้า 106-113





*King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus
17/1 Moo 6, Tambon Chumkho, Pathio District, Chumphon 86160 Thailand
Tel. +66(0) 77 591 446, +66(0) 77 591 446, website: www.pcc.kmitl.ac.th*

March 30, 2020

Dear Saysana Chanthaseng
Sulaksana Mongkon

We are very pleased to inform you that your manuscript, “ Electrical and thermal performances comparison of glazed and unglazed photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels” has been accepted to present in the 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Sciences and Technology: IAMBEST 2020) on May 28th- 29th, 2020.

In accordance with the academic committee’s decision, your paper will be in the oral presentation and to be published on the proceedings. Please make sure it conforms to the format guideline required to be published in the proceedings.

Please confirm your registration as well as attached all relevant documents (payment details) at EasyChair website before April 20th,2020. Please be noted that the conference will be conducted online. Please visit our website at <http://www.pcc.kmitl.ac.th/iambest/> where you can also follow all updating details. If there is any question or concern, please contact the IAMBEST2020 coordinator.

Yours sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Dr. Pongnak".

(Asst. Prof. Dr. Wattanachai Pongnak)
Vice President
KMTIL, Prince of Chumphon Campus



The 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business
administration, Engineering, Sciences and Technology : IAMBEST 2020



CERTIFICATE OF ATTENDANCE

This is to certify that

Saysana Chanhaseng and Sulaksana Mongkon

has successfully participated in a oral presentation.

Title of the Paper : Electrical and Thermal Performances Comparison of Glazed and
Unglazed Photovoltaic Thermal (PV/T) Hybrid Panels

held on 28-29 May 2020
at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon, Thailand

Prof. Dr. Suchatvee Suwansawat
President

Asst. Prof. Dr. Wattanachai Pongnak
General Chair

การประชุมวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติ IAMBEST 2020

The 5th National and The 1st International Conference on Informatics, Agriculture,
Management, Business administration, Engineering, Science and Technology



OM-208	An Architecture of Transportation Management System in Logistics Service Provider through Object-Process Methodology <i>Nang Khin Win Mon, Vithaya Suharitdamrong and Jaruwit Prabnasak</i>	41
OM-209	System Architecture for Warehouse Management System Using Object Process Methodology <i>Lhendup Gyeltshen, Vithaya Suharitdamrong and Jaruwit Prabnasak</i>	48
Group B : Business administration		
OB-11	A Leadership Development Guideline to Increase Work Performance Efficiency of Middle Level Manager in Electronic and Electric Appliances Industries <i>Nontawat Cheuamsamakkee</i>	56
OB-46	Impact of Dual QR Code in Interactive Application as a Digital Marketing Tool on Customer Satisfaction of Quality for the Toy Museum in Thailand <i>Nichatom Tangkuptanon and Sudaporn Sawmong</i>	64
OB-197	Reverse Vending Machines and Their Role in Reverse Logistics: Case Study of a Hypermarket Store in Thailand <i>Billel Bouchouareb, Ronnchai Tiyaratannachai and Isara Anantavrosilp</i>	72
Group E : Engineering		
OE-141	Trip Chain Characteristics of Carsharing Users in Bangkok <i>Saroch Boonsiripant, Ronnakrit Kaewpratom and Marc Lombaerde</i>	81
OE-158	Keys to Success in Construction Projects of Army Engineer Corps <i>Prapat Kotpat, Kanisa Rungjang and Pongsak Suriyavanakul</i>	89
OE-200	Signal Analysis by Discrete Wavelet Transform for Lateral Movement Inspection Data of Railway Rapid Transit from Machine Vision <i>Suparat Pomyoy, Somyot Kiatwanidvilai, Ham Sison, Poom Konghuayrob and Natchaya Yameek</i>	99
OE-31	Electrical and Thermal Performances Comparison of Glazed and Unglazed Photovoltaic Thermal (PV/T) Hybrid Panels <i>Saysana Chanthaseng and Sulaksana Mongkon</i>	106

Electrical and Thermal Performances Comparison of Glazed and Unglazed Photovoltaic Thermal (PV/T) Hybrid Panels

Saysana Chanthaseng¹ and Sulaksana Mongkon^{1*}

¹ School of renewable energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding author: Sulaksana Mongkon, e-mail address: s_mongkon@hotmail.com

Abstract

This research proposed to compare the electrical and thermal performance between glazed and unglazed of solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels. The Photovoltaic thermal is the solar photovoltaic (PV) module integrated with a flat-plate solar collector so the output of this system is an electricity and heat. The experimental study was investigated of 2 case studies such as glazed and unglazed solar PV conditions. The solar PV was polycrystalline silicon of 270 Wp. The DC pump was used to feed water from 122 liters storage tank to solar PV panel at the flow rate of 1.2 L/min·m². The thermal performance was considered following ASHRAE STANDARD 93-2003. Throughout the experiment was carried out in November 2019 at School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. Data collection started since 8:00 a.m. to 4:00 p.m. of local time in Thailand. The results showed that the thermal characteristics $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ of glazed PV/T hybrid were 0.2748 and 8.4743 W/m²·K. The thermal and electrical efficiencies were approximately 26% and 12.3 %, respectively. In the case of unglazed PV/T hybrid shown that the $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ were 0.219 and 5.8064 W/m²·K. The thermal and electrical efficiency were approximately 21% and 15.1 %, respectively. When analyzing the demonstrated results, it obviously cleared that the thermal efficiency of glazed photovoltaic thermal hybrid was higher than unglazed photovoltaic thermal hybrid, but the electrical efficiency of unglazed photovoltaic thermal hybrid was higher than glazed photovoltaic thermal hybrid.

Keywords: Solar photovoltaic thermal (PV/T), Glazed, Unglazed, Electrical efficiency, Thermal efficiency.

1. Introduction

Renewable energy is an energy generated from a natural source such as solar energy, wind energy, geothermal energy, etc. Especially, the solar energy is very interesting for electricity generation by using the solar photovoltaic (PV) module. However, the electrical conversion efficiency of commercial solar photovoltaic module is about 6-15% [1]. The major reason is the solar PV obtains heat from sun radiation, which causes electrical efficiency reduction, thus the solar PV module should be reduced heat. The affective method is to use cooling water through the back surface for panel temperature reduction [2]. As the result, heat removing from solar PV module can increase the electrical efficiency and convert into useful thermal energy such as hot air and hot water that is well known as solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid. Essentially, the solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panel can divide into two types: glazed PV/T which was produced more thermal energy, while, it generates lower electrical yield and unglazed PV/T, that has higher electrical performance with rather lower thermal performance [3].

There are many researchers to study about the electrical and thermal performance of PV/T. Wolf [4] was early researcher to analyze the performance of photovoltaic thermal system for residential heating. The results found that the overall performance was approximately 10-20%. Krauter [5] designed an integrated solar water heating system, this research proposed to removing heat from photovoltaic module and found that the electrical yield could be increased by 9-12%. Dupeyrat P. et al. [6] designed a new glazed PV/T hybrid panel and test in standard condition. The result showed that the $F_R(\tau\alpha)_c$ and $F_R U_L$ were 0.79 and 8.8 $W/m^2 \cdot K$. Srisuk and Yongcharoen [7] studied the performance of glazed PV/T hybrid panel, area of PV/T was 0.79 m^2 . The result showed that the daily electrical and thermal efficiencies were 3% and 40.9%, respectively. Kim and Kim [8] tested an unglazed PV/T hybrid panel in standard condition with outdoor testing, the solar PV was monocrystalline silicon with 1.65 m^2 of area. The experiment results showed that the $F_R(\tau\alpha)_c$ and $F_R U_L$ were 0.662 and 14.29 $W/m^2 \cdot K$, respectively, while the thermal and electrical efficiencies were 48% and 12.6%, respectively. Kongwut and Polvongsri [10] Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M. and Sachit, F. A. 2020. Theoretical study and indoor experimental validation of performance of the new photovoltaic thermal solar collector (PVT) based water system. Case studies in thermal engineering, 18: 1-13.

studied the electrical efficiency of unglazed solar PV/T system with water cooling, the experiment used solar PV that was polycrystalline silicon, area was 1.627 m^2 , the water in storage tank was 100 L and using the mass flow rate of 2 L/min for circulating the water. Found that the cooling water system could decrease the maximum panel temperature about 25.73°C and the average electrical efficiency was 15.06%. Abdullah et al. [10] demonstrated the performance of unglazed PV/T system with indoor testing, the results showed that the maximum thermal efficiency was 58.64% and the average electrical efficiency was 8.78% with the solar radiation at 1000 W/m^2 and mass flow rate at 5 L/min.

However, the most previous researches were proposed to investigate the experiment and theoretical performances of photovoltaic thermal hybrid. This research focused on the experimental performance of glazed and unglazed solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid in the weather of Chiang Mai, Thailand. Thus, this research aimed to evaluate the thermal efficiency of glazed and unglazed solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid analysis following to the ASHRAE STANDARD 93-2003 test and the electrical efficiencies were analyzed by using average values and compared the performance of obtaining results.

2. Methods and Materials

2.1 Experimental procedure

The experiment was carried out in November 2019 at School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. The experiment setting of glazed and unglazed solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels were showed in Figure 1(a) and (b). The type of photovoltaic panel was polycrystalline silicon solar cell which the peak electrical power was 270 Wp and the incident area was 1.63 m^2 . At the back of both photovoltaic modules were installed a heat receiving that made from copper sheet and copper tube. In a part of glazed PV/T hybrid panel used a glazing cover of 4 mm thickness. Figure 1(c) showed operating test of solar water heating system. In generally, the mass flow rate of water was controlled at 0.02 $L/s \cdot m^2$. The water was circulated from the 122 L of water storage tank into the back of solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panel by a DC pump. The temperature of glazed and unglazed PV/T hybrid panels would be reduced during the day. In a part of electricity production of solar photovoltaic thermal hybrid

was measured by the solar module analyzer (Model; Prova 210, accuracy $\pm 1\%$, Taiwan product). The all temperatures was measured by thermocouple Type K (Accuracy $\pm 0.05^\circ\text{C}$) and record by multi-channel data logger (Model; Lutron TM-1947SD, accuracy $\pm 0.4^\circ\text{C}$, USA product) such as the ambient temperature (T_a), inlet water temperature of PV/T (T_{fi}), outlet water temperature of PV/T (T_{fo}), hot water temperature in storage tank (T_s) and panel temperature (T_p). The solar radiation (I_T) was measured by solar power meter (Model; Lutron SPM-1116SD, accuracy $\pm 10 \text{ W/m}^2$). The mass flow rate of water was measured by flow meter (Model; Treaton Z-3001, Taiwan product).

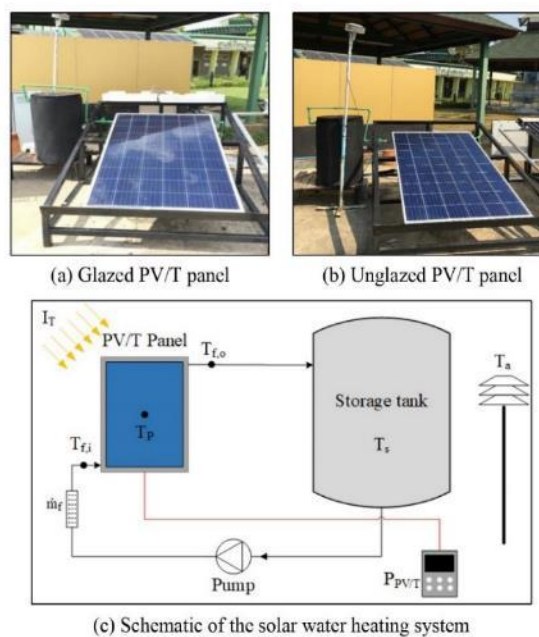


Figure 1 The solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid experiment setting.

The experiment of two type solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels was test on different days with the same weather condition and separated of two case studies. The first study was analyzing the electrical efficiency of solar photovoltaic PV/T hybrid panel along daytime from 8.00 a.m. to 4.00 p.m. The second study was analyzing the thermal efficiency according to ASHRAE STANDARD 93-2003 for $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ of PV/T finding. This experiment was demonstrated in steady state condition nearly solar noon on clear sky days which solar radiation is above $790 \pm 32 \text{ W/m}^2$, the water mass flow rate is $1.2 \text{ L/min}\cdot\text{m}^2$, the different ambient temperature varies of $\pm 1.5^\circ\text{C}$, the air velocity on the solar photovoltaic face is between 2.2-4.5 m/s and the water inlet temperature is maintained with a different within $\pm 1^\circ\text{C}$. The both of solar photovoltaic thermal PV/T hybrid panels were installed at a tilt angle of 18° facing to the south. The inlet water temperature through the panels was varied from 35, 40, 50, 55, 60 and 65°C [11], respectively by electrical heater controlling.

2.2 Analysis

The heat gain from solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid can be calculated from equation 1.

$$Q_{PV/T} = \dot{m}_f C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) = A_{PV/T} [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (1)$$

For the thermal efficiency of solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panel is an index that shows the ability to convert to the thermal energy when the panel receives the solar radiation can be determined as the following equation 2.

$$\eta_{th} = \frac{Q_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} = F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L \left(\frac{T_{f,i} - T_a}{I_T} \right) \quad (2)$$

For the electrical efficiency of solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid, it depends on the temperature of panel and the solar radiation and can be determined as the following equation 3.

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

3. Result and Discussion

3.1 The electrical performance

The experiment of glazed photovoltaic thermal hybrid in Figure 2 showed that the variations of solar radiation was in the range of 110-829 W/m², ambient temperature was in the range of 14.2-34.9°C, the panel temperature was in the range of 18.2-58.6°C and the electrical power was in the range of 11-161 W. Result was Obviously seen that the solar radiation was on the high value from 10.50 a.m. to 2.20 p.m. and it caused to increase the ambient and panel temperatures. Those values affected the electrical power generating. The maximum electrical power found that of 161 W, the total electricity during daytime was equal to 101 Wh and the average electrical efficiency was 12.3%.

For the experiment of unglazed photovoltaic thermal hybrid presents as Figure 3. It was found that the solar radiation varied in the range of 196-806 W/m², the ambient temperature was in the range of 19.7-34.6 °C, the panel temperature was in the range of 21.1-48.6 °C and the electrical power was in the range of 25-195 W. These results indicated that the solar radiation was on the high value from 10.40 a.m. to 2.00 p.m., therefore the ambient and panel temperatures were increased, too. The maximum electrical power was equal to 195 W, the total electricity during daytime was equal to 152 Wh and the average electrical efficiency was 15.1%.

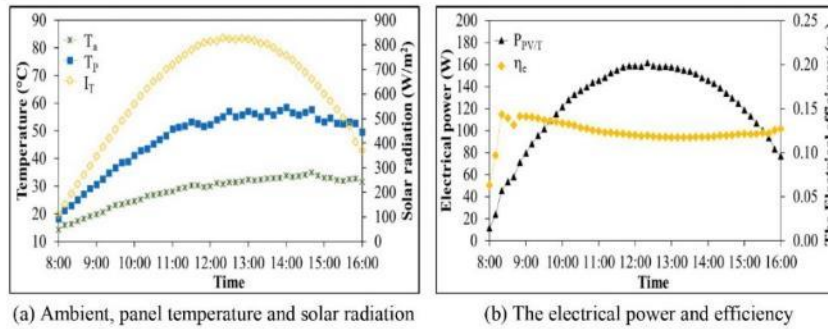


Figure 2 The parameter variations of glazed PV/T hybrid panel testing during daytime.

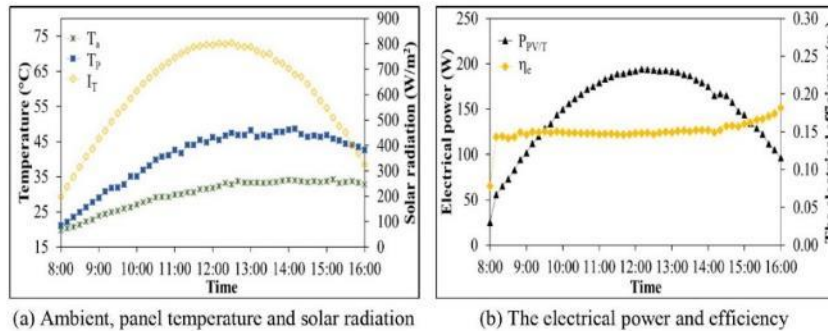


Figure 3 The parameter variations of unglazed PV/T hybrid panel testing during daytime.

3.2 Thermal performance

The thermal performance analysis of glazed and unglazed solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels, is followed ASHRAE STANDARD 93-2003 on clear sky. Figure 4 (a) and (b) shows the heat gain and the thermal efficiency of two PV/T hybrid panels were varied following the inlet water temperature. In the case of glazed PV/T hybrid panel, the heat gain from PV/T could be reached of 356 W and the thermal efficiency was equal to 26%. While the unglazed PV/T hybrid panel, the heat gain from PV/T was lower than using glazed PV/T hybrid of 290 W and the thermal efficiency was 21%, respectively. However, all parameters from testing were analyzed by linear regression analysis for the thermal efficiency finding. Figure 5 shows that the thermal efficiency could be demonstrated from equation 2 that the linear equation was $\eta_{th} = 0.2748 - 8.4743 (T_{ci} - T_a)/I_T$ and $\eta_{th} = 0.219 - 5.8064 (T_{ci} - T_a)/I_T$. When considering the thermal efficiencies of glazed and unglazed case study at the Y-axis intersection found that $F_R(\tau\alpha)_e$ was 0.2748 and 0.219, respectively while the heat loss coefficient from the equation slope showed as $F_R U_L$ which were 8.4743 W/m²·K and 5.8064 W/m²·K, respectively.

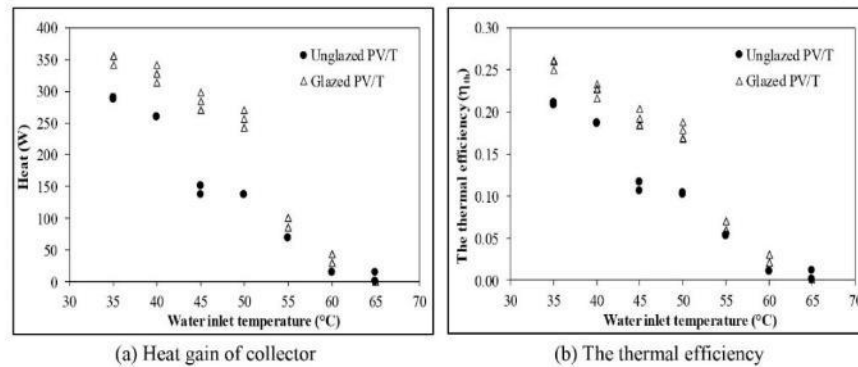


Figure 4 The variation of heat and thermal efficiency according to ASHRAE STANDARD 93-2003.

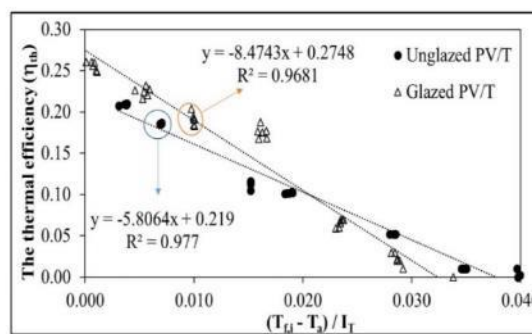


Figure 5 The regression analysis of thermal performance of glazed and unglazed PV/T hybrid.

3.3 Comparison between glazed and unglazed PV/T

The experimental results of glazed and unglazed PV/T hybrid panels could be discussed by the variation of panel temperature increasing. The panel temperature of glazed PV/T hybrid would be higher than unglazed PV/T hybrid that due to the storing heat of panel and found that the glass covered reduced surrounding cooling therefore the electrical efficiency and total electricity of glazed PV/T hybrid was also lower than unglazed PV/T hybrid, but the thermal efficiency of glazed PV/T hybrid was better than unglazed PV/T hybrid at the same testing condition.

4. Conclusion

This research studied the electrical and thermal performance of glazed and unglazed solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid panels. The results showed that $F_R(\tau\alpha)_e$ of glazed and unglazed photovoltaic thermal hybrid were 0.2748 and 0.219, the $F_R U_L$ were 8.4743 and 5.8064 $W/m^2 \cdot K$,

respectively. However, the thermal efficiency was approximately 26% and 21%. For the electrical analysis, the average electrical efficiency was equal to 12.3% and 15.1%, respectively. When comparing the demonstrated results, it was clearly that the thermal efficiency of glazed solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid was higher than unglazed solar photovoltaic thermal hybrid in the opposite the electrical efficiency of unglazed type was higher than glazed type wherewith more accumulating heat inside the panel.

5. Acknowledgements

The authors would like to thank the staffs at school of renewable energy, Maejo University for supporting the scholarship from the production and development potential graduate of renewable energy in ASEAN countries in the graduate. We would like to thank Agricultural Research Development Agency (Public Organization) for supporting the research fund.

Nomenclature			
$A_{PV/T}$	Area of PV/T hybrid panel (m^2)	T_{Ei}	Inlet water temperature ($^{\circ}C$)
T_a	Ambient temperature ($^{\circ}C$)	T_{Eo}	Outlet water temperature ($^{\circ}C$)
T_p	Panel temperature ($^{\circ}C$)	C_{pf}	Specific heat capacity of water ($J/kg \cdot K$)
\dot{m}_f	Flow rate of water (L/s)	$Q_{PV/T}$	Heat gain of PV/T hybrid panel (W)
I_T	Solar radiation (W/m^2)	$P_{PV/T}$	Electrical power of PV/T hybrid panel (W)
F_R	Heat removal factor	$(\tau\alpha)_e$	The transmittance-absorptance product
U_L	Overall heat loss ($W/m^2 \cdot K$)	η_{th}	The thermal efficiency
η_e	The electrical efficiency		

6. References

- [1] He, W., Chow, T. T., Ji, J., Lu, J., Pei, G. and Chan, L.s. 2006. Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water. *Applied Energy*. 83: 199-210.
- [2] Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P. and Rehman, S. 2013. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*. 59: 445-453.
- [3] Kim, J. H. and Kim, J. T. 2012. Comparison of electrical and thermal performances of glazed and unglazed PVT Collectors. *International journal of photoenergy*. 1-7.
- [4] Wolf, M. 1976. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences, *Energy conversion*. 16: 79-90.
- [5] Krauter, S. C. W. 2004. Development of an integrated solar home system. *Solar energy materials and solar cells*. 82: 119-130.
- [6] Dupeyrat, P., Ménézo, C., Rommel, M. and Henning, H. M. 2011. Efficient single glazed flat plate photovoltaic-thermal hybrid collector for domestic hot water system. *Solar energy*. 85: 1457-1468.

- [7] Srisuk, B. and Yongchareon, W. 2013. Performance of an electricity and thermal system using PV/T collector. *Journal of energy research*. 2: 57-70.
- [8] Kim, J. H. and Kim, J. T. 2012. The experimental performance of an unglazed PVT collector with two difference absorber types. *International journal of photoenergy*. 1-7.
- [9] Kongwut, N. and Polvongsri, S. 2018. Performance enhancement of solar photovoltaic/thermal system by using water cooling. *The 3rd KU SRC Annual conference*. 272-281.
- [10] Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M. and Sachit, F. A. 2020. Theoretical study and indoor experimental validation of performance of the new photovoltaic thermal solar collector (PVT) based water system. *Case studies in thermal engineering*. 18: 1-13.
- [11] ASHRAE Standard 93–2003. 2003. *Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors*, Atlanta, GA, USA.

การเผยแพร่ผลงานโดยการตีพิมพ์ในวารสาร

- ชื่อผู้แต่ง: Saysana Chanthaseng
สุลักษณ์ มงคล
- ชื่อบทความ: การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดต้นทุนด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์
- ชื่อวารสาร: วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ปีที่ตีพิมพ์: ปี 2021 ฉบับที่ 28 เล่มที่ 1 (มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564)





วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ๕๐๒๐๐
 โทรศัพท์ (๐๕๓) ๙๔๔๑๗๖-๗ โทรสาร (๐๕๓) ๒๑๗๒๘๗
 Engineering Journal Chiang Mai University, Thailand.
 Tel. +66(53) 944176-7 Fax. +66(53) 217287

ที่ อา ๘๓๙๓(๑๔).๑(๕)/๖๕๐

๒๕ มีนาคม ๒๕๖๔

เรื่อง ตอบรับบทความ

เรียน คุณ Saysana Chanthaseng และ คุณสุลักษณ์ มงคล

ตามที่ ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง “การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดต้นทุนด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์ (Experimental performance of hot water production by solar PV/T boosted heat pump system for electric power costs reduction in a slaughterhouse)” เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นั้น

บรรณาธิการได้พิจารณาแล้วและมีความเห็นว่า บทความของท่านมีความเหมาะสมที่จะลงตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ ๒๘ เล่มที่ ๑ มกราคม – เมษายน ๒๕๖๔ ทั้งนี้ หากการพิมพ์วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นที่เรียบร้อย จะได้นำส่งวารสารดังกล่าวให้ท่านต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

20. รับ 13 ก.พ. 64 แก้ไข.....

**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 สุลักษณ์ มงคล*

Saysana Chanthaseng and Sulaksana Mongkon*

หน่วยงานวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 50290 เชียงใหม่

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

Maejo University, 50290, Thailand

*E-mail: s_mongkon@hotmail.com , Telephone Number 0819074067

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ ใช้ปั๊มความร้อนขนาดประมาณ 17.8 kW_{th} ใช้ R134a เป็นสารทำงาน ให้ความร้อนเสริมในส่วนที่ระเหยจากน้ำร้อนที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 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) มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) เฉลี่ย 3.17 kW_{th}/kW_e สูงกว่าปั๊มความร้อนที่ไม่มีการให้ความร้อนเสริม (Heat pump) ที่มีค่า EER เฉลี่ย 2.79 kW_{th}/kW_e และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ 59.28% ในด้านการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการและชุดขนสุกร สามารถลดค่า SEC จากเดิม 7.27 kWh/ตัว ลดเหลือ 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_{hp}, 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_p, amounts 4 panels. The heat pump was powered by 14 panels of the solar photovoltaic panel which each peak power was 370 W_s 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_{hp}/kW_e which was higher than the heat pump without solar PV/T with an average EER was 2.79 kW_{hp}/kW_e. 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

ปัจจุบันการผลิตน้ำร้อนส่วนมากนิยมใช้ขดลวดความร้อนเนื่องจากหาง่ายและราคาถูกแต่ต้องแลกมาซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง ในกระบวนการสกนและขูดขนสุกรของโรงฆ่าสัตว์ทั่วไปและที่โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 27 kW เพื่อผลิตน้ำร้อนปริมาณ 2,500 ลิตรต่อวันที่อุณหภูมิประมาณ 60-64°C สำหรับสกนสุกรประมาณ 40 ตัวต่อวัน จากการเก็บข้อมูลพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้า 117.53 kWh/รอบการผลิต และข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้าพบว่าปี พ.ศ. 2561 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 108,894 kWh/year คิดเป็นค่าใช้จ่าย 493,581.60 Baht/year จำนวนสุกรสกนในกระบวนการ 15,027 ตัว/year คิดเป็นค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร (SEC) 7.27 kWh/ตัว หรือ 33.15 Baht/ตัว ในขณะที่มีการเรียกเก็บเฉพาะในส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 40 Baht/ตัว แนวทางการลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์มีหลากหลายแนวทาง เช่น การ

ใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ [1] หรือเทคโนโลยีที่นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้ามาติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้าไปด้านหลังแผงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผงไปสู่ น้ำทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีอุณหภูมิแผงลดลงช่วยให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [2] สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ [3] ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวเรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) นอกจากนี้ยังมีการใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อนที่พบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าขดลวดความร้อนประมาณ 2-3 เท่า [4] และยังมีหลายงานวิจัยที่มีการนำเอาปั๊มความร้อนและแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มาทำงานร่วมกันเรียกว่า ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและ

น้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวถูกพัฒนา มาจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสี อาทิตย์ ที่มีรูปแบบการทำงานของระบบก็คือใช้ความร้อนที่ ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊ม ความร้อน และเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ปั๊มความร้อนอีก ด้วย ดังงานวิจัยของ วงศ์สุวรรณ และ ทนงเกียรติ [5] Bakirdi and Yuksel [6] Burkner and Riffer [7] เป็นต้น โดยงานวิจัยของ วิวัฒน์ และทนงเกียรติ [8] ได้ทำการใช้ปั๊ม ความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโพลีพรอพิลีน ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 40-50°C แทนการใช้ ผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ปั๊มความร้อนขนาด 12 kW ใช้สาร ทำงาน R-22 พบว่าระบบดังกล่าวใช้กำลังไฟฟ้าลดลง 50% เทียบกับการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ของระบบทำน้ำร้อน (COP_{hp}) มีค่าประมาณ 2.5-5 Anderson et al [9] ทดสอบปั๊มความร้อนที่ใช้แหล่งความ ร้อนจากอากาศ โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่มีกระจก เป็นเครื่องระเหย พบว่าในวันที่สภาพอากาศแจ่มใส ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบอยู่ระหว่าง 5-7 Chaichana et al [10] ได้จำลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊ม ความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำนวน 1-5 แผง ปริมาณน้ำใน ถังเก็บน้ำร้อนคือ 300-1,200 L ปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน แบบผสม R22 20% R124 57% และ R152a 23% เป็น สารทำงาน พบว่าระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุดที่ 60°C และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 4.1-4.6 Wang et al [11] ทดสอบปั๊มความร้อนที่เสริมด้วยความร้อนจาก สองแหล่งคือ อุณหภูมิแวดล้อมและแผงผลิตไฟฟ้าและความ ร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าปั๊มความร้อนมีค่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยที่ 4.08 ในด้านการลดพลังงาน ไฟฟ้ามีงานวิจัยของ ณัฐพงศ์ และโสภิตสุดา [12] ที่ใช้แผง เซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาติดตั้งบนหลังคา 10 อาคารจาก ทั้งหมด 183 อาคารในมหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์เพื่อลด ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก ระบบสายส่งพื้นฐานได้ถึงประมาณ 10.97%

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นส่วนมากได้ กล่าวถึงการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนในการผลิต

น้ำร้อน และการใช้เทคโนโลยีทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าช่วยในการลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น ผู้วิจัย จึงมีแนวคิดที่จะใช้ปั๊มความร้อนเข้ามาผลิตน้ำร้อนแทนที่ การใช้ผลิตความร้อนร่วมกับการใช้แผง Solar PV/T เข้ามาช่วยเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อน และใช้ระบบ เซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาช่วยในการลดต้นทุนทางด้าน พลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์เทศบาล ตำบลไชยปราการ ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า “ระบบผลิตน้ำร้อน ด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump)” โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้มีคือ การวิเคราะห์ สมรรถนะของระบบ Solar PV/T boosted heat pump และการลดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าของกระบวนการ ผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถหาได้ดังนี้

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

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง เซลล์แสงอาทิตย์, P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ (W), I_T คาร์รังสีอาทิตย์ (W/m²) และ A_{PV} คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

2.2 แผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้ดังนี้

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

ประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ สามารถหาได้ดังนี้

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

เมื่อ η_{PVT} คือ ประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, Q_{PVT} คือ การถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (W), P_{PVT} คือ กำลังไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (W), \dot{m} คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง (kg/s), C_{pf} คือค่าความจุความร้อนของน้ำ (J/kg·K), T_{ci} อุณหภูมิน้ำเข้าแผง (°C), T_{co} อุณหภูมิน้ำออกแผง (°C) และ A_{PVT} คือ พื้นที่แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (m²)

2.3 บีบความร้อน

เครื่องควบแน่น (Condenser) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

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

เนื่องจากระบบบีบความร้อนใช้น้ำเป็นตัวถ่ายเทความร้อน จึงใช้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของบีบความร้อน (Energy Efficiency Ratio; EER) ที่เป็นอัตราส่วนของถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ EER_{HP} คือ ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของบีบความร้อน (kW_e/kW_e), Q_{Cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่เครื่องควบแน่น (kW_{th}), P_{Comp} คือ ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (kW_e)

2.4 ประสิทธิภาพรวมระบบ

อัตราความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนในกรณีที่ตั้งถังเก็บน้ำร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้นและไม่มีกาน้ำร้อนไปใช้งานสามารถหาได้จาก

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

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ไฟฟ้าในระบบผลิตน้ำร้อนด้วยบีบความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้จาก

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

ประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยบีบความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้ดังนี้

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

2.5 ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) คือค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 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 ซึ่งขนาดและจำนวนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ได้จากข้อมูลเบื้องต้นของโรงฆ่าสัตว์

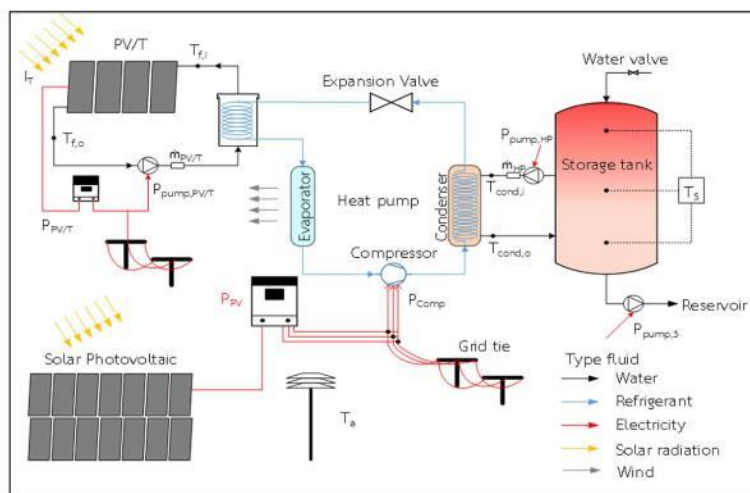
3.2 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากน้ำร้อนที่ผลิตได้จากแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 4 แผงที่ต่อขนานกัน จะถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานที่ออกจากวาล์วลดความดันของปั๊มความร้อน (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 ชุดมาต่อขนานกัน เพื่อผลิตไฟฟ้าและป้อนให้กับเครื่องอัดไอและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ โดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอที่จะมีการดึงไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานเข้ามาช่วยในการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบดังกล่าว

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ทดลอง	จำนวน	ข้อมูลเทคนิค
ปั๊มความร้อน	1 เครื่อง	17.8 kW _{th} , 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 _m = 39.5 V, I _m = 9.28 A V _{oc} = 48.5 V, I _{sc} = 9.61 A ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 Wp
ถังเก็บน้ำร้อน	1 ถัง	ขนาด 3,000 L
อินเวอร์เตอร์	2 เครื่อง	1. สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Invtr รุ่น iMars BG5KTR สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5,000 W 2. สำหรับระบบ Solar PV/T ยี่ห้อ Invtr รุ่น iMars MG1KSTL สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1,500 W
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	1 เครื่อง	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.54 m ²
ปั๊มเวียนน้ำผ่านแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	1 เครื่อง	อัตราการไหลสูงสุด 13 L/min ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 93 W
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 ทำการทดสอบการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อนทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ 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 ควบคุมอัตราการไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไป

แลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนที่ 30 L/min ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 3,000 L (ปริมาณน้ำในถัง 2,500 L) และกรณีที่ 2 ทดสอบปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) ทำการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 65°C ใช้อัตราการไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนที่ 30 L/min ควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 4 แผง ต่อขนาดกันที่ 8.2 L/min ปริมาณน้ำในถังที่ใช้ในการทดสอบคือ 2,500 L เพื่อทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

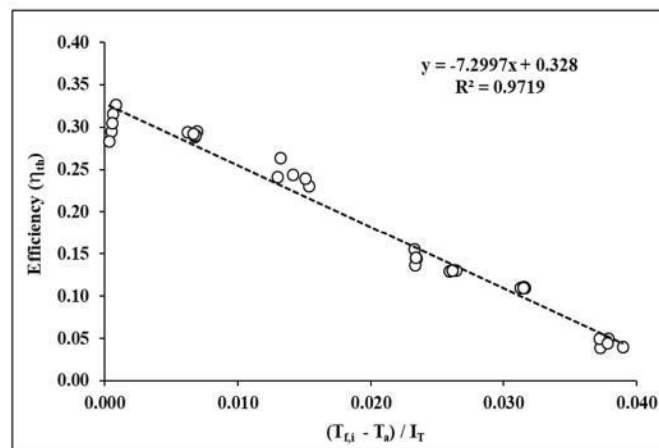
ส่วนที่ 3 ทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump ที่ทำงานตามการใช้งานจริงซึ่งทางโรงฆ่าสัตว์มีความต้องการใช้น้ำร้อน 2,500 L ที่อุณหภูมิประมาณ 65 °C ในช่วงเวลา 12.30 น.(เริ่มกระบวนการลวกและชุดขนสุก เดิมมีการผลิตน้ำร้อนด้วยชุดผลิตไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 6.00 – 10.30 น.) ควบคุมอัตรา

การไหลของน้ำระหว่างถังเก็บน้ำร้อนที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนที่ 30 L/min อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ขนาด 295 Wp จำนวน 4 แผงต่อขนาดพื้นที่ 8.2 L/min และใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 370 Wp จำนวน 14 แผง ผลิตไฟฟ้าป้อนให้แก่ปั๊มความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆในระบบร่วมกับไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน โดยผลการทดสอบในส่วนนี้จะวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตและพลังงานไฟฟ้าที่สามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม

4. ผลการศึกษา

4.1 สมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

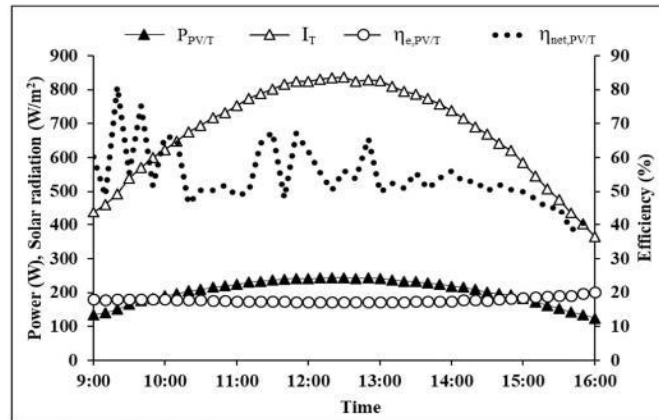
ส่วนที่ 1 ทำการทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อนทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงตามมาตรฐานการทดสอบที่ $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิที่เข้าแผง Solar PV/T สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงลดลงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น สมรรถนะของแผง Solar PV/T มีค่า $F_{\text{in}}(\text{TC})_{\text{p}} = 0.328$ และค่า $F_{\text{in}}U_{\text{p}} = 7.2997 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ [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 ตลอดทั้งวันพบว่า มีค่าเฉลี่ย 53.3%



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T

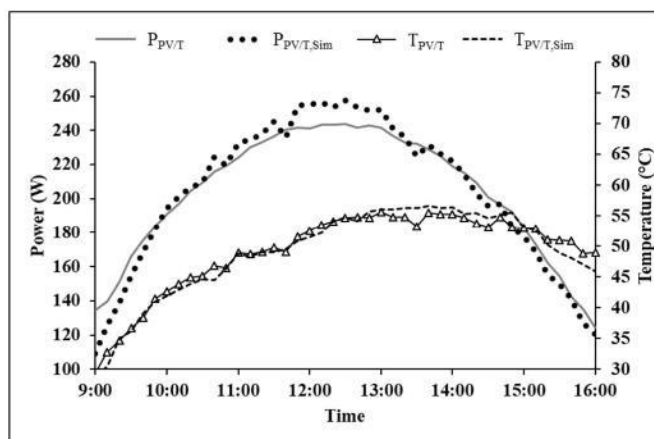
สมรรถนะของแผง Solar PV/T ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบระบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเก็บข้อมูลตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งอุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิแผง ค่ารังสีอาทิตย์ เพื่อนำมาสร้างสมการในการออกแบบขนาดของระบบที่เหมาะสม รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4 โดยจะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง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

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

$$P_{PV/T,Sim} = 0.82707 \times (T_a^{-0.47834}) \times (T_{fj}^{-0.47705}) \times (T_{PV/T}^{-1.3396}) \quad (11)$$

โดยอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงที่ 0.02 kg/s·m² และอุณหภูมิที่ใช้งานได้อยู่ระหว่าง 25 – 65°C.

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



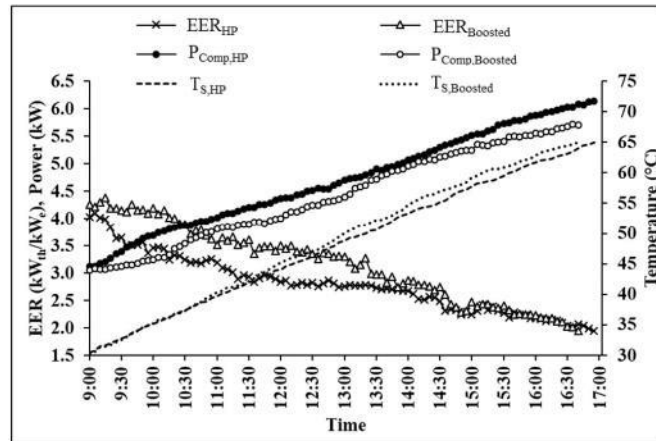
รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผงที่ได้จากการทดลองแผง Solar PV/T และจากการทำนาย

4.2 สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ในส่วนของ 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 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนสูงขึ้นส่งผลให้การระบายความร้อนของสารทำงานในส่วนระบายความร้อนลดลง กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดจึงมีค่าสูงขึ้นไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองระบบพบว่า ระบบ Solar PV/T boosted heat pump กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอจะมีค่าระหว่าง 3.05 - 5.71 kW คิดเป็นเฉลี่ย 4.40 kW ทำให้มีค่า EER สูงสุด 4.37 kW_e/kW_c คิดเป็นค่าเฉลี่ยคือ 3.17 kW_e/kW_c ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีปั๊มความร้อนที่ไม่มีระบบ Solar PV/T ที่มีค่า EER สูงสุดที่ 4.09 kW_e/kW_c คิดเป็นค่าเฉลี่ยได้ 2.79 kW_e/kW_c ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอมีค่า 3.12 - 6.13 kW คิดเป็นค่าเฉลี่ย 4.71 kW ดังนั้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของระบบ Solar PV/T boosted heat pump สูงกว่าระบบ Heat pump เนื่องจาก การให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนเสริมในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนช่วยให้สารทำงานเดือดเป็นไอที่มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอต้องใช้น้อยลงนั่นเอง



รูปที่ 5 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

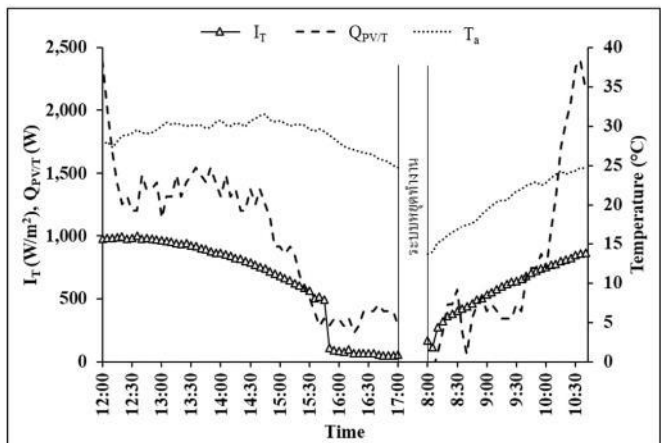
4.3 สมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อน Solar PV/T boosted heat pump ที่ใช้งานจริง

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 จนถึงเวลาประมาณ 11:00 น. จนได้อุณหภูมิน้ำร้อน 65°C จากนั้นจึงส่งน้ำร้อนที่ผลิตได้ไปยังเครื่องลวกและชุดชงโดยใช้เวลาประมาณ 40 นาที ซึ่งระบบจะสามารถกลับมาผลิตน้ำร้อนต่อได้ในเวลาไม่เกิน 12:00 น.จากการทดสอบในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าในวันที่ทดสอบมีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดที่ 998 W/m² ในเวลา 12.35 น. อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย

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 เมื่อระบบเริ่มทำงานพบว่าช่วงแรกความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้จะมีสูงสุดประมาณ 14.44 kW และจะลดลงเรื่อยๆตามอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อเวลา 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 ได้ อุณหภูมิ 65.5°C รวมใช้เวลาทั้งสิ้น 7 h 40 min หรือคิดเป็นค่าความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อนผลิตได้ใน 1 รอบการผลิต 367.4 MJ/รอบ จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดยมีค่าตั้งแต่ 3.55-5.67 kW

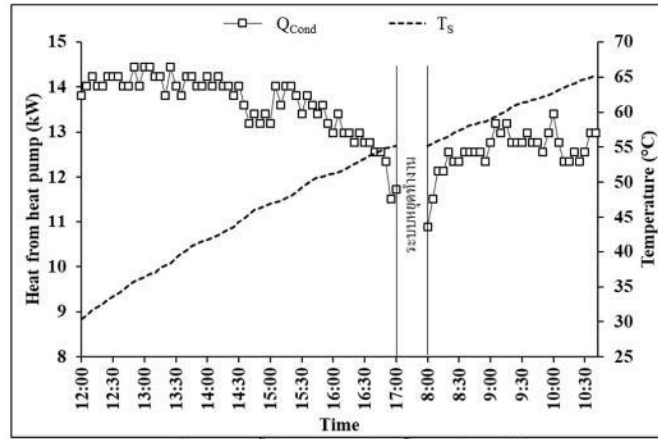
หรือคิดเป็นพลังงานเชิงความร้อน 72.37 MJ/รอบ ในขณะที่ความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์คิดเป็น 741.93 MJ/รอบ ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เริ่มต้นมีค่าสูงสุดที่ 3.99 kW_{th}/kW_e และลดลงต่ำสุด 2.23 kW_{th}/kW_e หรือเฉลี่ยตลอดการทำงาน 2.97 kW_{th}/kW_e หรือคิดเป็นประสิทธิภาพรวมของระบบ Solar PV/T boosted heat pump (η_{SP}) 59.28%



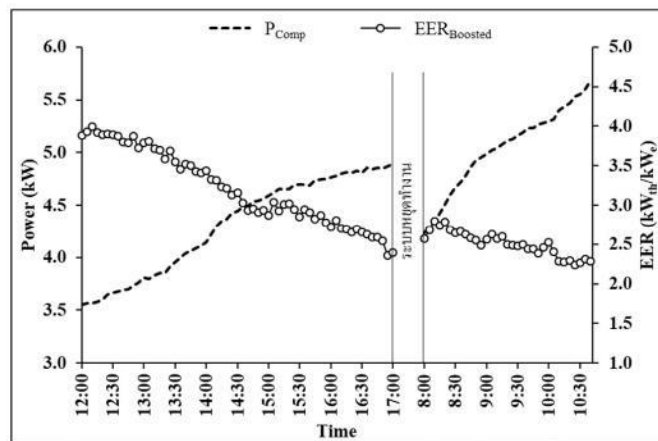
รูปที่ 6 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และความร้อนที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T

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

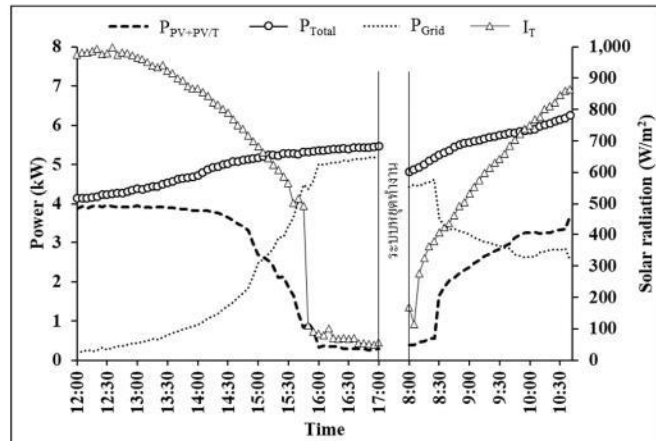
จากทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ Solar PV/T ในทุกช่วงเวลาของการทำงาน โดยมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด 3.98 kW และต่ำสุด 0.25 kW ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ารังสีอาทิตย์ โดยตลอดทั้งรอบการผลิตคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 20.10 kWh/รอบการผลิต ดังนั้นระบบนี้จึงต้องการไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานพื้นฐานเข้ามาช่วย 20.22 kWh/รอบการผลิต โดยเฉพาะในช่วงที่ค่ารังสีอาทิตย์ต่ำระบบจะใช้ไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานพื้นฐานมากขึ้น



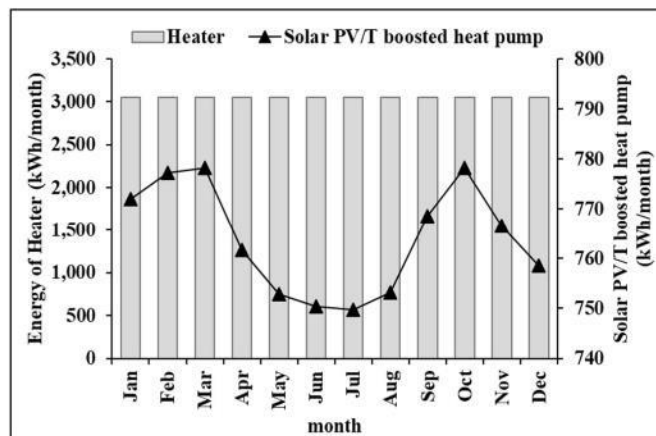
รูปที่ 7 อุณหภูมิหน้าในถัง และความร้อนที่ป้อนความร้อนผลิตได้



รูปที่ 8 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบสายส่งพื้นฐานและผลิตได้ของระบบ Solar PV/T boosted heat pump



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

จากการทดลองทั้งหมดและการวิเคราะห์พบว่า เดิมทางโรงพยาบาลตำบลตำบลไชยปราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า 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
ผลประโยชน์ได้ (kWh/year)	27,501.92 (ลดลง 75%)	
ผลประโยชน์ได้ (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) เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการลากและชุดขนสุกรของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ โดยสามารถสรุปผลแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ในการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_p(TC)_0 = 0.328$ และค่า $F_{p,PL} = 7.2997 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ย 17.4% และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ตลอดทั้งวันพบว่ามีค่าเฉลี่ย 53.3% นอกจากนี้สามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบติดตั้งระบบใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์ต่อไป

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

ในส่วนที่ 3 ผลทดสอบการใช้งานจริงของระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T boosted heat pump) พบว่าค่า EER มีค่าเฉลี่ยที่ 2.97 $\text{kWh}_e/\text{kWh}_t$ 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
คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน และขอขอบคุณ
โรงฟาร์มสัตว์เทศบาลตำบลไชยปราการ ที่เอื้อให้ข้อมูล
ในการศึกษาครั้งนี้

7. รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
EER	ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน	KW_e/KW_s
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	KW
P	กำลังไฟฟ้า	KW
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
E	พลังงานไฟฟ้า	kWh
A	พื้นที่	m^2
I	ค่ารังสีอาทิตย์	W/m^2
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}C$
Δt	ผลต่างของเวลา	s
M	ปริมาณของน้ำ	kg
Cp	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	$kJ/kg\cdot K$
\dot{m}	อัตราการไหลของน้ำ	kg/s
SEC	ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ	$KWh/ตัว$
ตัวกรีก	ความหมาย	หน่วย
η	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] สราวุธ พลวงษ์ศรี และศุภลักษณ์ มงคล (2560). การออกแบบและศึกษาสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับโรงฆ่าสัตว์ กรณีศึกษาโรงฆ่าสัตว์เทศบาลชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์, *การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุณหภูมิต่ำด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16*. วันที่ 23-24 กุมภาพันธ์ ณ ศูนย์ฝึกอบรมธนาคารไทยพาณิชย์ จ.เชียงใหม่
- [2] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Ibrahim, A. and Kazem, H.A. (2014). Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy Conversion and Management*, vol. 78, December 2013, pp. 641–651.
- [3] สราวุธ พลวงษ์ศรี และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2556). การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพเสริมโดยการใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์, *วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี*, 6(2), ธันวาคม 2556, หน้า 106–120.
- [4] กระทรงพลังงาน (2552). เทคโนโลยีการใช้ปั๊มความร้อนสำหรับการทำความร้อน, กรุงเทพฯ:โครงการวิจัยเทคโนโลยีเชิงลึกเพื่อการอนุรักษ์พลังงานกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [5] วงศ์สวรรค์ จันทะบูลย์ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2550). การทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์แผ่นเรียบไม่มีกระแสจกปิดเป็นอิวาเปอร์เตอร์, *การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุณหภูมิต่ำด้านความร้อน (ครั้งที่6)*, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่
- [6] Bakirci, K. and Yuksel, B. (2011). Experimental thermal performance of a solar source heat-pump system for residential heating in cold climate region, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31(8-9), June 2011, pp. 1508–1518.
- [7] Burkler, M.S. and Riffer, S.B. (2016). Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, March 2016, pp. 399–413.
- [8] วิวัฒน์ มูลอ้าย และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2552). ศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนในโรงพยาบาลด้วยปั๊มความร้อนเสริมแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีแบบโพสิโทรฟิซีน, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 16(3), ธันวาคม 2552, หน้า 23–33.
- [9] Anderson, T.N. and Morrison, G.L. (2007). Effect of load pattern on solar-assisted heat pump water heater performance, *Solar Energy*, vol. 81(11), November 2007, pp. 1386–1395.

- [10] Chaichana, C., Kiatsirirot, T. and Nuntaphan, A. (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*, vol. 31(5), July 2010, pp. 419–429.
- [11] Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Sun, C., Deng, Y. and Tong, J. (2015). Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system, *Energy and Buildings*, vol. 108, December 2015, pp. 175–184.
- [12] ณัฐพงษ์ สุวรรณสิงห์ และ โสภิตสุดา ทองโสภิต (2558). การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, *วารสารวิจัยพลังงาน*, 12(2), หน้า 59-74.
- [13] สราวุธ พลวงษ์ศรี (2557). เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [14] Wanchupela, N. and Polvongsri, S. (2020). The comparison study of performance between two different types of glazed solar photovoltaic thermal panels, paper presented in *The 5th National Conference and the 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology*, Chumphon, Thailand.

บรรณานุกรม

- Abou-Ziyan H. Z., Ahmed M. F., Metwally M. N. และ Abd El-Hameed H. M. 1997. Solar-assisted R22 and R134a heat pump systems for low-temperature applications. **Applied Thermal Engineering**,17(5), 455-469.
- Alternative energy tutorials. 2015. **Evacuated tube collector**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html>, เข้าถึงเมื่อ 17 กันยายน 2562
- Chaichana Chatchawan, Kiatsiriroat Tanongkiat และ Nuntaphan Atipoang. 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.
- Culprit design. 2018. **PV-Thermal**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://zerocarbonsolution.co.uk/technology/pv-thermal/>, เข้าถึงเมื่อ 10 กรกฎาคม 2562
- Fudholi Ahmad, Sopian Kamaruzzaman, Yazdi Mohammad H., Ruslan Mohd Hafidz, Ibrahim Adnan และ Kazem Hussein A. 2014. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. **Energy Conversion and Management**,78(641-651).
- Hawlder M. N. A., Chou S. K. และ Ullah M. Z. 2001. The performance of a solar assisted heat pump water heating system. **Applied Thermal Engineering**,21(10), 1049-1065.
- Huang B. J., Lee J. P. และ Chyng J. P. 2005. Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater. **Solar Energy**,78(3), 375-381.
- Ji Jie, Pei Gang, Chow Tin-tai, Liu Keliang, He Hanfeng, Lu Jianping และ Han Chongwei. 2008. Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. **Solar Energy**,82(1), 43-52.
- Northern lights solar solutions. 2018. **Solar flat plate collector**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://nlsolarheating.solartubs.com/?main_page=product_info&products_id=296, เข้าถึงเมื่อ 28 มิถุนายน 2562

- Nuntaphan Atipoang, Chansena Choosak และKiatsiriroat Tanongkiat. 2009. Performance analysis of solar water heater combined with heat pump using refrigerant mixture. **Applied Energy**,86(5), 748-756.
- Rebirth Group. 2555. ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://sites.google.com/site/rebirthgroupen/prapheth-khxng-sell-saeng-xathity>
- แบงค์ ศรีสุข และวิทยา ยงเจริญ. 2556. สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบรับความร้อน. **Journal of Energy Research**, Vol 10 (No 2), 57-70.
- กรมปศุสัตว์. 2558. กรมปศุสัตว์ พ.ศ. 2561-2565. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dld.go.th/th/images/stories/about_us/organization_chart/2561/strategy2561_2565.pdf, เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2562
- กระทรวงพลังงาน. 2548. พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตน้ำร้อน (ระบบผสมผสานกับความร้อนเหลือทิ้ง). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.tsus.co.th/download/d4.pdf>, เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2562
- กระทรวงพลังงาน. 2560. แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ประเทศไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/article_attach/developed_solarmap60%20-%20Copy.pdf, เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2562
- กาญจนศิษฐ์ เวชการ. 2560. การวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำ พิกัด 50kWp. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2554. เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www4.egat.co.th/re/solarcell/solarcell_technology.htm, เข้าถึงเมื่อ 25 มิถุนายน 2562
- ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และโสภิตสุดา ทองโสภิต. 2558. การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วารสารวิจัยพลังงาน, Vol 12 (No 2), 59-74.
- ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2537. การออกแบบระบบพลังงานความร้อน. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและ วัสดุ; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธนาคารกรุงไทย. 2564. อัตราต่างๆ และค่าธรรมเนียม. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://krungthai.com/th/rates> (09 มีนาคม 2564).
- รัฐพร ไชยญาติ. 2562. เทคโนโลยีพลังงานทดแทนด้านความร้อน. วิทยาลัยพลังงานทดแทน,

มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

บริษัท Leonics. 2558. ความรู้เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php, เข้าถึงเมื่อ 25 มิถุนายน 2562

วงศ์สุวรรณค์ จันทะบูลย์ และทงนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2550. การทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์แผ่นเรียบไม่มีกระจกปิดเป็นอิวาปอเรเตอร์. การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน(ครั้งที่6)132-137.

วิศิษฐ์ ชูประเสริฐ และจิตติน แดงเที่ยง. 2555. การนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบทำน้ำเย็นร่วมกับการใช้ฮีตปั๊มในการผลิตน้ำร้อน. *Journal of Energy Research*, Vol 9 (No 2), 48-59.

สิริชัย ปัญญาสมาธิ. 2548. การปรับปรุงประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	Saysana Chanthaseng
เกิดเมื่อ	01 December 1996
ประวัติการศึกษา	2011 - 2014 Salakham high school, Hadxayfong District, Vientiane, Laos. 2014 - 2018 Bachelor of Engineering Program in Industrial Engineering, National University of Laos.

