

การเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน
แสงอาทิตย์



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2565

การเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน
แสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
สำนักบริหารและพัฒนาระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน
แสงอาทิตย์

Piyaphone Mungkhaly

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรณ นิธิอุศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ชื่อผู้เขียน	Mr. Piyaphone Mungkhaly
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนขนาด 0.5 kW ที่ใช้สารทำงานเป็น R-22 และใช้อากาศไปแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนทำระเหยเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนจ่ายให้กับส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM 2.0 LPM 2.25 LPM และ 3.0 LPM และควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้ส่วนทำระเหยที่อุณหภูมิ 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C และ 65 °C จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนเข้าส่วนทำระเหย 2.0 LPM และอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้ส่วนทำระเหย 45 °C ให้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) 3.41 kW_{th}/kW_e ซึ่งมีค่าสูงกว่าปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้อากาศจ่ายให้ส่วนทำระเหยที่มีค่า EER อยู่ที่ 2.37 kW_{th}/kW_e

ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ขนาด 330 W ที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำแบบท่อทองแดงและแบบกล่องน้ำด้านหลังแผง จากการศึกษาทดสอบสมรรถนะด้านความร้อนตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 พบว่า การติดตั้งกล่องน้ำด้านหลังแผงมีสมรรถนะทางด้านความร้อนมีค่า $F_R(T \alpha)_e$ และค่า F_{RUL} เท่ากับ 0.4018 และ 10.466 W/m²×°C ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่าเฉลี่ย 44.22% ซึ่งสูงกว่ากรณีติดตั้งท่อทองแดงด้านหลังแผง Solar PV/T

ส่วนที่ 3 หลังการติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) แล้วทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงที่เหมาะสมในการใช้งานจริง ทำการเก็บข้อมูลการผลิตน้ำร้อนจากระบบโดยมีเงื่อนไขใน

การผลิตน้ำร้อนปริมาณ 100 L ให้ได้อุณหภูมิ 65 °C จากการเก็บข้อมูลทดสอบ พบว่า ที่อัตราการไหลน้ำผ่านแผง Solar PV/T 2.25 LPM เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยมีค่า EER สูงสุดเท่ากับ $4.95 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ (ค่า EER เฉลี่ย $2.69 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$) สามารถลดพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ 0.78 kWh/day หรือคิดเป็นผลประหยัดที่ลดลง 46.14% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบปั๊มความร้อนแบบเดิม เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากการศึกษาพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 285.80 kWh/year คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 1,303.26 Baht/year หรือลดลง 63.25% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม โดยใช้เงินลงทุน 10,500 Baht คิดเป็นระยะเวลาคืนทุน 8.06 year มีอัตราผลตอบแทน 9.01%

คำสำคัญ : ปั๊มความร้อน, แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, สมรรถนะ, น้ำร้อน



Title	PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT PUMP WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC THERMAL HYBRID SYSTEM
Author	Mr. Piyaphone Mungkhaly
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sulaksana Mongkon

ABSTRACT

This research is to study the performance enhancement of heat pump by solar photovoltaic thermal system (Solar PV/T) and evaluates the economics of this system. The study was divided into 3 parts as follows:

Part 1 is the performance test a 0.5 kW of heat pump that used a working fluid as R-22 and used air to exchange heat in the evaporator section, compared with the use of hot water supplied to the evaporator section at a flow rate of 1.0 LPM, 2.0 LPM, 2.25 LPM and 3.0 LPM, respectively and control the hot water temperature which supplied to the evaporator at 35°C, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C and 65°C, respectively. The result found that at 2LPM of hot water flow rate and hot water temperature to evaporator section about 45°C obtained the energy efficiency ratio (EER) $3.41 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ which was higher than a conventional heat pump with air was supplied to the evaporator with an EER of $2.37 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$.

Part 2 is the electrical and thermal performance study of a solar PV/T panel of 330 Wp with water-cooled by copper tubes and a water box. From the thermal performance test according to ASHRAE STANDARD 93-2003, it was found that the installation of the water box behind the panel had the thermal performance of $F_R(\tau \alpha)_e$ and $F_R U_L$ of 0.4018 and $10.466 \text{ W/m}^2 \times ^\circ\text{C}$, respectively, while the solar PV/T power generation efficiency was an average of 44.22% , which was higher than the

case of installation of copper tubes behind the Solar PV/T panel.

Part 3 is an installation of a solar PV/T boosted heat pump system and study the flow rate of water through the solar panel that is suitable for use. The data was conditionally collected for producing hot water about 100 liters and a temperature of 65 °C. From the test, it was found that the water flow rate through the Solar PV/T panel of 2.25 LPM was a suitable value for use with the highest EER of 4.95 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ (with an average EER of 2.69 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$). It was able to reduce an electric power from grid line around 0.78 kWh/day or equal to a 46.14% reduction compared with a conventional heat pump system. For economics analysis by mathematical models use, the study found that the Solar PV/T boosted heat pump system can reduce the electricity consumption by 285.80 kWh/year, representing a savings of 1,303.26 Baht/ year, or a reduction of 63.25% compared with the conventional system. The investment was equal to 10,500 Baht, representing a payback period of 8.06 years and the internal rate of return of 9.01%.

Keywords : Heat pump, Solar PV/T, Performance, Hot water

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนถึงการดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี และ รองศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน นทร์ อินทนิเวศน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ปินะเต ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำงานวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนจาก “โครงการผลิตและพัฒนา ศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2561

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

Piyaphone Mungkhaly

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....ช	ช
สารบัญ.....ช	ช
สารบัญตาราง.....ฉ	ฉ
สารบัญภาพ.....ฐ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย..... 1	1
วัตถุประสงค์..... 4	4
ขอบเขตงานวิจัย..... 5	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6	6
เซลล์แสงอาทิตย์..... 6	6
หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์..... 6	6
ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์..... 7	7
ประเภทระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์..... 8	8
คุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์..... 10	10
ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์..... 11	11
หลักการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์..... 11	11
สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์..... 13	13
สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อน..... 15	15

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	16
ค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	17
ระบบปั๊มความร้อน	18
การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์.....	20
ระยะเวลาคืนทุน.....	20
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ.....	20
อัตราผลตอบแทนภายใน.....	21
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	29
อุปกรณ์การทดสอบ	29
1. ปั๊มความร้อน.....	29
2. โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
3. ถังเก็บน้ำร้อน.....	31
4. ก่อ่งน้ำระบายความร้อน	31
5. ท่อทองแดงระบายความร้อน	32
6. อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	33
7. ก่อ่งน้ำที่ส่วนระเหยของปั๊มความร้อน.....	33
8. ปั๊มน้ำ	34
9. ท่อน้ำร้อนและวาล์ว.....	34
10. ฉนวนยางดำ.....	35
11. หม้อแปลงไฟฟ้า	36
12. Speed Control PWM DC Motor	36
เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล.....	37
1. เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้า	37

2. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger 4 Channels)	37
3. เครื่องมือตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Clamp Meter)	38
4. เครื่องมือตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์.....	39
5. เครื่องตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ.....	39
6. เครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	40
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	41
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง	49
การทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน	49
กำลังงานของคอมเพรสเซอร์	49
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่คอนเดนเซอร์	52
ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน	55
การทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	61
การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	61
การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำ	62
การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อทองแดง.....	69
การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	80
อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	80
อัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อน	83
กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	87
กำลังไฟฟ้าจากระบบพื้นฐาน.....	89
อัตราการไหลที่เหมาะสมแก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump.....	91
วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์.....	93

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
สรุปผลการวิจัย	95
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณ	98
ภาคผนวก ข. ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย.....	104
ภาคผนวก ค. ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย	161
การเผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการ	162
การเผยแพร่ผลงานโดยการตีพิมพ์ในวารสาร	173
บรรณานุกรม	190
ประวัติผู้วิจัย	193



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
ตารางที่ 2 ค่ารายลเอียดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline.....	30
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั้มความร้อนในแต่้อัตราการไหล59	59
ตารางที่ 4 สรุปผลของัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งวัน	76
ตารางที่ 5 รายละเอียดการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์.....	94



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การใช้พลังงานในแต่ละรูปแบบ	1
ภาพที่ 2 เปรียบเทียบการใช้พลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ.2559-2561	2
ภาพที่ 3 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	3
ภาพที่ 4 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	6
ภาพที่ 5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline Cell).....	7
ภาพที่ 6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสม (Poly Crystalline Cell).....	7
ภาพที่ 7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสเซลล์ (Amorphous Cell).....	8
ภาพที่ 8 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System)	9
ภาพที่ 9 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้า (PV Grid Connected System)	9
ภาพที่ 10 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System)	10
ภาพที่ 11 คุณสมบัติทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	11
ภาพที่ 12 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง (Focusing Solar Collector).....	12
ภาพที่ 13 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate Solar Collector).....	12
ภาพที่ 14 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector).....	13
ภาพที่ 15 สมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	14
ภาพที่ 16 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	15
ภาพที่ 17 สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	16
ภาพที่ 18 แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PV/T).....	17
ภาพที่ 19 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ.....	18
ภาพที่ 20 ค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์.....	22

ภาพที่ 21	อัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผง PV/T.....	22
ภาพที่ 22	ระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	23
ภาพที่ 23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์	24
ภาพที่ 24	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระหว่างโหมดปั๊มความร้อน	25
ภาพที่ 25	ระบบผลิตน้ำร้อนจากความร้อนปล่อยทิ้งร่วมกับการใช้ปั๊มความร้อน	26
ภาพที่ 26	อัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน	26
ภาพที่ 27	ปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
ภาพที่ 28	โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline	30
ภาพที่ 29	ถังเก็บน้ำร้อน	31
ภาพที่ 30	กล่องน้ำระบายความร้อนติดตั้งใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
ภาพที่ 31	ทิศทางการไหลของน้ำในกล่องระบายความร้อน.....	32
ภาพที่ 32	ท่อทองแดงระบายความร้อนติดตั้งใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	32
ภาพที่ 33	อินเวอร์เตอร์.....	33
ภาพที่ 34	กล่องน้ำที่ส่วนระเหยของปั๊มความร้อน	33
ภาพที่ 35	ปั๊มหมุนเวียนน้ำในระบบ	34
ภาพที่ 36	ท่อน้ำร้อนและวาล์ว	35
ภาพที่ 37	ฉนวนยางดำ	35
ภาพที่ 38	หม้อแปลงไฟฟ้า.....	36
ภาพที่ 39	โมดูลควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของปั๊มน้ำกระแสตรง.....	36
ภาพที่ 40	เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้า.....	37
ภาพที่ 41	เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger 4 Chanel).....	38
ภาพที่ 42	เครื่องมือตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า.....	38
ภาพที่ 43	เครื่องมือตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์.....	39

ภาพที่ 44 เครื่องตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ	39
ภาพที่ 45 เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	40
ภาพที่ 46 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	41
ภาพที่ 47 ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ	42
ภาพที่ 48 ก่อ้งน้ำที่ติดตั้งในส่วนระเหยของปั๊มความร้อน	42
ภาพที่ 49 จุดตรวจวัดต่าง ๆ ของระบบที่ปั๊มความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ	43
ภาพที่ 50 ท่อทองแดงที่ติดตั้งบริเวณด้านหลังของแผง Solar Cell โดยใช้ น้ำไหลในท่อ	44
ภาพที่ 51 แผ่นกัน (Buffer) เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำ	44
ภาพที่ 52 ระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	45
ภาพที่ 53 ขั้นตอนทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	46
ภาพที่ 54 รายละเอียดตำแหน่งตรวจวัดของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	47
ภาพที่ 55 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วน ทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	50
ภาพที่ 56 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วน ทำระเหยที่อัตราการไหล 2.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	51
ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วน ทำระเหยที่อัตราการไหล 2.25 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	51
ภาพที่ 58 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วน ทำระเหยที่อัตราการไหล 3.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	52
ภาพที่ 59 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	53
ภาพที่ 60 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	54
ภาพที่ 61 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.25 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	54

ภาพที่ 62 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 3.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	55
ภาพที่ 63 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	56
ภาพที่ 64 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	57
ภาพที่ 65 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.25 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	57
ภาพที่ 66 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 3.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย	58
ภาพที่ 67 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าของปั๊มความร้อน.....	60
ภาพที่ 68 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า.....	60
ภาพที่ 69 ความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนไปตาม อุณหภูมิ น้ำเข้าแผง	61
ภาพที่ 70 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	62
ภาพที่ 71 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM.....	63
ภาพที่ 72 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM.....	64
ภาพที่ 73 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM.....	64
ภาพที่ 74 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM	65
ภาพที่ 75 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM.....	66
ภาพที่ 76 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM.....	66

ภาพที่ 77 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM.....	67
ภาพที่ 78 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM.....	68
ภาพที่ 79 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM.....	68
ภาพที่ 80 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM.....	69
ภาพที่ 81 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM	70
ภาพที่ 82 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM....	71
ภาพที่ 83 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM.....	72
ภาพที่ 84 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM	73
ภาพที่ 85 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM..	73
ภาพที่ 86 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM.....	74
ภาพที่ 87 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM	75
ภาพที่ 88 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM....	75
ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง Solar PV/T กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์.....	77
ภาพที่ 90 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิน้ำในถัง.....	78
ภาพที่ 91 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T	78
ภาพที่ 92 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า.....	79

ภาพที่ 93 อุณหภูมิแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์เมื่อทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 2.25 และ 2.5 LPM	80
.....	80
ภาพที่ 94 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (ที่อัตราการไหล 2.0 LPM).....	81
ภาพที่ 95 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (ที่อัตราการไหล 2.25 LPM)	82
ภาพที่ 96 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (ที่อัตราการไหล 2.5 LPM).....	82
ภาพที่ 97 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	83
ภาพที่ 98 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM	84
ภาพที่ 99 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.5 LPM	84
ภาพที่ 100 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (ที่อัตราการไหล 2.0 LPM).....	85
ภาพที่ 101 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 2.25 LPM)	86
ภาพที่ 102 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (อัตราการไหล 2.5 LPM).....	86
ภาพที่ 103 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	88
ภาพที่ 104 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T ที่อัตราการไหล 2.25 LPM.....	88
ภาพที่ 105 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T ที่อัตราการไหล 2.5 LPM	89
ภาพที่ 106 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (ที่อัตราการไหล 2.0 LPM).....	90
ภาพที่ 107 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (ที่อัตราการไหล 2.25 LPM).....	90
ภาพที่ 108 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (ที่อัตราการไหล 2.5 LPM).....	91

ภาพที่ 109 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราการไหล.....92

ภาพที่ 110 เปอร์เซนต์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหล92

ภาพที่ 111 จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน กรณีใช้ Solar PV/T Boosted Heat Pump
.....93



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันโลกได้ประสบกับปัญหาด้านพลังงานเนื่องจากประชากรมีจำนวนเพิ่มขึ้น จึงมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมอย่างรวดเร็ว ในหลายประเทศก่อให้เกิดความกังวลกับปัญหาด้านพลังงานทำให้เกิดการวิจัยเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานอย่างประหยัด ส่งเสริมให้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ให้มากขึ้นในหลายรูปแบบเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อน พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น จากข้อมูลสถิติการใช้พลังงานในประเทศ ปี พ.ศ. 2561 พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานรวม 69,812 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยมีปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2560 ร้อยละ 5.7 คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 1,194,388 ล้านบาท ซึ่งเป็นกลุ่มของพลังงานฟอสซิลเป็นหลัก ดังภาพที่ 1

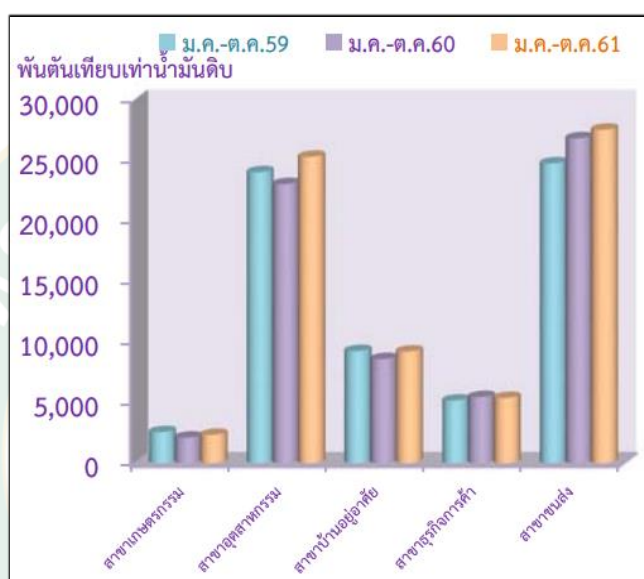


ภาพที่ 1 การใช้พลังงานในแต่ละรูปแบบ

ที่มา : (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)

การใช้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยที่น้ำมันสำเร็จรูปยังคงเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดคิดเป็น 49% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาเป็น ไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียน ถ่านหินลิกไนต์ ก๊าซธรรมชาติ และพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม คิดเป็น 20.1% 9.3% 8.4% 6.9% และ 6.3% ตามลำดับ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)

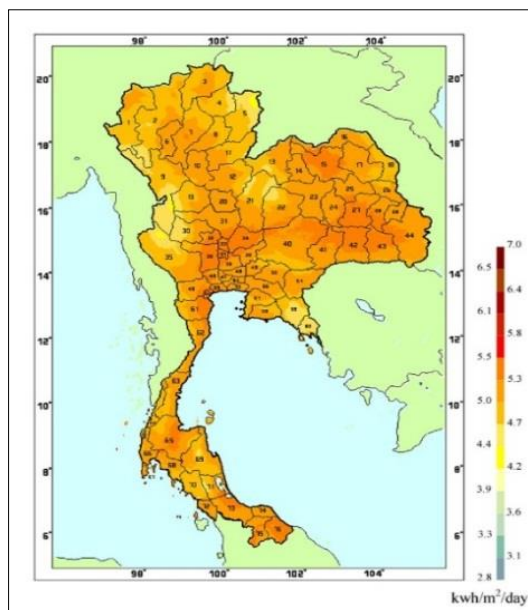
อย่างไรก็ตาม พบว่ายังมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายเพิ่มขึ้นในเกือบทุกภาคเศรษฐกิจ ภาคเกษตรกรรมเพิ่มขึ้น 9.8% ภาคบ้านอยู่อาศัยเพิ่มขึ้น 7.2% ภาคธุรกิจการค้าลดลง 1.3% และภาคขนส่งเพิ่มขึ้น 2.6% จากช่วงเดียวกันของปีก่อน โดยภาคขนส่งเป็นภาคที่มีการใช้พลังงานในสัดส่วนที่สูงกว่าภาคอื่น มีสัดส่วนการใช้ 39.3% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาเป็นภาคอุตสาหกรรม บ้านอยู่อาศัย ธุรกิจการค้า และเกษตรกรรม โดยมีการใช้ 36.2%, 13.3%, 7.8%, และ 3.4% ตามลำดับ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบการใช้พลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ.2559-2561

ที่มา : (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จึงทำให้ได้รับแสงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งปี และเมื่อพิจารณาค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีทุกพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าประมาณ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงพอสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

ที่มา : (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic : Solar PV) สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพประมาณ 15% อายุการใช้งานโดยทั่วไปจะยาวนานกว่า 20 ปี (Faherbruch, 1983) และเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ไม่มีส่วนใดเคลื่อนไหวทำให้ดูแลรักษาได้ง่าย อุณหภูมิการทำงานมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพจะแปรผกผันกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคืออุณหภูมิแผงสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง (Backus, 1976) ซึ่งแสดงว่าการระบายความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และถ้าความร้อนที่ดึงออกมานั้น สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือการระบายความร้อนด้วยน้ำจึงจะทำให้ได้ผลพลอยได้คือน้ำร้อนออกมาประกอบกับปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำร้อนเพิ่มมากขึ้น ทั้งในบ้านที่อยู่อาศัย โรงแรม โรงพยาบาล รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ การผลิตน้ำร้อนเดิมนิยมใช้เครื่องทำน้ำร้อนแบบขดลวดไฟฟ้าเนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อง่ายและมีการติดตั้งไม่ซับซ้อน แต่ในส่วนข้อเสีย คือการผลิตน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูง โดยมีกำลังไฟฟ้าประมาณ 3.5 – 4.5 kW เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตน้ำร้อน เรียกว่า เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heating system) ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลงไปได้ แต่ยังมีปัญหาในช่วงฤดูฝนหรือ

วันที่ไม่มีแดดทำให้ยังต้องใช้ขดลวดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ผลิตความร้อนเสริม ซึ่งยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงในช่วงเวลาดังกล่าว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562)

การผลิตน้ำร้อนนอกจากพลังงานแสงอาทิตย์และขดลวดไฟฟ้าแล้ว ยังมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อน และมีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าขดลวดไฟฟ้า 3-4 เท่า และสามารถแก้ปัญหาในช่วงฤดูฝนหรือช่วงที่ค่ารังสีอาทิตย์น้อยๆได้ ซึ่งเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ปั๊มความร้อน (Heat pump) (Techato, 2012) หากใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) มาผลิตไฟฟ้าและจ่ายให้กับปั๊มความร้อน ผ่าน Inverter แบบเชื่อมต่อกับสายส่ง ก็จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงได้อีกเรียกว่า ระบบ Solar PV Heat pump

อย่างไรก็ตามพบว่าข้อจำกัดของระบบ Solar PV Heat pump แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนประสิทธิภาพ ขณะใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะลดลงเมื่อ อุณหภูมิแผงสูงขึ้น (Backus, 1976) ในขณะที่ในส่วนของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance : COP) ยังมีค่าประมาณเท่ากับ 3 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562) โดยวิธีการแก้ปัญหาในส่วน แผงโซล่าเซลล์ สามารถทำได้โดยการระบายความร้อนด้วย อากาศหรือน้ำ เรียกว่าระบบ Solar PV/T ซึ่งถ้าระบายความร้อนด้วยน้ำ นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพของ Solar cell เพิ่มขึ้นแล้ว หากนำน้ำร้อนที่ได้ไปแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับส่วนทำระเหย (Evaporator) ของ ปั๊มความร้อน จะสามารถเพิ่มค่า COP ของปั๊มความร้อนให้สูงขึ้นด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดใช้ระบบปั๊มความร้อนมาผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ซึ่งระบบ Solar PV/T จะผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับ Compressor ของระบบ Heat pump และน้ำร้อนที่นำไประบายความร้อนจากระบบจะนำไปจ่ายให้กับส่วนทำระเหยของ Heat pump เพื่อช่วยเพิ่มค่า COP และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพรวมของระบบดังกล่าว พร้อมทั้งศึกษาต้นทุนในการติดตั้งระบบดังกล่าว

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขอบเขตงานวิจัย

1. ใช้ปั๊มความร้อน (heat pump) ที่ใช้สารทำงาน R-22
2. ใช้แผง Solar PV/T ชนิด Poly Crystalline ขนาดไม่น้อยกว่า 330 W
3. ใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด Grid Tie Inverter
4. ปริมาณน้ำร้อนในถังน้ำร้อนขนาดประมาณ 75 liter/m² หุ้มฉนวนกันความร้อน
5. ทดสอบปั๊มความร้อน (Heat Pump) ด้วยการปรับค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าอีแวพอเรเตอร์ ($T_{I,Evap}$) ตั้งแต่ 30 – 65 °C เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) ของปั๊มความร้อน
6. ทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง Solar PV/T การระบายความร้อนด้วยน้ำ ด้วยท่อทองแดงและกล่องน้ำ
7. ทดสอบแผง Solar PV/T ด้วยการปรับอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนจำนวน 3 ค่าที่ทำให้ได้ค่า P_{net} สูงสุด
8. ทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
9. วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบสมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้ไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. ได้ทราบความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

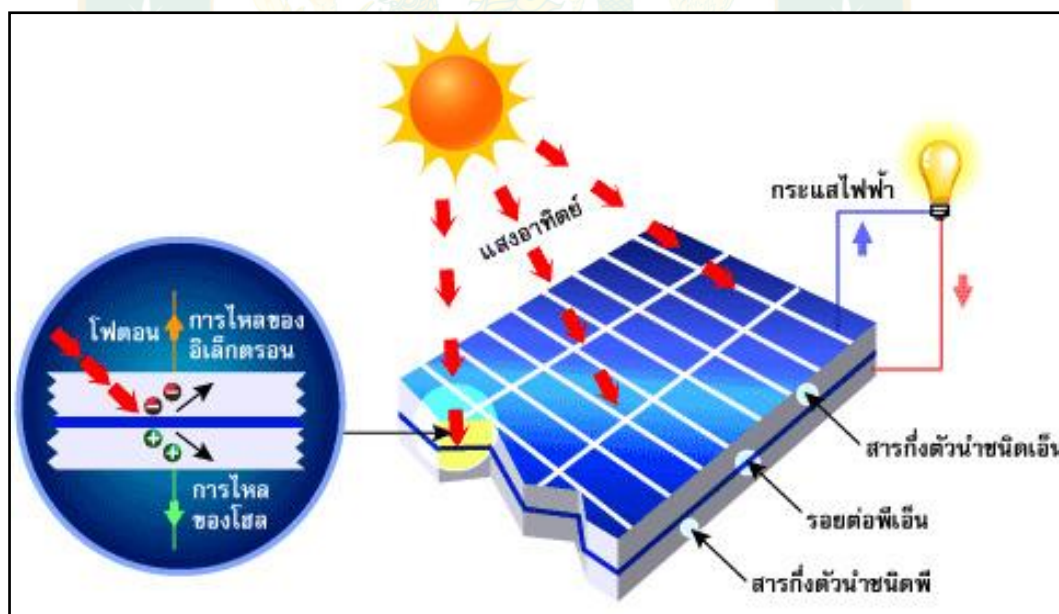
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซลล์แสงอาทิตย์

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ผ่านหลายกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ เมื่อมีค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ จากภาพที่ 4 พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์จะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีอนุภาคของพลังงานโฟตอน (Proton) เมื่อกระทบต่อสารกึ่งตัวนำจะเกิดมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) จึงเกิดเป็นอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายใต้สนามไฟฟ้าของเซลล์ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) โดยในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน

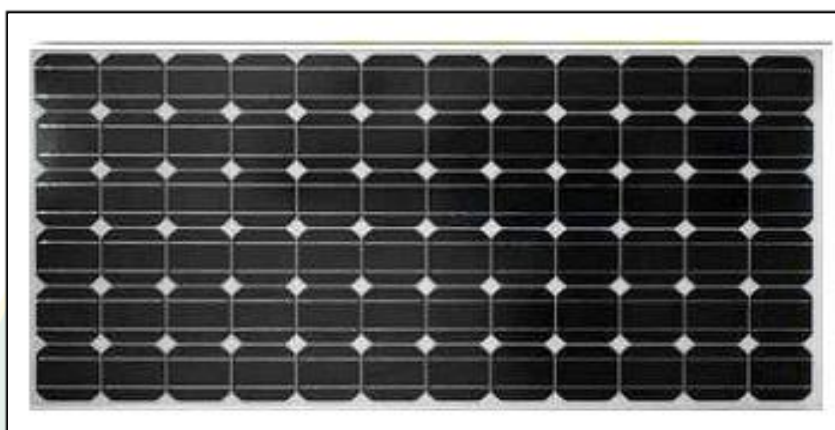


ภาพที่ 4 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (บริษัท Leonic, 2558)

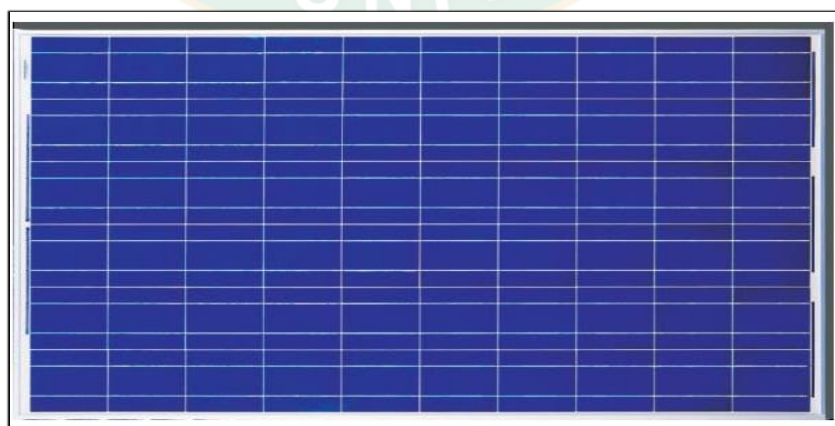
ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

1.) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline Cell) หรือ (Single Crystalline Silicon) ลักษณะจะเป็นผลึกแผ่นสีน้ำเงินเข้มล้วน แต่ละแผ่นมีลักษณะที่บางมาก และแตกหักง่าย ค่าประสิทธิภาพสูงเพราะเป็นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการค่อนข้างจะซับซ้อน และยุ่งยากจนได้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์ จึงทำให้ซิลิคอนผลึกเดี่ยวนี้มีราคาค่อนข้างสูงตามไปด้วย โดยจะมีประสิทธิภาพประมาณ 15-20% (ชนิดและความหมายของโซลาร์เซลล์หรือเซลล์แสงอาทิตย์, 2557)



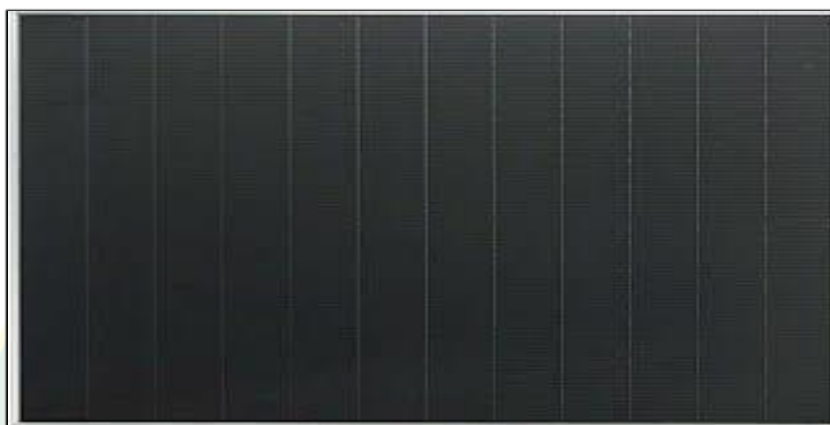
ภาพที่ 5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline Cell)

2.) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสม (Poly Crystalline Cell) หรือ (Multi Crystalline Silicon) เป็นผลึกผสมที่ตัดมาจากซิลิคอนบล็อก มีลักษณะสีน้ำเงินอ่อน และผลึกจะมีลวดลายไม่เหมือนกับซิลิคอนผลึกเดี่ยว มีค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า และมีราคาที่ถูกกว่าผลึกเดี่ยวเล็กน้อย มีลักษณะแผ่นบาง แตกหักง่ายเช่นเดียวกันซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพประมาณ 13-16%



ภาพที่ 6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสม (Poly Crystalline Cell)

3.) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสเซลล์ (Amorphous Cell) หรือ ทินฟิล์ม (Thin-film) เป็นฟิล์มบางที่เคลือบลงบนพื้นผิวเซลล์ ด้วยลักษณะการผลิตนี้เองจึงทำให้เซลล์ชนิดนี้ สามารถยืดหยุ่น และโค้งงอได้ จึงนำไปใช้กับแผงโซลาร์ที่ต้องการความยืดหยุ่น เซลล์ชนิดนี้มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 9-11% จึงต่ำกว่าเซลล์สองแบบแรกอยู่มากเพราะขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนน้อยกว่า นอกจากนี้เซลล์ชนิดนี้จะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าสองแบบแรกอีกด้วย

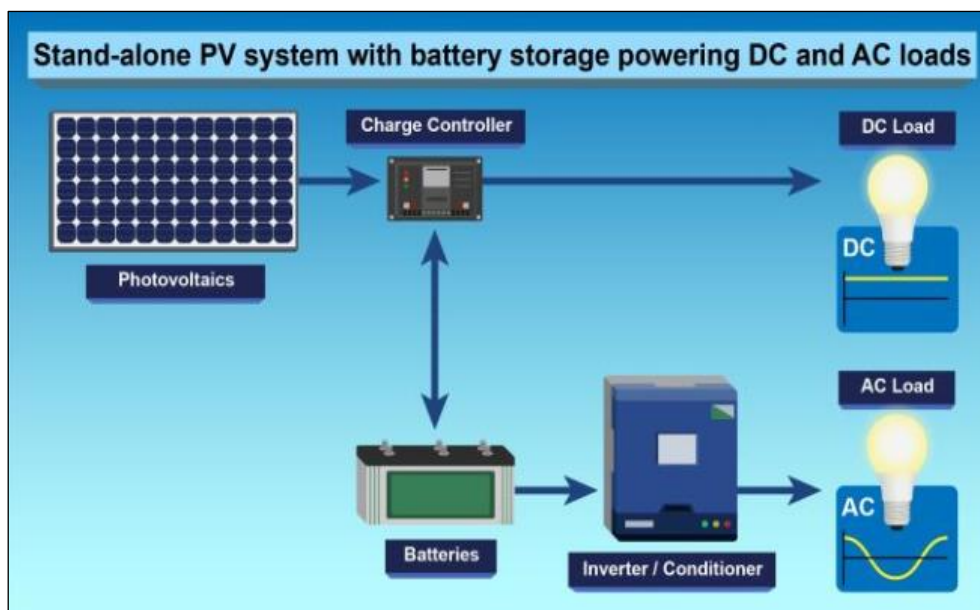


ภาพที่ 7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสเซลล์ (Amorphous Cell)

ประเภทระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

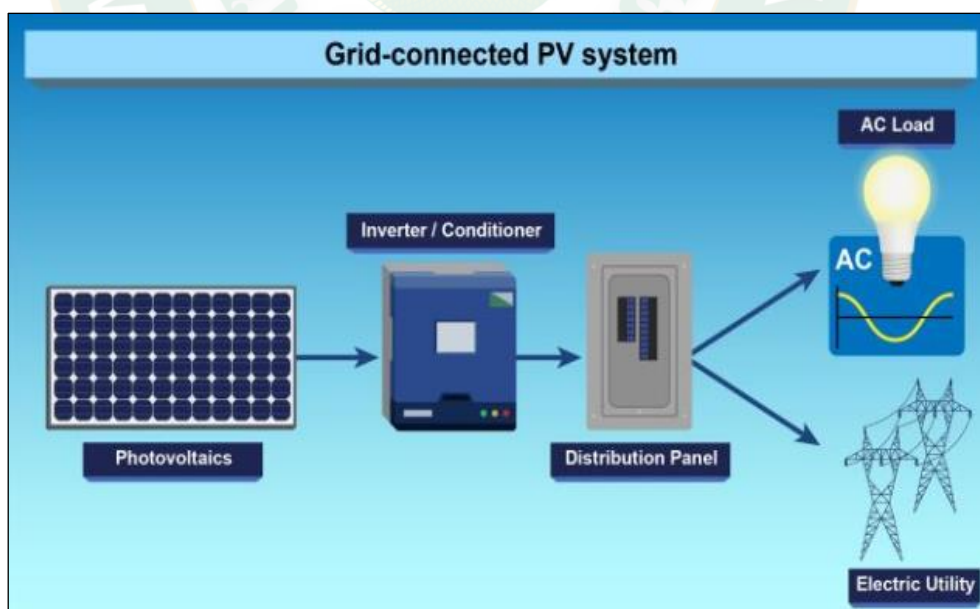
การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 แบบ

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) เป็นระบบที่ออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ที่ไม่มีระบบระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าและจ่ายให้อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ



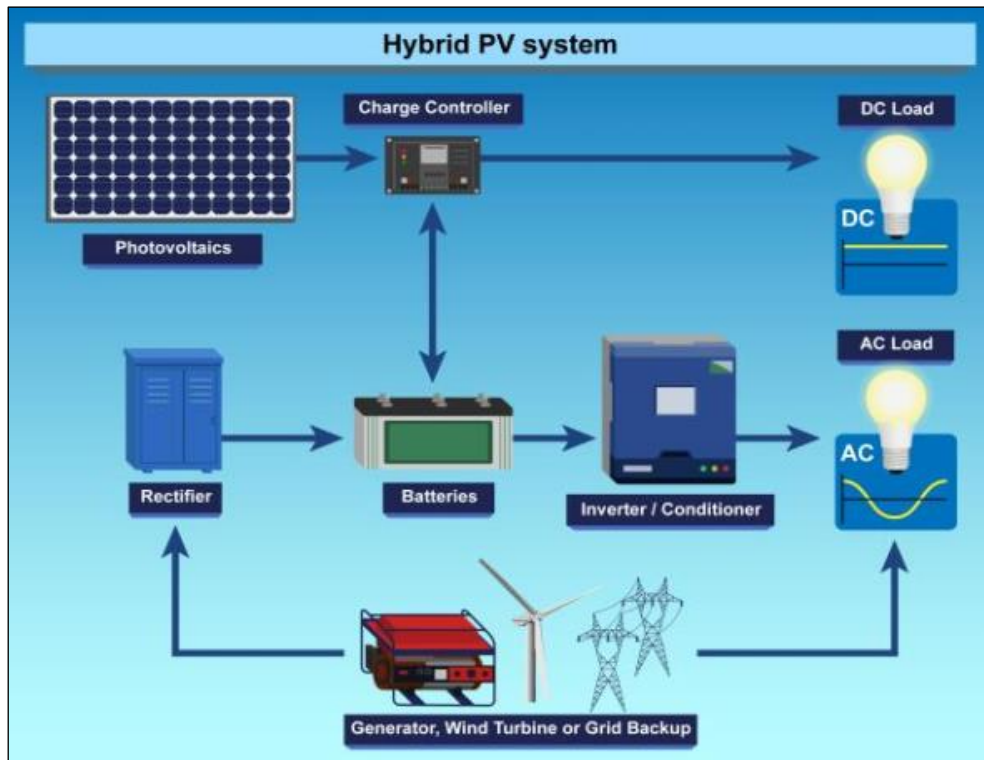
ภาพที่ 8 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System)

2. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้า (PV Grid Connected System) เป็นระบบที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ เข้าจำหน่ายสู่ระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้าโดยตรง



ภาพที่ 9 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานไฟฟ้า (PV Grid Connected System)

3. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) เป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและพลังงานน้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 10 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System)

คุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการพิจารณาคุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$P_m = I_m \times V_m$$

สมการที่ 1

เมื่อ I_m คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)

V_m คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)

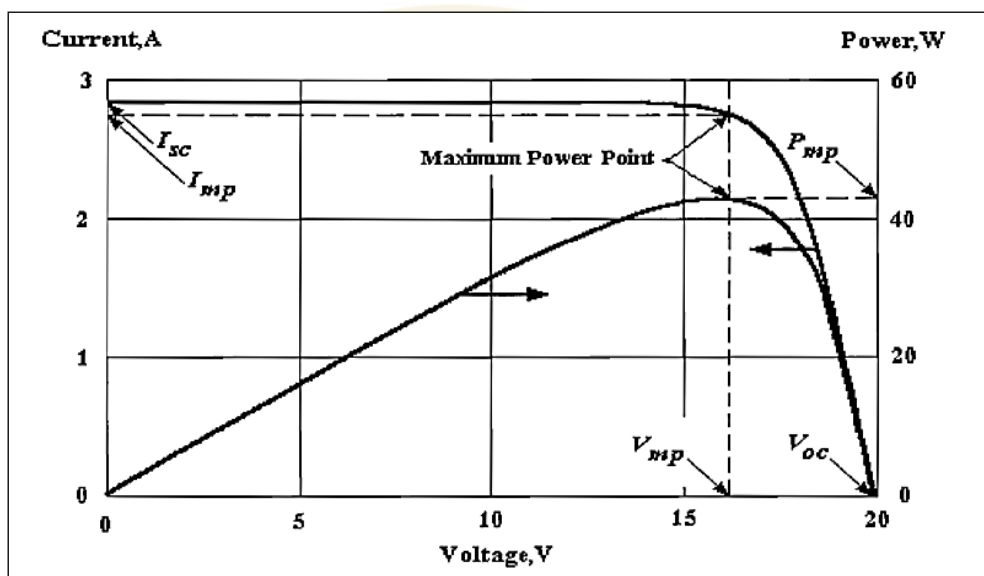
P_m คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (W) หมายถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบและอุณหภูมิของตัวเซลล์ที่ค่าหนึ่งๆ เมื่อนำภาระทางไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

สมการที่ 2

- เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
 A_C คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)
 I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

ถึงอย่างไรก็ตาม ตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบและอุณหภูมิขณะทำงานของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งตัวอย่างคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 คุณลักษณะทางกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (สิริชัย ปัญญาสมาธิ, 2548)

ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

หลักการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีการนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์การทำน้ำร้อน ซึ่งการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้พลังงานในรูปแบบความร้อน ด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อน และถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลภายในแผ่นเก็บรังสีทำให้อุณหภูมิของของไหลดังกล่าวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แผ่นเก็บรังสีที่ดีต้องมีความสามารถดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ได้ดีมีการสูญเสียความร้อนได้น้อยมาก และสามารถถ่ายเทความร้อนที่ดูดกลืนให้กลับของ

ไหลได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้วแผ่นเก็บรังสีแสงอาทิตย์ส่วนมากจะยึดให้อยู่กับที่ หันหน้าไปทางทิศใต้ เอียงเป็นมุม 18° (Latitude) ของตำแหน่งที่ตั้งอยู่ (สราวุธ พลวงษ์ศรี, 2547)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีหลายชนิดแต่นิยมใช้กัน ดังนี้

1. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง (Focusing Solar Collector) ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งหลักการทำงานโดยใช้หลักการรวมรังสีดวงอาทิตย์ด้วยการสะท้อนจากผิวโค้งรูปพาราโบลาโบลิคที่เป็นรางยาว เป็นแบบที่สามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 100°C เพื่อผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 12 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง (Focusing Solar Collector)

2. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate Solar Collector) ดังแสดงในภาพที่ 13 มี 2 ชนิดคือ ชนิดมีกระจกปิด (Single Glazed) และชนิดไม่มีกระจกปิด (Unglazed) เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมากโดยประมาณ $40\text{-}90^\circ\text{C}$



ภาพที่ 13 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate Solar Collector)

3. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) ดังแสดงในภาพที่ 14 เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นหลอดแก้ว ภายในเคลือบด้วยสารดูดกลืนรังสีและเหมาะกับงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงโดยประมาณ 100-200 °C



ภาพที่ 14 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector)

สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่เวลาใด ๆ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนจะเท่ากับอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ และค่าอัตราความร้อนที่สูญเสียจากผิวดูดรังสี ในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีจะอยู่ในรูปสมการดังนี้ (ทงนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)

$$Q_{\text{coll}} = A_c [I_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_p - T_a)] \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ Q_{coll} คือ อัตราความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)

$(\tau\alpha)_e$ คือ ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

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

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

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

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

$$Q_{\text{coll}} = A_c F' [I_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 4}$$

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

$$T_{fm} = \frac{(T_{f,o} + T_{f,i})}{2} \quad \text{สมการที่ 5}$$

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

$$Q_{coll} = A_c [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 6}$$

F_R คือค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor)

กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะค่าพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

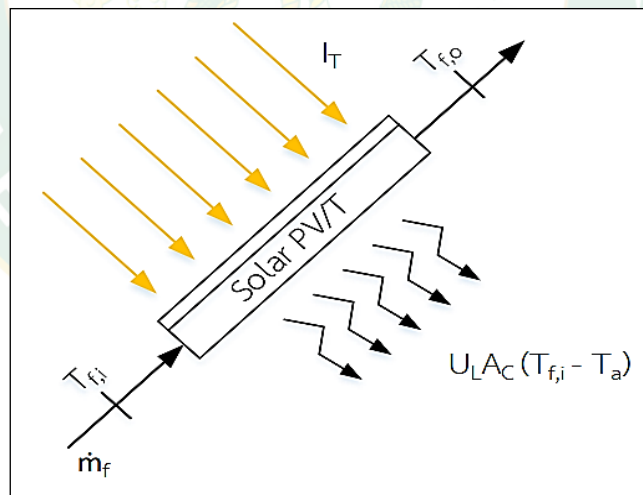
$$Q_{coll} = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad \text{สมการที่ 7}$$

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

C_{p_f} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (kJ/kg·°C)

$T_{f,i}$ คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

$T_{f,o}$ คือ อุณหภูมิของไหลขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

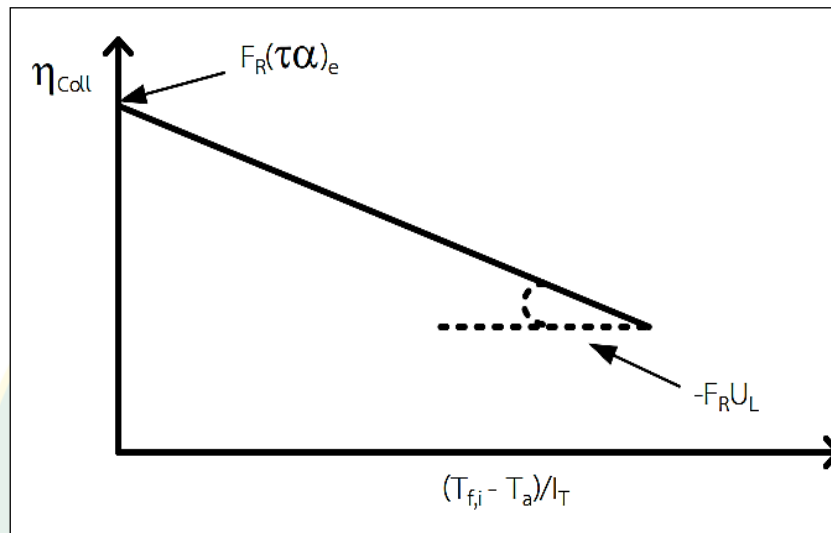


ภาพที่ 15 สมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta_{\text{Coll}} = \frac{Q_{\text{Coll}}}{A_C I_T} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_C I_T} = F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_{f,i} - T_a)}{I_T} \quad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{Coll} และ $(T_{f,i} - T_a)/I_T$ จะได้สมการเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 16 โดยที่ค่าความชันของเส้นคือ ค่า $F_R U_L$ ส่วนค่าที่ตัดแกนประสิทธิภาพคือค่า $F_R (\tau\alpha)_e$



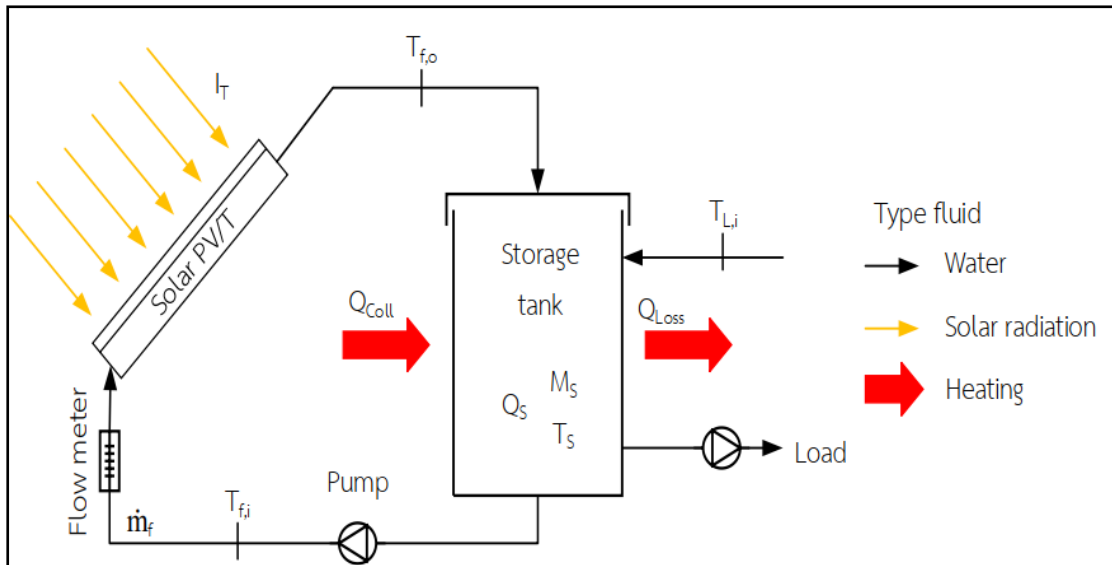
ภาพที่ 16 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อน

ระบบที่ใช้ของงานวิจัยประกอบด้วยปั๊มหมุนเวียนน้ำที่ส่งน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อน้ำได้รับความร้อนที่ถูกถ่ายเทความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์และส่งต่อไปเก็บในถังเก็บสะสมน้ำร้อนที่ถูกหุ้มฉนวนไว้อย่างดี ดังภาพที่ 17 อุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในกรณีที่ถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอและไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิของน้ำ สามารถทำสมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนดังสมการที่ 9 (ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)

$$Q_{\text{Coll}} = Q_S + Q_{\text{Load}} + Q_{\text{Loss}} \quad \text{สมการที่ 9}$$

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



ภาพที่ 17 สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ในกรณีที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อนหุ้มฉนวนอย่างดีและไม่มีการนำน้ำร้อนไปใช้งาน จึงไม่มีการพิจารณาอัตราการความร้อนที่ดึงออกจากถังเก็บสะสมน้ำร้อน (Q_{Load}) และอัตราการความร้อนสูญเสียออกจากถังน้ำร้อน (Q_{Loss}) ดังสมการดังนี้

$$Q_{Coll} = Q_S$$

$$A_c [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] = (MC_p)_s \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s^t)}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 10}$$

จากสมการที่ 10 สามารถเขียนในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้ดังนี้

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s^t + \frac{A_c \Delta t}{(MC_p)_s} [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 11}$$

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

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

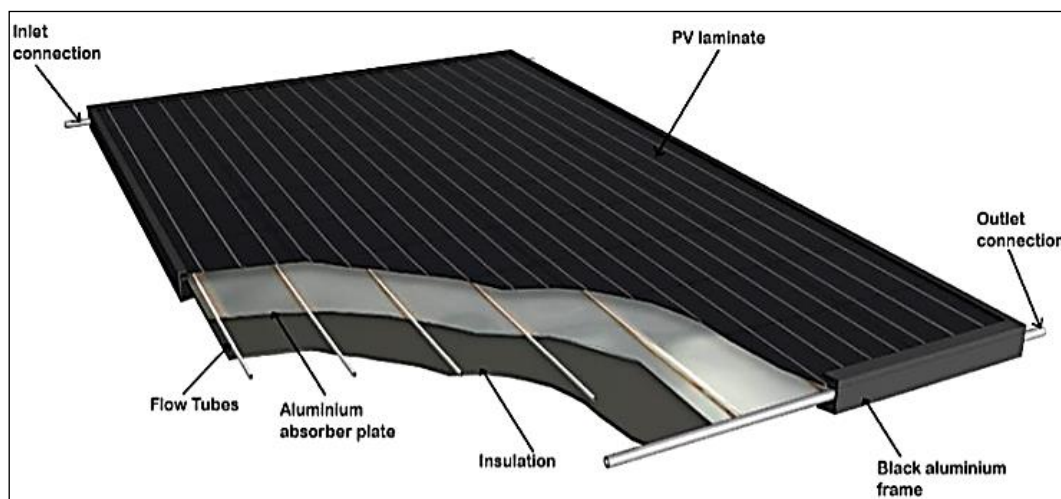
Δt คือ ผลต่างเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (s)

$(MC_p)_s$ คือ ผลคูณของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของของไหลในถัง ($\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$)

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Thermal Hybrid Panel; PV/T) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 18 เป็นแผงที่ถูกพัฒนามาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้าและตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ผลิตน้ำร้อนมารวมกันเป็นแผงเดียว ซึ่งการทำงานของแผงผลิต

ไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้น้ำและอากาศเป็นตัวดูดซับความร้อน โดยปัจจุบันแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะนิยมใช้แบบท่อและแบบแผ่นเรียบเนื่องจากเหมาะสมในการใช้งานจริง



ภาพที่ 18 แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PV/T)

ที่มา: (Culprit design, 2018)

ค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (แผง Solar PV/T) แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 12 (โดย $Q_{PV/T} = Q_{Coll}$ จากสมการที่ 6)

$$\eta_{PV/T} = \frac{P_{PV/T} + Q_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}}$$

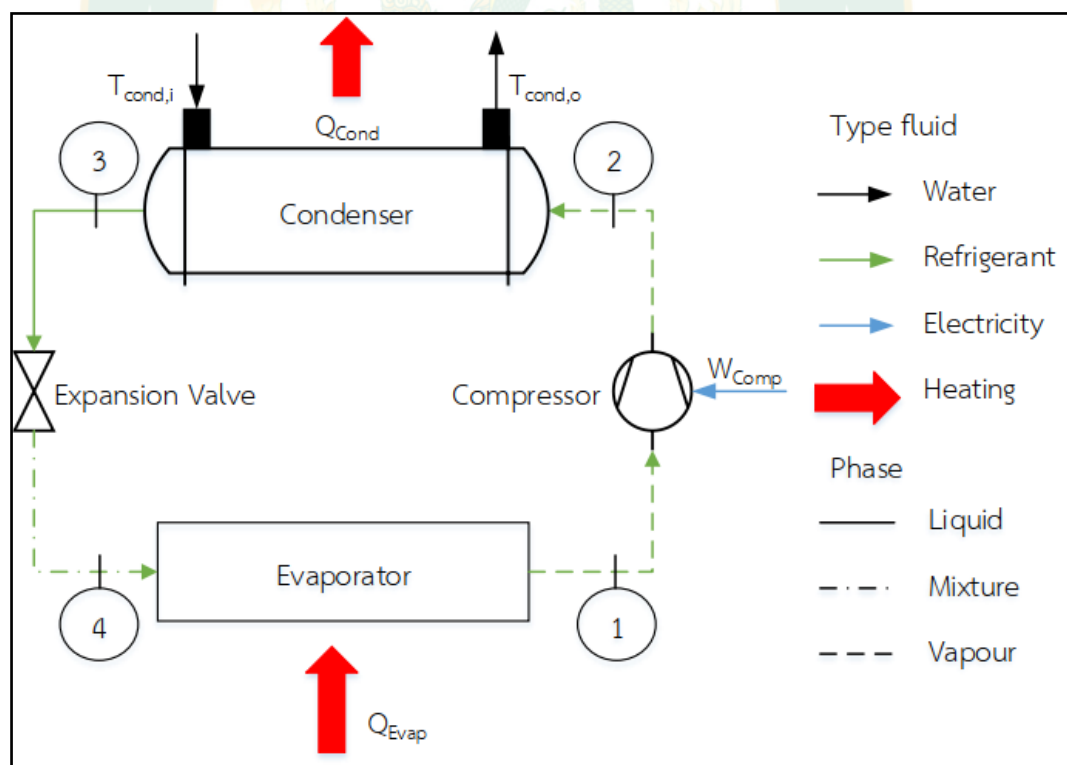
สมการที่ 12

- 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)
 I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบแผง Solar PV/T (W/m^2)
 $A_{PV/T}$ คือ พื้นที่ของแผง Solar PV/T (m^2)

ระบบปั๊มความร้อน

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

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



ภาพที่ 19 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ

จากภาพที่ 19 กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของวัฏจักรอัดไอตามทฤษฎีมีดังนี้

1. กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการอัดไอแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic Compression) กำลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องอัดไอ สมมุติว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อน คำนวณได้จากสมการ

$$W_{\text{Comp}} = \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad \text{สมการที่ 13}$$

2. กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการควบแน่นที่ความดันคงที่ (Isobaric Condensation) อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น คำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{Cond}} = \dot{m}_r (h_2 - h_3) \quad \text{สมการที่ 14}$$

3. กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ (Isenthalpic Expansion) และลดความดันอย่างเดียวไม่มีงานหรือการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น จะได้

$$h_3 = h_4$$

4. กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการระเหยที่ความดันคงที่ (Isobaric Expansion) อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย คำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{Evap}} = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad \text{สมการที่ 15}$$

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

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{W_{\text{Comp}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad \text{สมการที่ 16}$$

ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (Energy Efficiency Ratio, EER) คือ ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่หาได้จากอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับปั๊มความร้อน สามารถหาได้จาก

$$\text{EER}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{P_{\text{Comp}}} = \frac{\dot{m}_r C_{p,f} (T_{\text{Cond,o}} - T_{\text{Cond,i}})}{P_{\text{Comp}}} \quad \text{สมการที่ 17}$$

เมื่อ	\dot{m}_r	คือ อัตราการไหลของสารทำงาน (kg/s)
	h_1	คือ เอนทาลปีขาออกเครื่องระเหย (kJ/kg)
	h_2	คือ เอนทาลปีขาเข้าเครื่องควบแน่น (kJ/kg)
	h_2	คือ เอนทาลปีขาออกของเครื่องควบแน่น (kJ/kg)
	h_2	คือ เอนทาลปีขาออกของวาล์วขยายตัว (kJ/kg)
	\dot{m}_f	คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
	$T_{\text{Cond},l}$	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 ($\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$)

การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback Period) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด โครงการใดที่มีระยะเวลาลงทุนยิ่งสั้นยิ่งมีความต้องการสูง เนื่องจากสามารถนำเงินที่คืนทุนไปลงทุนในกิจการอื่น ๆ ซึ่งระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \quad \text{สมการที่ 18}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) คือ ผลบวกของรายรับทั้งหมด และรายจ่ายทั้งหมดที่ได้จากโครงการ เพื่อชี้ให้เห็นว่าโครงการนั้นเป็นที่น่าสนใจในการลงทุน ซึ่งมูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$\text{NPV} = \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - \text{TIC} \quad \text{สมการที่ 19}$$

เมื่อ	R_n	คือ ผลตอบแทนในปีที่ n (Baht)
	C_n	คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n (Baht)
	N	คือ ระยะเวลาของโครงการ
	i	คือ อัตราส่วนลด (%)
	TIC	คือ เงินลงทุนทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบัน (Baht)

อัตราผลตอบแทนภายใน

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) คือ อัตราผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมดมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน ซึ่งอัตราผลตอบแทนภายในสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20

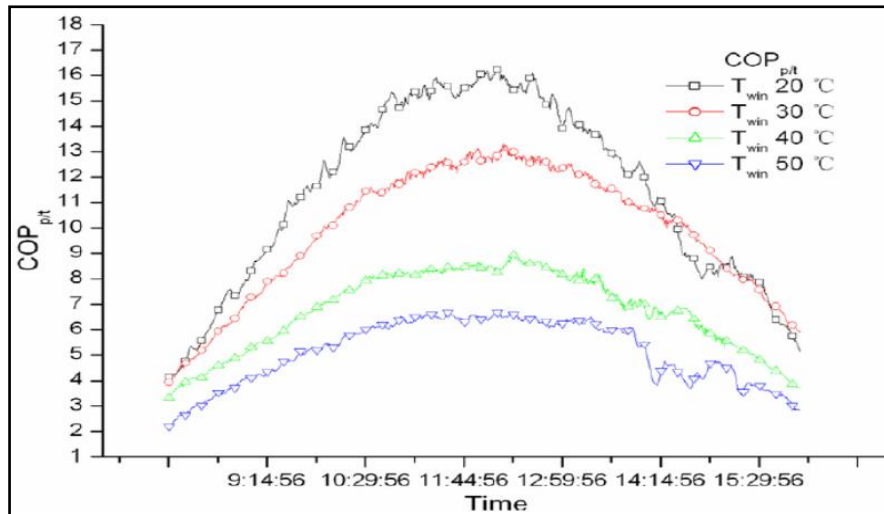
$$\sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC = 0$$

สมการที่ 20

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษา ค้นคว้าสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ของการพัฒนางานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

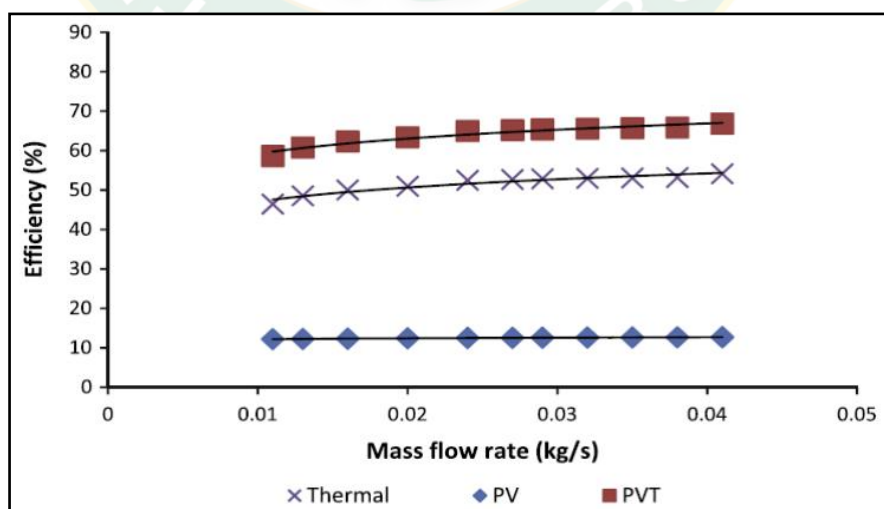
Ji et al. (2008) ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนแบบไม่มีกระจกปิดขนาด 4.59 m^2 เป็นเครื่องระเหยของปั๊มความร้อน ใช้ R22 เป็นสารทำงาน ช่วงเวลาทำการศึกษาและทดลองใช้อุณหภูมิของน้ำเข้าปั๊มความร้อนที่ 20°C 30°C 40°C 50°C ตามลำดับ ในระยะเวลา 4 วัน ที่มีสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดมาวิเคราะห์ใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.217 kg/s เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 606 W/m^2 และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 13.7°C โดยผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ไม่มีตัวเสริม และในขณะเดียวกันประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ก็สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5.4 ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 13.4% ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์สูงถึง 16.1 และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 8.3 ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา: Ji et al. (2008)

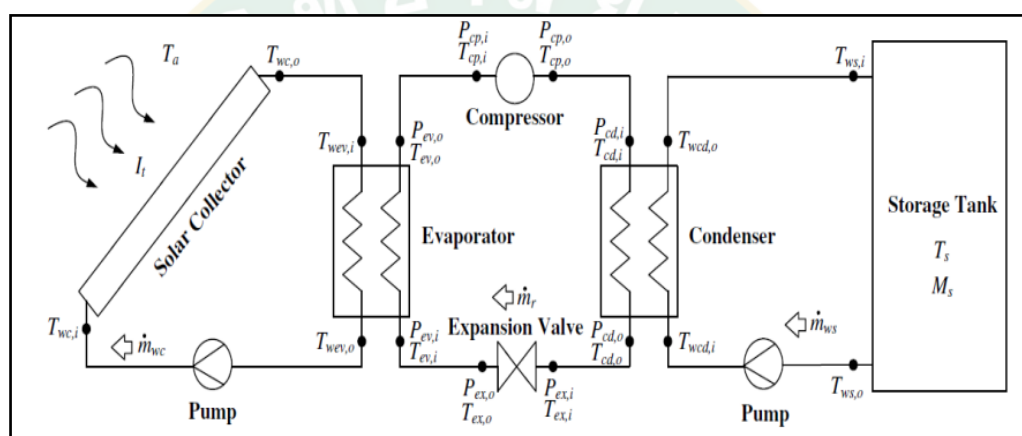
Fudholi et al. (2014) ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic/Thermal; PV/T) ซึ่งมีขนาด 0.512 m² ค่ารังสีอาทิตย์ระหว่าง 500-800 W/m² ใช้อัตราการไหลของน้ำระหว่าง 0.011-0.041 kg/s ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ประสิทธิภาพการผลิตความร้อนและประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของแผง Solar PV/T ผลการทดลองพบว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ 800 W/m² และอัตราการไหลของน้ำที่ 0.041 kg/s ได้ประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของแผง Solar PV/T สูงสุด 66.82% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 12.69% และประสิทธิภาพการผลิตความร้อนสูงสุด 54.13% ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 อัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผง PV/T

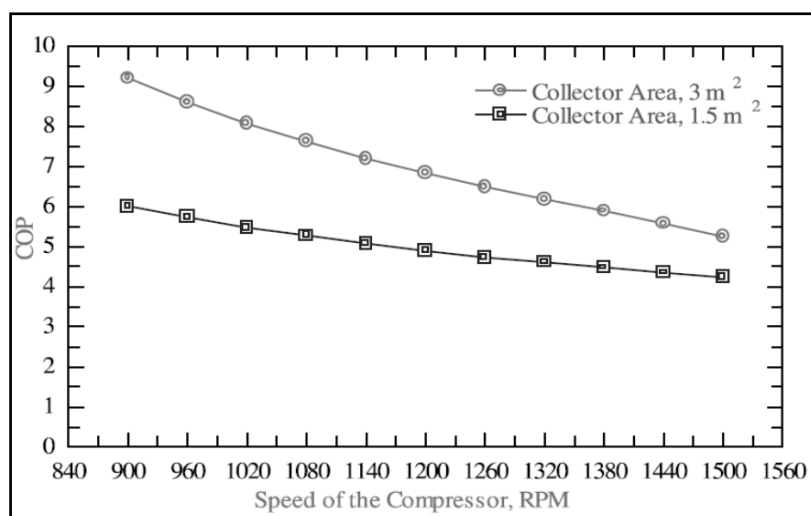
ที่มา: Fudholi et al. (2014)

Nuntaphan et al. (2009) ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 22 ใช้สารทำงานแบบผสม โดยประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ใช้โปรแกรมการจำลองในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นแบบจำลองสำหรับปั๊มความร้อนโดยใช้สารทำงานแบบผสมคือ R22 R124 R152a ที่ถูกเลือกด้วยโปรแกรมการจำลองพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นที่อัตราส่วนของมวลคือ 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



ภาพที่ 22 ระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน
ที่มา: Nuntaphan et al. (2009)

Hawlder et al. (2001) ได้ทำการวิเคราะห์และทดลองระบบผลิตน้ำร้อนปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหยขนาด 1.5 m² จำนวนสองแผงต่ออนุกรมกัน ใช้สารทำงาน R134a ซึ่งระบบดังกล่าวได้รับการออกแบบและดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมในประเทศสิงคโปร์ ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำในเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นตามเวลา ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะก็เพิ่มขึ้นเช่นกันและประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ที่ประมาณ 4 ถึง 9 และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์พบว่ามีค่าระหว่าง 40-75% สำหรับอุณหภูมิของน้ำในเครื่องควบแน่นที่แตกต่างกันระหว่าง 30 °C และ 50 °C แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีการทดลองชุดตัวเลขเพื่อระบุตัวแปรสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าประสิทธิภาพของระบบขึ้นกับพื้นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ และค่ารังสีแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 23



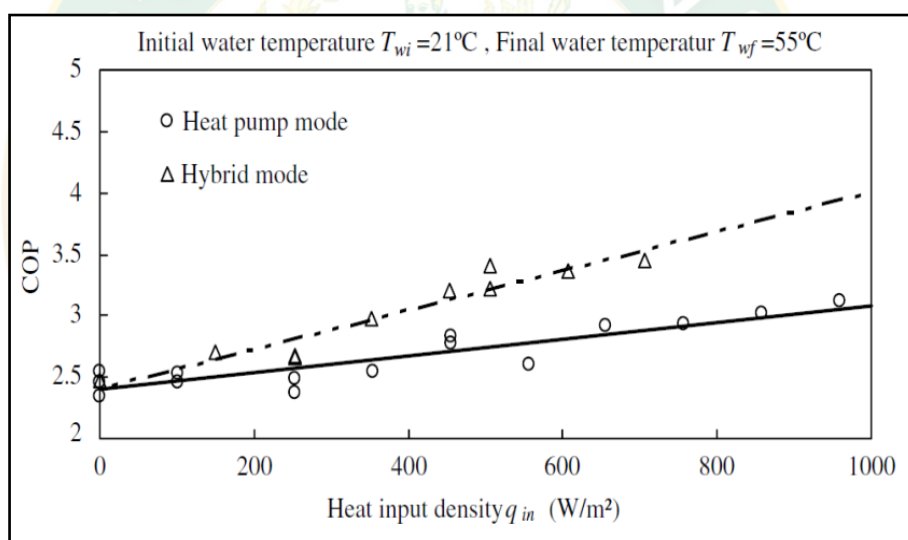
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วของเครื่องอัดไอ และพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์
ที่มา: Hawlader et al. (2001)

แบงค์ ศรีสุข และ วิทยา ยงเจริญ (2556) ทำการศึกษาสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic/Thermal; PV/T) แบบ Amorphous Silicon ที่มีขนาดพื้นที่ของแผง 0.97 m² กำลังไฟฟ้า 40 Wp ปริมาณน้ำในการทดสอบ 80 L อัตราการไหลของน้ำเข้าแผง 1.2 L/min ในการทดสอบใช้เวลา 10 วัน โดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยต่อวงจรกับตัวต้านทานชนิดไว้วางค์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า แล้วคูณกับเวลาที่ดึงประจุออกจากแบตเตอรี่จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้า 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 Wh/day ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำร้อน 41.7 °C

วงศ์สวรรค์ จันทะบูลย์ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2550) ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดขนาด 2.09 m² 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 °C โดยค่ารังสีแสงอาทิตย์จะมีผลต่อสมรรถนะของระบบในช่วงแรกๆของการ

ทดสอบ จากนั้นสมรรถนะของระบบจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่สูงขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนนำไฟฟ้าพบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่า

Huang et al. (2005) ศึกษาการใช้ท่อนำความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นระบบที่ใช้แหล่งความร้อนควบคู่กันไประหว่างปั๊มความร้อน และท่อนำความร้อน หรือตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R134a ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1.21 m^2 ระบบนี้สามารถทำงานได้สองกรณีคือ กรณีที่ใช้เพียงแค่อุปกรณ์ปั๊มความร้อนเมื่อไม่มีรังสีอาทิตย์ และกรณีที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมท่อนำความร้อนเมื่อมีรังสีอาทิตย์ ถ้าหากค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงระบบนี้สามารถมีประสิทธิภาพทางพลังงานสูง สำหรับการทดสอบในกลางแจ้งของระบบนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมท่อนำความร้อนเฉลี่ยที่ 3.32 โดยมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 28.7% เมื่อเทียบกับกรณีปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ 2.58 ดังภาพที่ 24

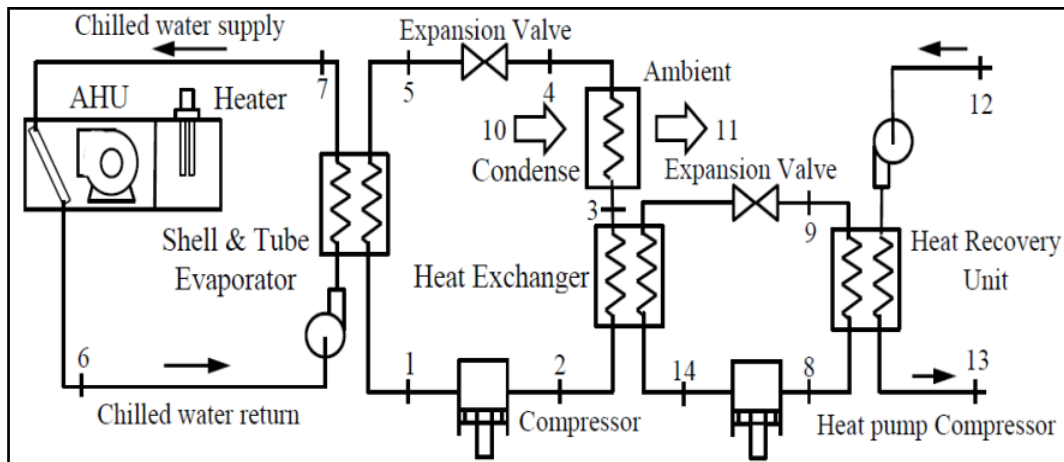


ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระหว่างโหมดปั๊มความร้อน และโหมดปั๊มความร้อนเสริมท่อนำร้อน

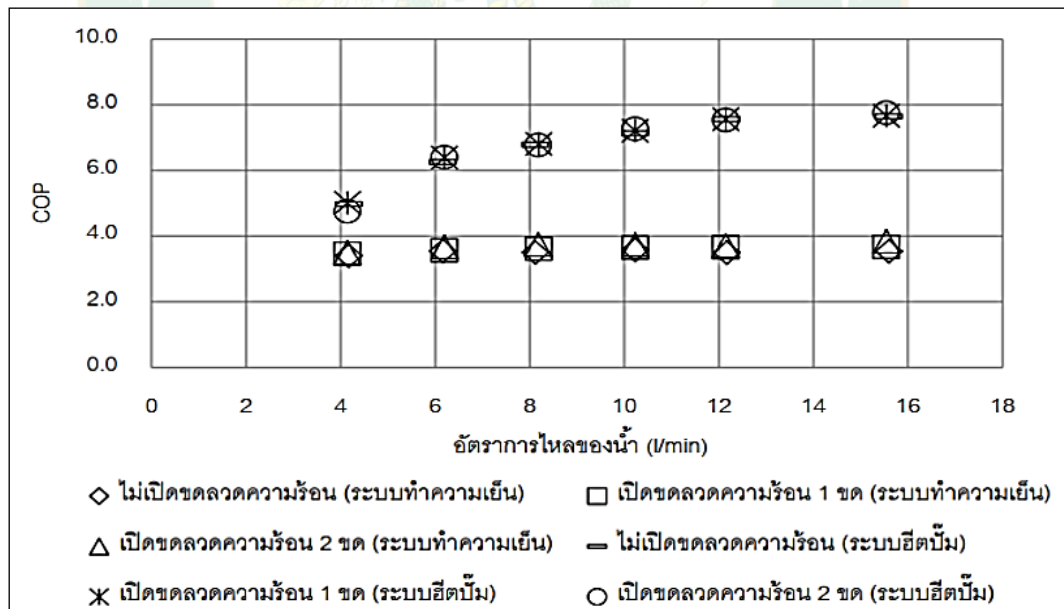
ที่มา: Huang et al. (2005)

วิศิษฐ์ ชูประเสริฐ และ จิตติน แดงเที่ยง (2012) ทำการศึกษากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ด้วยการนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบปรับอากาศทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนดังภาพที่ 25 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ส่งผลถึงปริมาณและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลมีค่าลดลง อุณหภูมิน้ำร้อนและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนและกำลังไฟฟ้าของ

เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนจะมีค่าลดลง 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 LPM ตามลำดับ ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 25 ระบบผลิตน้ำร้อนจากความร้อนปล่อยทิ้งร่วมกับการใช้ปั๊มความร้อน
ที่มา: วิศิษฎ์ ชูประเสริฐ และ จิตติน แดงเที่ยง (2012)



ภาพที่ 26 อัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน
ที่มา: วิศิษฎ์ ชูประเสริฐ and จิตติน แดงเที่ยง (2012)

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำไปประยุกต์ใช้
Ji et al.	ศึกษาสมรรถนะของปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้แผงโซลาร์แบบผลึกเดี่ยวไม่มีกระจกปิดเป็นเครื่องระเหย	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะโดยรวมของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Fudholi et al.	ทดสอบสมรรถนะที่เหมาะสมต่อระบบผลิตไฟฟ้าและทำความร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	นำไปใช้การวิเคราะห์สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อหาอัตราการใช้ที่เหมาะสมต่อระบบ
Nunthaphan et al.	วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้สารทำงานแบบผสม	นำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Hawlder et al.	วิเคราะห์และการดำเนินการทดลองระบบผลิตน้ำร้อนปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหย	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
แบงค์ และวิทยา	ศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและทำความร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	นำไปใช้การวิเคราะห์สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
วงศ์สุวรรณค์ และทองเกียรติ	ศึกษาสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิดเป็นเครื่องระเหย	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	ส่วนที่นำไปประยุกต์ใช้
Haung et al.	ศึกษาการใช้ท่อนำความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน	นำไปวิเคราะห์สมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
วิศิษฐ์ และจิตติน	ศึกษากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยการนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบปรับอากาศทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อน	นำไปวิเคราะห์และนำใช้หลักการเอาความร้อนทิ้งจากระบบปรับอากาศมาทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อน โดยการใช้ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีการดำเนินการติดตั้ง ทดสอบ และตรวจวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการติดตั้งและตรวจวัดข้อมูลในการทดลอง มีดังนี้

อุปกรณ์การทดสอบ

1. ปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-22 มีถังน้ำร้อนขนาด 100 L เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้คอมเพรสเซอร์แบบเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศมาดึงความร้อนจากอากาศภายนอกที่อุณหภูมิปกติแล้วถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ มีอุปกรณ์ประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอนเดนเซอร์ (Condenser) วาล์วขยายตัว (Expansion Valve) และเครื่องระเหย (Evaporator) แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

2. โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ Poly crystalline ยี่ห้อ Sunfree รุ่น SPF330-24 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด $330 W_p$ มีพื้นที่ $1.88 m^2$ จำนวน 3 แผง ดังภาพที่ 28 โดยค่ารายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 28 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline

ตารางที่ 2 ค่ารายละเอียดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline

รายละเอียด	ค่าทางไฟฟ้า
Poly Crystalline Silicon Solar Cell	$330 W_p$
Operating Voltage (V_{mp})	37.5 V
Operating Current (I_{mp})	8.89 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	47.0 V
Short Circuit Current (I_{sc})	9.38 A
Panel Size	1,960 mm x 960 mm x 30 mm

3. ถังเก็บน้ำร้อน

ถังเก็บน้ำขนาด 150 L จำนวน 2 ถัง ใช้ในการหมุนเวียนน้ำผ่านชุดระบายความร้อนของการทดสอบทั้งวันจำเป็นต้องมีถังเก็บน้ำที่สามารถบรรจุปริมาณน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการระบาย ถังเก็บน้ำร้อนที่ใช้ในการทดสอบทำจากวัสดุที่เป็นสแตนเลสเพื่อป้องกันการเกิดสนิม โดยผิวด้านนอกของถังเก็บน้ำหุ้มด้วยฉนวนยางดำเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนที่ผิวถังเก็บน้ำ ดังแสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ถังเก็บน้ำร้อน

4. กล่องน้ำระบายความร้อน

กล่องน้ำระบายความร้อนทำจากวัสดุเหล็กขนาด 0.95 m x 1.91 m จะติดตั้งด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำน้ำเข้าไประบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพที่ 30 โดยที่กล่องน้ำระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้แผ่นกั้น (Buffer) เพื่อควบคุมหรือบังคับทิศทางการไหลของน้ำ แสดงดังภาพที่ 31



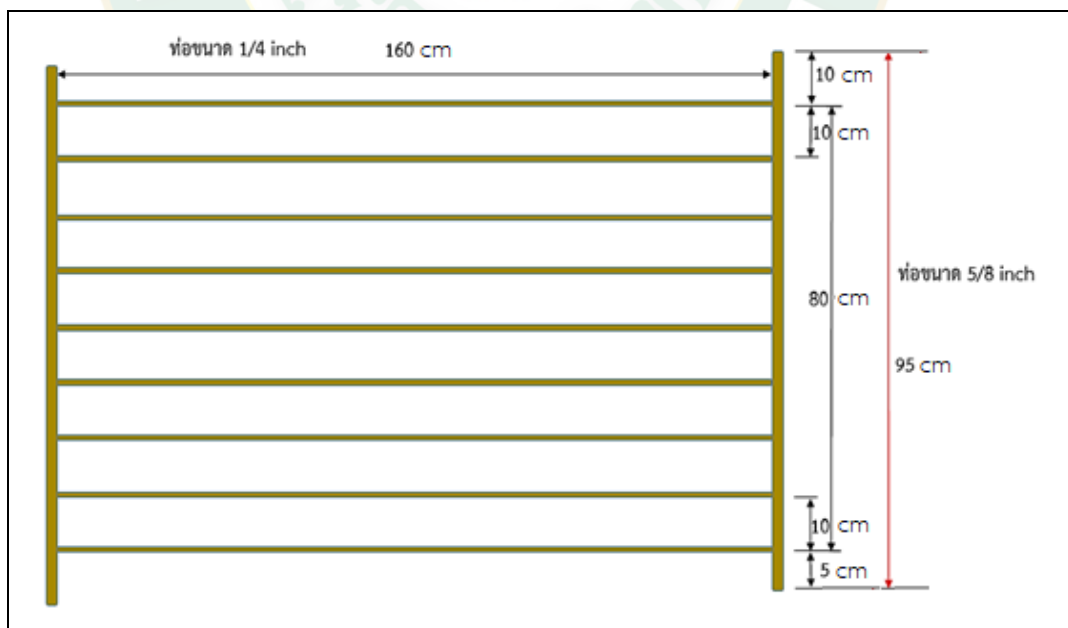
ภาพที่ 30 กล่องน้ำระบายความร้อนติดตั้งใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 31 ทิศทางการไหลของน้ำในกล่องระบายความร้อน

5. ท่อทองแดงระบายความร้อน

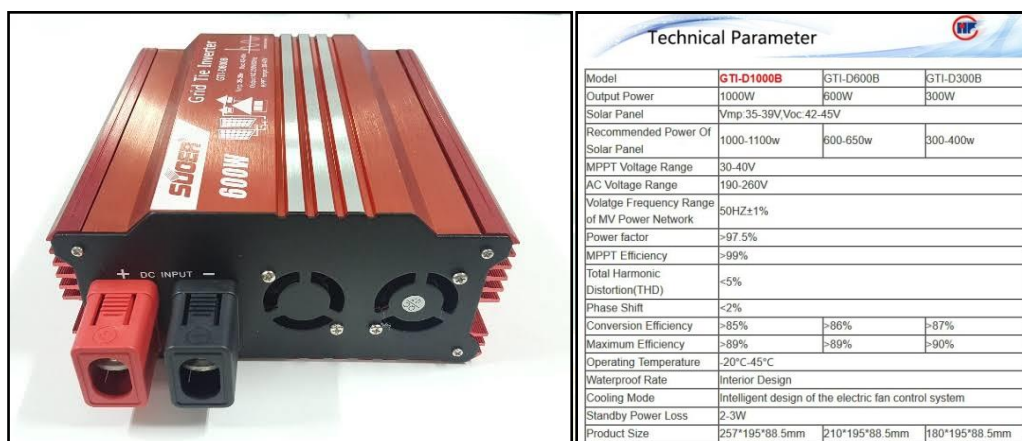
ท่อทองแดงระบายความร้อนทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 mm เป็นท่อ Riser และท่อ Header ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.87 mm จะติดอยู่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำน้ำเข้าไประบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ท่อทองแดงระบายความร้อนติดตั้งใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

6. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดกริดไทล์อินเวอร์เตอร์ (Grid Tie Inverter) ยี่ห้อ SUOER รุ่น GTI-D600B ขนาด 600W 24V ดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 อินเวอร์เตอร์

7. ถังน้ำที่ส่วนระเหยของปั๊มความร้อน

ถังน้ำที่ส่วนระเหยของปั๊มความร้อนทำจากวัสดุเหล็กขนาด 40 cm x 40 cm ทำการติดตั้งครอบส่วนระเหยของปั๊มความร้อนเพื่อนำน้ำร้อนเข้าไปถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ถังน้ำที่ส่วนระเหยของปั๊มความร้อน

8. ปั๊มน้ำ

การหมุนเวียนน้ำผ่านกล่องน้ำระบายความร้อน ผ่านท่อทองแดงระบายความร้อนและเพื่อเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนจำเป็นต้องใช้แรงขับเคลื่อนทางกลเพื่อส่งอัตราการไหลของน้ำให้เหมาะสม อย่างไรก็ตามมาตรฐานการทดสอบแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar collector) จะใช้อัตราการไหลของน้ำที่ $1.2 \text{ L/min}\cdot\text{m}^2$ ดังนั้น จึงเลือกใช้ปั๊มน้ำ ที่สามารถให้อัตราการไหลสูงสุดที่ 5.0 L/min โดยเป็นปั๊มน้ำที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V และใช้กำลังไฟฟ้า 18 W ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ปั๊มหมุนเวียนน้ำในระบบ

9. ท่อน้ำร้อนและวาล์ว

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ท่อน้ำร้อนประเภทพีพีอาร์ (80) ซึ่งย่อมาจาก Polypropylene Random Copolymer (80) ซึ่งเป็นพลาสติกคุณภาพสูงชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติด้านเคมีและกายภาพเหมาะสมต่อการใช้งานท่อประปาและงานท่อประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 36

- Model : SDR 6 (PN 20) high pressure class ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว
- ใช้งานกับระบบท่อน้ำประปา ระบบท่อน้ำร้อน ระบบท่อ Chilled water หรือระบบท่ออื่นๆ
- อุณหภูมิการใช้งาน : ที่อุณหภูมิ $3-95 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ความดัน (Working Pressure) : 20 บาร์
- รูปลักษณ์ภายนอก (สี) : สีเขียวมีแถบขาว 4 เส้น
- ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำด้วยวาล์ว PP-R ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว



ภาพที่ 36 ท่อน้ำร้อนและวาล์ว

10. ฉนวนยางดำ

ฉนวนยางดำใช้หุ้มในส่วนถังเก็บน้ำ กล่องน้ำระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ฉนวนยางดำ

11. หม้อแปลงไฟฟ้า

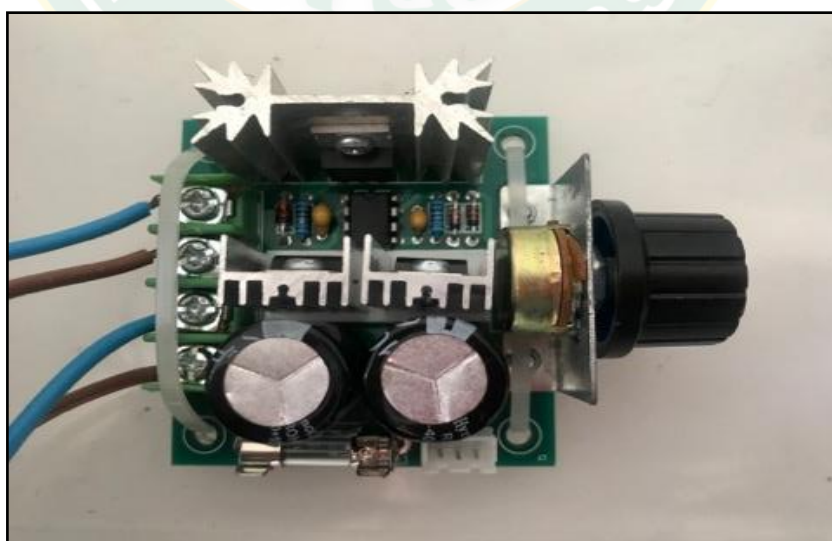
หม้อแปลงไฟฟ้า รุ่น S-120-12 ใช้แปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50/60 Hz ให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง 12 V 10 A_{max} เพื่อใช้งานกับปั๊มหมุนเวียนน้ำในระบบ แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 หม้อแปลงไฟฟ้า

12. Speed Control PWM DC Motor

โมดูลควบคุมอัตราการความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง 12 – 40 V 10A เพื่อใช้ปรับอัตราความเร็วที่มอเตอร์ของปั๊มน้ำที่ใช้เพื่อหมุนเวียนน้ำในระบบเพื่อให้ได้อัตราการไหลของน้ำตามที่ต้องการ แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 โมดูลควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของปั๊มน้ำกระแสตรง

เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูล

ในการทดสอบได้ทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดตามจุดต่าง ๆ ที่ต้องการนำค่าของตัวแปรเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ

1. เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้า

ในการตรวจวัดตัวแปรทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เครื่อง Solar PV Analyzer รุ่น PROVA 210A (12 A, 60V) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถบันทึกค่าทางไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ และยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบกราฟได้ มีความคลาดเคลื่อนของผลการวัดอยู่ที่ $\pm 1\%$ แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้า

2. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger 4 Channels)

เครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Lutron รุ่น TM-1947SD สามารถวัดอุณหภูมิได้ 4 จุด สามารถใช้งานได้กับสายเทอร์โมคัปเปิ้ล Type K, J, T, E, R, S, Pt100 เครื่องบันทึกข้อมูลสามารถบันทึกข้อมูลลง SD Card มีความแม่นยำอยู่ที่ $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger 4 Chanel)

3. เครื่องมือตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Clamp Meter)

เครื่องมือวัดค่ากระแสไฟฟ้ายี่ห้อ MASTECH รุ่น MS2203 ซึ่งสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ทั้งวงจร 1-phase และวงจร 3-phase มีการวัดค่าพลังงานขั้นต่ำที่น้อยที่สุดคือ 0.5 A สามารถวัดค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ไปในหนึ่งชั่วโมงของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปได้ แสดงดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 เครื่องมือตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า

4. เครื่องมือตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์

ในการทดสอบใช้เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ยี่ห้อ Lutron รุ่น SPM-116SD ซึ่งสามารถวัดค่ารังสีอาทิตย์ได้ตั้งแต่ 0.0 – 2,000.0 W/m² เครื่องมือตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์สามารถบันทึกข้อมูลลง SD Card มีความแม่นยำอยู่ที่ ± 10 W/m² แสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 เครื่องมือตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์

5. เครื่องตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ

ใช้เครื่องตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำชนิด Rotameter ยี่ห้อ Treaton รุ่น Z-4001 สามารถวัดอัตราการไหลของน้ำได้ในช่วง 0.2-2 GPM หรือ 1-7.5 L/min ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ 40-80 °C และที่ความดันน้อยกว่า 6 Bar แสดงดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 เครื่องตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ

6. เครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อมคือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิแวดล้อมโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ล Type-K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger 4 Chanel) แสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 เครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อน โดยการใช้ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาทฤษฎีหลักการทำงานของระบบปั๊มความร้อน (Heat Pump) และระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T)

ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งและทดสอบอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (Heat Pump) โดยมีขนาดถังบรรจุน้ำปริมาตร 100 L ที่ใช้สารทำงาน R-22 ดังภาพที่ 47 ซึ่งได้ทำการติดตั้งกล่องน้ำให้กับส่วนทำระเหย (Evaporator) ของปั๊มความร้อนเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบ ดังภาพที่ 48

ซึ่งน้ำร้อนที่ใช้การทดสอบนั้นถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์เพื่อที่จะทำให้ อุณหภูมิน้ำอยู่ในระดับคงที่สม่ำเสมอ โดยทำการทดสอบอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊ม ความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยที่ 1.0 LPM 2.0 LPM 2.25 LPM และ 3.0 LPM ภายใต้สภาวะของอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหย (Evaporator) ของปั๊มความร้อนที่ แตกต่างกัน ตั้งแต่ 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C และ 65 °C ในการผลิตน้ำร้อน ประมาณ 100 L จากอุณหภูมิประมาณ 35 °C จนผลิตน้ำร้อนได้ที่ 65 °C

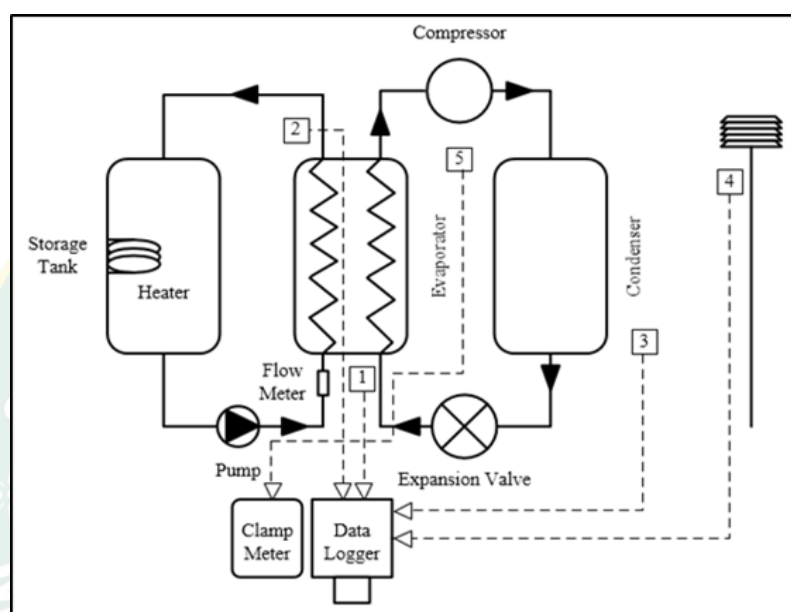


ภาพที่ 47 ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 48 กล่องน้ำที่ติดตั้งในส่วนระเหยของปั๊มความร้อน

การเก็บข้อมูลในการทดสอบเพื่อวัด และบันทึกผลจุดต่าง ๆ ดังภาพที่ 49 คือ จุดที่ 1 อุณหภูมิน้ำที่เข้าส่วนทำระเหย จุดที่ 2 อุณหภูมิน้ำที่ออกส่วนทำระเหย จุดที่ 3 อุณหภูมิน้ำร้อนในถัง (Condenser) จุดที่ 4 อุณหภูมิแวลวล้อม จุดที่ 5 วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน และอัตราการไหลของน้ำร้อนที่ป้อนให้ส่วนทำระเหย ในการเก็บข้อมูลนั้นได้บันทึกค่าทุก ๆ 5 นาที เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนในลำดับต่อไป



ภาพที่ 49 จุดตรวจวัดต่าง ๆ ของระบบที่ปั๊มความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3 ติดตั้งและทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) จำนวน 2 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปแบบที่ 1 ทำการติดตั้งท่อทองแดงบริเวณด้านหลังของแผง Solar Cell ซึ่งประกอบด้วยท่อ Header และ Riser เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 50



ภาพที่ 50 ท่อทองแดงที่ติดตั้งบริเวณด้านหลังของแผง Solar Cell โดยใช้น้ำไหลในท่อ

รูปแบบที่ 2 ทำการติดตั้งกล่องน้ำหนา 1.2 mm บริเวณด้านหลังของแผง Solar Cell และใช้แผ่นกัน (Buffer) เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 51

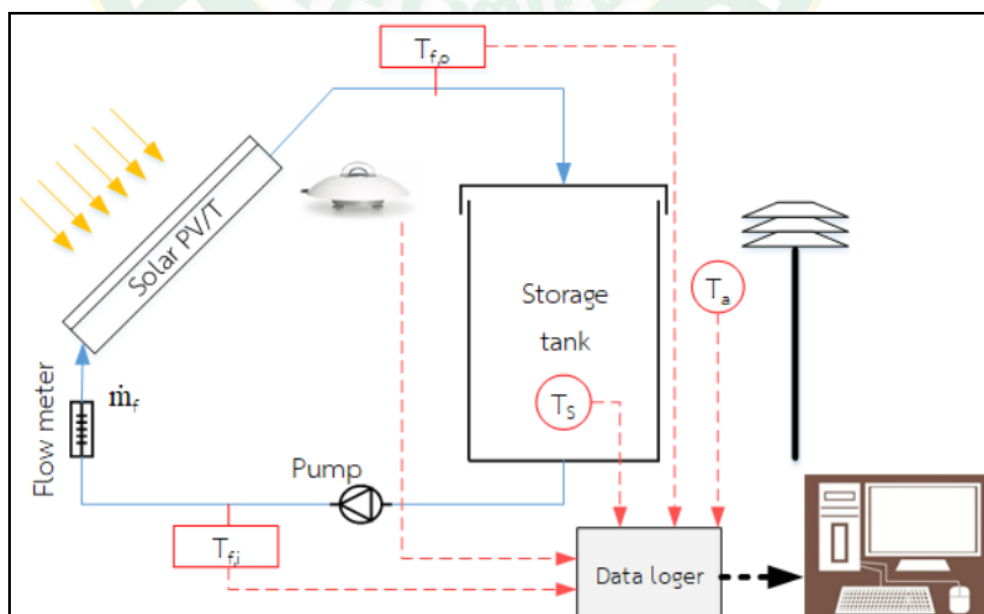


ภาพที่ 51 แผ่นกัน (Buffer) เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำ

การทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T โดยทดสอบทั้งแบบท่อทองแดงและแบบกล่องน้ำ ซึ่งจะทดสอบตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 ในการหาค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ

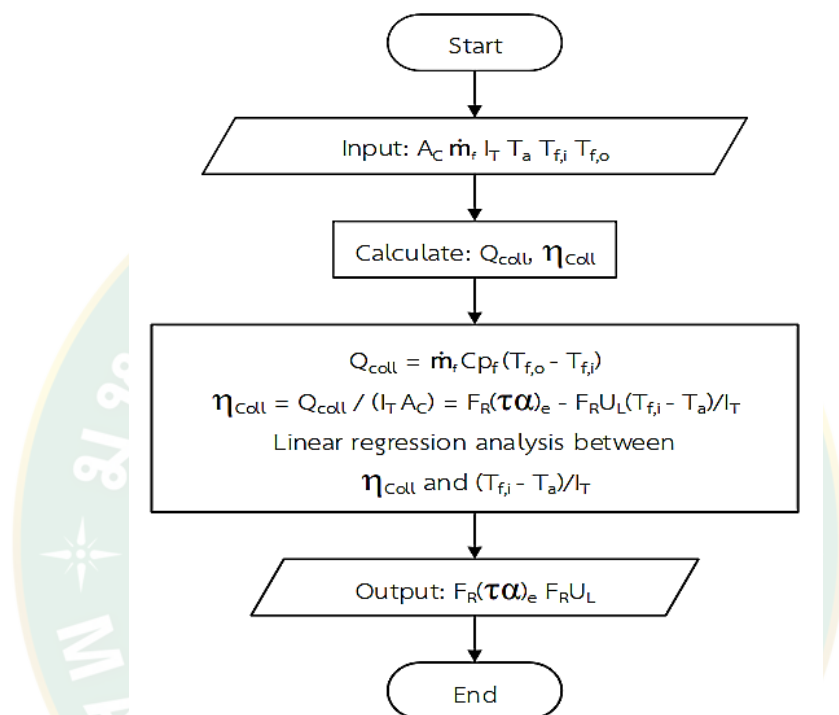
F_{RU_L} เพื่อสามารถทำนายกำลังไฟฟ้าและความร้อนที่แผงผลิตได้จากสมการที่ 5 และเพื่อคัดเลือกแผงที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดไปใช้ในระบบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชุดทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หันแผงไปทางทิศใต้และเอียงทำมุมระนาบตามละติจูดที่ตั้งของสถานที่ทดลอง ซึ่งกรณีแบบท่อทองแดงเอียงมุม 18° และกรณีแบบกล่องน้ำเอียงมุม 10°
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 $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$
5. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงด้วยชุดลดไฟฟ้า โดยอุณหภูมิที่ทำการทดสอบอยู่ที่ 35°C , 40°C , 45°C , 50°C , 55°C , 60°C และ 65°C ตามลำดับ
6. ระบบจะต้องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state condition) เพื่อทำการเก็บและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิน้ำเข้า-ออก อุณหภูมิน้ำในถัง ที่ใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) เป็นตัวบันทึกอุณหภูมิต่าง ๆ และค่ารังสีอาทิตย์ที่บันทึกด้วย Pyranometer ดังแสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 ระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

7. เมื่อทำการเก็บข้อมูลเสร็จ ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 53 เพื่อเลือกเอาแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะดีที่สุดไปติดตั้งในระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์



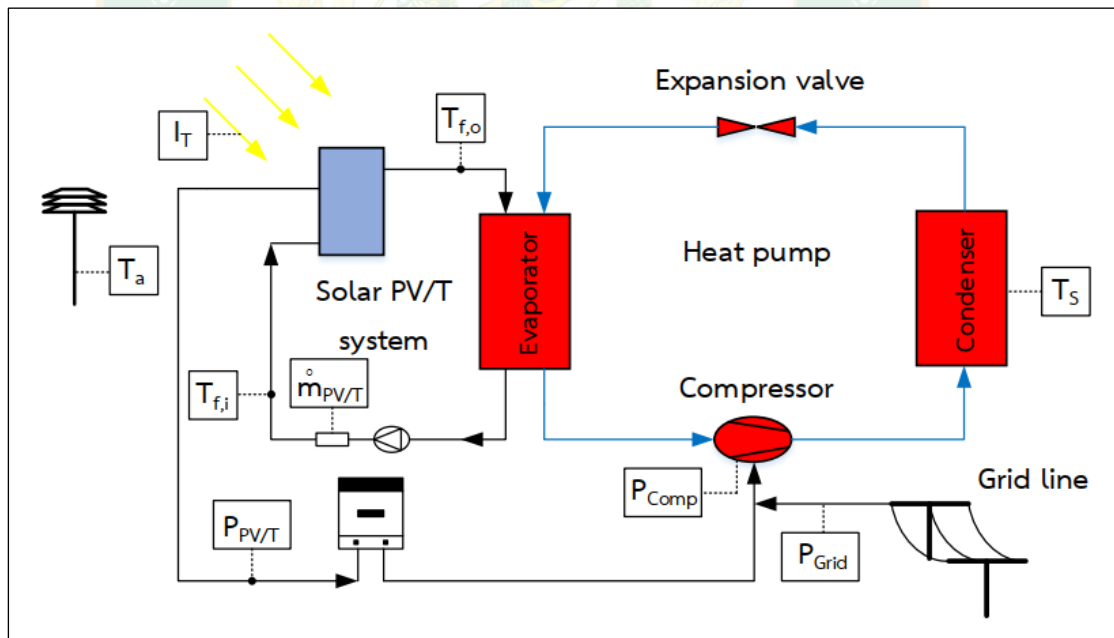
ภาพที่ 53 ขั้นตอนทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ตาม ASHRAE Standard 93-2003

ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ตั้งแต่เวลา 9:00 – 16:00 น. ด้วยการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนจำนวน 3 ค่าคือ 2.0 LPM 2.25 LPM และ 2.5 LPM ที่สามารถทำให้ได้ค่าพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) สูงสุด

ขั้นตอนที่ 5 ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อหาจำนวนและขนาดของอุปกรณ์ที่เหมาะสม เมื่อได้ขนาดระบบจึงทำการติดตั้งระบบที่มีการออกแบบระบบดังในภาพที่ 54 ซึ่งระบบจะประกอบด้วย ปั๊มความร้อนเสริม ที่มีถังน้ำร้อนขนาด 100 L แผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ (PV/T Box) จำนวน 1 แผง ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 330 Wp หลักการทำงานของระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มจาก เมื่อน้ำที่ไหลเข้าไปรับความ

ร้อนจากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น และนำไปจ่ายให้กับส่วนทำระเหยเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานของปั๊มความร้อน ส่วนการทำงานของปั๊มความร้อนเริ่มจาก สารทำงานในสถานะไอร้อนยวดยิ่งที่ออกจากเครื่องอัดไอไหลออกไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนเพื่อรับความร้อนภายในเครื่องควบแน่น แล้วสารทำงานจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลต่อไปยังวาล์วลดความดัน เพื่อลดอุณหภูมิและความดันก่อนที่จะไหลไปที่ส่วนทำระเหยและหมุนเวียนไปเรื่อย ๆ ส่วนไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) จะถูกป้อนให้กับ Compressor ของระบบปั๊มความร้อน

ขั้นตอนที่ 6 ทำการทดสอบและเก็บบันทึกข้อมูล ในการทดสอบระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 9.00 – 16.00 น. ซึ่งได้ปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 3 อัตราการไหล คือ 2.0 LPM 2.25 LPM และ 2.5 LPM เพื่อหาอัตราการไหลที่ทำให้สมรรถนะของระบบดีที่สุด และทำการบันทึกข้อมูลการทดลองทุก ๆ 5 นาที โดยได้ทำการติดตั้งจุดตรวจวัดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 รายละเอียดตำแหน่งตรวจวัดของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยนำเอาค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ไปวิเคราะห์สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Thermal Hybrid Efficiency; $\eta_{PV/T}$) ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (Energy Efficiency Ratio; EER_{HP}) และสมรรถนะของระบบ

ขั้นตอนที่ 8 ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายในโดยคำนวณได้จากสมการที่ 18-20



บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

จากงานวิจัยในการทดสอบระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

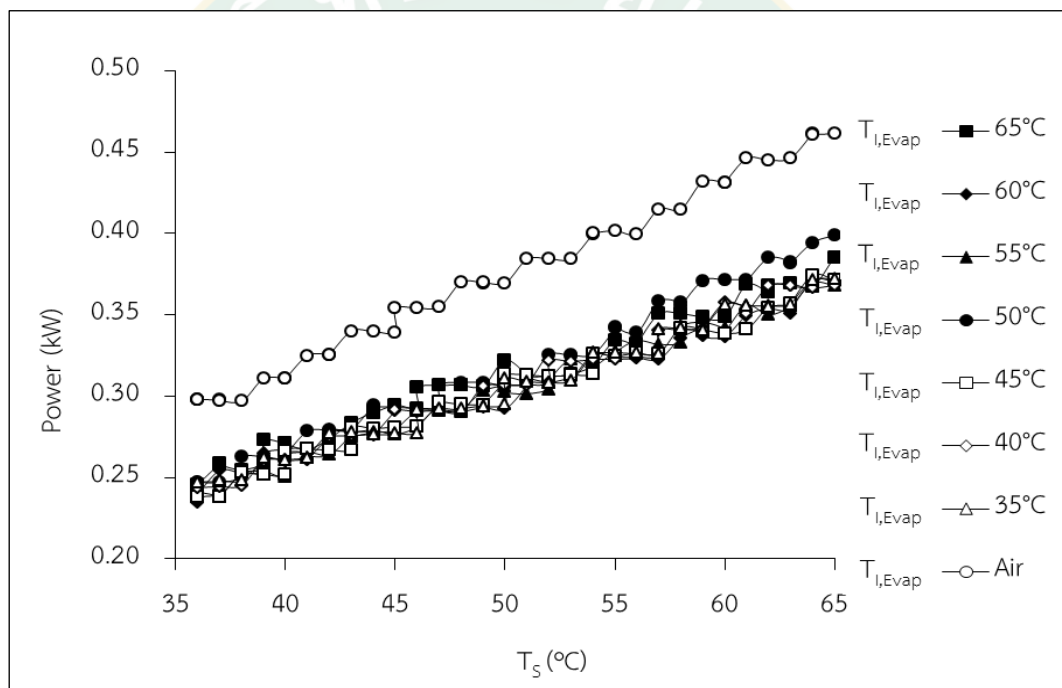
1. ศึกษาสมรรถนะของปั๊มความร้อน และแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนผ่านแผงที่เหมาะสมแก่ระบบ
3. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน

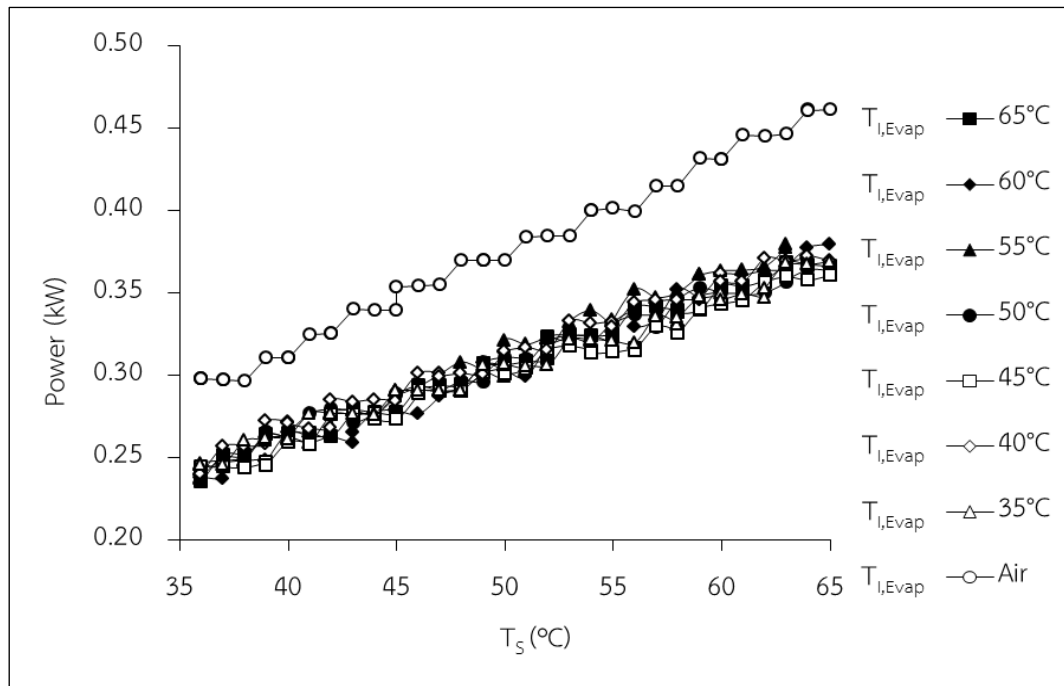
กำลังงานของคอมเพรสเซอร์

ในการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนพบว่ากำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์นั้นเปลี่ยนไปตามอัตราการไหลและสถานะอุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน จากภาพที่ 55 ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 1.0 LPM พบว่า กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนเสริมในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.251 - 0.404 kW_e ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM แสดงดังภาพที่ 56 พบว่า กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนเสริมต่ำกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 1.0 LPM โดยแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.235 - 0.379 kW_e ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.25 LPM แสดงดังภาพที่ 57 พบว่า กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนเสริมสูงกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM โดยแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.243 - 0.383 kW_e จากภาพที่ 58 ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 3.0 LPM พบว่า กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนเสริมต่ำกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.25 LPM โดยแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.238 - 0.399 kW_e ในขณะที่กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 0.297 - 0.462 kW_e โดยพบว่า กำลังงานที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์ช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่าย

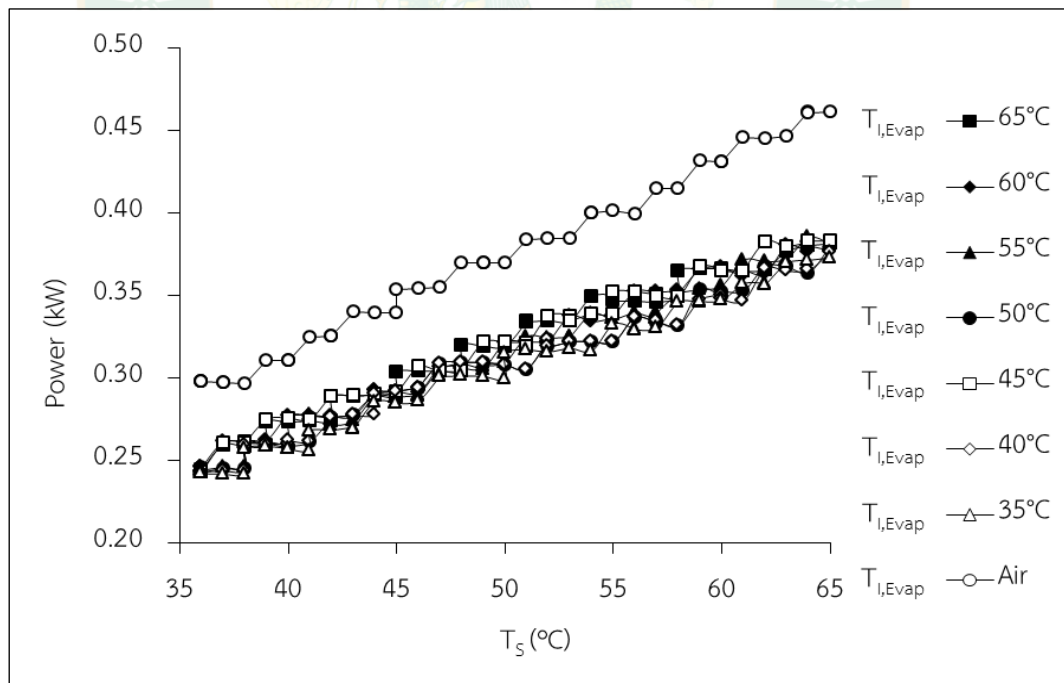
ให้กับส่วนทำระเหยและอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อน อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากส่วนทำระเหย จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ต้องใช้กำลังงานในการอัดไอสารทำงานสูงขึ้น จากนั้นกำลังงานที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้คอมเพรสเซอร์ต้องใช้กำลังงานในการอัดไอสารทำงานเพิ่มมากขึ้น ส่วนกำลังงานที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศในส่วนทำระเหยที่สูงกว่าเพราะว่าอุณหภูมิของอากาศนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำร้อนจึงทำให้ต้องใช้กำลังงานในการอัดไอที่เพิ่มสูงขึ้น จากผลการทดสอบ พบว่า กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM มีค่าต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 0.235 - 0.379 kW_e



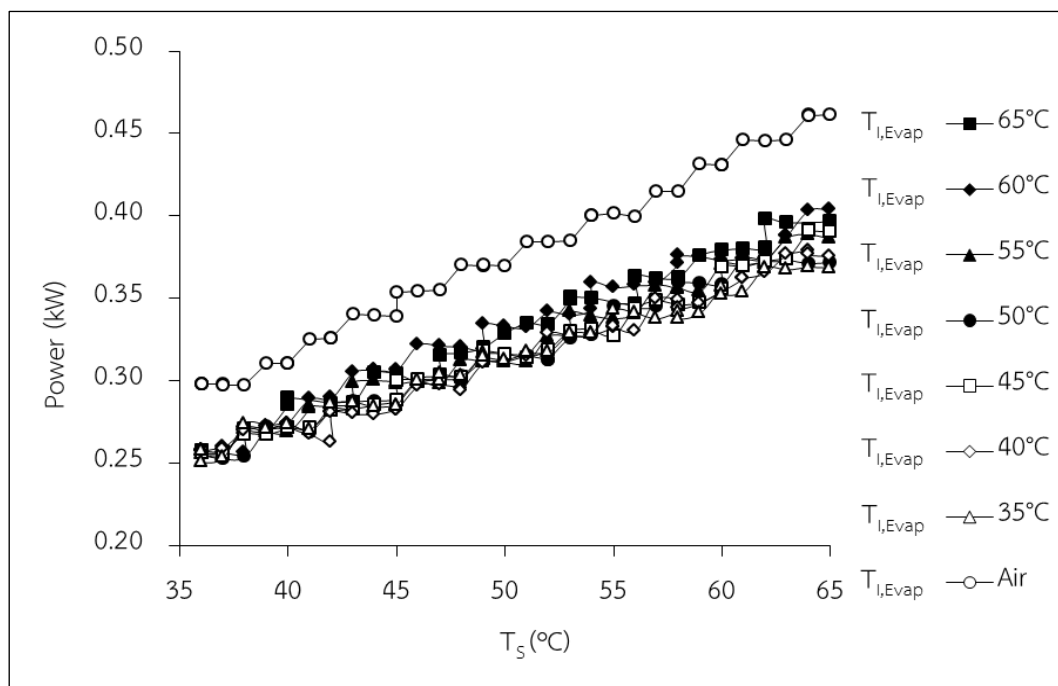
ภาพที่ 55 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 56 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.25 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย

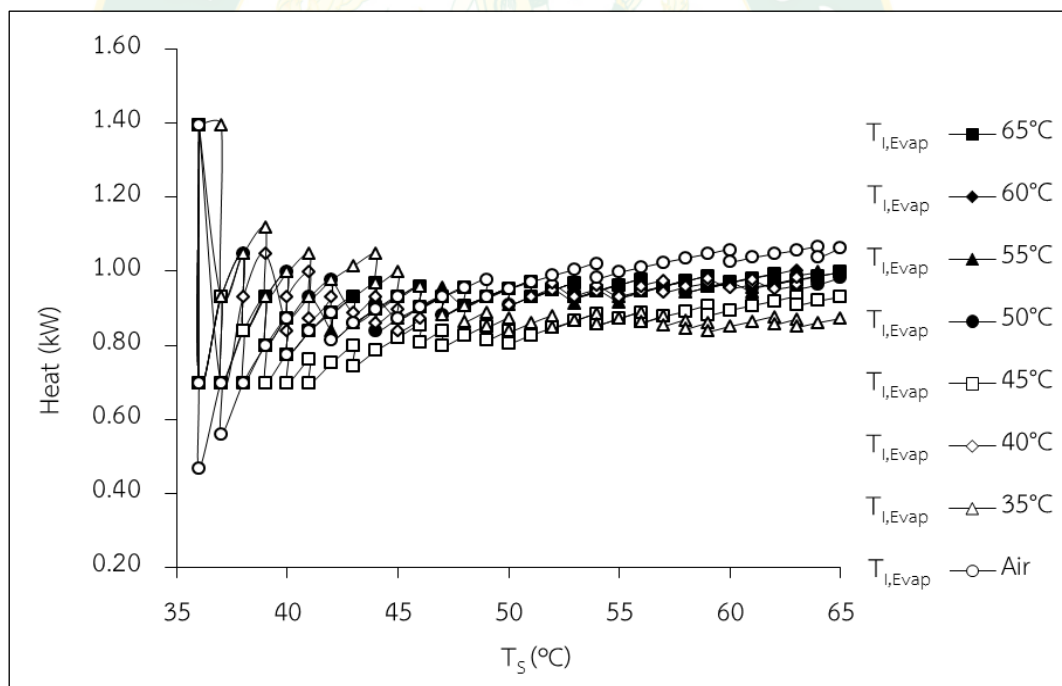


ภาพที่ 58 กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 3.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย

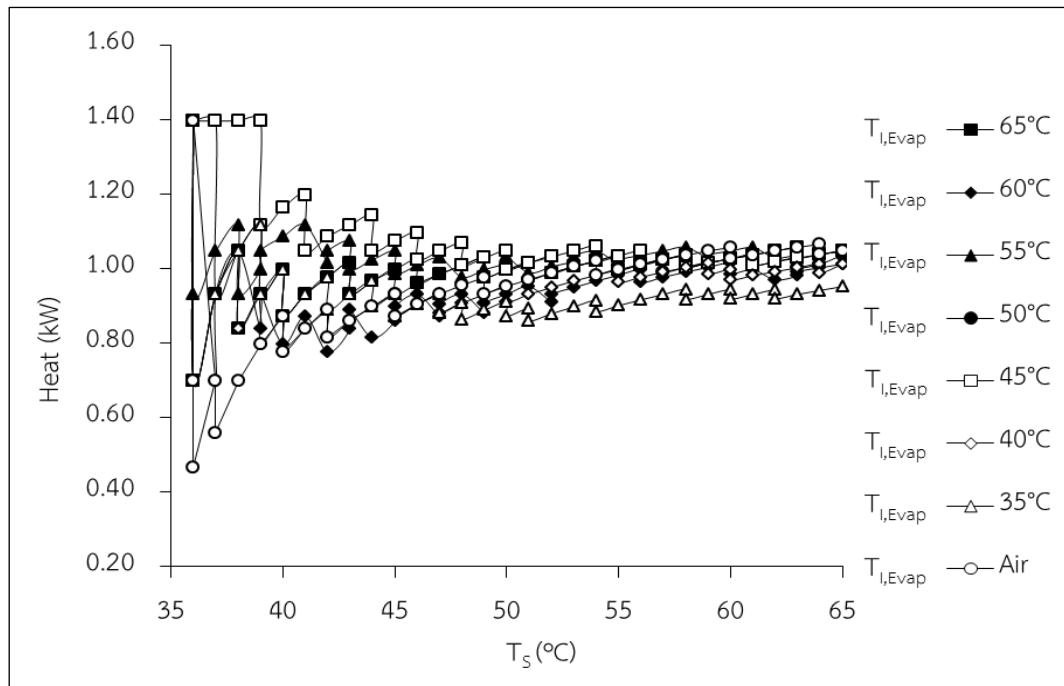
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่คอนเดนเซอร์

จากภาพที่ 59 แสดงความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ (Q_{Cond}) ของปั๊มความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 1.0 LPM พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์อยู่ในช่วง 0.558 – 1.396 kW ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM แสดงดังภาพที่ 60 พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์สูงกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 1.0 LPM มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 0.698 - 1.396 kW ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.25 LPM แสดงดังภาพที่ 61 พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ต่ำกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 0.615 - 1.396 kW จากภาพที่ 62 ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 3.0 LPM พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ต่ำกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.25 LPM มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 0.538 – 1.396 kW ในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์อยู่ในช่วง 0.465 – 1.396 kW โดยพบช่วงแรกอุณหภูมิน้ำในถังมีค่าที่ต่ำ ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานและอุณหภูมิน้ำในถังมากขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกมีค่าที่สูง เมื่ออุณหภูมิในถังเริ่มเข้าสู่อุณหภูมิ

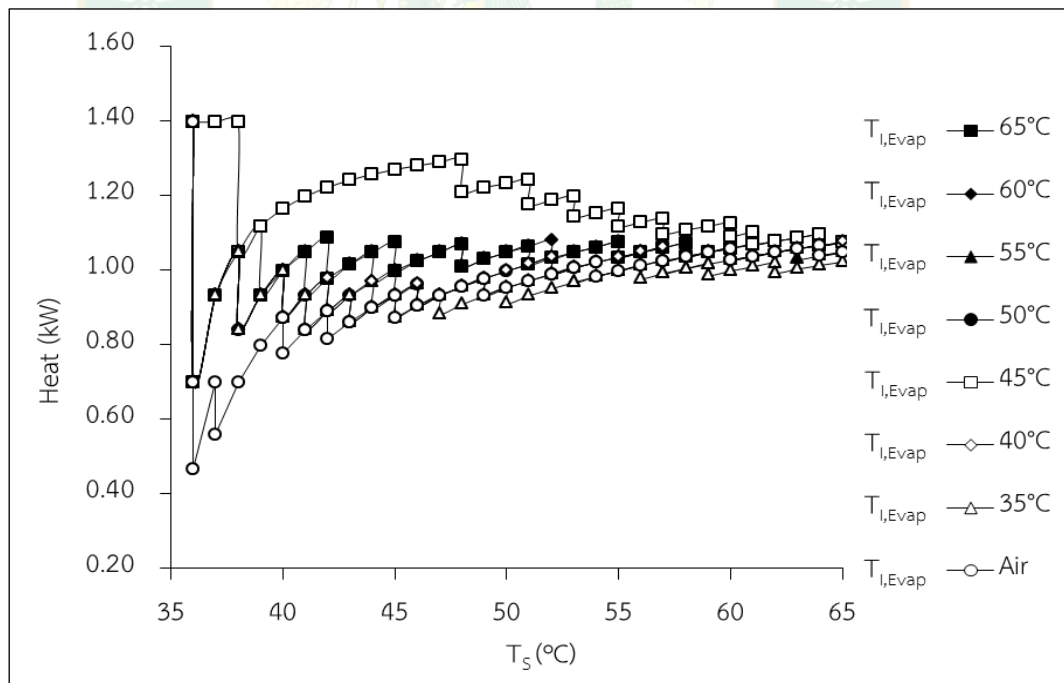
ประมาณ 60 °C ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผลิตได้มีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่สูงขึ้นและเข้าใกล้อุณหภูมิ 65 °C ที่ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้เบื้องต้น จึงทำให้อุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสารทำงาน และส่งผลต่อผลต่างของอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลงและทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนมีค่าที่ลดลงเรื่อย ๆ ในส่วนของอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหย การที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานและอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิลดลงก็จะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานและอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยลดลง อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะลดลงตามไปด้วย จากผลการทดสอบ พบว่า ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ (Q_{Cond}) ของปั๊มความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์สูงสุด อยู่ในช่วง 0.698 - 1.396 kW



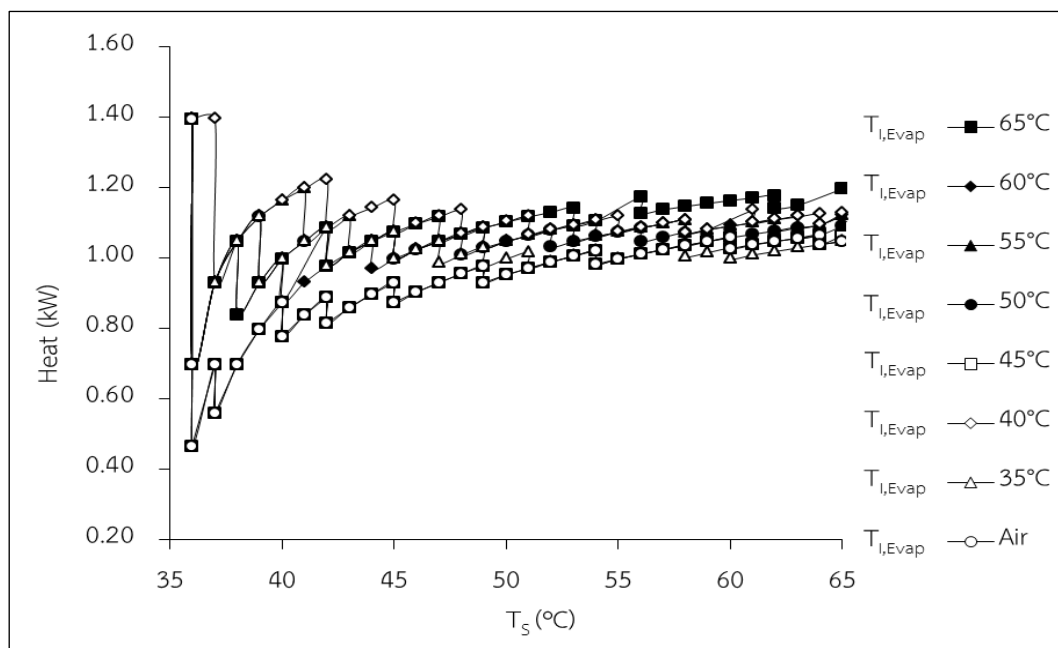
ภาพที่ 59 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 60 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 61 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.25 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย

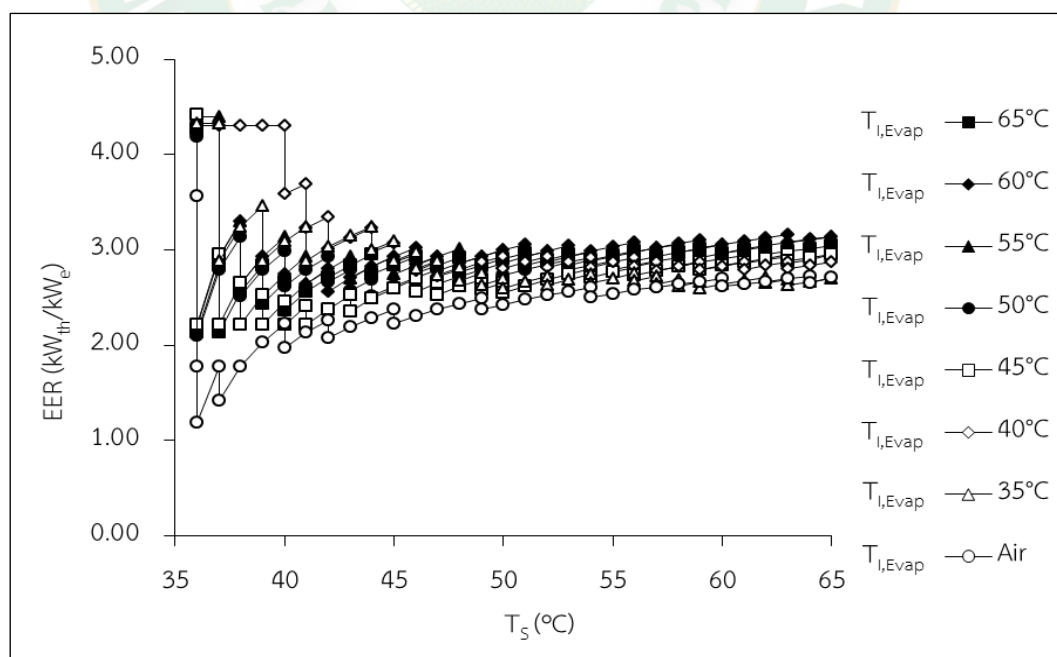


ภาพที่ 62 ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 3.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย

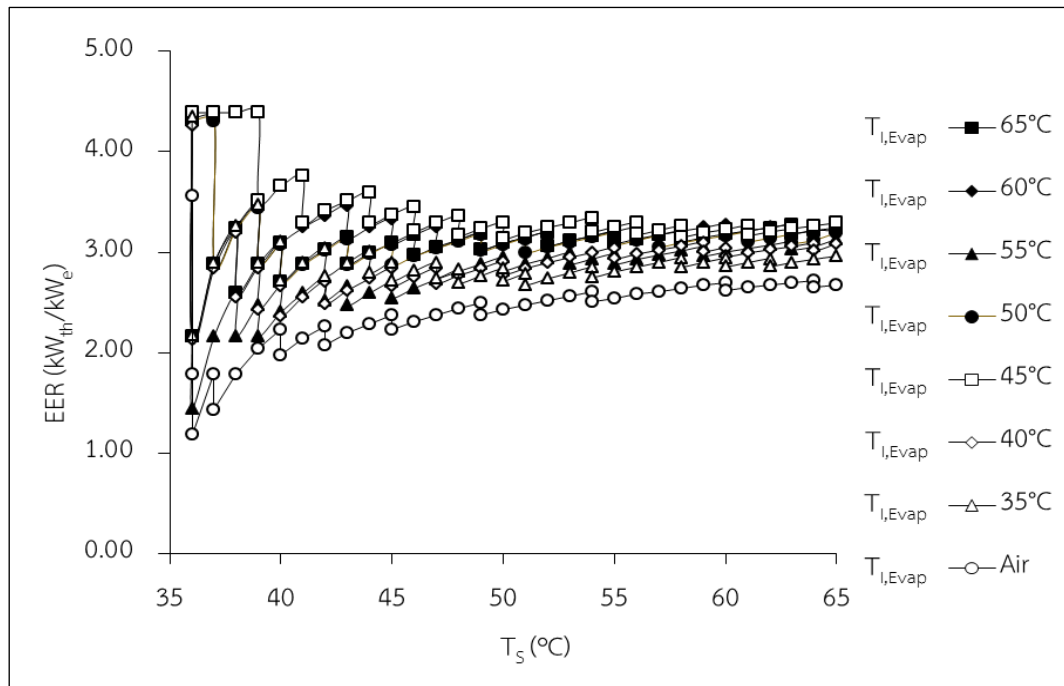
ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน

จากภาพที่ 63 แสดงอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ น้ำร้อนต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 1.0 LPM พบว่า EER ของปั๊มความร้อนเสริมที่ได้รับเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.67-3.09 อุณหภูมิ น้ำร้อนที่เหมาะสมที่สุด อยู่ที่ 40 °C ซึ่งสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 3.09 ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM แสดงดังภาพที่ 64 พบว่า EER ของปั๊มความร้อนเสริม สูงกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 1.0 LPM ซึ่ง EER ของปั๊มความร้อนเสริมที่ได้รับเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.97-3.41 อุณหภูมิ น้ำร้อนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 45 °C ซึ่งสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทาง พลังงานของปั๊มความร้อนเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 3.41 ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.25 LPM แสดงดัง ภาพที่ 65 พบว่า EER ของปั๊มความร้อนเสริมต่ำกว่ากรณีทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 LPM ซึ่ง EER ของปั๊มความร้อนเสริมที่ได้รับเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.88-3.34 อุณหภูมิ น้ำร้อนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 45 °C ซึ่งสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 3.34 จาก ภาพที่ 66 ในกรณีทดสอบที่อัตราการไหล 3.0 LPM พบว่า EER ของปั๊มความร้อนเสริมต่ำกว่ากรณี ทดสอบที่อัตราการไหล 2.25 LPM ซึ่ง EER ของปั๊มความร้อนเสริมที่ได้รับเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.80-3.33 อุณหภูมิ น้ำร้อนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 40 °C ซึ่งสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน ของปั๊มความร้อนเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 3.33 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความ

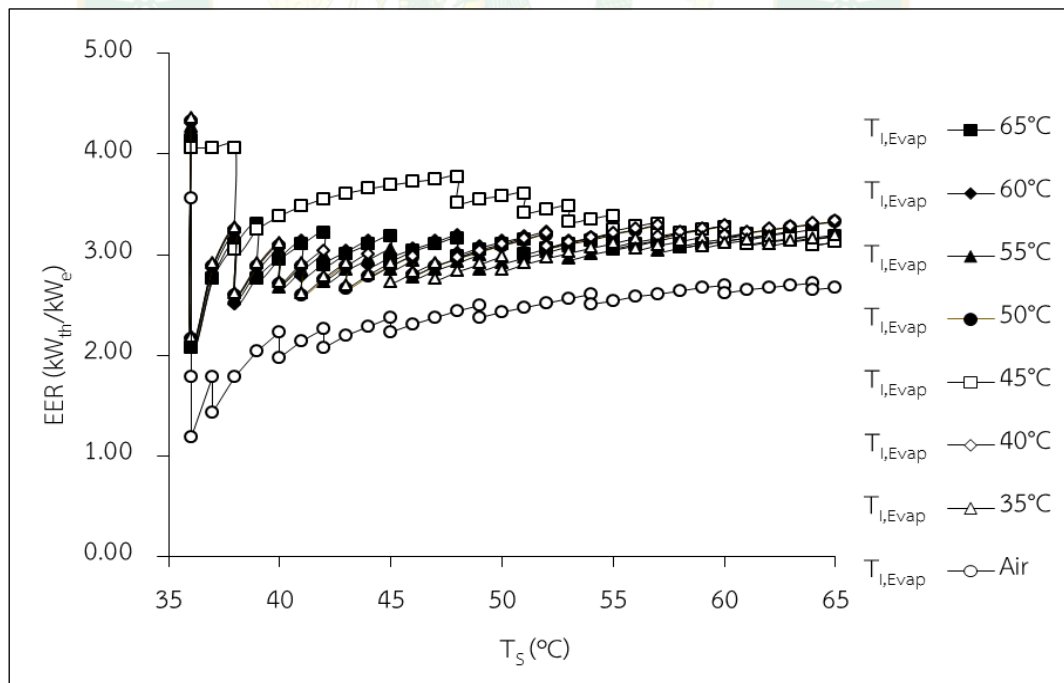
ร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.37 โดยพบว่า ช่วงแรกค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนจะมีค่าที่สูงเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่ต่ำทำให้ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์มีค่าที่สูงและกำลังงานที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์ ช่วงแรกที่ต่ำ เมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเริ่มสูงขึ้นทำให้ความร้อนที่ผลิตได้จากคอนเดนเซอร์มีค่าลดลงเรื่อย ๆ และกำลังงานที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์ที่สูงขึ้น จากผลการทดสอบ พบว่า สามารถเพิ่มค่าอัตราส่วน ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำร้อนในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนให้สูงกว่าค่า อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.67 ถึง 3.41 โดยพบว่า ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำร้อนจ่าย ให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนสูงกว่าปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศในส่วนทำ ระเหยของปั๊มความร้อน เพราะว่าอุณหภูมิที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยจะมีผลต่อค่าอัตราส่วน ประสิทธิภาพทางพลังงาน เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนต่ำทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหยลดลงโดยปริมาณความร้อนดังกล่าวจะถ่ายเทออกจาก คอนเดนเซอร์ลดลง ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนลดลง ขณะเดียวกันเมื่อ อุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำ ระเหยเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความร้อนดังกล่าวจะถ่ายเทออกจากคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วน ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนจะสูงขึ้นตาม



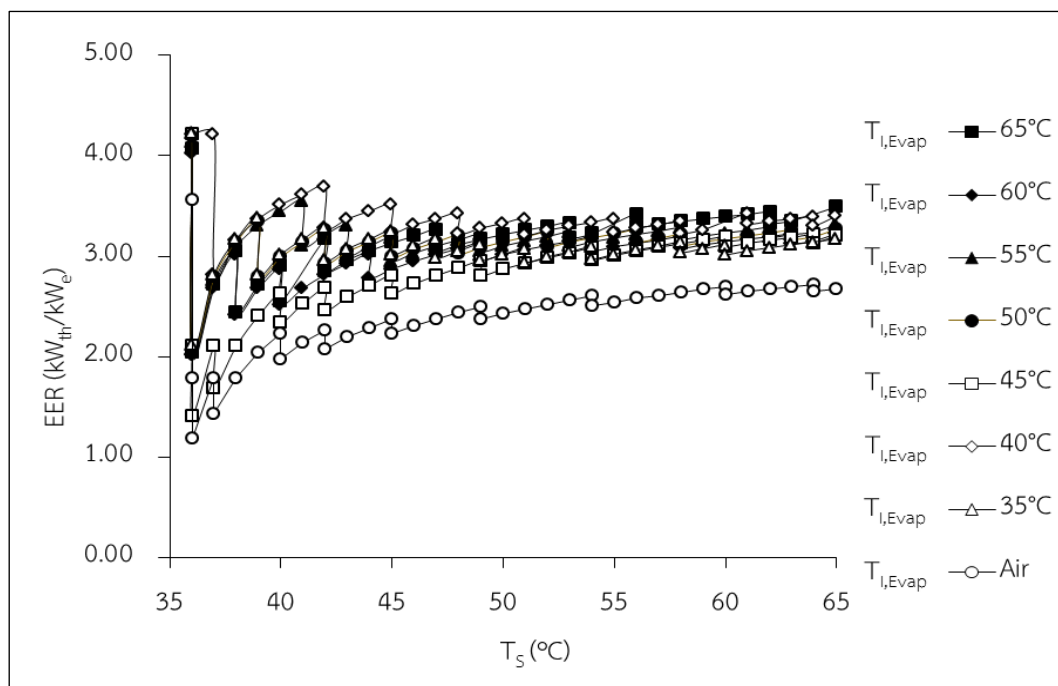
ภาพที่ 63 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้า ส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 64 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 65 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 2.25 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย



ภาพที่ 66 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 3.0 LPM เปรียบเทียบกับกรณีใช้อากาศเข้าส่วนทำระเหย

จากตารางที่ 3 แสดงค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) ของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลและสภาวะอุณหภูมิน้ำร้อนต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน พบว่า ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำร้อนในส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้แหล่งอากาศในทุกอัตราการไหล นอกจากนี้อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเพิ่มขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 2.0 LPM ซึ่งมีอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เฉลี่ยสูงสุดที่ 3.41 และอุณหภูมิน้ำร้อนที่เหมาะสมที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนเท่ากับ 45 °C

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนในแต่้อตราการไหล

Flow rate	Energy Efficiency Ratio (EER)						
	อุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้กับส่วนระเหยของปั๊มความร้อน						
	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C
1.0 LPM	2.87	3.09	2.67	2.82	3.01	2.95	2.85
2.0 LPM	2.89	2.97	3.41	3.13	3.02	3.24	3.10
2.25 LPM	2.88	3.07	3.34	3.05	2.99	3.07	3.09
3.0 LPM	3.08	3.33	2.80	3.14	3.18	3.00	3.15

จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการไหลที่ 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อนที่เหมาะสมที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนเท่ากับ 45 °C ซึ่งมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) เฉลี่ยสูงสุดที่ 3.41 จึงเลือกใช้ข้อมูลในการทดสอบส่วนนี้เป็นข้อมูลหลักเพื่อไปวิเคราะห์เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในขั้นตอนต่อไป

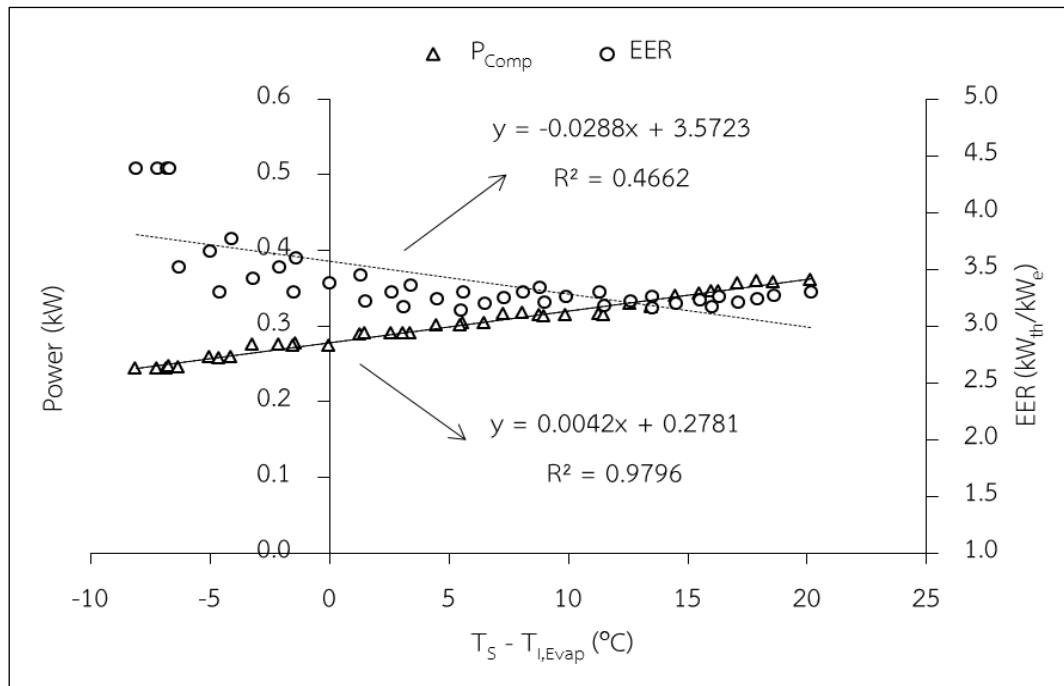
จากภาพที่ 67 แสดงค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าของปั๊มความร้อน พบว่า มีการแปรผันตามน้ำร้อนที่ป้อนให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน และอุณหภูมิน้ำในถัง ดังนั้นเมื่อนำเอาผลต่างอุณหภูมิน้ำในถังกับอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้กับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน ($T_S - T_{I,Evap}$) และค่า EER ไปวิเคราะห์ด้วยสมการเส้นตรง พบว่าเมื่อผลต่างอุณหภูมิต่ำจะทำให้ค่า EER สูงขึ้น แต่หากผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า EER ต่ำลง เนื่องจากว่าถ้าหากอุณหภูมิในถังเพิ่มขึ้นจะทำให้ปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$EER_{HP,Sim} = 3.5723 - [0.0288 (T_S - T_{I,Evap})] \quad \text{สมการที่ 21}$$

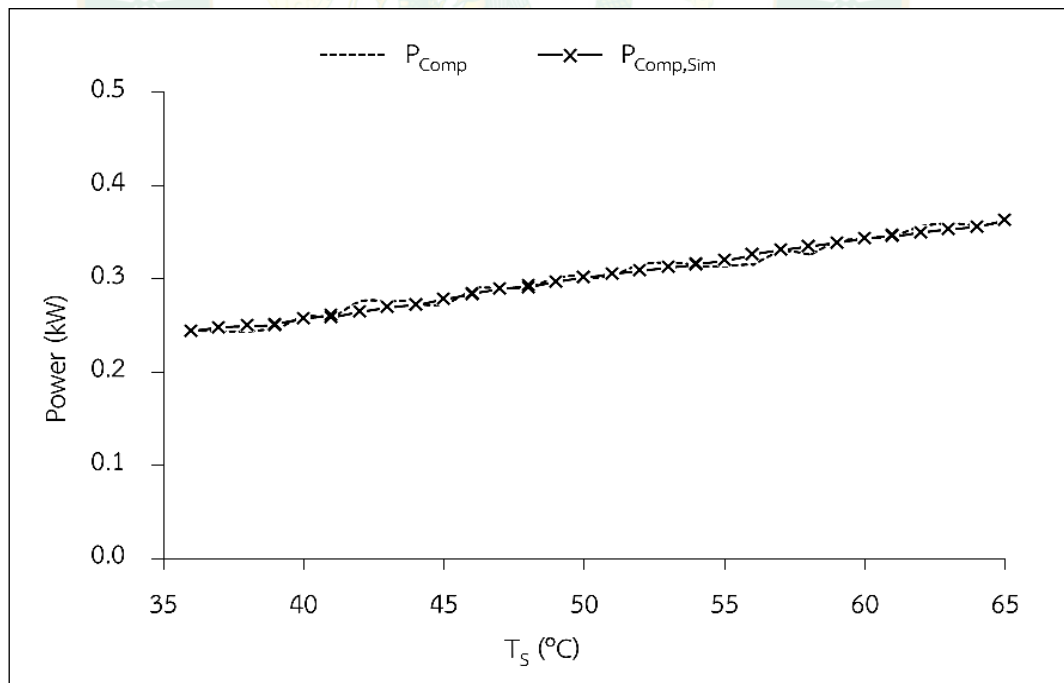
ในการทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$P_{Comp,Sim} = 0.2781 + [0.0042 (T_S - T_{I,Evap})] \quad \text{สมการที่ 22}$$

โดยสมการที่ 21 ได้จากการนำเอาข้อมูลผลทดสอบปั๊มความร้อน เพื่อมาทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) และนำเอาสมการดังกล่าวไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่ามีความใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีความคลาดเคลื่อน 1.34% แสดงดังภาพที่ 68



ภาพที่ 67 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (EER)
 และกำลังไฟฟ้าของปั๊มความร้อน

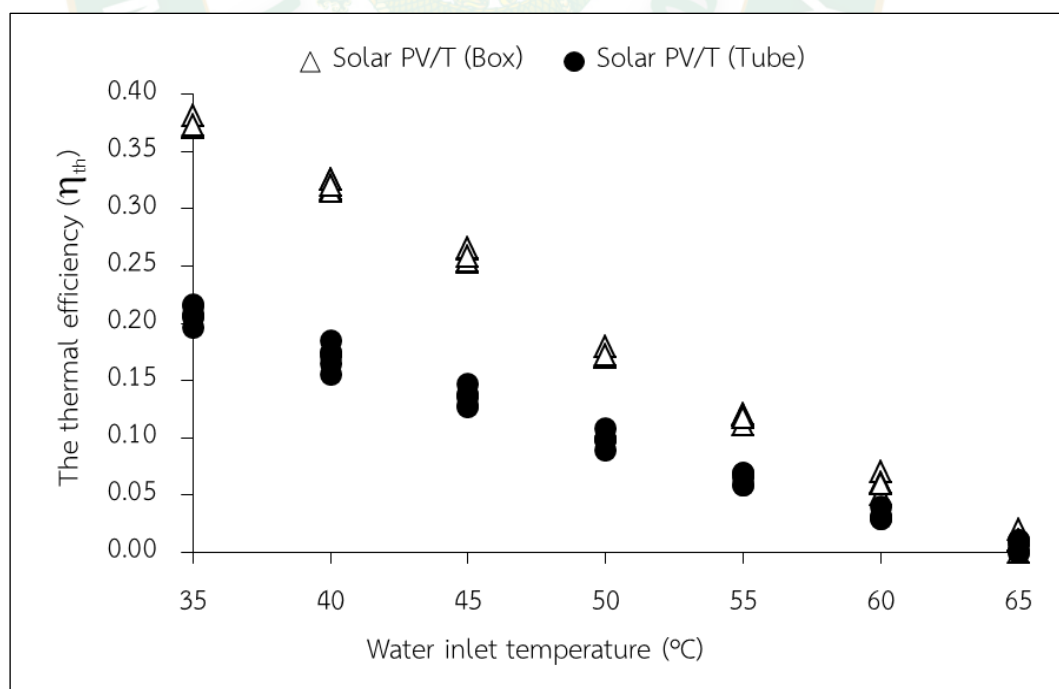


ภาพที่ 68 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า

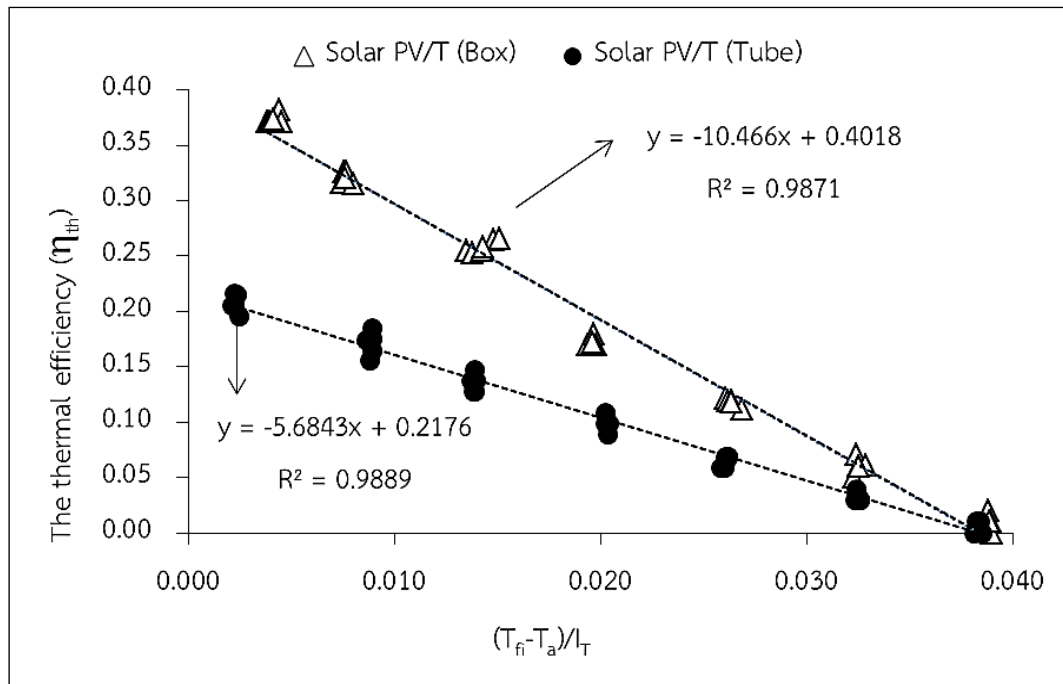
การทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำ (PV/T Box) และแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อทองแดง (PV/T Tube) โดยทดสอบตามมาตรฐานของ ASHRAE STANDARD 93-2003 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ผลทดสอบพบว่าหากอุณหภูมิน้ำเข้าแผงมีค่าที่สูงขึ้นจะทำอัตราการถ่ายเทความร้อนของทั้งสองแผงมีค่าลดลง ดังภาพที่ 69 เนื่องจากอุณหภูมิแผงสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ 35 °C จะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่าที่สูงที่สุด จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำตาม ASHRAE STANDARD 93-2003 พบว่ามีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.4018 และ $F_R U_L$ เท่ากับ 10.466 W/m²·K สำหรับแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง พบว่ามีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.1811 และ $F_R U_L$ เท่ากับ 7.5034 W/m²·K ดังภาพที่ 70 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำมีประสิทธิภาพทางด้านความร้อนสูงกว่าแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง



ภาพที่ 69 ความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิน้ำเข้าแผง

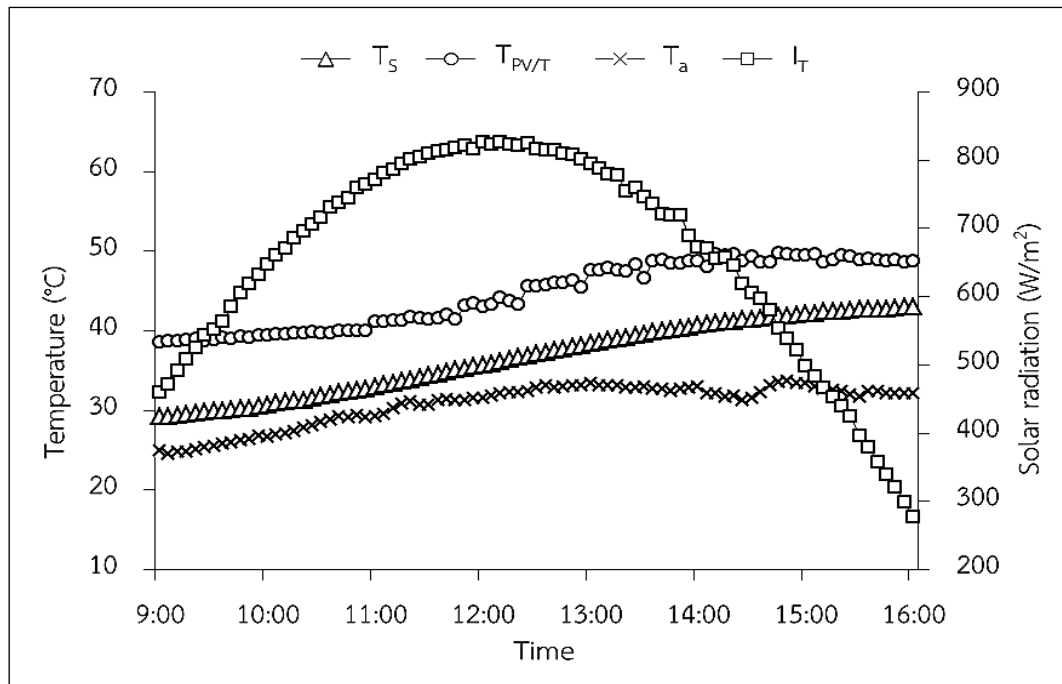


ภาพที่ 70 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ กล่องน้ำ

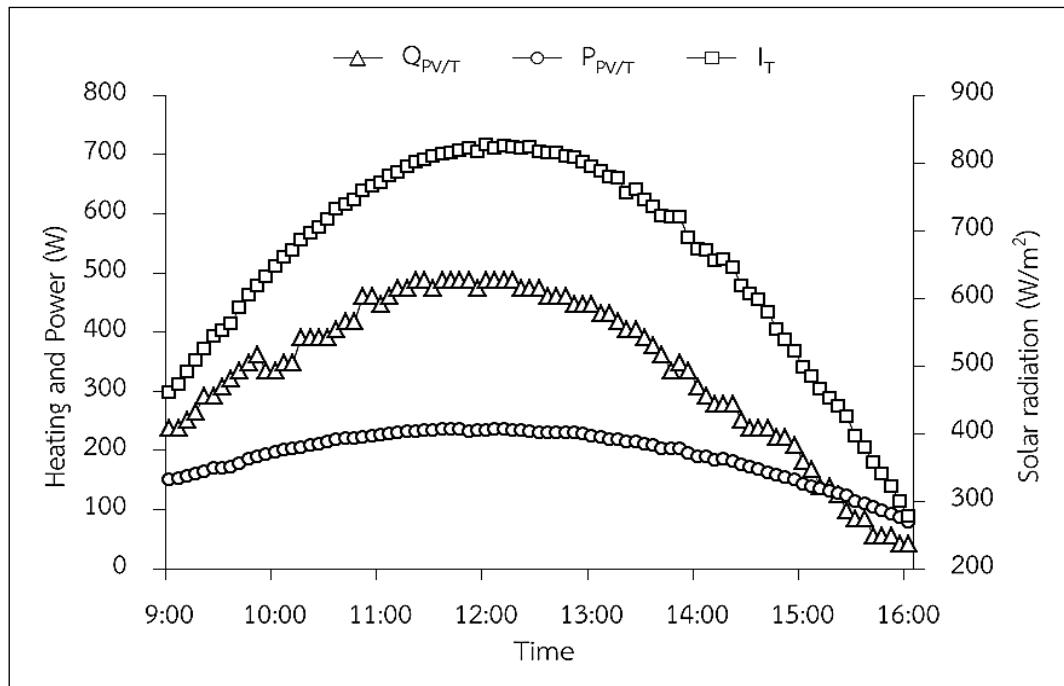
การทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการทำงานของระบบทั้งวันเพื่อหาประสิทธิภาพโดยรวมของแผงและพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) โดยการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนจำนวน 3 ค่า ตั้งแต่เวลา 9:00 – 16:00 น. ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ 144 L และทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

ภาพที่ 71 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ (ทดสอบที่แผงเอียงมุม 10°) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ 2.0 LPM พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:00 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 826.22 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลงสำหรับอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่เวลา 9:00 น. มีค่าเท่ากับ 24.8°C และสูงสุด 33.5°C ณ เวลา 14:50 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 38.6°C จนถึงเวลา 14:45 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 49.8°C โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 44.6°C สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 29.2°C และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ 42.7°C ณ เวลา 15:50 น.

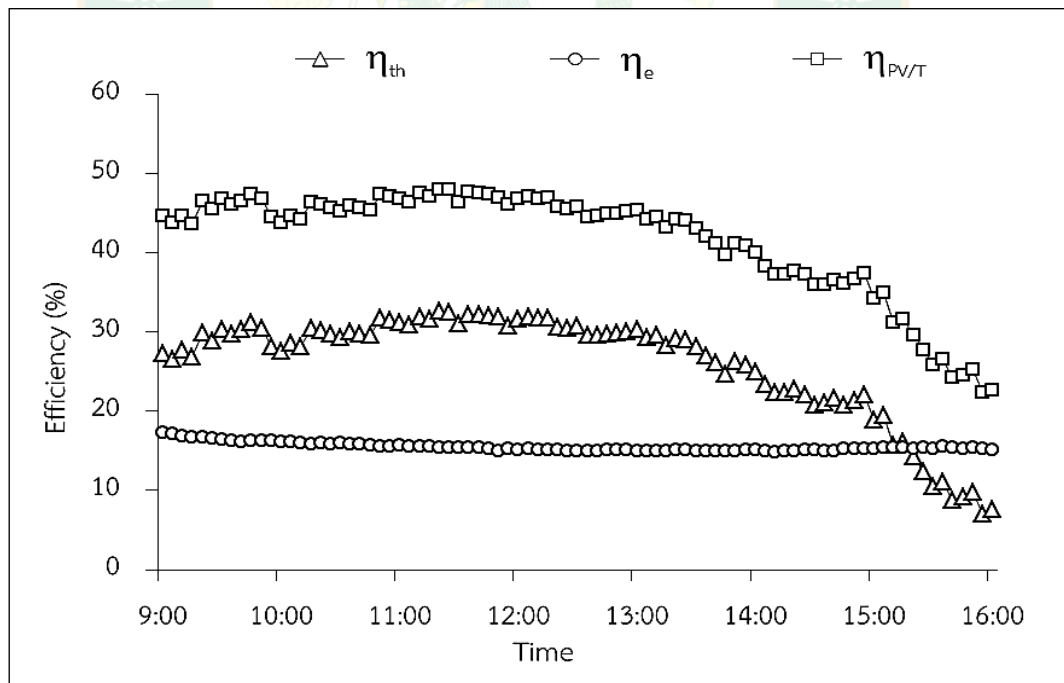


ภาพที่ 71 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM

จากภาพที่ 72 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ พบว่า ณ เวลา 11.20 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 487.99 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 8.61 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่นเมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 235.8 W ที่เวลา 11.45 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ 1,352.01 Wh จากภาพที่ 73 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 15.46% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 26.02% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 41.48% คิดเป็นพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) มีค่าเท่ากับ 13.24 MJ

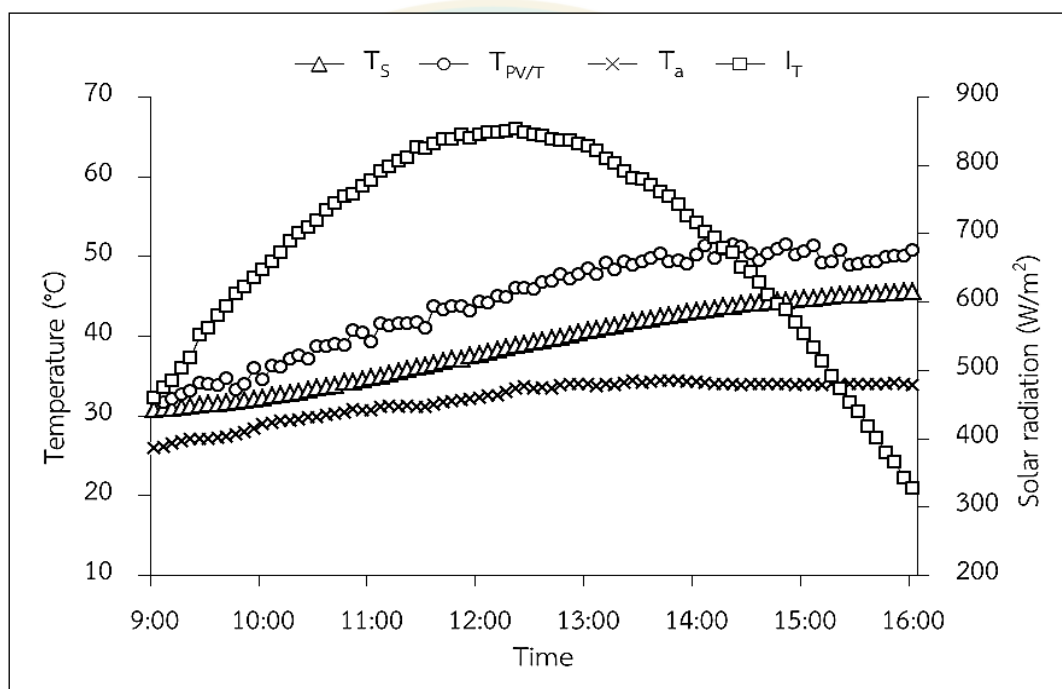


ภาพที่ 72 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM



ภาพที่ 73 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM

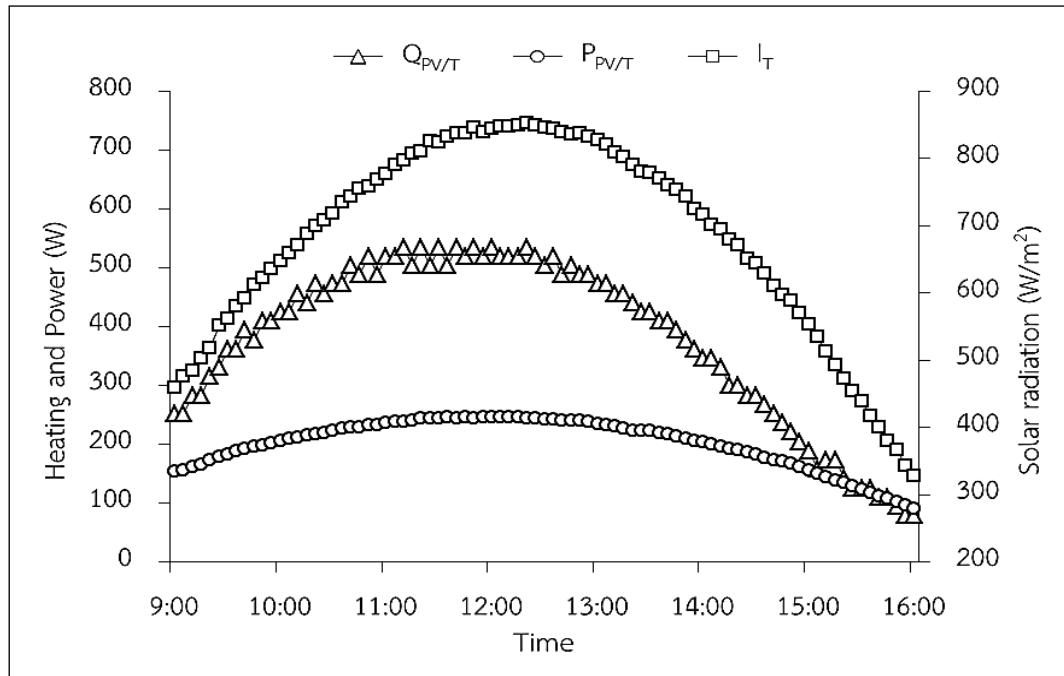
ภาพที่ 74 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ (ทดสอบที่มุม 10°) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ 2.25 LPM พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:20 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 852.33 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง สำหรับอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่เวลา 9:00 น. มีค่าเท่ากับ 25.8°C และสูงสุด 34.3°C ณ เวลา 13:45 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 32.3°C จนถึงเวลา 14:50 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 51.5°C โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 44.2°C สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 30.8°C และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ 45.6°C ณ เวลา 15:55 น.



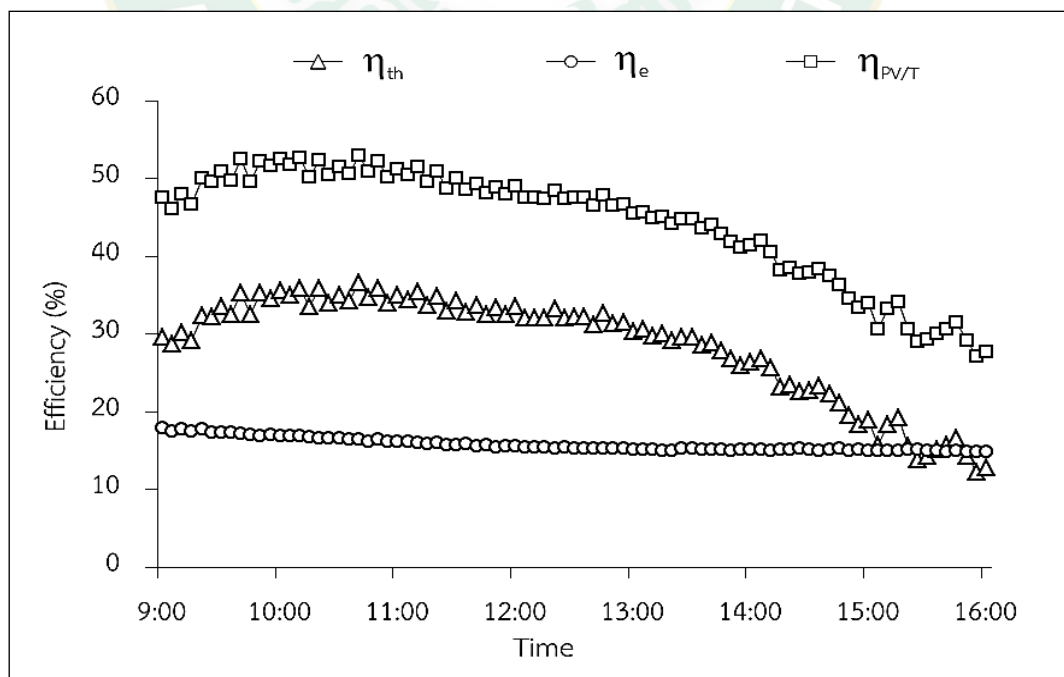
ภาพที่ 74 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM

จากภาพที่ 75 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ พบว่า ณ เวลา 12:00 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 535.27 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 9.66 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่นเมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 247.1 W ที่เวลา 11:45 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ $1,424.85 \text{ Wh}$ จากภาพที่ 76 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ย

อยู่ที่ 15.73% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28.49% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 44.21% คิดเป็นพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) มีค่าเท่ากับ 14.51 MJ

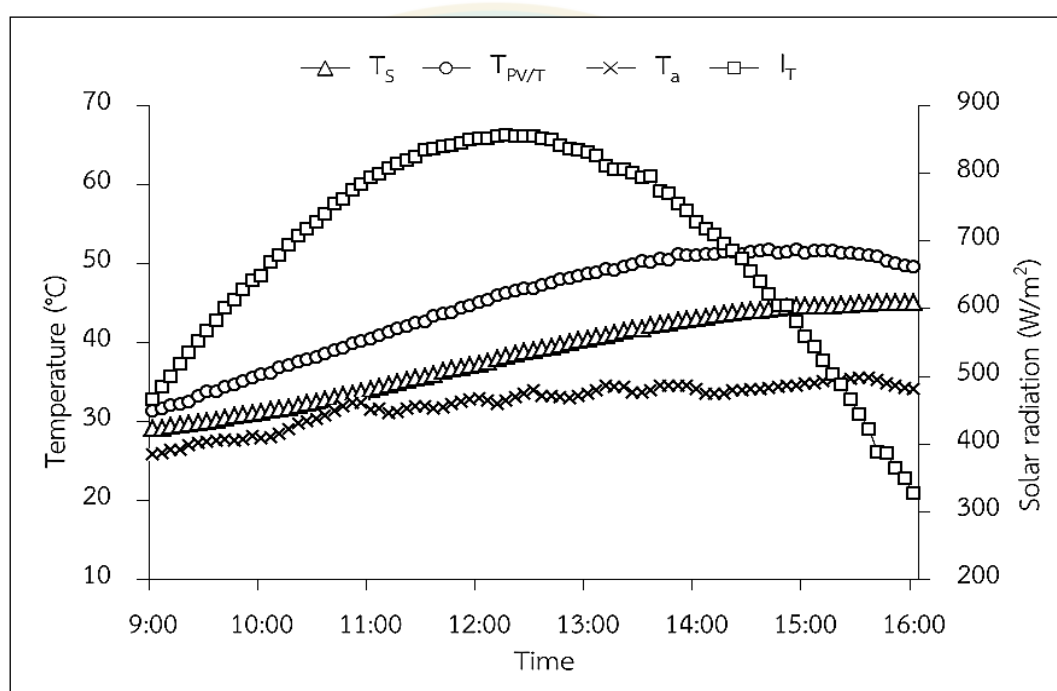


ภาพที่ 75 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM



ภาพที่ 76 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM

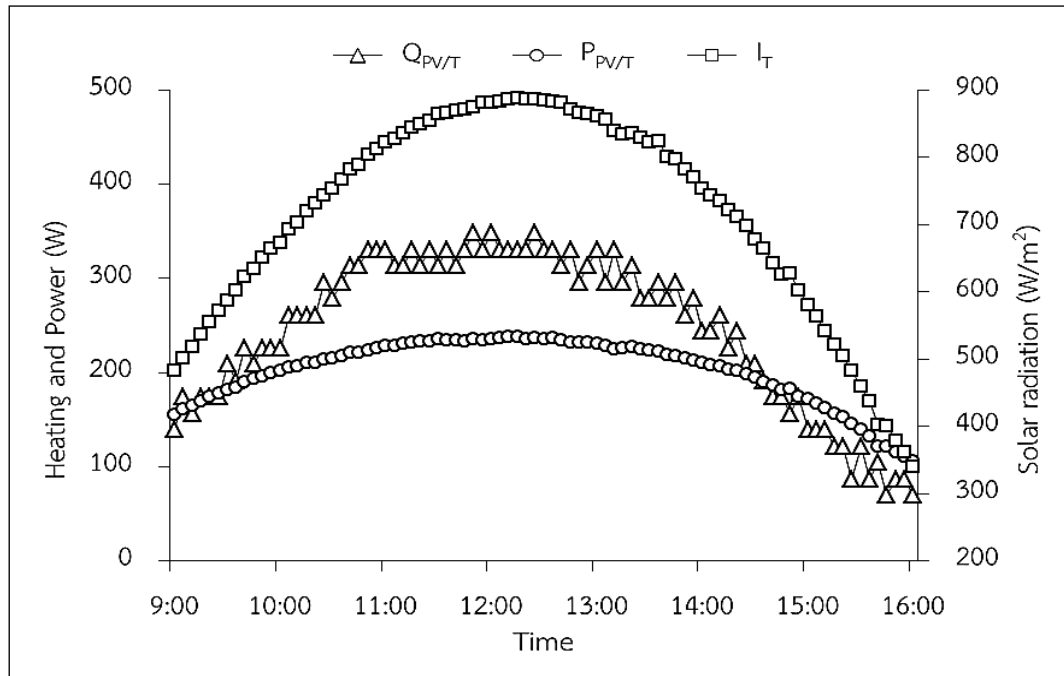
ภาพที่ 77 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ (ทดสอบที่มุม 10°) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ 2.5 LPM พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:15 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 856.07 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง สำหรับอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 9:00 น. มีค่าเท่ากับ 25.6°C และสูงสุด 35.3°C ณ เวลา 15:30 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 31.4°C จนถึงเวลา 14:55 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 51.8°C โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 44.8°C สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 29.1°C และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ 45.1°C ณ เวลา 15:50 น.



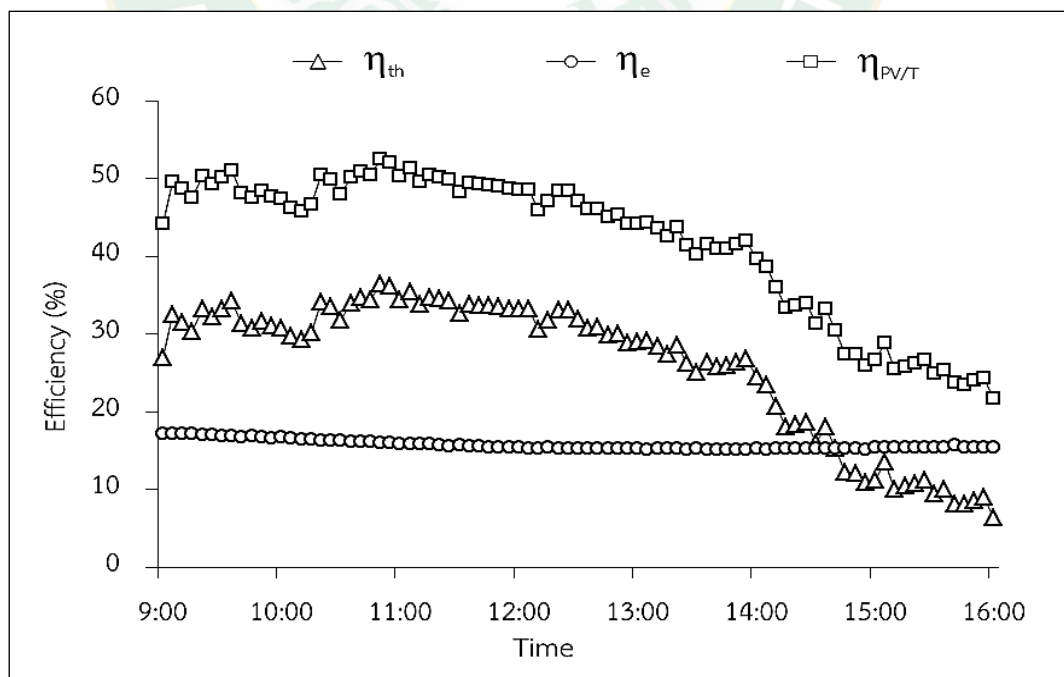
ภาพที่ 77 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM

จากภาพที่ 78 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ พบว่า ณ เวลา 11:55 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 539.96 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 9.04 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่นเมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 246.8 W ที่เวลา 12:15 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ $1,437.48 \text{ Wh}$ จากภาพที่ 79 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ย

อยู่ที่ 15.70% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 26.10% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 41.80% คิดเป็นพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) มีค่าเท่ากับ 13.95 MJ



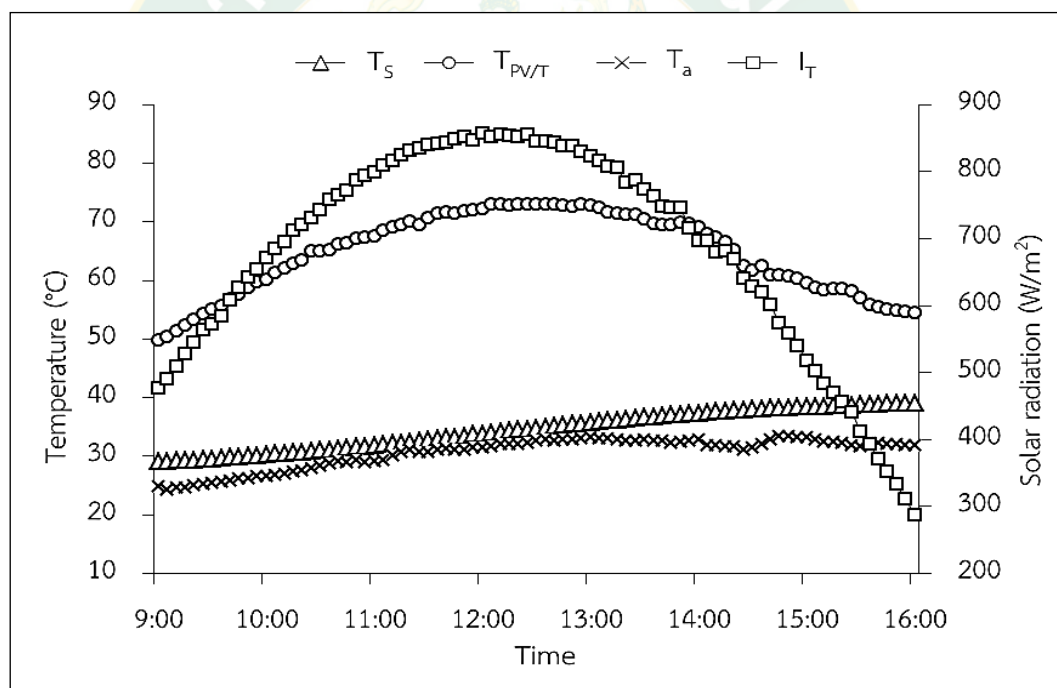
ภาพที่ 78 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM



ภาพที่ 79 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อทองแดง

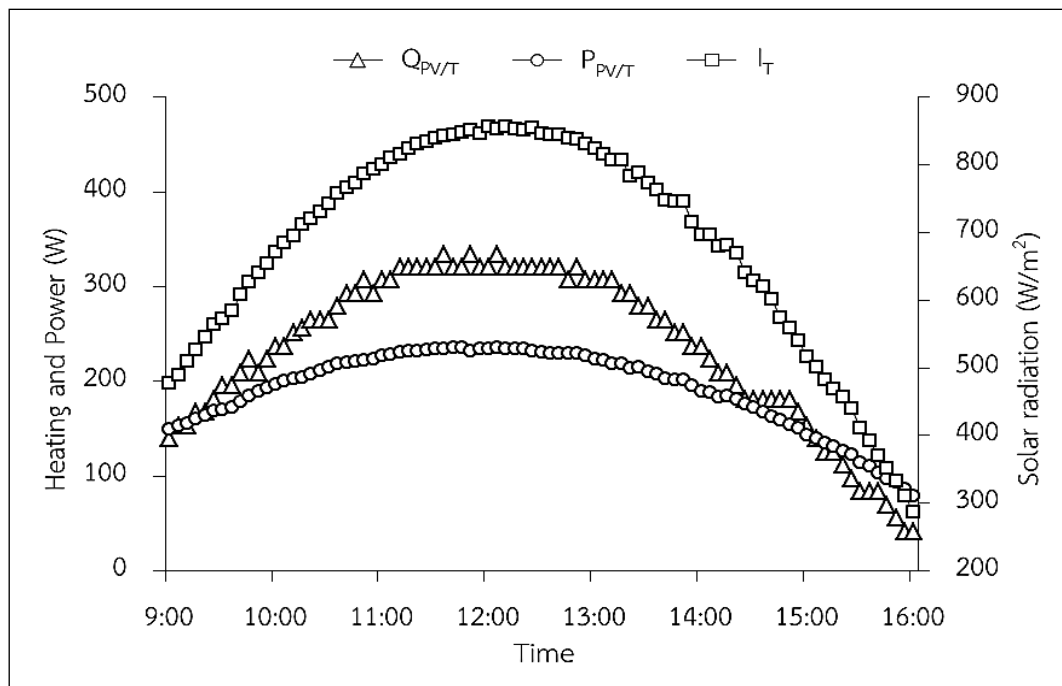
ภาพที่ 80 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง (ทดสอบที่แผงเอียงมุม 10°) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ 2.0 LPM พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:00 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 856.71 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลงสำหรับอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 9:00 น. มีค่าเท่ากับ 24.8°C และสูงสุด 33.5°C ณ เวลา 14:50 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 49.8°C จนถึงเวลา 12:05 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 73.1°C โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 64.7°C สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 29.1°C และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ 39.1°C ณ เวลา 15:55 น.



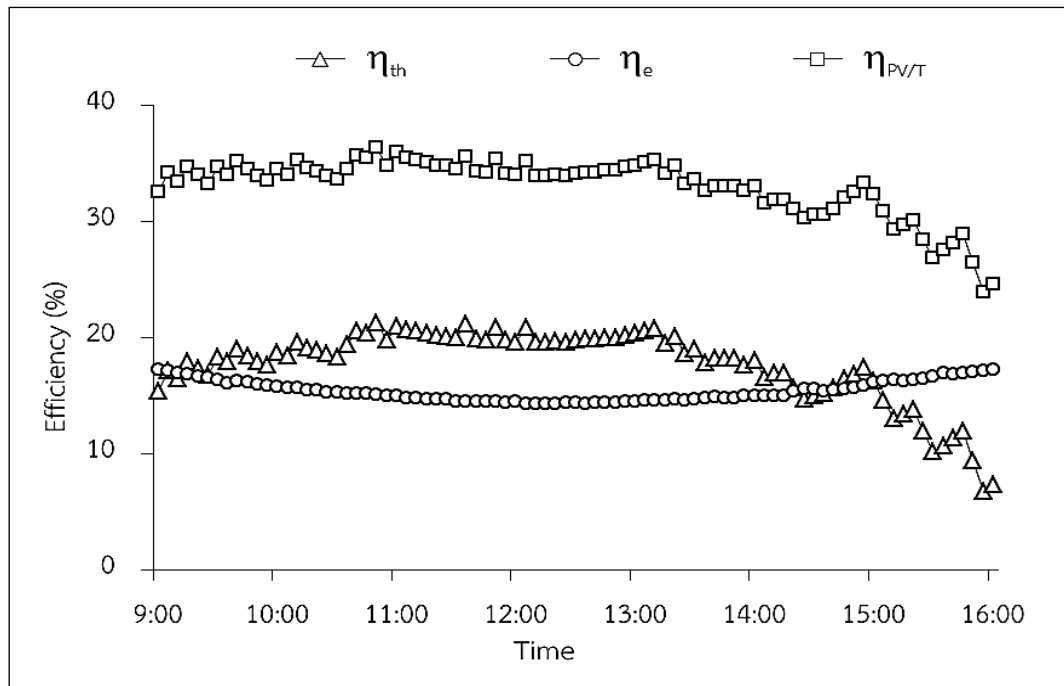
ภาพที่ 80 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM

จากภาพที่ 81 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง พบว่า ณ เวลา 11:35 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 334.63 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 6.00 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่น

เมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 232.5 W ที่เวลา 12:00 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ 1,379.50 Wh จากภาพที่ 82 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 15.38% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.64% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 33.02% คิดเป็นพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) มีค่าเท่ากับ 10.70 MJ

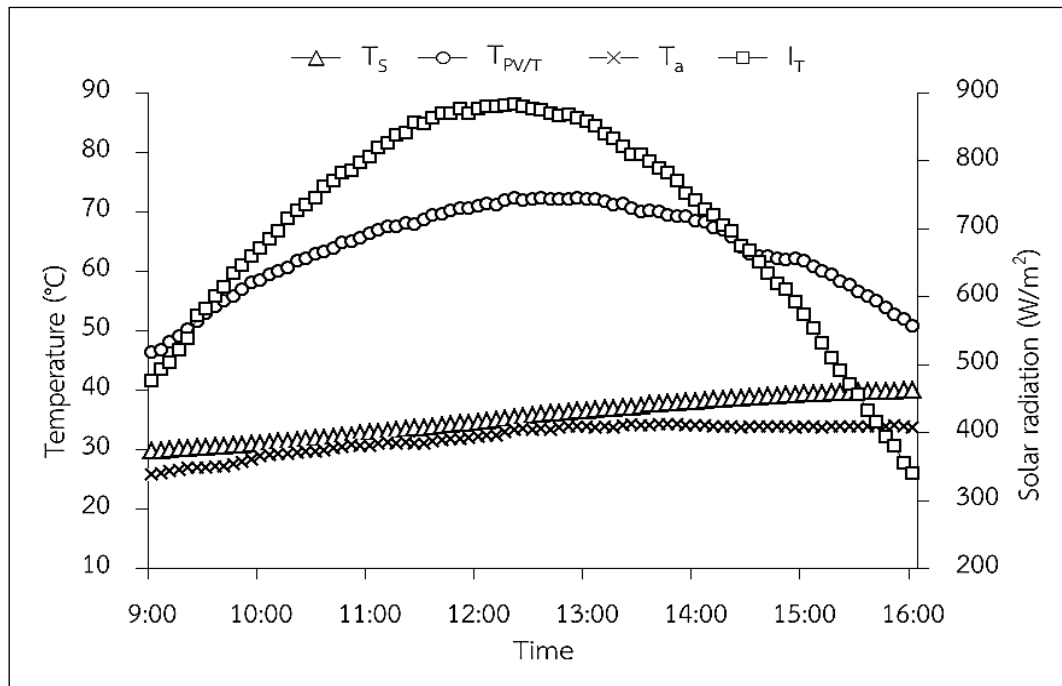


ภาพที่ 81 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM



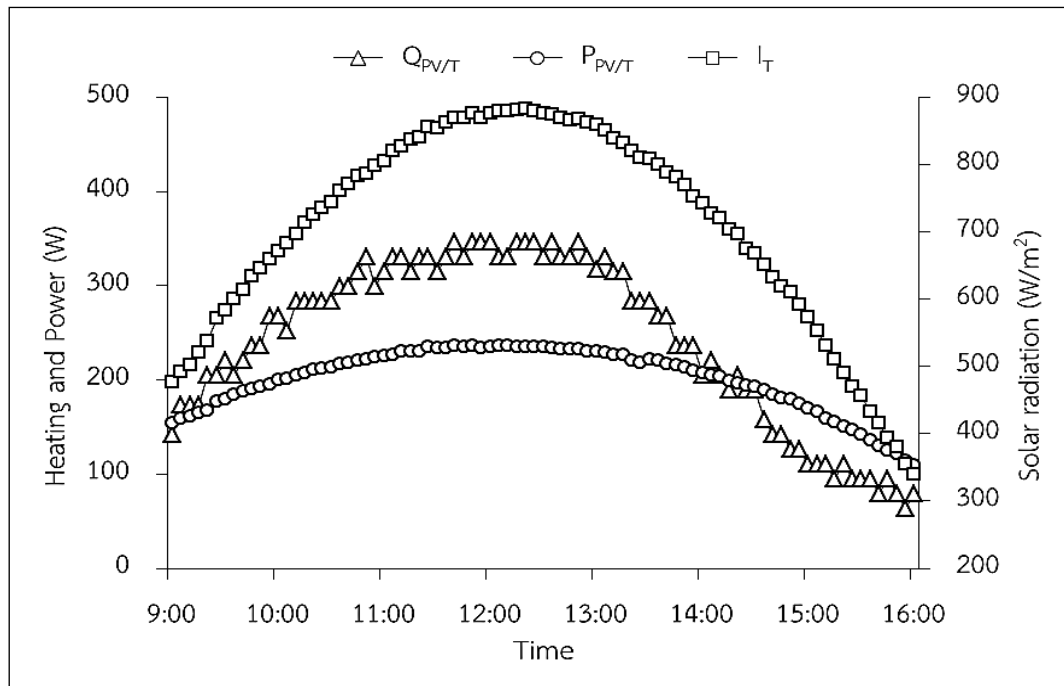
ภาพที่ 82 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0 LPM

ภาพที่ 83 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง (ทดสอบที่มุม 18°) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ 2.25 LPM พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:20 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 883.78 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง สำหรับอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 9:00 น. มีค่าเท่ากับ $25.8 \text{ }^\circ\text{C}$ และสูงสุด $34.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ณ เวลา 13:45 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องน้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $46.4 \text{ }^\circ\text{C}$ จนถึงเวลา 12:35 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ $72.3 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ $63.7 \text{ }^\circ\text{C}$ สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $29.9 \text{ }^\circ\text{C}$ และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ $40.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ณ เวลา 15:55 น.

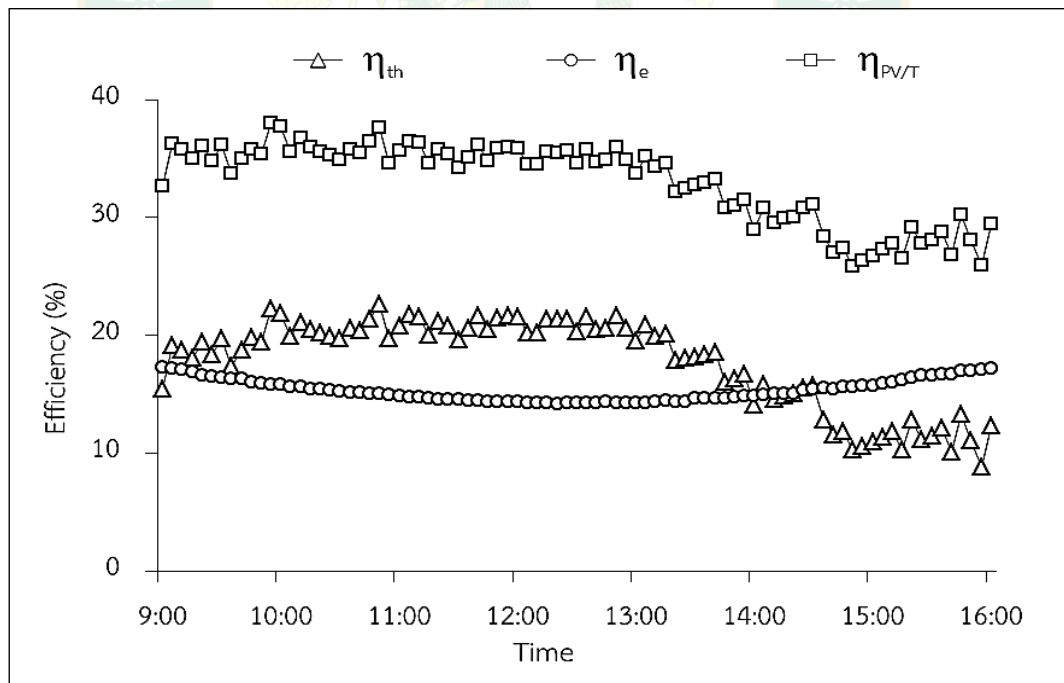


ภาพที่ 83 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM

จากภาพที่ 84 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง พบว่า ณ เวลา 12:15 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 346.35 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 6.19 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่น เมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 236.9 W ที่เวลา 11:40 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ 1,422.40 Wh จากภาพที่ 85 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 15.31% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.74% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 33.05% คิดเป็นพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) มีค่าเท่ากับ 11.07 MJ

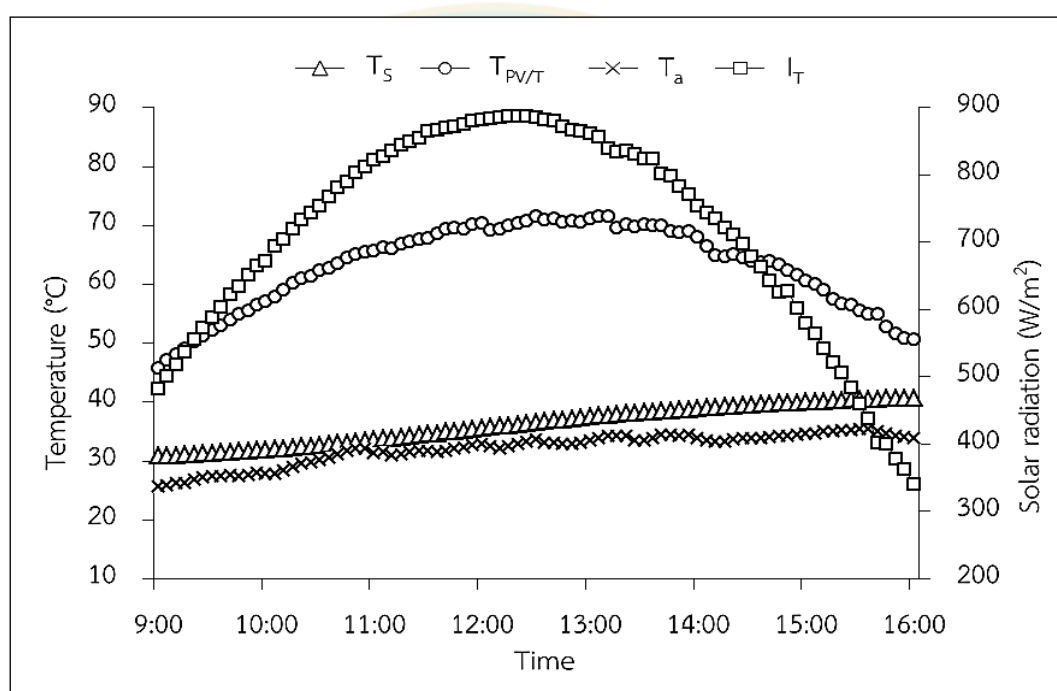


ภาพที่ 84 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM



ภาพที่ 85 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.25 LPM

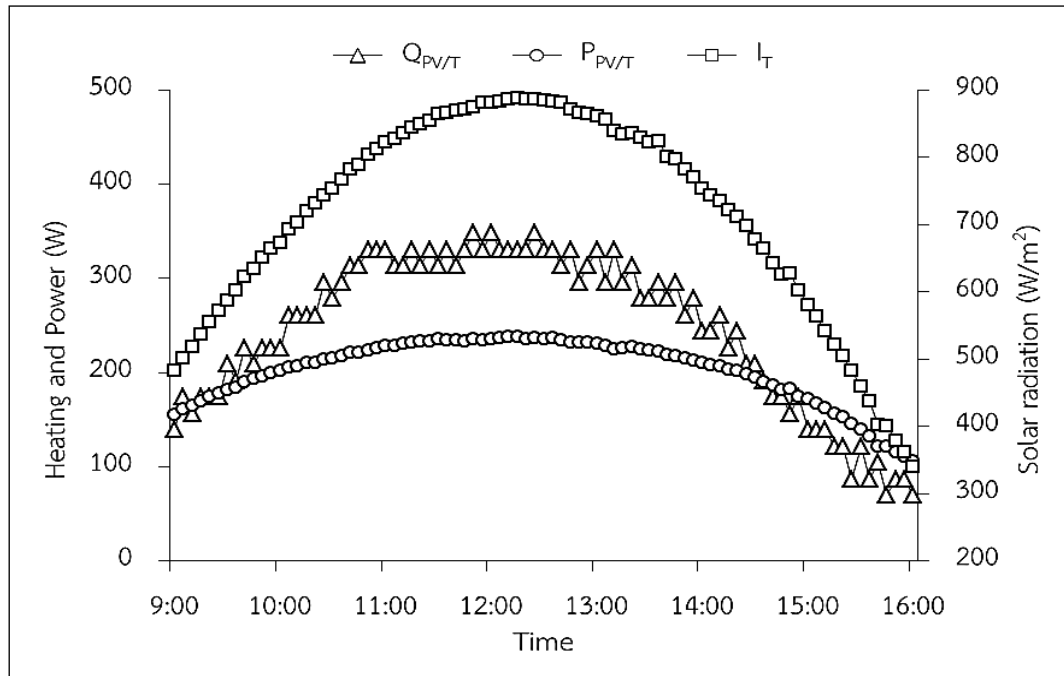
ภาพที่ 86 แสดงกรณีทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง (ทดสอบที่มุม 18°) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำที่ 2.5 LPM พบว่า ค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 12:15 น. มีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 887.66 W/m^2 หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง สำหรับ อุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่เวลา 9:00 น. มีค่าเท่ากับ 25.6°C และสูงสุด 35.3°C ณ เวลา 15:30 น. อุณหภูมิแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบกลองน้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 45.8°C จนถึงเวลา 13:05 น. มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 71.4°C โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 62.9°C สำหรับอุณหภูมิน้ำ ในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 30.8°C และสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ 40.7°C ณ เวลา 15:55 น.



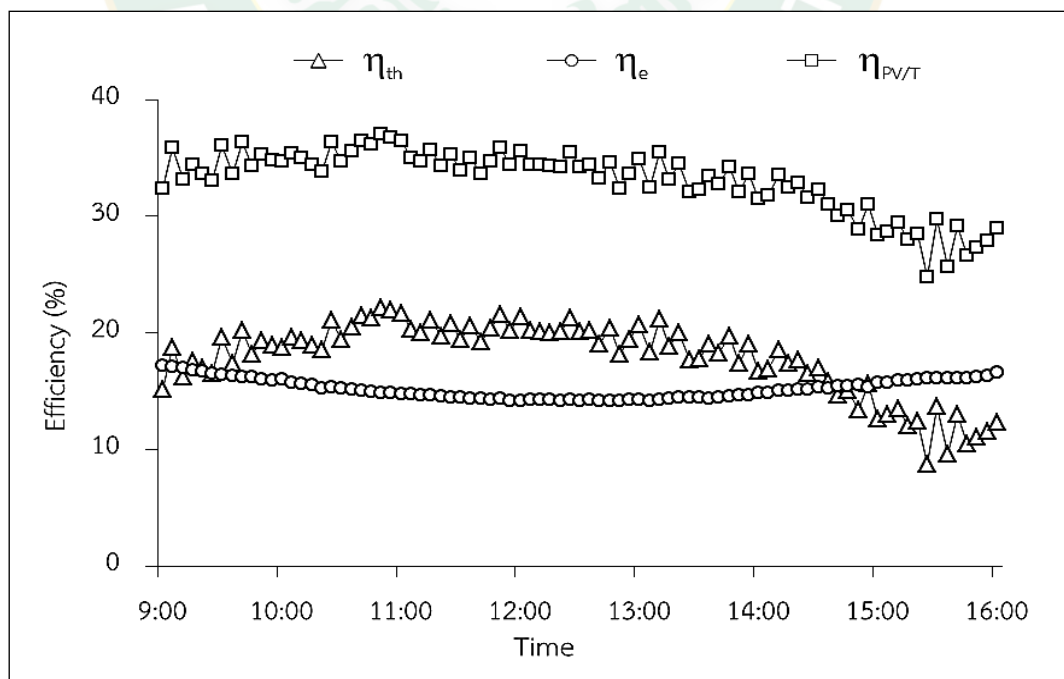
ภาพที่ 86 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดสอบแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM

จากภาพที่ 87 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง พบว่า ณ เวลา 12:00 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 348.36 W หากคิดเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของแผง พบว่า เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 6.29 MJ ส่วนทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มตามค่ารังสีอาทิตย์ เช่น เมื่อค่ารังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 237.7 W ที่เวลา 12:10 น. หากคิดเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวันเท่ากับ $1,429.83 \text{ Wh}$ จากภาพที่ 88 แสดงประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 9:00 – 16:00 น. พบว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงดังกล่าวมีค่าเฉลี่ย

อยู่ที่ 15.19% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.88% และประสิทธิภาพโดยรวมของแผงมีค่าเฉลี่ยที่ 33.07% คิดเป็นพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) มีค่าเท่ากับ 11.17 MJ



ภาพที่ 87 ความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM



ภาพที่ 88 ประสิทธิภาพของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดงที่อัตราการไหลของน้ำ 2.5 LPM

หลังจากทดสอบด้านพลังงานสุทธิของระบบ (P_{net}) ของแผง Solar PV/T ทั้งแบบกล่องน้ำ และท่อทองแดง ด้วยการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนจำนวน 3 ค่า พบว่าแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหล 2.25 LPM ประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 44.22% รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งวัน

อัตราการไหล (L/min)		2.0	2.25	2.5
อุณหภูมิโมดูลเซลล์ แสงอาทิตย์ (°C)	แบบกล่องน้ำ	44.6	44.2	44.8
	แบบท่อทองแดง	64.7	63.7	62.9
อัตราการถ่ายเทความร้อนของโมดูล เซลล์แสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน (MJ)	แบบกล่องน้ำ	8.61	9.66	9.04
	แบบท่อทองแดง	6.00	6.19	6.29
ประสิทธิภาพทางความร้อนของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	แบบกล่องน้ำ	26.02	28.49	26.10
	แบบท่อทองแดง	17.64	17.74	17.88
อุณหภูมิน้ำที่ถึงเก็บน้ำ (°C)	แบบกล่องน้ำ	42.7	45.6	45.1
	แบบท่อทองแดง	39.1	40.0	40.7
กำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ (W)	แบบกล่องน้ำ	235.8	247.1	246.8
	แบบท่อทองแดง	232.5	236.9	237.7
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	แบบกล่องน้ำ	15.46	15.73	15.70
	แบบท่อทองแดง	15.38	15.31	15.19
พลังงานสุทธิของระบบ (MJ/day)	แบบกล่องน้ำ	13.24	14.51	13.95
	แบบท่อทองแดง	10.70	11.07	11.17
ประสิทธิภาพโดยรวมของแผง Solar PV/T (%)	แบบกล่องน้ำ	41.18	44.22	41.80
	แบบท่อทองแดง	33.02	33.05	33.07

จากการทดสอบพบว่าแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำมีสมรรถนะที่ดีกว่าแบบท่อทองแดง จึงได้เลือกใช้ข้อมูลแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำเป็นข้อมูลหลักเพื่อไปวิเคราะห์ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพบว่าแผง Solar PV/T ดังกล่าวมีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.4018 และ F_{RUL} เท่ากับ $10.466 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ซึ่งจากสมการที่ 6 สามารถหาสมการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการที่ 23

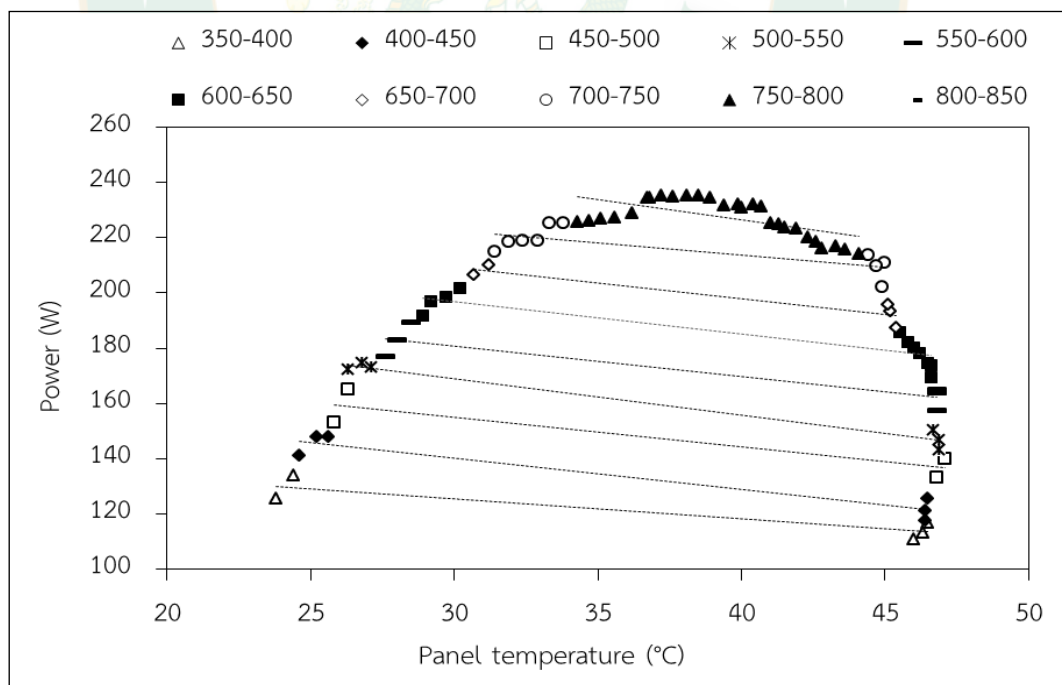
$$Q_{PV/T} = A_{PV/T} [(0.4018 I_T) - (10.466 (T_{f,i} - T_a))] \quad \text{สมการที่ 23}$$

จากภาพที่ 89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง ค่ารังสีอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่า เมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จากการพิจารณาเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะพบว่า อุณหภูมิแผงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยที่อุณหภูมิแผงจะขึ้นกับความร้อนสะสมที่ได้จากรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้ามาระบายความร้อนของแผง Solar PV/T ดังนั้น ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ก่อนอื่นต้องทราบอุณหภูมิแผง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24

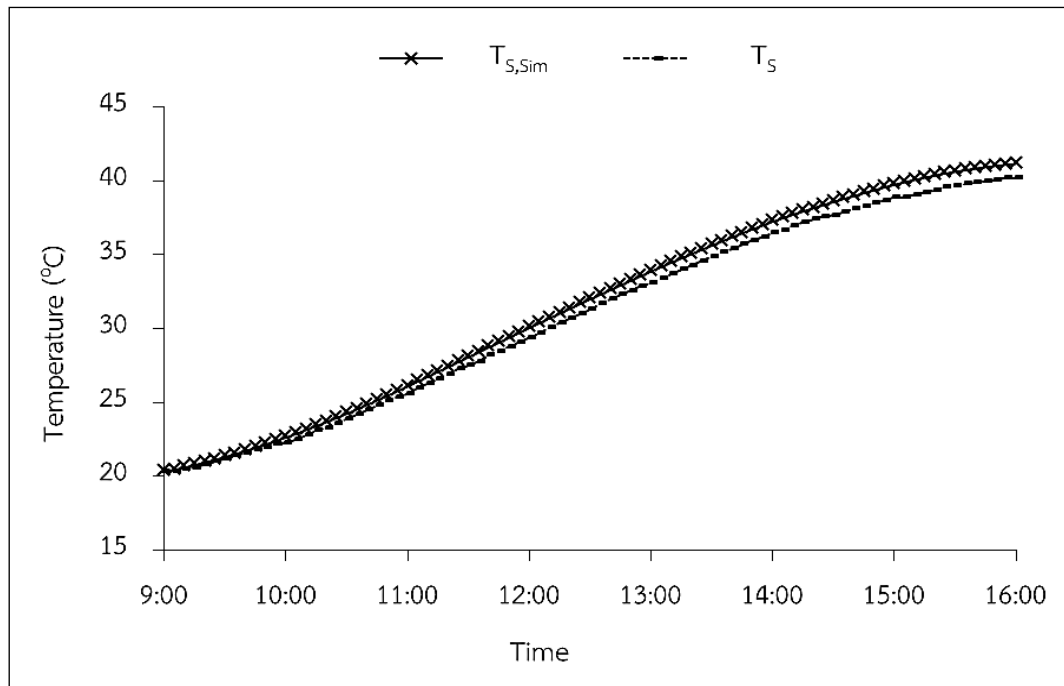
$$T_{PV/T,Sim} = 1.0234 \times (I_T^{0.09286}) \times (T_a^{-0.17333}) \times (T_{f,i}^{1.0357}) \quad \text{สมการที่ 24}$$

การทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25

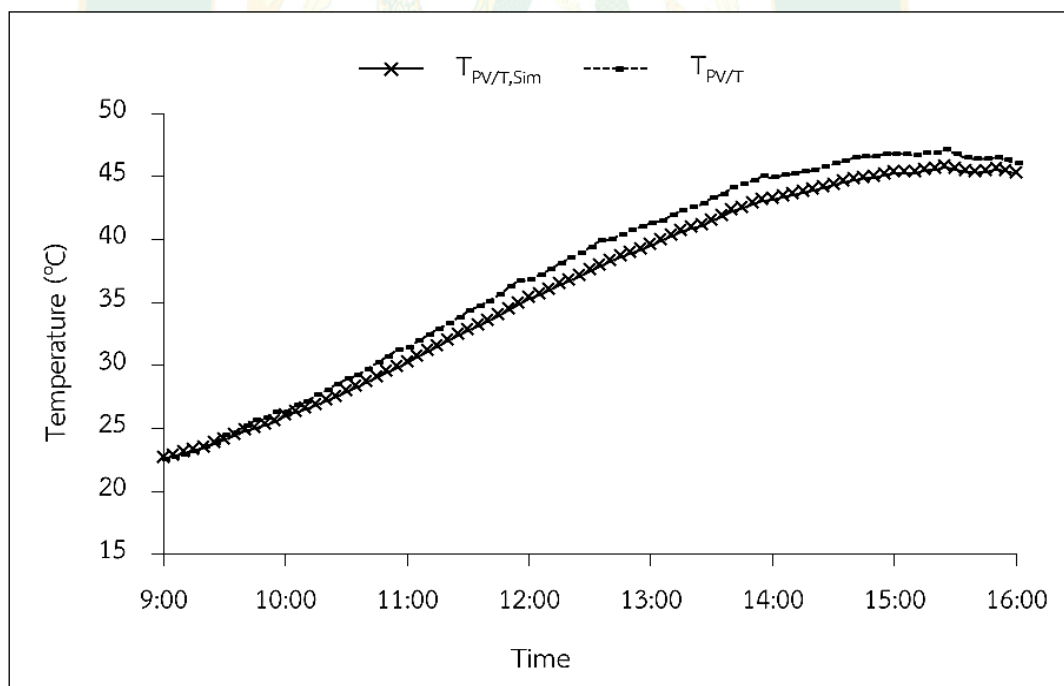
$$P_{PV/T,Sim} = 1.170 \times (I_T^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{f,i}^{0.17826}) \times (T_{PV/T}^{-0.38333}) \quad \text{สมการที่ 25}$$



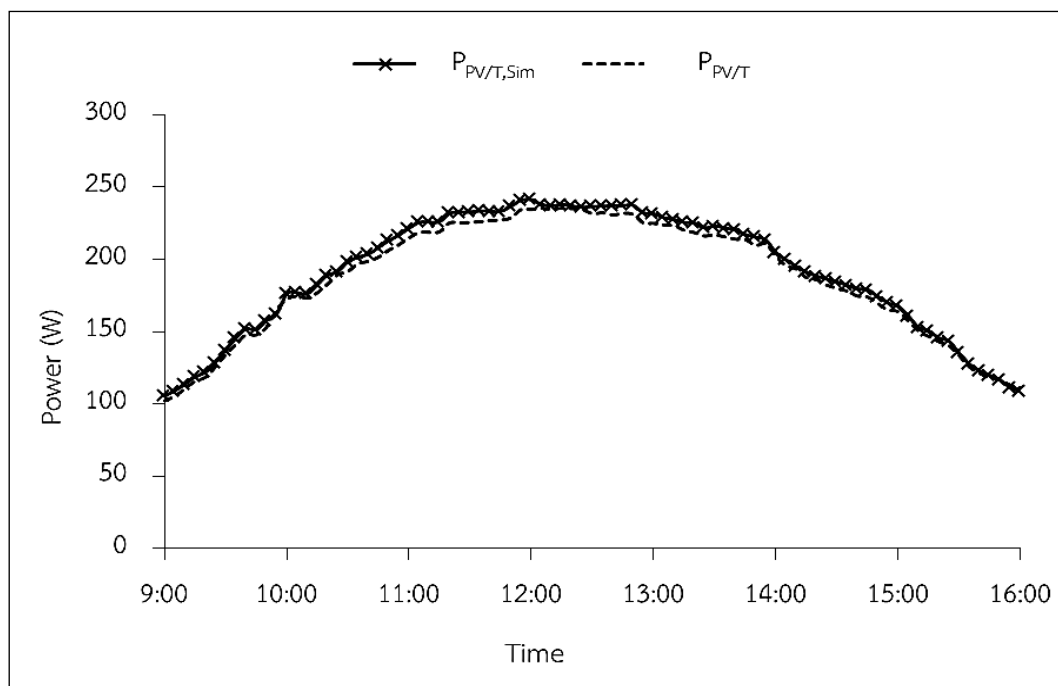
ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง Solar PV/T กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์



ภาพที่ 90 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิพื้นผิวน้ำในถัง



ภาพที่ 91 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T

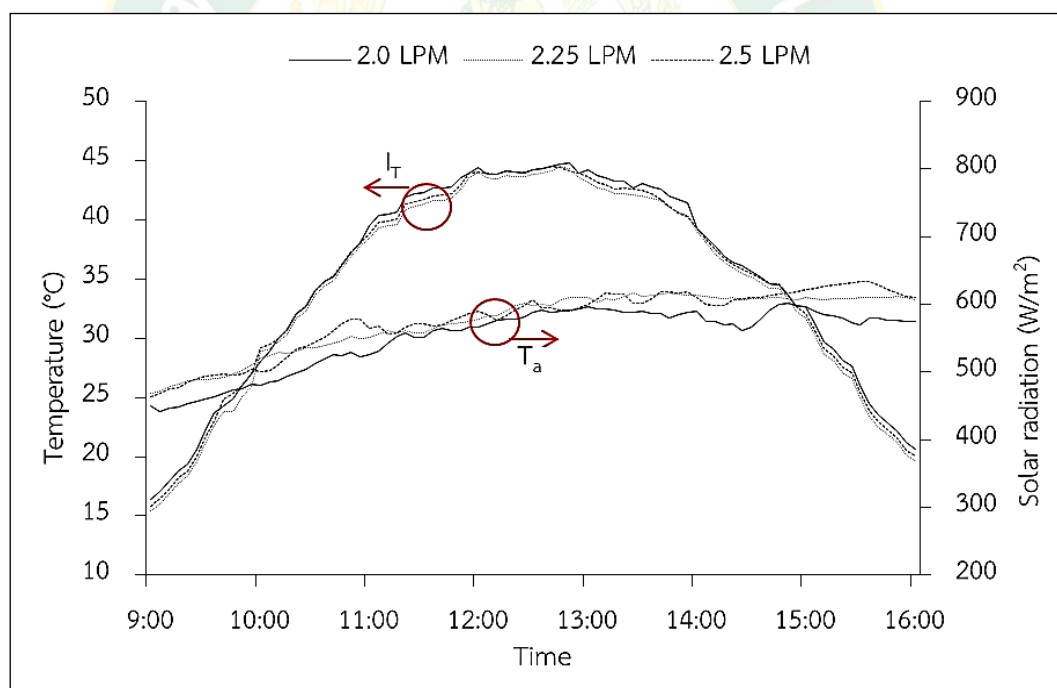


ภาพที่ 92 เปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายกำลังไฟฟ้า

โดยสมการที่ 24 และ 25 ได้นำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อมาทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) เมื่อนำเอาสมการเหล่านี้ไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่สมการที่ 23 เมื่อคำนวณและเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 90 มีความคลาดเคลื่อน 1.85% ส่วนสมการที่ 24 และ 25 เมื่อนำไปคำนวณและเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 3.33% และ 2.37% ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 91 และ รูปที่ 92 โดยความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากทำการติดตั้งระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ต่อไปได้ทำการทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเพิ่มสมรรถนะที่ดีที่สุดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ซึ่งได้ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ออกเป็น 3 ค่า คือ 2.0 LPM 2.25 LPM และ 2.5 LPM ในการผลิตน้ำร้อนประมาณ 100 L จากอุณหภูมิประมาณ 35 °C จนผลิตน้ำร้อนได้ที่ 65 °C โดยการทดสอบได้ทำการทดสอบในวันที่มีอุณหภูมิแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะอยู่ในทิศทางที่ใกล้เคียงกัน ตั้งแต่วันที่ 22 – 24 กุมภาพันธ์ 2563 ดังภาพที่ 93 หลังจากนั้น จึงทำการวิเคราะห์สมรรถนะความร้อนของปั๊มความร้อนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และพลังงานไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

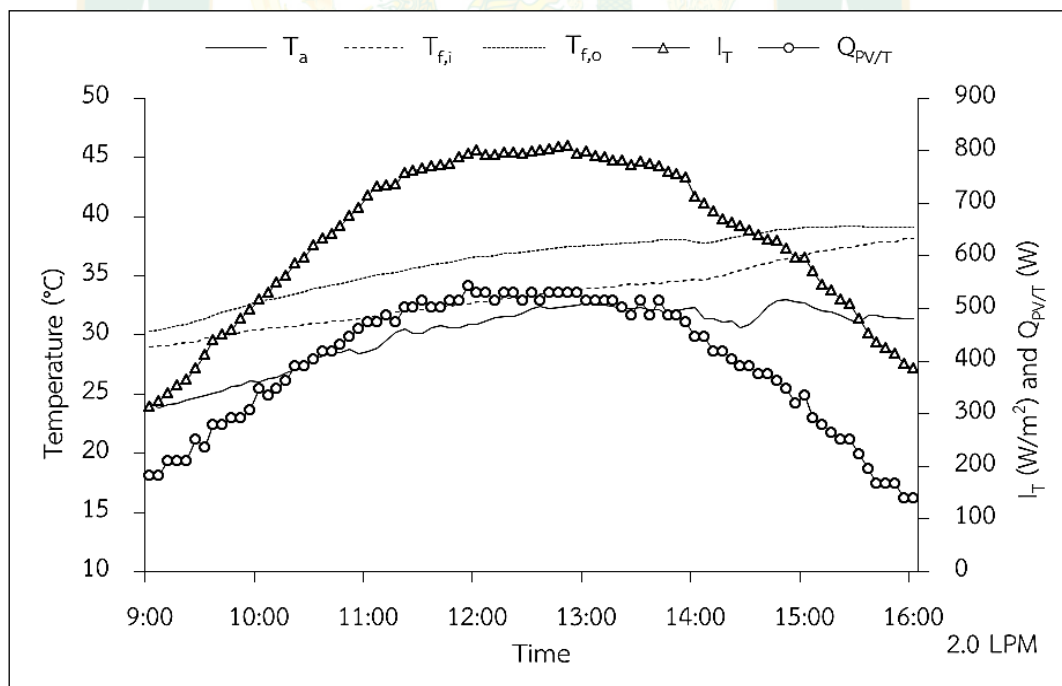


ภาพที่ 93 อุณหภูมิแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์เมื่อทดสอบที่อัตราการไหล 2.0 2.25 และ 2.5 LPM

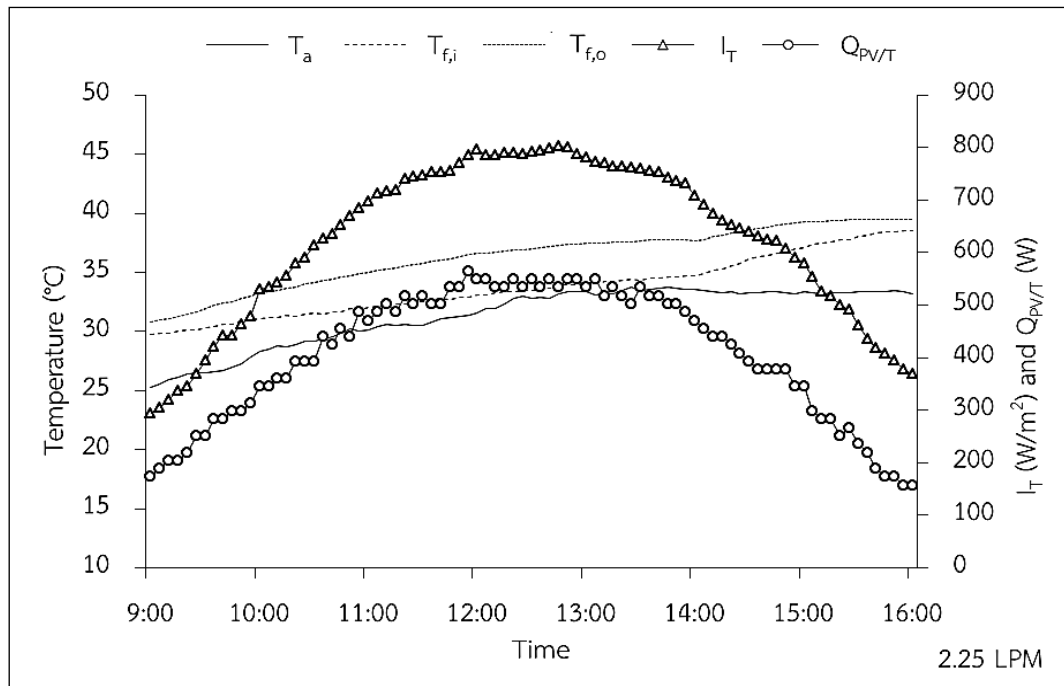
อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 94 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.0 LPM พบว่าค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่ 804.6 W/m² ในเวลา 12:45 น. อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.11 °C ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T จะมีค่าที่สูงขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุด 543.77 W ใน

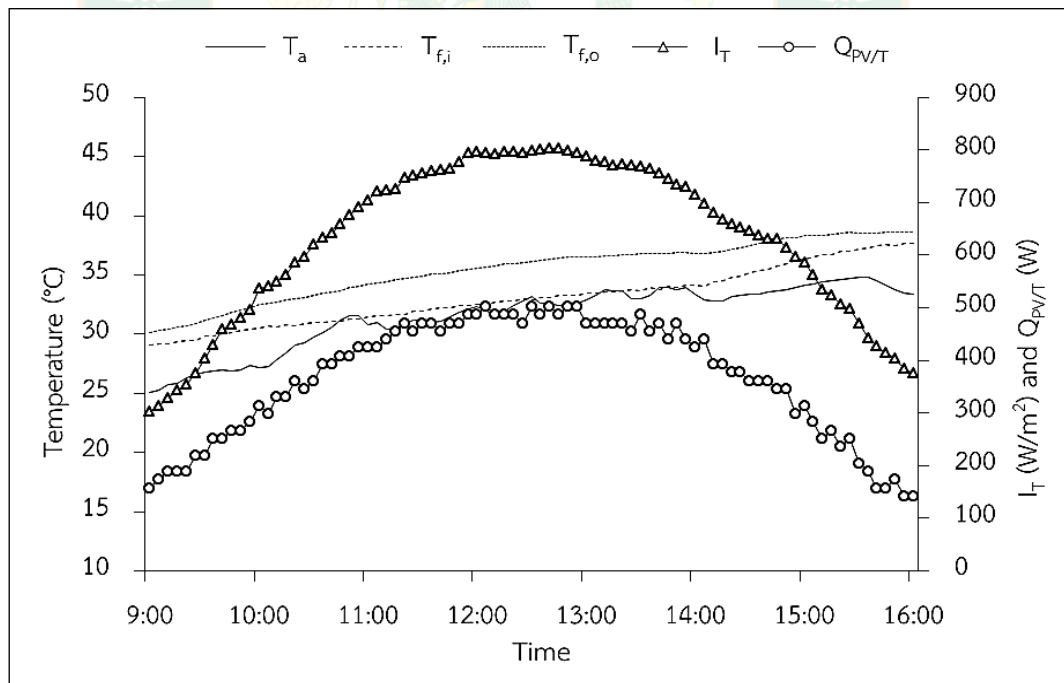
เวลา 11:55 น. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 395.32 W หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้คือ 10.08 MJ/รอบการผลิต เพื่อป้อนความร้อนให้กับเครื่องระเหยของปั๊มความร้อน ในกรณีการทดสอบของอัตราการไหล 2.25 LPM ดังภาพที่ 95 แสดงให้เห็นว่าค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทดสอบมีค่าสูงสุดที่ 808.5 W/m² ในเวลา 12:50 น. อุณหภูมิแวลดล้อมเฉลี่ย 29.90 °C ทางด้านอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด 565.25 W ในเวลา 11:55 น. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 406.75 W หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้คือ 10.37 MJ/รอบการผลิต สำหรับกรณีการทดสอบของอัตราการไหล 2.5 LPM แสดงดังภาพที่ 96 พบว่าค่ารังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 800.1 W/m² ในเวลา 12:45 น. ในส่วนของอุณหภูมิแวลดล้อมเฉลี่ย 29.56 °C และอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด 502.44 W ในเวลา 12:05 น. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 367.41 W หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้คือ 9.37 MJ/รอบการผลิต เนื่องจากการทำงานช่วงแรกของระบบพบว่าอุณหภูมิน้ำจากระบบ Solar PV/T ที่ออกไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำงานในกอล่งน้ำที่ติดตั้งไว้กับเครื่องระเหยในปั๊มความร้อนมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกและขาเข้ามีค่าที่ต่ำไปด้วยเมื่อเข้าสู่ช่วงที่แผง Solar PV/T ได้รับค่ารังสีอาทิตย์เต็มที่จึงทำให้ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกและขาเข้ามีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นโดยส่งผลต่อความร้อนที่ผลิตได้สูงขึ้นและมีค่าลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์



ภาพที่ 94 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวลดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (ที่อัตราการไหล 2.0 LPM)



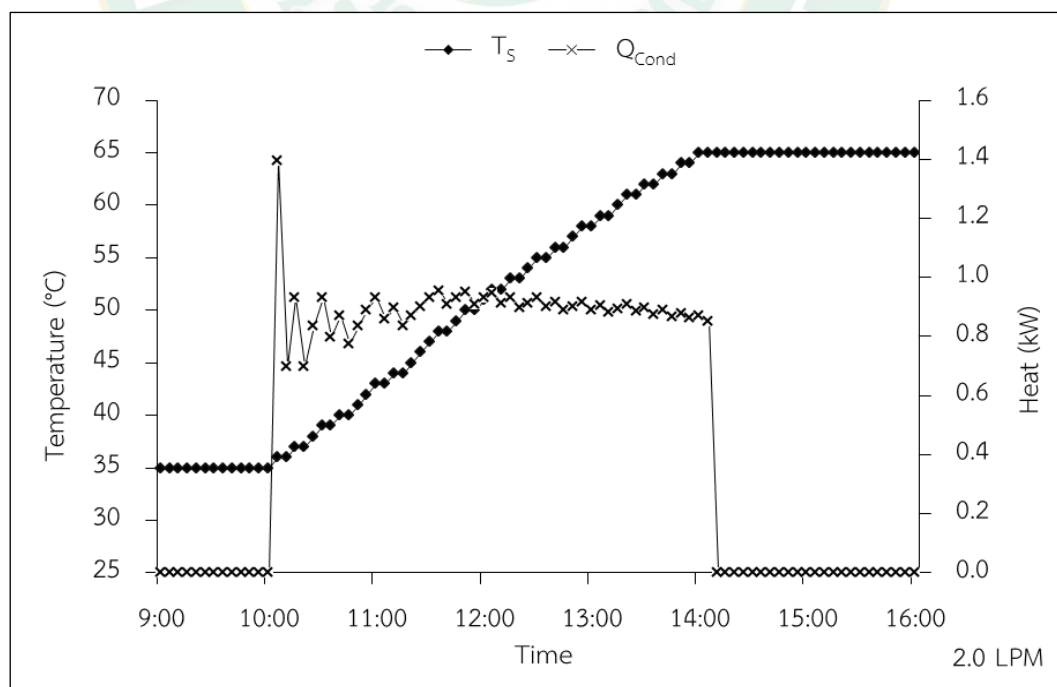
ภาพที่ 95 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (ที่อัตราการไหล 2.25 LPM)



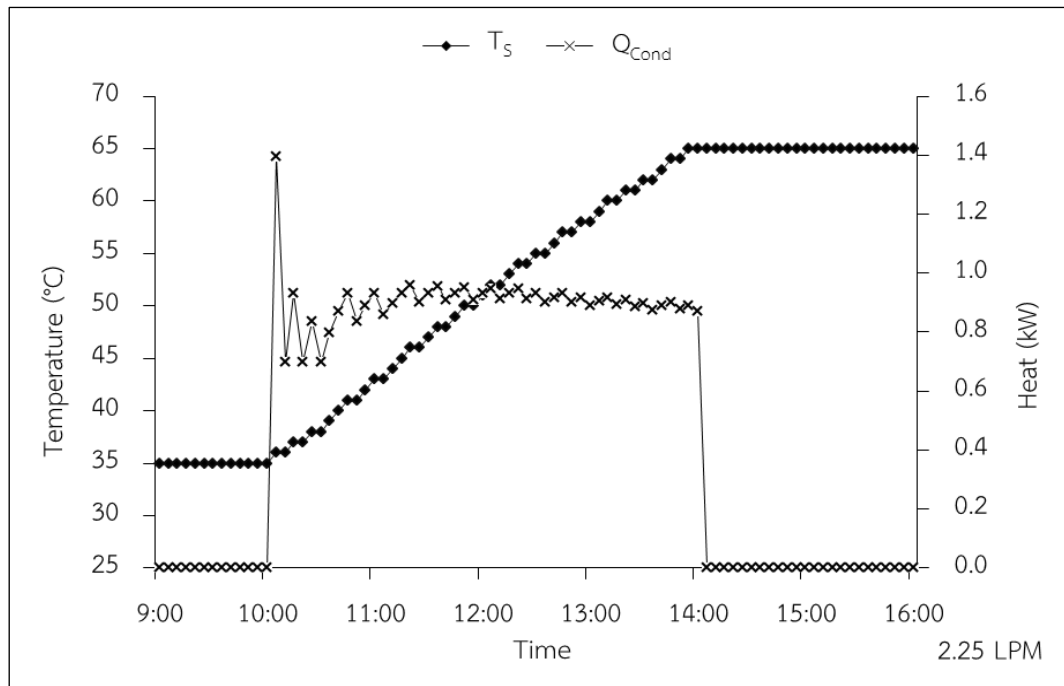
ภาพที่ 96 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการถ่ายเทความร้อนระบบ Solar PV/T (ที่อัตราการไหล 2.5 LPM)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อน

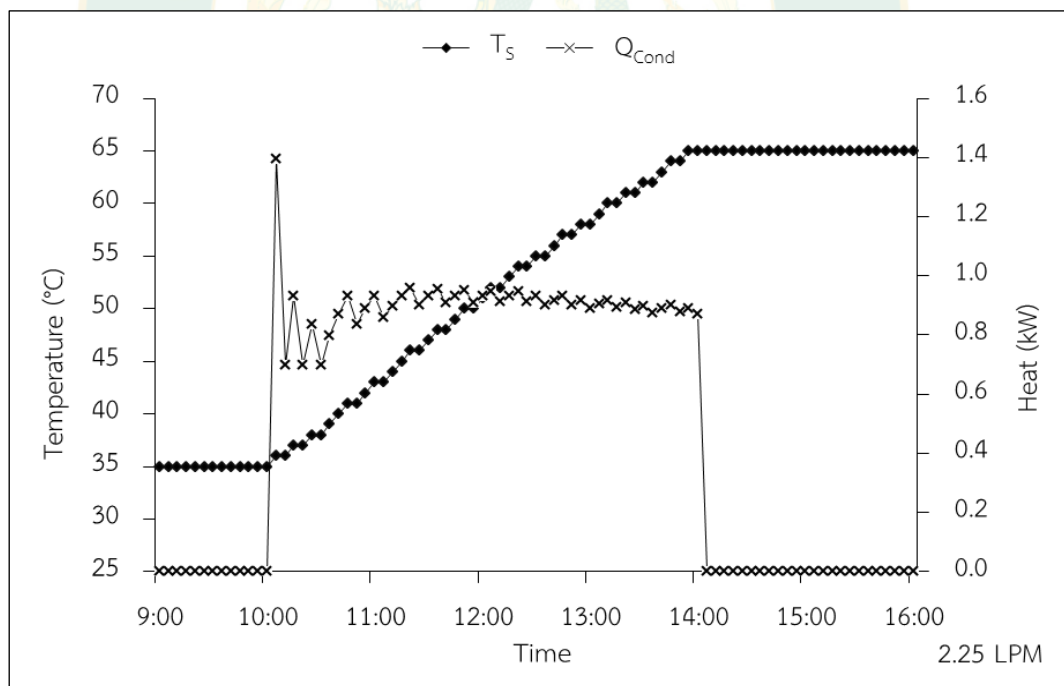
จากภาพที่ 97 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.0 LPM พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนมีค่าสูงสุดที่ 1.396 kW เฉลี่ยได้ 0.897 kW และใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนโดยเริ่มแต่ 35 – 65 °C ด้วยเวลาประมาณ 4 h ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.25 LPM แสดงดังภาพที่ 98 พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนสูงสุด 1.396 kW และมีค่าเฉลี่ย 0.903 kW ใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนจนถึงอุณหภูมิ 65 °C ด้วยเวลาประมาณ 3 h 55 min จากภาพที่ 99 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.5 LPM พบว่า มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนสูงสุด 1.396 kW มีค่าเฉลี่ย 0.894 kW ใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนจนถึงอุณหภูมิ 65 °C ด้วยเวลาประมาณ 4 h โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเริ่มเข้าสู่อุณหภูมิประมาณ 60 °C ทำให้ความร้อนที่ผลิตได้มีค่าเริ่มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่สูงขึ้นและเข้าใกล้อุณหภูมิ 65 °C ที่ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้เบื้องต้น จึงทำให้อุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสารทำงาน และส่งผลต่อผลต่างอุณหภูมิที่เข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลงและทำให้การผลิตความร้อนของปั๊มความร้อนมีค่าที่ลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งจากการทดสอบของทั้ง 3 อัตราการไหล จะสังเกตเห็นว่าในการทำงานในช่วงแรก ความร้อนที่ผลิตได้จากปั๊มความร้อนจะมีค่าที่สูงเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังที่ต่ำ และเมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเพิ่มสูงขึ้นในช่วงท้ายจะทำให้ความร้อนที่ผลิตได้ลดลงเรื่อย ๆ



ภาพที่ 97 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM



ภาพที่ 98 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM

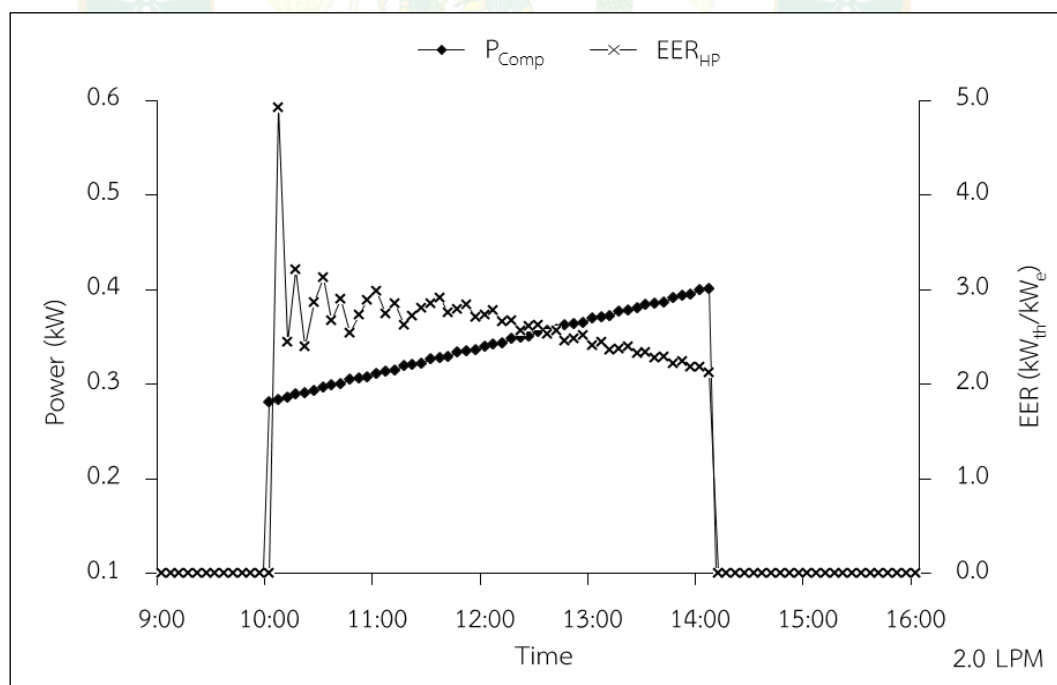


ภาพที่ 99 อุณหภูมิน้ำร้อนและความร้อนที่ผลิตได้ของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.5 LPM

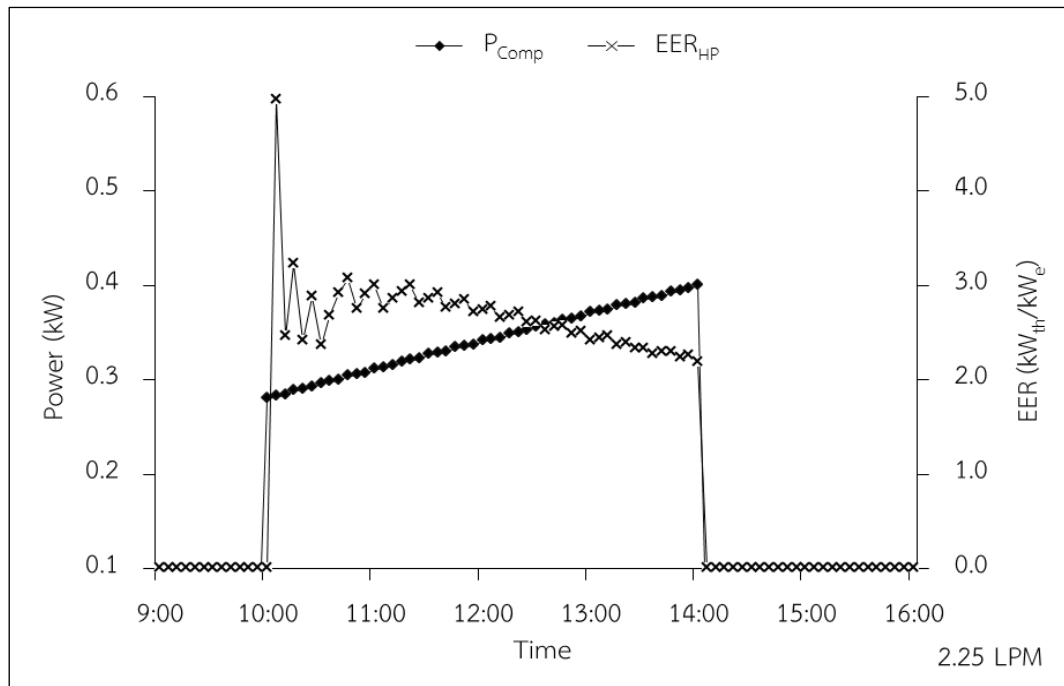
จากภาพที่ 100 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.0 LPM พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำมีค่าตั้งแต่ประมาณ 0.282 – 0.399 kW คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.196 kW และใช้

พลังงานไฟฟ้าไปที่ 1.386 kWh ส่วนค่า EER จะมีค่าตั้งแต่ 2.18 – 4.92 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ มีค่าเฉลี่ย 2.66 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.25 LPM ดังภาพที่ 101 พบว่า กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอนี้มีค่าตั้งแต่ 0.280 – 0.396 kW หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.191 kW และใช้พลังงานไฟฟ้า 1.354 kWh ทางด้าน EER มีค่าตั้งแต่ 2.25 – 4.95 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.69 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ จากภาพที่ 102 ในกรณีทดสอบของอัตราการไหล 2.5 LPM พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอนี้มีค่าตั้งแต่ 0.283 – 0.404 kW คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.198 kW และใช้พลังงานไฟฟ้าไปที่ 1.401 kWh สำหรับค่า EER จะมีค่าตั้งแต่ 2.16 – 4.89 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.62 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$

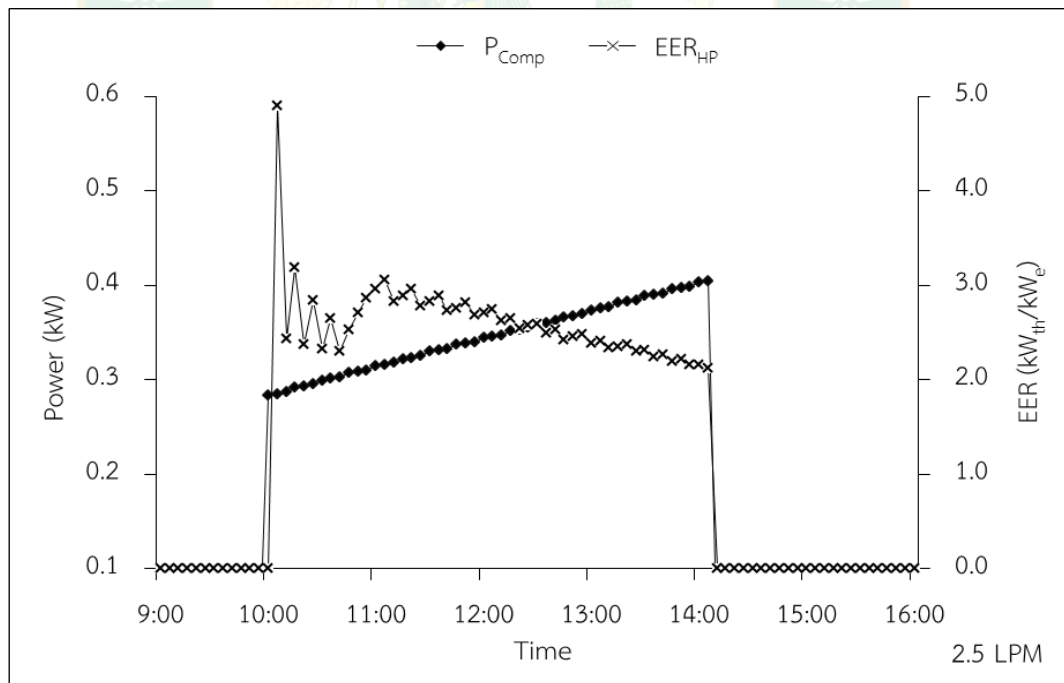
การทดสอบปั๊มความร้อนของทั้ง 3 อัตราการไหลจะสังเกตเห็นว่า ในการทำงานช่วงแรกของระบบจะมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนที่สูง หลังจากนั้นก็จะลดลงเรื่อย ๆ ในตอนท้าย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอ จากข้อมูลที่ได้พบว่าที่อัตราการไหล 2.25 LPM (อัตราการไหลตามค่ามาตรฐาน ASHRAE 93-2003) ทำให้ค่า EER มีค่าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 2.0 LPM และ 2.5 LPM ตามลำดับ ส่วนทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องอัดไอเห็นว่าที่อัตราการไหล 2.25 LPM ใช้พลังงานน้อยที่สุด รองลงมาคือ 2.0 LPM และ 2.5 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 100 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน (ที่อัตราการไหล 2.0 LPM)



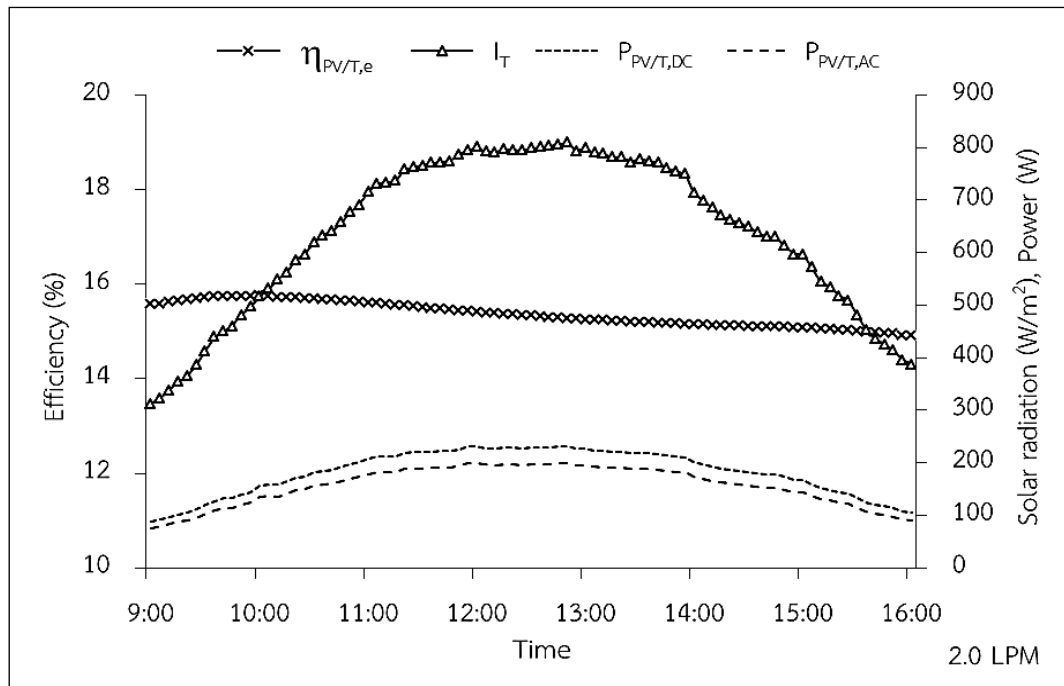
ภาพที่ 101 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน
(อัตราการไหล 2.25 LPM)



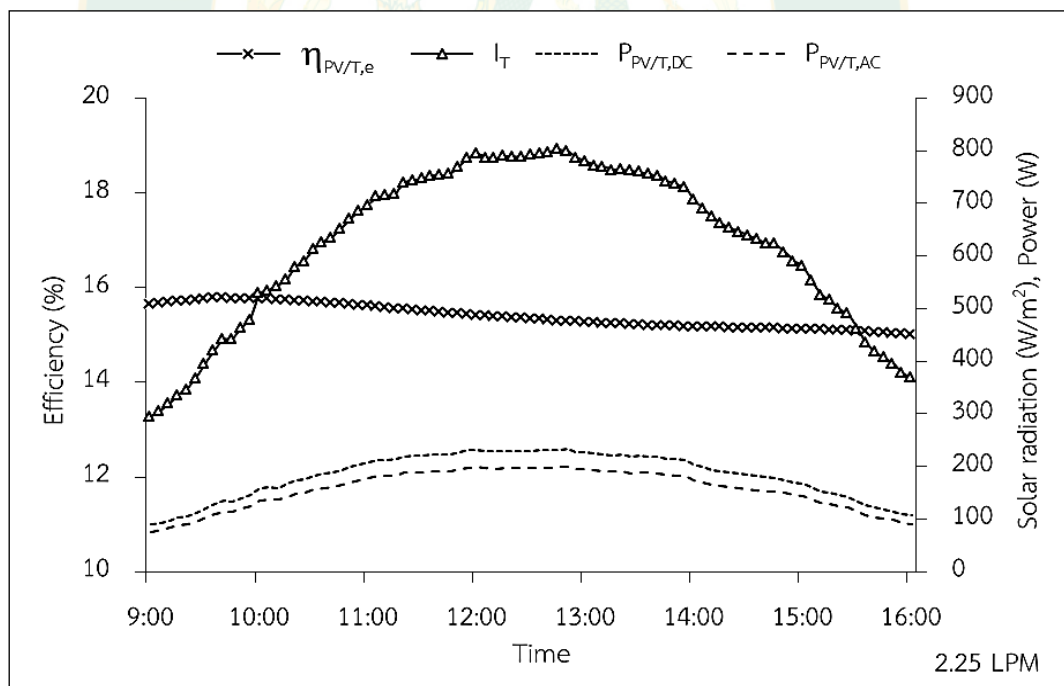
ภาพที่ 102 กำลังไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน
(อัตราการไหล 2.5 LPM)

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

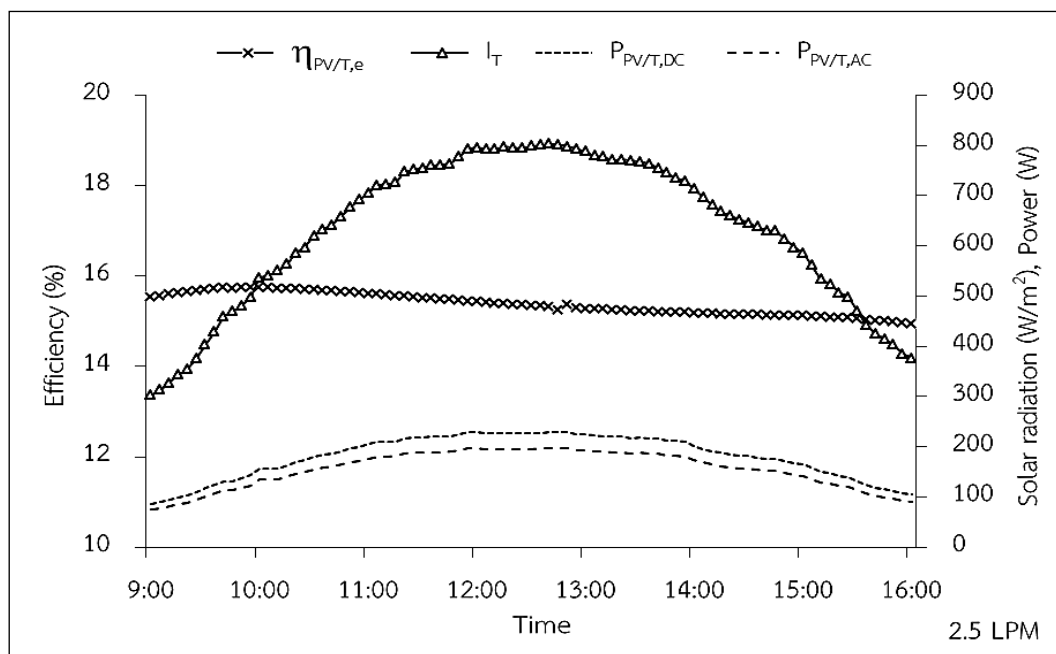
จากภาพที่ 103 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีอัตราการไหลผ่านแผง 2.0 LPM จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่ารังสีอาทิตย์ (เริ่มเก็บเวลา 9:00 – 16:00 น.) ซึ่งกำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 231.1 W มีค่าเฉลี่ย 181.8 W เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นกระแสตรงจึงต้องนำไปแปลงเป็นกระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์ พบว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 198.8 W มีค่าเฉลี่ย 156.4 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด 15.76% มีค่าเฉลี่ย 15.36% จากภาพที่ 104 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีอัตราการไหลผ่านแผง 2.25 LPM (เริ่มเก็บเวลา 9:00 – 16:00 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้า (DC) สูงสุดที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 232.5 W มีค่าเฉลี่ย 182.9 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว เห็นว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 199.9 W มีค่าเฉลี่ย 157.3 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด 15.79% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.39% จากภาพที่ 105 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในอัตราการไหลผ่านแผง 2.5 LPM (เริ่มเก็บเวลา 9:00 – 16:00 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้า DC สูงสุดที่ผลิตได้คือ 230.1 W มีค่าเฉลี่ย 180.5 W เมื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์แล้ว พบว่ากำลังไฟฟ้า (AC) สูงสุดที่ได้เท่ากับ 197.9 W มีค่าเฉลี่ย 155.3 W ทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T มีค่าสูงสุด 15.75% มีค่าเฉลี่ย 15.38% จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลจะมีผลต่อประสิทธิภาพที่ผลิตได้ของระบบ Solar PV/T โดยพบว่าที่อัตราการไหล 2.25 LPM มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T สูงที่สุด ตามมาด้วยอัตราการไหล 2.5 LPM และ 2.0 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 103 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T ที่อัตราการไหล 2.0 LPM



ภาพที่ 104 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T ที่อัตราการไหล 2.25 LPM

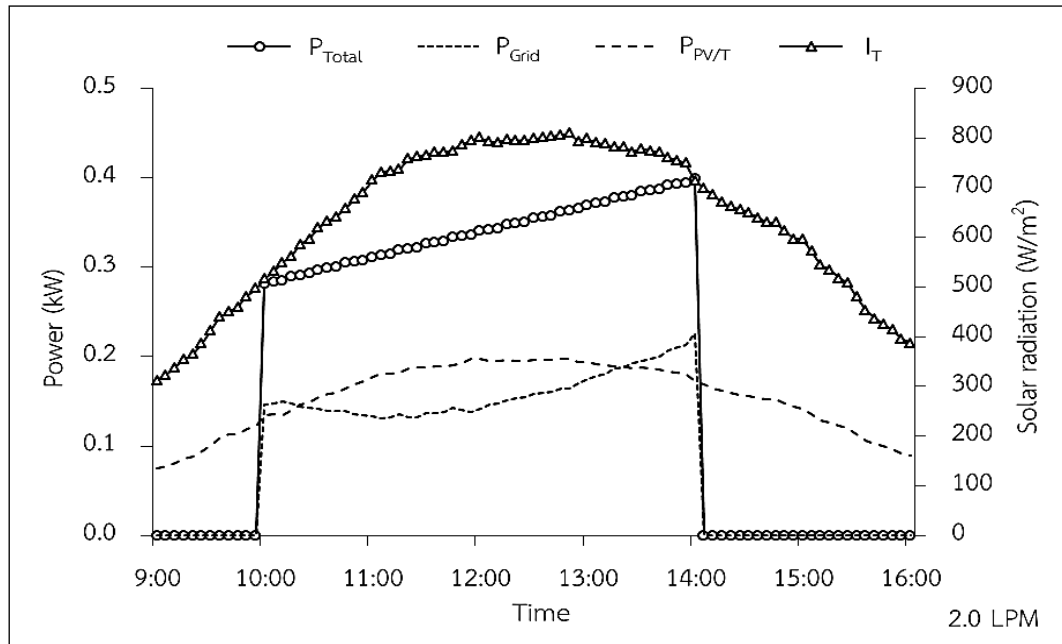


ภาพที่ 105 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T ที่อัตราการไหล 2.5 LPM

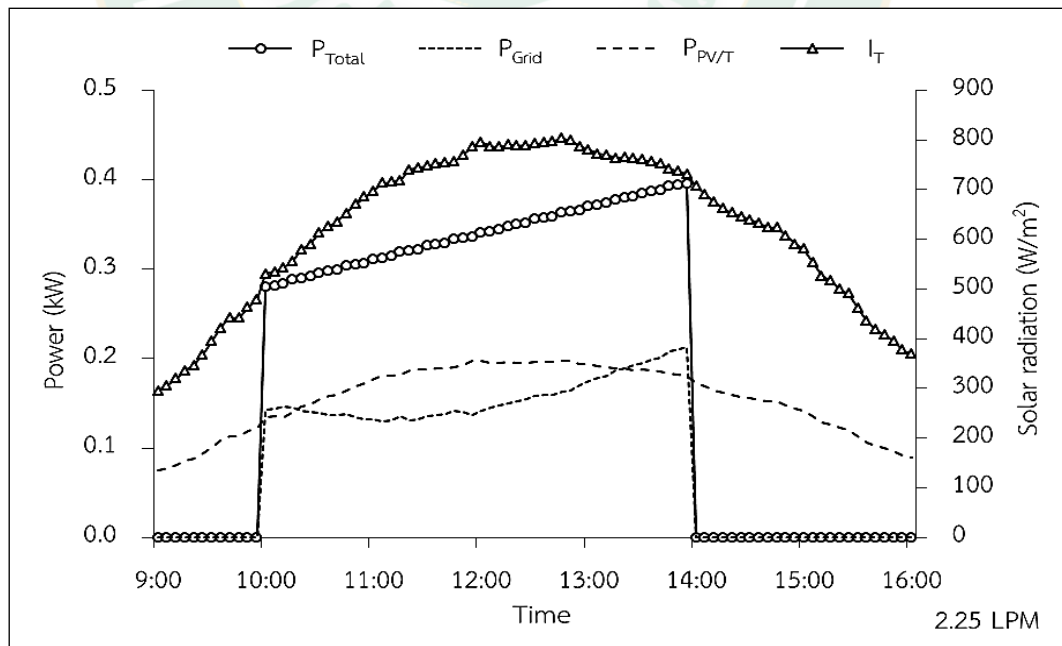
กำลังไฟฟ้าจากระบบพื้นฐาน

จากภาพที่ 106 ในกรณีอัตราการไหล 2.0 LPM พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 198.8 W เมื่อคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิตคือ 1.108 kWh/รอบการผลิต ซึ่งไม่เพียงพอต่อการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.399 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1.387 kWh/รอบการผลิต จึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มเท่ากับ 0.647 kWh/รอบการผลิต จากภาพที่ 107 กรณีอัตราการไหล 2.25 LPM พบว่าระบบ Solar PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 199.9 W หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิต 1.114 kWh/รอบการผลิต และไม่เพียงพอต่อการใช้งานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้พลังงานสูงสุด 0.396 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิตเท่ากับ 1.354 kWh/รอบการผลิต จึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่ม 0.625 kWh/รอบการผลิต จากภาพที่ 108 กรณีอัตราการไหล 2.5 LPM พบว่าระบบ Solar PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 197.9 W หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิต 1.100 kWh/รอบการผลิต และไม่เพียงพอต่อการใช้งานของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่ใช้พลังงานสูงสุด 0.404 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 1.401 kWh/รอบการผลิต จึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่ม 0.666 kWh/รอบการผลิต จากข้อมูลที่ได้พบว่า ที่อัตรา

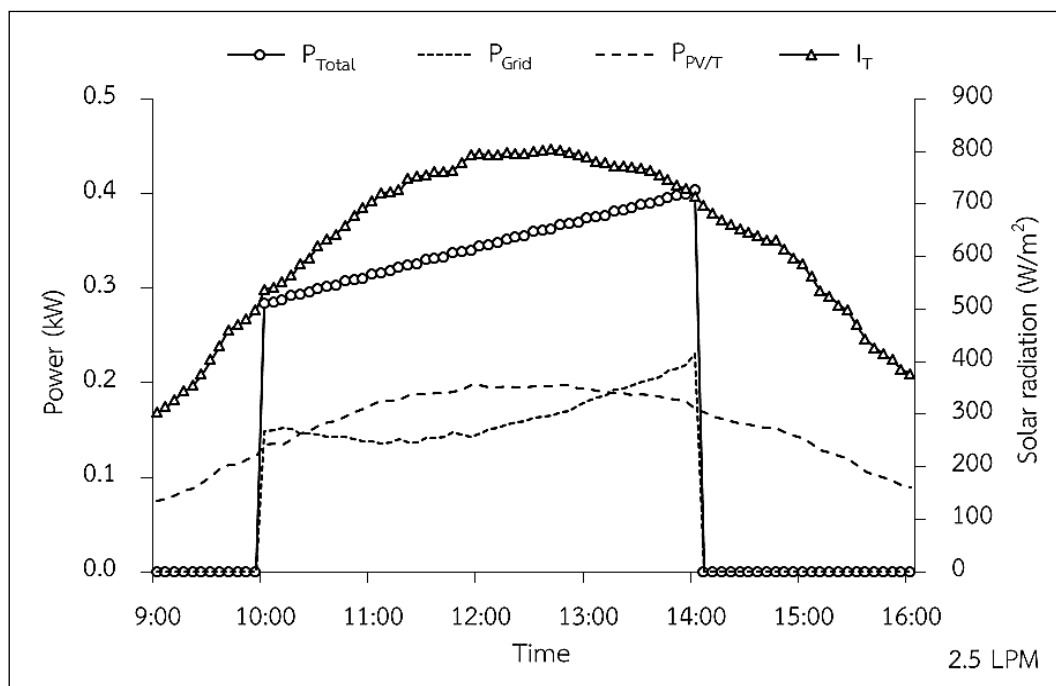
การไหล 2.25 LPM มีส่วนทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้ต่ำสุด รองลงมาเป็น อัตราการไหล 2.0 LPM และ 2.5 LPM ตามลำดับ



ภาพที่ 106 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (ที่อัตราการไหล 2.0 LPM)



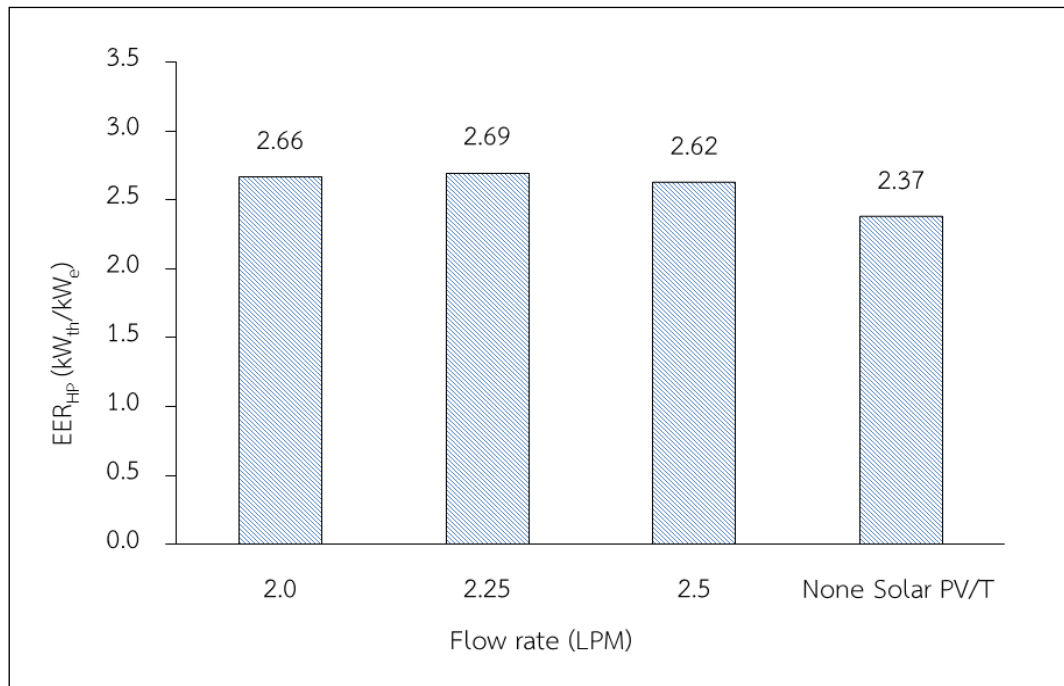
ภาพที่ 107 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (ที่อัตราการไหล 2.25 LPM)



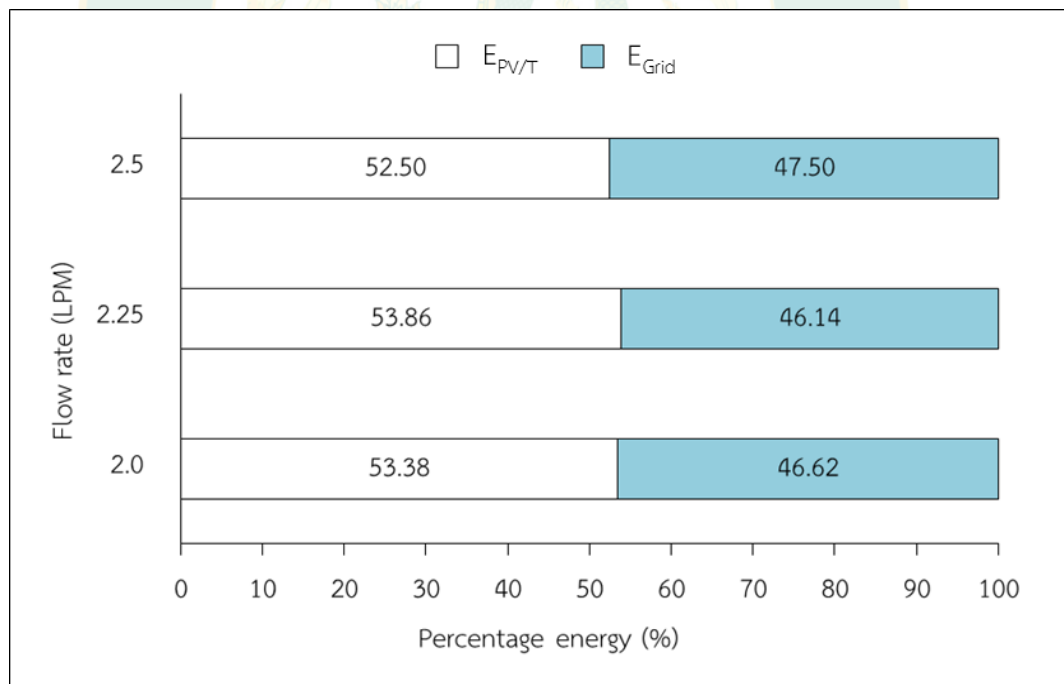
ภาพที่ 108 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกใช้ในระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (ที่อัตราการไหล 2.5 LPM)

อัตราการไหลที่เหมาะสมแก่ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

การทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ด้วยการปรับอัตราการไหลผ่านระบบ Solar PV/T แบ่งออกเป็น 3 ค่า คือ 2.0 2.25 และ 2.5 LPM จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า กรณีอัตราการไหล 2.25 LPM เป็นอัตราการไหลที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบได้สูงสุด โดยมีค่า EER สูงสุด 4.95 kW_{th}/kW_e มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.69 kW_{th}/kW_e รองลงมาคืออัตราการไหล 2.25 และ 2.5 LPM ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.66 และ 2.62 kW_{th}/kW_e ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 109 สำหรับการใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเพิ่มพบว่า อัตราการไหล 2.25 LPM มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตมาจากระบบ Solar PV/T เข้ามาช่วยลดพลังงานไฟฟ้าโดยคิดเป็น 53.38% จากพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่ำสุดเท่ากับ 46.14% ตามด้วยอัตราการไหล 2.0 LPM คิดเป็น 46.62% และอัตราการไหล 2.5 LPM คิดเป็น 47.50% แสดงดังภาพที่ 110 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลผ่านระบบ Solar PV/T ที่เหมาะสมกับระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump คือ อัตราการไหลที่ 2.25 LPM เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และเป็นอัตราการไหลที่เพิ่มสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ได้ดีที่สุดในทั้ง 3 อัตราการไหล



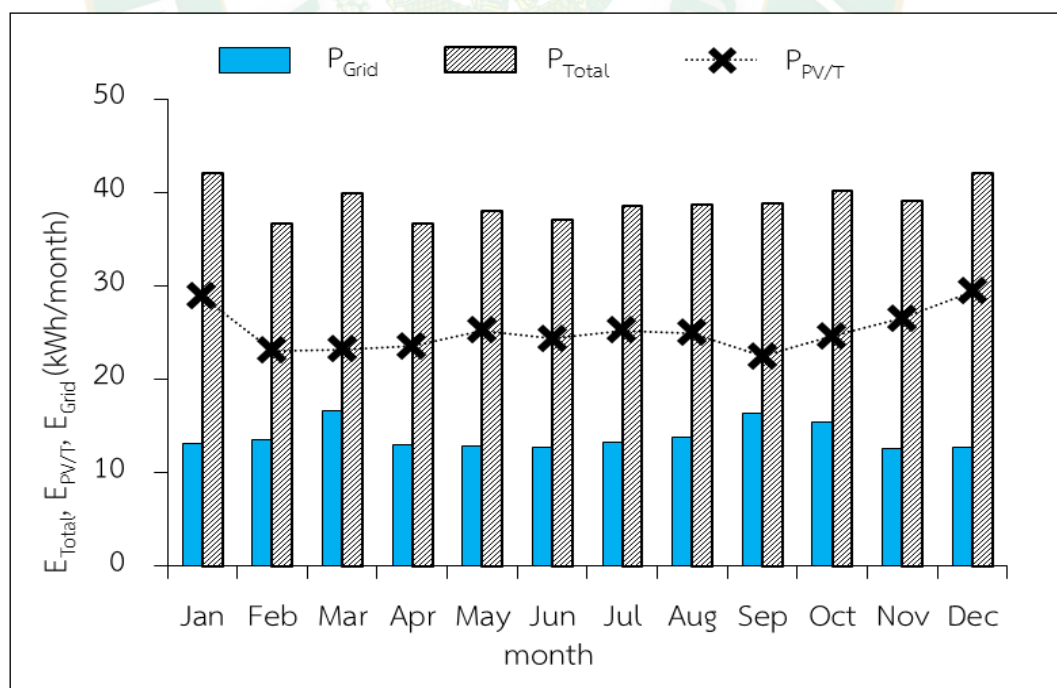
ภาพที่ 109 ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราการไหล



ภาพที่ 110 เปอร์เซ็นต์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหล

วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ในการผลิตน้ำร้อนประมาณ 100 L จากอุณหภูมิประมาณ 35 °C จนผลิตน้ำร้อนได้ที่ 65 °C ด้วยการใช้วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนมาคำนวณโดยจากเดิมปั๊มความร้อนที่ใช้แหล่งความร้อนเป็นอากาศ ผลิตน้ำร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้า 1.24 kWh/day หรือ 451.87 kWh/year จากภาพที่ 111 แสดงลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump พบว่า เดือนมีนาคมเป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานสูงสุด 16.64 kWh/month สำหรับเดือนพฤศจิกายนเป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด 12.59 kWh/month ซึ่งหากคิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี พบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump จะใช้พลังงานไฟฟ้า 166.07 kWh/year เมื่อเปรียบเทียบกับปั๊มความร้อนแบบเดิมที่ใช้แหล่งความร้อนเป็นอากาศ จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 285.80 kWh/year คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 1,303.26 Baht/year พบว่าระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 63.25% โดยใช้เงินลงทุนสร้างระบบ 10,500 Baht คิดเป็นระยะเวลาคืนทุนคือ 8.06 year อัตราผลตอบแทน (IRR) 9.01% มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,977.61 Baht รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 111 จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน กรณีใช้ Solar PV/T Boosted Heat Pump

ตารางที่ 5 รายละเอียดการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ระบบเดิม	ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (kWh/day)	1.24	0.46
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี (kWh/year)	451.87	166.07
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (Baht/kWh)	4.50	
ค่าใช้จ่าย (Baht/year)	2,060.53	757.27
ผลประหยัดได้ (kWh/year)	285.80	
ผลประหยัดได้ (Bath/year)	1,303.26 (ลดลง 63.25%)	
เงินลงทุน (Bath)	10,500	
ระยะเวลาคืนทุน (year)	8.06	
NPV (Baht) คิดอัตราดอกเบี้ย 6.22% (ธนาคารกรุงไทย, 2564)	1,977.61	
IRR	9.01%	

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนขนาด 0.5 kW ที่ใช้สารทำงานเป็น R-22 และใช้อากาศไปแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนทำระเหยเปรียบเทียบกับการใช้น้ำร้อนจ่ายให้กับส่วนทำระเหยที่อัตราการไหล 1.0 LPM 2.0 LPM 2.25 LPM และ 3.0 LPM และควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้ส่วนทำระเหยที่อุณหภูมิ 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C และ 65 °C จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนเข้าส่วนทำระเหย 2.0 LPM และอุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายให้ส่วนทำระเหย 45 °C ให้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) $3.41 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปั๊มความร้อนแบบธรรมดาที่ใช้อากาศจ่ายให้ส่วนทำระเหยที่มีค่า EER อยู่ที่ $2.37 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$

ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ขนาด 330 W ที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำแบบท่อทองแดง และแบบกล่องน้ำด้านหลังแผง จากการศึกษาสมรรถนะด้านความร้อนตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 พบว่า การติดตั้งกล่องน้ำด้านหลังแผงมีสมรรถนะด้านความร้อนมีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และค่า $F_R U_L$ เท่ากับ 0.4018 และ $10.466 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่าเฉลี่ย 44.22% ซึ่งสูงกว่ากรณีติดตั้งท่อทองแดงด้านหลังแผง Solar PV/T

ส่วนที่ 3 หลังการติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) แล้วทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงที่เหมาะสมในการใช้งานจริง ทำการเก็บข้อมูลการผลิตน้ำร้อนจากระบบโดยมีเงื่อนไขในการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 100 L ให้ได้อุณหภูมิ 65 °C จากการศึกษาทดสอบ พบว่า ที่อัตราการไหลน้ำผ่านแผง Solar PV/T 2.25 LPM เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยมีค่า EER สูงสุดเท่ากับ $4.95 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$ (ค่า EER เฉลี่ย $2.69 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$) สามารถลดพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ $0.78 \text{ kWh}/\text{day}$ หรือคิดเป็นผลประหยัดที่ลดลง 46.14% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบปั๊มความร้อนแบบเดิม เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จาก

การศึกษาพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 285.80 kWh/year คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 1,303.26 Baht/year หรือลดลง 63.25% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม โดยใช้เงินลงทุน 10,500 Baht คิดเป็นระยะเวลาคืนทุน 8.06 year มีอัตราผลตอบแทน 9.01%





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ก.1 ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์

กรณีการใช้ปั๊มความร้อนแบบเดิมที่ใช้แหล่งความร้อนเป็นอากาศในการผลิตน้ำร้อน

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 1.238 && \text{kWh/day} \\
 &= 1.238 \times 365 \\
 &= 451.87 && \text{kWh/year}
 \end{aligned}$$

กรณีการใช้ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 0.455 && \text{kWh/day} \\
 &= 0.455 \times 365 \\
 &= 166.07 && \text{kWh/year} \\
 \text{ผลประหยัดได้} &= 451.87 - 166.07 \\
 &= 285.80 && \text{kWh/year} \\
 \text{ผลประหยัดได้} &= 285.80 \times 4.56 \\
 &= 1,303.26 && \text{Baht/year} \\
 \text{เงินลงทุนระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump} &= 10,500 && \text{Baht} \\
 \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= 10,500 / 1,303.26 \\
 &= 8.06 && \text{Year}
 \end{aligned}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) กำหนด $i = 6.22\%$

$$\begin{aligned}
 \text{NPV} &= \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - \text{TIC} \\
 &= \frac{1,303.26}{(1+0.622)} + \frac{1,303.26}{(1+0.622)^2} + \dots + \frac{1,303.26}{(1+0.622)^{15}} - 10,500 \\
 &= 1,977.61 \text{ Baht}
 \end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

$$\begin{aligned}
 \text{IRR} &= \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - \text{TIC} \\
 &= \frac{1,303.26}{(1+\text{IRR})} + \frac{1,303.26}{(1+\text{IRR})^2} + \dots + \frac{1,303.26}{(1+\text{IRR})^{15}} - 10,500 \\
 &= 9.01\%
 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ก.2 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองระบบ Solar Boosted Heat Pump เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบ โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองค่ารังสีอาทิตย์และ อุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ทดสอบจริง เวลา 09:00 น. ซึ่งมี $I_T = 800.5 \text{ W/m}^2$ $T_a = 26.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ใช้ อุณหภูมิน้ำผ่านแผง Solar PV/T เริ่มต้นคือ $29.8 \text{ }^\circ\text{C}$ และใช้อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นของถังเก็บน้ำร้อนคือ $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} Q_{PV/T} &= A_{PV/T} [(0.4018 I_T) - (10.466 (T_{f,i} - T_a))] \\ &= 1.88 \times [(0.4018 \times 800.5) - (10.466 \times (29.8 - 26.7))] \\ &= 169.02 \text{ W} \end{aligned}$$

2. การทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} T_{PV/T,Sim} &= 1.0234 \times (I_T^{0.09286}) \times (T_a^{-0.17333}) \times (T_{f,i}^{1.0357}) \\ &= 1.0234 \times (800.5^{0.09286}) \times (26.7^{-0.17333}) \times (29.8^{1.0357}) \\ &= 33.13 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T

$$\begin{aligned} P_{PV/T,Sim} &= 1.170 \times (I_T^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{f,i}^{0.17826}) \times (T_{PV/T}^{-0.38333}) \\ &= 1.1170 \times (800.5^{0.99252}) \times (26.7^{-0.15381}) \times (29.8^{0.17826}) \times \\ &\quad (33.13^{-0.38333}) \\ &= 98.58 \text{ W} \end{aligned}$$

4. การทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน

$$\begin{aligned} EER_{HP,Sim} &= 3.5723 - [0.0288 (T_s - T_{l,Evap})] \\ &= 3.5723 - [0.0288 (35 - 33.4)] \\ &= 3.53 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e \end{aligned}$$

5. การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

$$\begin{aligned} P_{\text{Comp,Sim}} &= 0.2781 + [0.0042 (T_S - T_{i,\text{Evap}})] \\ &= 0.2781 + [0.0042 (35 - 33.4)] \\ &= 0.28 \text{ kW} \end{aligned}$$



ภาคผนวก ก.3 ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump โดยใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T คือ 2.25 LPM ปริมาณน้ำในถังเก็บ 100 L ณ เวลา 12:00 น. ของวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2563 ซึ่งเป็นวันที่ทำการทดลองระบบ

1. การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Condenser) ของปั๊มความร้อน

$$Q_{\text{Cond}} = M_s C_p (T_s^{t+\Delta t} - T_s^t) / \Delta t = 100 \times 4.187 \times (51.0 - 35.0) / 7200$$

$$= 0.930 \text{ kW}$$

2. การคำนวณค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อน

$$EER_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{P_{\text{Comp}}} = \frac{0.930}{0.341} = 2.731 \text{ kW}_{\text{th}} / \text{kW}_e$$





ภาคผนวก ข.
ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย

ตารางที่ ข.1 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 35 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	234.5	1.6	35.1	30.8	7500	50	235.4	2.0	34.7	29.2
300	36	234.2	1.6	35.2	30.7	7800	51	234.0	2.0	35.0	29.4
600	37	234.5	1.6	35.2	30.5	8100	52	233.5	2.0	35.3	29.5
900	37	235.2	1.6	35.2	30.4	8400	52	233.7	2.0	36.0	29.7
1200	38	235.1	1.6	35.2	30.5	8700	53	234.6	2.0	36.0	30.0
1500	39	233.5	1.7	35.2	30.1	9000	54	235.7	2.1	36.0	30.3
1800	39	233.7	1.7	35.2	29.8	9300	54	235.7	2.1	35.3	29.9
2100	40	232.7	1.7	35.1	29.8	9600	55	235.8	2.1	35.5	29.9
2400	41	233.5	1.7	35.3	29.6	9900	56	235.2	2.1	35.4	29.9
2700	41	233.7	1.7	35.8	29.4	10200	56	235.5	2.1	35.5	29.9
3000	42	233.5	1.8	36.0	29.4	10500	57	235.4	2.1	34.9	29.8
3300	43	234.0	1.8	36.0	29.7	10800	57	234.9	2.2	35.0	29.5
3600	44	234.2	1.8	35.6	30.0	11100	58	235.1	2.2	35.1	29.7
3900	44	232.7	1.8	35.1	29.6	11400	58	235.4	2.2	34.9	29.4
4200	45	232.7	1.8	35.0	29.5	11700	59	234.2	2.2	35.0	29.5
4500	45	233.4	1.8	35.1	29.5	12000	59	234.6	2.2	34.9	29.3
4800	46	233.6	1.8	35.1	29.4	12300	60	234.6	2.3	35.0	29.5
5100	46	232.4	1.9	35.3	29.5	12600	61	234.3	2.3	35.5	30.0
5400	47	232.6	1.9	35.3	29.5	12900	62	234.1	2.3	36.0	30.0
5700	47	233.4	1.9	35.2	29.7	13200	62	234.0	2.3	36.0	30.1
6000	48	232.4	1.9	34.7	29.3	13500	63	234.2	2.3	36.0	30.3
6300	48	233.1	1.9	34.8	29.3	13800	63	234.9	2.3	36.0	30.5
6600	49	234.5	1.9	34.4	29.0	14100	64	234.3	2.4	35.8	30.4
6900	49	234.2	1.9	34.7	29.6	14400	65	234.9	2.4	35.1	30.0
7200	50	235.5	1.9	34.7	29.2						

ตารางที่ ข.2 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 40 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	232.2	1.6	40.6	36.7	6900	50	232.6	2.0	40.2	34.4
300	36	230.9	1.6	40.5	36.6	7200	51	232.5	2.0	40.4	34.2
600	37	231.5	1.6	40.4	36.4	7500	52	233.6	2.0	40.4	34.5
900	38	232.2	1.6	40.3	35.8	7800	52	232.2	2.1	40.4	34.4
1200	39	231.9	1.7	40.4	35.5	8100	53	231.9	2.1	40.3	34.4
1500	40	232.2	1.7	40.9	34.9	8400	54	232.7	2.1	40.2	34.4
1800	40	232	1.7	40.6	34.6	8700	54	232.9	2.1	40.2	34.4
2100	41	232.7	1.7	41.0	34.8	9000	55	232.8	2.1	40.3	34.4
2400	41	232.8	1.7	41.0	34.2	9300	56	233.3	2.1	40.3	34.4
2700	42	231.9	1.8	41.0	34.5	9600	56	234	2.1	40.3	34.5
3000	42	231.9	1.8	41.0	35.2	9900	57	234.2	2.1	40.6	34.5
3300	43	232.1	1.8	40.7	35.0	10200	57	234.3	2.2	41.0	34.7
3600	44	232.8	1.8	40.5	34.4	10500	58	234.6	2.2	41.0	35.0
3900	44	232.2	1.8	40.5	34.2	10800	59	235.1	2.2	41.0	35.2
4200	45	232.2	1.9	40.6	34.5	11100	59	234.9	2.2	40.7	35.2
4500	45	232.8	1.9	40.5	34.5	11400	60	235.5	2.3	40.2	34.7
4800	46	231.6	1.9	40.6	34.6	11700	61	233.1	2.3	40.0	34.3
5100	46	231.8	1.9	41.0	34.8	12000	61	231.2	2.3	40.3	34.6
5400	47	232.1	1.9	40.5	34.6	12300	62	232.2	2.4	40.1	34.5
5700	47	232.1	1.9	40.6	34.5	12600	63	232.2	2.4	40.1	34.5
6000	48	231.5	1.9	40.3	34.4	12900	63	232.1	2.4	40.1	34.6
6300	49	231.8	2.0	40.6	34.4	13200	64	231.3	2.4	40.2	34.6
6600	50	232	2.0	40.5	34.4	13500	65	232.4	2.4	40.5	34.5

ตารางที่ ข.3 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 45 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	226.2	1.6	46.0	42.8	6900	49	223.2	2.0	45.9	38.7
300	36	225.5	1.6	46.0	42.8	7200	49	223.2	2.0	45.8	39.7
600	36	225.5	1.6	46.0	41.9	7500	50	223.5	2.1	45.6	40.0
900	37	226.2	1.6	45.5	40.4	7800	50	226.1	2.1	45.7	40.0
1200	37	225.6	1.6	45.1	39.6	8100	51	225.9	2.1	45.3	39.7
1500	38	225.9	1.7	45.1	39.1	8400	52	225.2	2.1	46.0	40.3
1800	38	225.6	1.7	45.0	39.0	8700	53	225.8	2.1	46.0	40.0
2100	39	224.6	1.7	45.2	39.0	9000	54	226.5	2.1	45.4	39.7
2400	39	224.7	1.7	45.4	39.1	9300	54	224.5	2.2	45.1	39.4
2700	40	224.3	1.7	45.6	39.2	9600	55	223.5	2.2	45.1	39.0
3000	40	224.4	1.8	45.4	39.3	9900	56	225.2	2.2	45.0	38.9
3300	41	225.2	1.8	45.0	39.1	10200	56	224.9	2.2	45.0	39.0
3600	41	225.2	1.8	44.5	38.7	10500	57	224.7	2.2	45.0	38.6
3900	42	224.7	1.8	44.6	38.5	10800	58	225.3	2.3	45.0	39.0
4200	43	224.9	1.8	44.8	38.7	11100	59	224.5	2.3	45.7	39.2
4500	43	224.0	1.9	44.4	38.7	11400	59	224.7	2.3	45.6	39.3
4800	44	223.5	1.9	44.6	38.8	11700	60	223.0	2.3	45.1	39.2
5100	45	224.0	1.9	44.6	38.8	12000	61	224.6	2.3	44.9	39.4
5400	46	224.1	1.9	45.0	38.7	12300	62	223.8	2.4	44.3	39.5
5700	46	224.4	1.9	45.1	38.8	12600	63	224.6	2.4	44.4	39.5
6000	47	223.8	2.0	45.7	39.3	12900	63	225.2	2.4	44.3	39.4
6300	47	224.8	2.0	45.6	38.8	13200	64	226.9	2.5	44.5	39.5
6600	48	223.4	2.0	45.9	39.9	13500	65	225.2	2.5	44.8	40.2

ตารางที่ ข.4 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 50 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	233.9	1.6	49.1	43.6	6600	50	231.9	2.0	50.0	44.1
300	36	233.6	1.6	49.1	43.6	6900	50	232.3	2.0	49.8	43.9
600	36	233.9	1.6	49.9	43.7	7200	51	233.6	2.0	49.6	43.8
900	37	233.9	1.6	51.0	44.2	7500	52	234.8	2.1	49.7	43.7
1200	38	223.3	1.7	51.0	43.6	7800	53	234.2	2.1	49.7	43.5
1500	38	234.0	1.7	51.0	45.7	8100	53	234.8	2.1	50.0	43.7
1800	39	234.2	1.7	51.0	46.4	8400	54	234.9	2.1	50.1	44.0
2100	40	232.4	1.7	51.0	46.4	8700	55	235.2	2.2	50.6	44.3
2400	40	234.9	1.7	50.9	45.7	9000	55	235.8	2.2	50.8	44.6
2700	41	234.4	1.8	50.5	45.0	9300	56	233.6	2.2	50.2	44.7
3000	42	234.6	1.8	50.0	44.6	9600	57	236.0	2.3	49.7	44.5
3300	42	235.1	1.8	49.5	44.0	9900	58	235.5	2.3	50.0	44.3
3600	43	235.2	1.8	49.3	43.6	10200	58	234.2	2.3	50.1	44.2
3900	43	234.5	1.8	49.5	43.6	10500	59	234.2	2.4	49.4	44.0
4200	44	234.6	1.9	49.6	43.6	10800	60	234.6	2.4	49.0	43.1
4500	44	234.2	1.9	49.4	43.5	11100	61	234.5	2.4	49.3	43.3
4800	45	233.9	1.9	49.7	43.5	11400	61	234.0	2.4	49.2	43.1
5100	46	233.3	1.9	50.1	43.4	11700	62	233.3	2.5	49.2	43.2
5400	47	234.0	1.9	50.3	43.7	12000	63	231.9	2.5	49.2	43.1
5700	47	232.5	2.0	51.0	44.2	12300	63	231.3	2.5	49.6	43.6
6000	48	233.6	2.0	51.0	45.1	12600	64	229.8	2.6	49.6	43.6
6300	49	233.7	2.0	50.7	44.6	12900	65	232.4	2.6	50.3	43.9

ตารางที่ ข.5 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 55 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	228.2	1.6	55.4	50.9	6600	50	220.9	2.1	54.6	48.1
300	36	228.3	1.6	55.3	50.7	6900	50	218.2	2.1	54.6	48.3
600	37	226.0	1.6	56.0	50.0	7200	51	217.5	2.1	54.8	48.7
900	37	225.3	1.6	56.0	49.9	7500	52	219.5	2.1	55.0	48.9
1200	38	226.2	1.7	55.7	50.1	7800	52	213.3	2.2	55.7	49.3
1500	38	226.2	1.7	55.3	49.5	8100	53	222.1	2.2	56.0	49.3
1800	39	226.2	1.7	54.7	49.0	8400	54	216.4	2.2	56.0	49.2
2100	40	223.2	1.7	54.7	48.4	8700	54	218.3	2.2	56.0	50.0
2400	40	222.9	1.8	54.7	48.3	9000	55	215.5	2.3	56.0	50.2
2700	41	223.2	1.8	54.7	48.2	9300	56	220.1	2.3	55.9	50.1
3000	41	221.7	1.8	54.7	48.3	9600	57	218.6	2.3	55.8	50.4
3300	42	222.1	1.8	54.7	48.2	9900	58	219.3	2.3	55.2	49.8
3600	43	220.4	1.9	55.0	48.1	10200	58	216.5	2.4	55.0	49.2
3900	43	219.6	1.9	55.0	48.3	10500	59	218.1	2.4	54.8	49.0
4200	44	221.3	1.9	55.2	48.6	10800	60	215.6	2.4	55.0	49.0
4500	45	222.1	1.9	56.0	48.8	11100	60	214.2	2.4	54.9	48.7
4800	45	222.6	1.9	55.7	48.9	11400	61	215.6	2.5	55.1	48.6
5100	46	220.2	2.0	55.1	48.5	11700	62	212.1	2.5	54.8	48.8
5400	47	220.2	2.0	54.5	48.1	12000	63	215.5	2.5	54.2	48.5
5700	48	219.7	2.0	54.5	47.7	12300	64	215.3	2.6	54.0	48.2
6000	48	220.2	2.0	54.4	47.9	12600	65	214.5	2.6	54.0	48.0
6300	49	218.7	2.1	54.5	47.9						

ตารางที่ ข.6 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 60 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	226.7	1.6	59.8	55.9	6600	50	221.3	2.0	59.9	53.1
300	36	222.1	1.6	59.6	55.8	6900	51	221.5	2.1	60.4	53.8
600	36	226.7	1.6	59.8	55.1	7200	51	224.3	2.1	60.1	53.8
900	37	226.7	1.7	60.9	54.3	7500	52	222.6	2.1	59.6	53.5
1200	38	224.9	1.7	61.0	54.2	7800	53	224.5	2.1	59.6	52.7
1500	38	226.2	1.7	61.0	54.4	8100	53	223.2	2.1	59.4	52.8
1800	39	225.2	1.7	61.0	54.6	8400	54	224.3	2.2	59.3	52.4
2100	39	222.9	1.8	60.9	54.5	8700	55	223.2	2.2	59.2	52.1
2400	40	224.8	1.8	60.3	54.4	9000	56	223.1	2.2	59.3	52.1
2700	40	223.1	1.8	59.9	53.8	9300	56	223.1	2.2	59.6	52.2
3000	41	223.7	1.8	59.9	53.6	9600	57	222.2	2.2	59.7	52.4
3300	42	222.4	1.8	59.7	53.4	9900	58	221.2	2.3	60.1	52.6
3600	42	222.5	1.9	59.6	53.2	10200	59	225.0	2.3	60.2	52.6
3900	43	221.6	1.9	60.0	53.4	10500	59	221.8	2.3	60.8	53.3
4200	44	222.6	1.9	59.3	53.3	10800	60	221.7	2.3	60.1	53.4
4500	45	220.5	1.9	59.0	52.6	11100	61	220.7	2.4	59.9	53.1
4800	46	223.8	1.9	59.6	52.9	11400	62	223.3	2.4	59.7	52.5
5100	46	224.2	1.9	59.0	52.8	11700	63	221.6	2.4	59.8	52.5
5400	47	223.5	2.0	59.0	52.4	12000	63	222.6	2.4	59.7	52.5
5700	47	221.3	2.0	59.0	52.5	12300	64	224.9	2.5	59.6	52.8
6000	48	220.2	2.0	59.0	52.7	12600	65	224.6	2.5	60.0	52.7
6300	49	221.9	2.0	59.3	52.9						

ตารางที่ ข.7 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 65 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	232.5	1.6	64.0	59.8	6600	50	232.5	2.1	64.9	58.0
300	36	229.7	1.6	64.0	59.7	6900	51	225.5	2.1	64.8	57.7
600	36	232.5	1.6	64.1	59.0	7200	51	224.9	2.1	64.9	57.8
900	37	230.4	1.7	64.2	58.7	7500	52	225.3	2.1	65.0	57.9
1200	37	229.8	1.7	64.2	58.3	7800	53	225.6	2.1	65.2	58.2
1500	38	227.1	1.7	64.2	58.2	8100	53	226.2	2.1	65.0	57.6
1800	39	231.2	1.7	64.3	58.7	8400	54	230.0	2.1	64.5	57.0
2100	39	229.7	1.8	64.2	58.2	8700	55	230.0	2.2	65.3	57.9
2400	40	227.9	1.8	64.2	58.1	9000	56	227.7	2.2	65.2	58.2
2700	40	227.9	1.8	64.3	57.9	9300	56	228.6	2.2	64.6	58.0
3000	41	225.0	1.8	64.1	58.0	9600	57	230.9	2.3	64.3	57.7
3300	42	230.7	1.8	64.2	58.0	9900	58	231.0	2.3	64.3	57.6
3600	43	226.2	1.9	64.0	57.5	10200	59	229.5	2.3	64.3	57.4
3900	44	231.4	1.9	64.2	57.7	10500	59	229.2	2.3	64.3	57.6
4200	44	231.0	1.9	64.3	57.9	10800	60	229.5	2.3	64.4	57.5
4500	45	234.8	1.9	64.4	57.8	11100	61	232.7	2.4	64.3	57.6
4800	46	233.3	1.9	64.5	57.8	11400	62	229.7	2.4	64.6	57.7
5100	46	231.3	2.0	64.4	57.5	11700	62	232.4	2.4	65.4	58.2
5400	47	232.3	2.0	64.8	57.9	12000	63	233.1	2.4	65.9	58.6
5700	48	232.5	2.0	64.9	58.0	12300	64	231.9	2.4	66.0	59.0
6000	48	232.5	2.0	64.8	58.0	12600	65	233.6	2.5	65.7	59.3
6300	49	232.0	2.0	64.9	58.0						

ตารางที่ ข.8 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 35 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	232.8	1.6	35.6	33.5	6900	50	231.9	2.0	35.3	32.3
300	36	232.7	1.6	35.5	33.5	7200	50	232.4	2.0	35.7	32.2
600	36	232.7	1.6	35.5	33.2	7500	51	230.1	2.0	35.6	32.6
900	37	232.8	1.6	35.2	32.6	7800	51	231.8	2.0	35.4	32.4
1200	38	232.2	1.7	35.0	32.2	8100	52	232.2	2.0	35.3	32.4
1500	39	232.2	1.7	35.3	32.2	8400	53	232.1	2.1	35.4	32.4
1800	39	233.7	1.7	35.1	31.9	8700	54	231.9	2.1	35.5	32.2
2100	40	233.3	1.7	35.1	31.6	9000	54	232.4	2.1	35.9	32.8
2400	40	233.1	1.7	35.3	32.1	9300	55	231.5	2.1	35.9	32.9
2700	41	233.1	1.8	35.2	32.3	9600	56	230.9	2.1	35.6	32.5
3000	42	232.8	1.8	35.2	32.3	9900	57	231.5	2.2	35.6	32.6
3300	42	233.1	1.8	34.8	32.0	10200	58	228.2	2.2	35.3	32.3
3600	43	233.1	1.8	34.7	31.6	10500	58	230.7	2.2	35.6	32.6
3900	44	233.1	1.8	34.8	31.8	10800	59	229.2	2.3	35.5	32.5
4200	44	232.7	1.8	35.2	32.4	11100	60	230.5	2.3	35.9	32.9
4500	45	232.2	1.9	35.6	32.5	11400	60	227.9	2.3	35.9	32.8
4800	45	232.1	1.9	35.7	32.7	11700	61	230.2	2.3	35.6	32.6
5100	46	232.1	1.9	35.4	32.4	12000	62	228.6	2.3	35.4	32.4
5400	47	231.9	1.9	35.4	32.1	12300	62	232.4	2.3	35.5	32.5
5700	47	231.8	1.9	35.2	32.2	12600	63	232.6	2.4	35.4	32.4
6000	48	231.9	1.9	35.3	32.1	12900	64	231.9	2.4	32.9	32.7
6300	48	232.2	1.9	35.2	32.2	13200	65	233.1	2.4	35.4	32.4
6600	49	232.1	2.0	35.4	32.4						

ตารางที่ ข.9 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 40 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	227.4	1.6	40.3	37.4	6600	50	226.7	2.1	39.9	35.8
300	36	227.0	1.6	40.1	37.4	6900	50	227.3	2.1	40.3	35.9
600	36	227.4	1.6	40.0	36.4	7200	51	228.7	2.1	40.3	36.3
900	37	228.9	1.7	40.0	36.2	7500	52	227.9	2.1	39.8	36.1
1200	38	229.1	1.7	40.1	36.1	7800	53	229.4	2.2	39.7	35.8
1500	38	229.1	1.7	40.3	36.7	8100	54	228.3	2.2	39.5	35.6
1800	39	230.4	1.7	40.9	36.8	8400	55	229.1	2.2	39.6	35.5
2100	39	229.2	1.8	40.3	36.4	8700	55	227.0	2.2	39.7	35.4
2400	40	229.0	1.8	39.9	35.7	9000	56	226.7	2.3	39.9	35.6
2700	40	228.0	1.8	39.9	35.6	9300	57	227.6	2.3	41.2	36.2
3000	41	225.5	1.8	39.9	35.7	9600	58	227.8	2.3	41.4	37.1
3300	42	225.9	1.8	40.5	35.7	9900	59	227.9	2.3	40.9	37.0
3600	42	227.3	1.9	40.3	36.0	10200	59	228.2	2.3	40.3	36.5
3900	43	226.5	1.9	39.8	35.5	10500	60	228.6	2.4	40.1	36.2
4200	44	227.7	1.9	39.7	35.4	10800	60	225.5	2.4	40.1	36.1
4500	45	227.0	1.9	39.7	35.2	11100	61	225.5	2.4	40.0	36.0
4800	45	227.0	1.9	39.8	35.5	11400	62	225.0	2.5	40.1	36.2
5100	46	228.2	2.0	40.3	35.7	11700	63	224.0	2.5	41.0	36.4
5400	47	228.2	2.0	40.6	36.3	12000	64	225.1	2.5	40.6	36.8
5700	47	227.0	2.0	40.2	36.1	12300	64	226.0	2.5	40.4	36.5
6000	48	228.2	2.0	39.8	35.9	12600	65	224.0	2.5	40.4	36.5
6300	49	228.0	2.0	40.0	35.9						

ตารางที่ ข.10 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 45 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	231.0	1.6	44.2	41.7	6300	50	227.7	2.0	44.5	41.0
300	36	231.6	1.6	44.1	41.7	6600	51	230.3	2.0	44.5	41.1
600	37	231.2	1.6	44.2	41.5	6900	52	227.7	2.1	44.7	41.3
900	38	231.0	1.6	44.8	41.5	7200	53	229.2	2.1	44.9	41.4
1200	39	233.8	1.6	45.7	42.4	7500	54	227.4	2.1	45.2	41.9
1500	39	232.4	1.6	45.3	42.5	7800	54	226.2	2.1	45.0	41.9
1800	40	231.3	1.7	45.0	41.9	8100	55	226.5	2.1	45.1	41.9
2100	41	230.4	1.7	45.1	41.7	8400	56	228.1	2.1	44.7	41.6
2400	41	229.5	1.7	45.6	42.2	8700	56	227.4	2.1	44.5	41.4
2700	42	232.2	1.8	45.2	42.1	9000	57	227.0	2.2	44.4	41.2
3000	43	232.5	1.8	45.1	41.8	9300	58	224.9	2.2	44.5	41.2
3300	44	232.8	1.8	45.4	42.1	9600	58	224.1	2.2	44.5	41.3
3600	44	230.0	1.8	45.5	42.2	9900	59	224.1	2.3	44.5	41.5
3900	45	230.0	1.8	45.0	41.8	10200	60	226.2	2.3	44.5	41.5
4200	46	230.1	1.9	44.7	41.2	10500	61	227.6	2.3	44.7	41.7
4500	46	232.1	1.9	44.5	41.3	10800	61	227.5	2.3	45.0	42.0
4800	47	231.5	1.9	44.4	41.2	11100	62	225.0	2.4	44.9	41.8
5100	48	231.2	1.9	44.6	41.3	11400	63	227.1	2.4	45.1	42.0
5400	48	231.3	1.9	44.9	41.6	11700	64	225.9	2.4	45.4	42.3
5700	49	228.2	2.0	44.5	41.1	12000	65	227.8	2.4	44.8	41.8
6000	50	230.3	2.0	44.4	41.2						

ตารางที่ ข.11 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 50 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	224.6	1.6	50.9	47.8	6300	50	224.3	2.1	49.0	45.5
300	36	225.8	1.6	50.9	47.7	6600	51	223.5	2.1	49.0	45.6
600	37	224.6	1.7	50.2	47.1	6900	51	221.4	2.1	49.2	46.0
900	37	224.4	1.7	49.6	46.4	7200	52	221.0	2.2	49.0	45.3
1200	38	223.8	1.7	49.2	46.2	7500	53	223.2	2.2	49.0	45.1
1500	39	223.4	1.8	49.0	45.7	7800	54	223.2	2.2	49.0	45.3
1800	39	223.5	1.8	49.3	45.8	8100	55	220.8	2.2	49.4	45.7
2100	40	221.0	1.8	49.4	46.0	8400	55	218.1	2.3	50.0	46.3
2400	40	222.9	1.8	49.4	45.9	8700	56	221.6	2.3	50.8	46.7
2700	41	220.8	1.9	49.0	45.7	9000	57	221.0	2.3	50.0	46.8
3000	42	222.8	1.9	49.2	45.9	9300	57	216.9	2.3	50.3	46.9
3300	43	221.9	1.9	49.3	45.9	9600	58	218.6	2.4	50.4	47.0
3600	43	216.2	1.9	49.7	46.0	9900	59	222.8	2.4	50.0	46.5
3900	44	220.8	1.9	49.3	45.6	10200	60	221.1	2.4	49.7	46.6
4200	45	218.0	2.0	49.1	45.5	10500	61	220.7	2.4	49.7	46.5
4500	45	218.7	2.0	49.1	45.4	10800	61	220.1	2.4	49.9	46.4
4800	46	222.6	2.0	49.0	45.4	11100	62	221.1	2.4	49.6	46.5
5100	47	220.5	2.0	49.0	45.4	11400	63	216.2	2.5	49.6	46.4
5400	48	224.7	2.0	49.1	45.5	11700	63	217.0	2.5	49.7	46.9
5700	49	224.3	2.0	49.5	46.0	12000	64	220.7	2.5	49.7	46.4
6000	49	221.9	2.1	49.0	45.8	12300	65	220.4	2.5	49.8	46.4

ตารางที่ ข.12 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 55 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	226.5	1.6	55.0	52.6	6600	50	227.1	2.1	54.1	50.1
300	36	226.6	1.6	55.0	51.9	6900	50	226.5	2.1	54.0	50.1
600	36	226.5	1.6	55.3	52.0	7200	51	226.7	2.1	54.1	50.2
900	36	226.4	1.6	55.3	52.3	7500	52	226.1	2.1	54.2	50.3
1200	37	226.5	1.7	55.2	52.6	7800	53	225.9	2.2	54.2	50.4
1500	38	226.2	1.7	54.1	50.9	8100	53	225.0	2.2	54.9	51.1
1800	38	226.5	1.7	54.5	51.1	8400	54	223.2	2.2	55.1	51.6
2100	39	226.2	1.7	54.0	50.6	8700	55	223.9	2.2	55.7	52.2
2400	39	226.5	1.8	55.0	51.4	9000	55	226.0	2.2	55.8	51.9
2700	40	226.4	1.8	55.3	51.6	9300	56	223.4	2.3	55.0	51.1
3000	41	223.7	1.8	54.6	51.5	9600	57	222.4	2.3	54.3	50.8
3300	42	224.6	1.8	54.5	51.1	9900	58	224.4	2.3	54.3	50.6
3600	42	226.2	1.8	54.3	50.9	10200	59	223.6	2.4	55.1	51.6
3900	43	226.8	1.9	54.7	51.4	10500	59	219.2	2.4	55.3	51.5
4200	43	225.5	1.9	55.0	51.5	10800	60	217.5	2.4	55.9	52.0
4500	44	227.6	1.9	54.4	51.3	11100	61	223.8	2.4	55.3	51.5
4800	45	227.4	1.9	54.1	50.7	11400	62	220.5	2.5	55.0	51.4
5100	45	226.0	2.0	54.1	50.3	11700	63	218.6	2.5	55.2	51.6
5400	46	225.0	2.0	54.7	50.9	12000	63	218.9	2.5	55.3	51.4
5700	47	227.3	2.0	54.2	50.4	12300	64	223.5	2.5	55.5	51.7
6000	48	227.3	2.0	54.4	50.7	12600	65	223.2	2.5	55.7	52.1
6300	49	227.3	2.0	54.2	50.7						

ตารางที่ ข.13 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 60 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	225.9	1.6	59.2	56.5	6300	50	218.7	2.1	59.3	55.2
300	36	225.6	1.6	59.3	56.3	6600	51	215.9	2.1	59.3	55.2
600	37	224.9	1.6	60.8	58.2	6900	52	221.4	2.2	59.7	55.3
900	37	219.5	1.7	60.5	57.5	7200	52	219.6	2.2	59.4	55.7
1200	38	221.4	1.7	60.0	56.9	7500	53	222.4	2.2	59.8	56.4
1500	39	221.6	1.7	59.5	56.0	7800	54	220.9	2.2	59.6	55.7
1800	39	221.1	1.7	59.6	56.2	8100	55	219.2	2.3	59.0	54.9
2100	40	223.5	1.8	59.7	56.1	8400	56	223.5	2.3	59.4	55.6
2400	41	221.2	1.8	59.2	55.7	8700	56	217.1	2.3	59.2	55.2
2700	42	221.2	1.8	60.1	55.8	9000	57	220.1	2.3	59.3	55.2
3000	43	218.3	1.8	60.2	56.0	9300	58	222.5	2.4	59.9	55.4
3300	43	223.3	1.8	60.1	56.1	9600	59	219.2	2.4	60.4	56.4
3600	44	221.3	1.9	59.9	55.6	9900	60	221.4	2.4	60.1	56.4
3900	45	222.6	1.9	59.5	55.9	10200	60	218.9	2.5	60.1	55.8
4200	45	222.5	1.9	59.7	55.6	10500	61	218.9	2.5	59.7	55.6
4500	46	220.5	1.9	59.7	55.6	10800	62	220.4	2.5	59.7	56.0
4800	47	217.8	2.0	60.0	56.0	11100	63	220.5	2.5	59.5	55.5
5100	47	218.1	2.0	59.4	55.7	11400	63	222	2.5	59.3	55.2
5400	48	222.1	2.0	59.4	55.3	11700	64	220.1	2.6	59.2	55.6
5700	49	217.0	2.1	59.6	55.1	12000	65	221.1	2.6	59.4	55.4
6000	49	222.3	2.1	59.3	55.2						

ตารางที่ ข.14 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 65 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	225.5	1.6	65.8	62.9	6300	50	221.1	2.1	64.2	60.3
300	36	225.2	1.6	65.8	62.7	6600	51	222.5	2.1	64.2	60.2
600	36	222.9	1.6	65.0	61.8	6900	52	223.4	2.1	64.2	60.2
900	37	224.3	1.7	64.8	61.2	7200	52	222.6	2.2	64.4	60.6
1200	38	223.8	1.7	65.1	61.2	7500	53	223.4	2.2	64.8	60.4
1500	38	222.6	1.7	65.1	61.3	7800	54	223.0	2.2	65.0	60.6
1800	39	222.3	1.8	65.1	61.3	8100	55	223.5	2.2	65.3	61.2
2100	40	220.8	1.8	64.4	60.6	8400	55	223.7	2.2	65.6	61.5
2400	40	223.2	1.8	64.3	60.6	8700	56	224.8	2.3	64.4	61.0
2700	41	223.1	1.8	64.5	60.9	9000	57	224.9	2.3	64.3	60.3
3000	42	221.3	1.8	64.6	60.9	9300	58	223.5	2.3	64.5	60.5
3300	43	222.3	1.9	65.0	60.9	9600	58	222.5	2.3	64.7	61.0
3600	43	222.8	1.9	65.0	61.3	9900	59	223.8	2.3	64.7	60.5
3900	44	221.3	1.9	64.5	60.7	10200	60	223.8	2.4	64.9	60.9
4200	45	221.3	1.9	64.3	60.7	10500	61	223.5	2.4	64.8	61.0
4500	46	222.6	2.0	64.5	60.8	10800	62	226.1	2.4	64.8	60.9
4800	46	221.6	2.0	64.5	60.7	11100	63	223.0	2.5	64.9	61.1
5100	47	222.5	2.0	64.9	60.8	11400	63	223.1	2.5	65.2	61.3
5400	48	222.9	2.0	64.7	61.2	11700	64	222.6	2.5	65.0	61.6
5700	49	221.4	2.1	64.4	60.5	12000	65	221.9	2.5	64.3	60.7
6000	49	221.5	2.1	64.4	60.8						

ตารางที่ ข.15 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 35°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	230.5	1.6	35.3	32.6	6300	49	228.0	2.0	35.0	30.9
300	36	230.5	1.6	35.1	32.4	6600	50	226.7	2.0	34.9	30.8
600	36	229.4	1.6	35.0	31.4	6900	50	227.3	2.1	35.3	30.9
900	37	228.9	1.6	35.0	31.2	7200	51	228.7	2.1	35.3	31.3
1200	38	229.1	1.6	35.1	31.1	7500	52	227.9	2.1	34.8	31.1
1500	38	229.1	1.7	36.3	31.7	7800	53	229.4	2.1	34.7	30.8
1800	39	230.4	1.7	35.9	31.8	8100	54	228.3	2.1	34.5	30.6
2100	40	229.2	1.7	35.3	31.4	8400	55	229.1	2.2	34.6	30.5
2400	40	229.0	1.7	34.9	30.7	8700	56	227.0	2.2	34.7	30.4
2700	41	228.0	1.7	34.9	30.6	9000	56	226.7	2.2	34.9	30.6
3000	41	225.5	1.8	34.9	30.7	9300	57	227.6	2.2	36.2	31.2
3300	42	225.9	1.8	35.5	30.7	9600	58	227.8	2.3	36.4	32.1
3600	43	227.3	1.8	35.3	31.0	9900	59	227.9	2.3	35.9	32.0
3900	43	226.5	1.8	34.8	30.5	10200	59	228.2	2.3	35.3	31.5
4200	44	227.7	1.9	34.7	30.4	10500	60	228.6	2.3	35.1	31.2
4500	45	227.0	1.9	34.7	30.2	10800	61	225.5	2.4	35.1	31.1
4800	45	227.0	1.9	34.8	30.5	11100	62	225.5	2.4	35.0	31.0
5100	46	228.2	1.9	35.3	30.7	11400	62	225.0	2.4	35.1	31.2
5400	47	228.2	2.0	35.6	31.3	11700	63	224.0	2.5	36.0	31.4
5700	47	228.0	2.0	35.2	31.1	12000	64	225.1	2.5	35.6	31.8
6000	48	228.2	2.0	34.8	30.9	12300	65	226.0	2.5	35.4	31.5

ตารางที่ ข.16 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 40°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	231.2	1.6	37.8	36.7	6000	49	234.3	2.0	39.6	36.5
300	36	230.2	1.6	39.7	36.6	6300	50	233.4	2.0	39.5	36.3
600	36	230.2	1.6	39.9	37.0	6600	51	231.3	2.0	39.6	36.4
900	37	230.7	1.6	39.7	36.5	6900	52	233.1	2.1	39.1	36.0
1200	38	230.9	1.6	40.3	37.3	7200	52	230.1	2.1	40.3	37.0
1500	38	230.9	1.7	39.5	36.5	7500	53	232.2	2.1	40.5	37.5
1800	39	231.8	1.7	40.1	36.9	7800	54	232.4	2.1	40.3	37.1
2100	40	231.8	1.7	40.2	37.2	8100	55	232.1	2.1	40.0	36.8
2400	40	233.5	1.7	39.8	36.8	8400	56	231.9	2.2	40.1	37.1
2700	41	233.2	1.7	39.9	36.9	8700	57	229.6	2.2	39.9	36.7
3000	42	232.5	1.8	39.8	36.7	9000	57	230.3	2.2	39.4	36.4
3300	42	232.5	1.8	40.1	37.0	9300	58	228.5	2.2	39.2	36.2
3600	43	233.4	1.8	39.8	36.3	9600	59	228.8	2.3	40.2	37.0
3900	44	233.7	1.8	40.0	37.0	9900	60	230.6	2.3	40.4	37.2
4200	44	231.2	1.9	39.2	36.2	10200	60	229.1	2.3	40.7	37.6
4500	45	232.8	1.9	39.4	36.5	10500	61	228.4	2.3	40.0	36.8
4800	46	234.5	1.9	40.1	36.9	10800	62	231.2	2.4	39.7	36.6
5100	46	234.5	1.9	39.6	36.5	11100	63	230.3	2.4	39.6	36.6
5400	47	233.9	2.0	39.6	36.5	11400	64	230.7	2.4	39.5	36.3
5700	48	234.4	2.0	39.8	36.8	11700	65	227.9	2.5	39.7	36.7

ตารางที่ ข.17 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 45°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	229.3	1.6	45.3	43.2	6000	52	232.6	2.2	44.7	41.4
300	36	230.1	1.6	45.2	43.1	6300	53	232.5	2.2	45.0	41.7
600	37	232.0	1.7	44.7	42.2	6600	53	230.6	2.2	44.5	41.5
900	38	232.9	1.7	44.9	42.0	6900	54	233.3	2.2	44.6	41.4
1200	38	232.2	1.7	45.0	41.8	7200	55	233.1	2.2	44.2	41.4
1500	39	231.4	1.8	44.7	41.7	7500	55	232.0	2.3	44.4	41.0
1800	40	232.1	1.8	44.1	41.3	7800	56	232.1	2.3	44.2	40.9
2100	40	231.4	1.8	44.3	41.5	8100	57	230.9	2.3	44.1	41.2
2400	41	230.2	1.9	44.4	41.7	8400	57	230.3	2.3	44.2	41.3
2700	42	230.7	1.9	44.5	41.6	8700	58	230.1	2.3	44.5	41.4
3000	43	231.2	1.9	44.7	41.4	9000	59	232.0	2.4	44.4	41.2
3300	44	232.8	1.9	44.8	41.7	9300	60	230.7	2.4	44.1	41.0
3600	45	232.4	2.0	44.9	41.8	9600	60	230.2	2.4	44.2	41.2
3900	46	230.3	2.0	44.1	40.5	9900	61	230.2	2.4	44.6	41.7
4200	47	230.4	2.0	44.8	41.4	10200	61	230.5	2.4	44.5	41.6
4500	48	230.5	2.0	45.6	42.2	10500	62	232.0	2.5	44.2	41.3
4800	49	232.1	2.1	45.8	42.3	10800	63	230.2	2.5	44.5	41.7
5100	50	232.1	2.1	44.8	42.0	11100	64	232.0	2.5	44.6	41.3
5400	51	231.8	2.1	44.4	41.2	11400	64	232.2	2.5	45.1	41.7
5700	51	230.3	2.1	44.3	41.0	11700	65	232.2	2.5	44.3	41.1

ตารางที่ ข.18 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 50°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	230.4	1.6	50.7	47.7	6000	49	234.3	2.0	48.8	45.7
300	36	233.1	1.6	50.7	47.6	6300	50	233.4	2.0	48.8	45.4
600	36	230.1	1.6	50.0	47.0	6600	51	231.3	2.0	48.8	45.5
900	37	232.2	1.6	49.4	46.3	6900	52	233.1	2.1	49.0	45.9
1200	38	232.4	1.6	49.0	46.1	7200	52	230.1	2.1	48.8	45.2
1500	38	232.1	1.7	48.8	45.6	7500	53	232.2	2.1	48.8	45.0
1800	39	231.9	1.7	49.1	45.7	7800	54	232.4	2.1	48.8	45.2
2100	40	229.6	1.7	49.2	45.9	8100	55	232.1	2.1	49.2	45.6
2400	40	230.3	1.7	49.2	45.8	8400	56	231.9	2.2	49.8	46.2
2700	41	233.2	1.7	48.8	45.6	8700	57	229.6	2.2	50.6	46.6
3000	41	232.5	1.8	49.0	45.8	9000	57	230.3	2.2	49.8	46.7
3300	42	232.5	1.8	49.1	45.8	9300	58	228.5	2.2	50.1	46.8
3600	43	233.4	1.8	49.5	45.9	9600	59	233.1	2.3	50.2	46.9
3900	43	233.7	1.8	49.1	45.5	9900	60	230.1	2.3	49.8	46.4
4200	44	231.2	1.9	48.9	45.4	10200	60	232.2	2.3	49.5	46.5
4500	45	232.8	1.9	48.9	45.3	10500	61	232.4	2.3	49.5	46.4
4800	46	234.5	1.9	48.8	45.3	10800	62	232.1	2.4	49.7	46.3
5100	46	234.5	1.9	48.8	45.3	11100	63	231.9	2.4	49.4	46.4
5400	47	233.9	2.0	48.9	45.4	11400	64	229.6	2.4	49.4	46.3
5700	48	234.4	2.0	49.3	45.9	11700	65	230.3	2.5	49.5	46.8

ตารางที่ ข.19 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 55°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	231.5	1.6	55.0	50.9	6300	49	232.8	2.0	54.4	47.8
300	36	232.7	1.6	55.2	50.6	6600	50	234.5	2.0	54.5	48.0
600	36	231.2	1.6	55.9	49.9	6900	51	234.5	2.1	54.5	48.2
900	37	232.8	1.6	55.9	49.8	7200	52	233.9	2.1	54.7	48.6
1200	38	232.5	1.6	55.6	50.0	7500	53	234.4	2.1	54.9	48.8
1500	38	232.5	1.7	55.2	49.4	7800	53	234.3	2.1	55.6	49.2
1800	39	232.9	1.7	54.6	48.9	8100	54	233.4	2.2	55.9	49.2
2100	40	232.4	1.7	54.6	48.3	8400	55	231.3	2.2	55.9	49.1
2400	40	232.3	1.8	54.6	48.2	8700	56	233.7	2.2	55.9	49.9
2700	41	233.4	1.8	54.6	48.1	9000	57	231.2	2.2	55.9	50.1
3000	42	231.3	1.8	54.6	48.2	9300	57	233.7	2.2	55.8	50.0
3300	42	228.5	1.8	54.6	48.1	9600	58	231.2	2.3	55.7	50.3
3600	43	230.5	1.8	54.9	48.0	9900	59	232.8	2.3	55.1	49.7
3900	44	230.3	1.9	54.9	48.2	10200	60	234.5	2.3	54.9	49.1
4200	45	229.8	1.9	55.1	48.5	10500	61	234.5	2.4	54.7	48.9
4500	45	230.0	1.9	55.9	48.7	10800	62	233.9	2.4	54.9	48.9
4800	46	230.7	1.9	55.6	48.8	11100	63	234.4	2.4	54.8	48.6
5100	46	230.3	1.9	55.0	48.4	11400	63	234.3	2.4	55.0	48.5
5400	47	230.9	2.0	54.4	48.0	11700	64	233.4	2.5	54.7	48.7
5700	48	233.7	2.0	54.4	47.6	12000	65	231.3	2.5	54.1	48.4
6000	49	231.2	2.0	54.3	47.8						

ตารางที่ ข.20 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 60°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	225.9	1.6	59.2	57.8	6300	51	232.2	2.1	60.1	57.4
300	36	232.7	1.6	59.4	57.5	6600	52	232.1	2.1	59.8	57.4
600	36	232.7	1.6	59.4	57.3	6900	52	231.9	2.1	59.4	57.0
900	37	232.8	1.7	59.8	57.5	7200	53	232.4	2.2	59.6	57.1
1200	38	232.2	1.7	59.4	57.3	7500	54	230.1	2.2	60.0	57.3
1500	38	232.2	1.7	59.5	56.9	7800	55	231.8	2.2	59.5	56.9
1800	39	233.7	1.7	59.4	57.0	8100	55	232.2	2.2	59.6	57.1
2100	40	233.3	1.8	59.8	57.4	8400	56	232.1	2.3	60.0	57.4
2400	41	233.1	1.8	59.8	57.6	8700	57	231.9	2.3	59.5	57.2
2700	41	233.1	1.8	59.4	57.0	9000	58	232.4	2.3	59.7	57.1
3000	42	232.8	1.8	59.4	57.1	9300	58	231.5	2.3	60.2	57.5
3300	43	233.1	1.8	59.8	57.3	9600	59	230.9	2.4	59.7	57.6
3600	44	233.1	1.9	59.8	57.5	9900	60	231.5	2.4	59.7	57.4
3900	44	233.1	1.9	59.5	57.1	10200	61	228.2	2.4	60.0	57.7
4200	45	232.7	1.9	59.7	57.3	10500	61	230.7	2.4	59.7	57.5
4500	46	232.2	1.9	59.6	57.5	10800	62	229.2	2.4	60.0	57.7
4800	47	232.1	2.0	59.4	56.9	11100	63	230.5	2.5	59.8	57.7
5100	48	232.1	2.0	59.7	57.1	11400	64	227.9	2.5	59.7	57.6
5400	48	231.9	2.0	59.7	57.3	11700	64	230.2	2.5	59.7	57.5
5700	49	231.8	2.0	59.4	56.9	12000	65	228.6	2.5	59.6	57.4
6000	50	231.9	2.1	59.6	56.9						

ตารางที่ ข.21 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 2.25 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 65°C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	230.5	1.6	65.3	62.7	6000	50	230.3	2.1	64.6	61.7
300	36	230.4	1.6	65.1	62.5	6300	51	230.3	2.2	64.9	61.9
600	36	231.2	1.6	64.8	62.3	6600	51	230.0	2.2	65.3	62.3
900	37	231.2	1.7	64.5	61.9	6900	52	230.6	2.2	64.7	62.1
1200	38	230.3	1.7	64.7	61.9	7200	53	230.4	2.2	64.6	61.6
1500	39	231.0	1.7	65.0	62.2	7500	54	230.2	2.3	65.3	62.0
1800	39	230.3	1.8	64.6	61.9	7800	55	230.5	2.3	64.5	61.6
2100	40	230.0	1.8	64.7	61.9	8100	55	228.6	2.3	64.5	61.2
2400	41	230.6	1.8	65.2	62.3	8400	56	228.4	2.3	64.7	61.6
2700	42	230.4	1.8	64.5	61.8	8700	57	228.0	2.3	65.3	62.1
3000	42	230.2	1.9	64.7	61.6	9000	58	230.0	2.3	64.5	61.8
3300	43	230.5	1.9	64.9	61.8	9300	58	230.4	2.4	64.7	61.6
3600	44	230.9	1.9	65.4	62.2	9600	59	231.2	2.4	65.2	61.9
3900	45	230.4	1.9	65.5	62.6	9900	60	231.2	2.4	64.5	61.8
4200	45	230.0	2.0	64.5	61.8	10200	61	230.3	2.4	64.6	61.7
4500	46	230.4	2.0	64.8	61.9	10500	62	231.0	2.4	64.8	61.7
4800	47	230.6	2.0	65.0	62.1	10800	63	228.4	2.5	64.7	61.7
5100	48	230.4	2.0	64.7	61.7	11100	64	230.4	2.5	64.6	61.7
5400	48	230.9	2.1	64.8	61.8	11400	64	230.5	2.5	64.5	61.6
5700	49	230.4	2.1	65.1	62.1	11700	65	231.2	2.5	64.5	61.5

ตารางที่ ข.22 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 35 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	230.5	1.6	35.4	33.6	6300	50	225.5	2.1	35.3	33.1
300	36	229.6	1.7	35.3	33.4	6600	51	228.5	2.1	35.0	32.8
600	36	223.4	1.7	35.0	32.9	6900	51	228.8	2.1	35.0	32.8
900	37	225.5	1.7	35.1	32.8	7200	52	228.8	2.1	35.1	32.8
1200	38	230.5	1.8	34.8	32.6	7500	53	226.2	2.2	35.1	32.8
1500	39	229.3	1.8	35.3	32.7	7800	54	226.3	2.2	35.5	33.1
1800	39	227.9	1.8	34.9	32.6	8100	54	226.1	2.2	35.8	33.5
2100	40	230.0	1.8	34.8	32.4	8400	55	225.8	2.3	35.6	33.4
2400	41	227.4	1.8	35.2	32.7	8700	56	224.6	2.3	35.3	33.2
2700	42	228.0	1.9	35.0	32.6	9000	57	222.3	2.3	35.2	32.9
3000	42	228.3	1.9	35.3	32.8	9300	58	224.9	2.3	35.5	33.0
3300	43	228.8	1.9	35.1	32.9	9600	58	222.2	2.3	35.1	32.9
3600	44	226.4	1.9	35.0	32.6	9900	59	224.5	2.3	35.1	33.0
3900	45	227.0	1.9	35.1	32.7	10200	60	225.3	2.4	34.8	32.8
4200	45	227.0	1.9	35.0	32.8	10500	60	222.3	2.4	35.1	32.8
4500	46	227.1	2.0	34.8	32.7	10800	61	223.3	2.4	35.3	33.1
4800	47	227.0	2.0	35.0	32.7	11100	62	223.2	2.5	35.0	33.0
5100	47	230.4	2.0	35.3	33.0	11400	63	222.5	2.5	35.2	33.0
5400	48	229.3	2.0	35.2	32.7	11700	64	223.5	2.5	35.2	33.1
5700	49	228.6	2.1	35.0	32.8	12000	65	223.2	2.5	34.9	32.9
6000	49	227.0	2.1	35.4	33.2						

ตารางที่ ข.23 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 40 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	231.2	1.6	40.8	38.1	6000	51	227.4	2.1	40.1	37.6
300	36	229.0	1.7	40.8	38.0	6300	51	227.0	2.1	40.1	37.3
600	37	231.2	1.7	40.1	37.8	6600	52	226.4	2.2	40.3	37.5
900	37	230.4	1.7	39.7	37.2	6900	53	225.3	2.2	40.8	37.8
1200	38	226.6	1.8	39.8	36.9	7200	54	225.5	2.2	40.9	37.7
1500	39	229.2	1.8	39.9	37.1	7500	55	228.8	2.2	40.9	37.8
1800	40	230.3	1.8	40.2	37.1	7800	55	229.1	2.2	40.9	37.8
2100	41	225.2	1.8	40.3	37.5	8100	56	227.2	2.2	40.6	37.5
2400	42	220.7	1.8	39.8	37.1	8400	57	230.0	2.3	40.1	37.2
2700	42	223.4	1.9	39.5	36.8	8700	58	229.6	2.3	39.9	36.9
3000	43	223.0	1.9	39.7	36.7	9000	58	226.4	2.3	40.1	37.1
3300	44	222.8	1.9	39.6	36.7	9300	59	228.5	2.3	40.0	37.1
3600	45	224.9	1.9	39.8	36.6	9600	61	228.3	2.4	39.8	36.9
3900	45	224.5	1.9	40.5	37.1	9900	61	228.6	2.4	40.1	36.9
4200	46	224.7	2.0	40.9	38.0	10200	62	230.5	2.4	40.2	36.9
4500	47	225.3	2.0	40.6	38.0	10500	63	228.0	2.5	39.7	36.8
4800	48	223.7	2.0	40.2	37.7	10800	64	229.3	2.5	39.8	36.7
5100	48	222.6	2.0	39.9	37.2	11100	64	228.0	2.5	40.3	36.8
5400	49	224.0	2.1	39.9	37.2	11400	65	227.4	2.5	40.2	37.1
5700	50	224.7	2.1	40.1	37.4						

ตารางที่ ข.24 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 45 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	229.3	1.6	45.0	42.9	6300	49	229.3	2.1	45.0	42.5
300	36	229.5	1.7	44.7	42.6	6600	50	228.2	2.1	44.9	42.5
600	36	228.5	1.7	45.3	42.9	6900	51	226.7	2.1	44.8	42.3
900	36	228.0	1.7	45.9	43.3	7200	52	230.0	2.1	45.0	42.6
1200	37	227.9	1.7	45.5	43.6	7500	53	227.4	2.2	44.8	42.4
1500	37	228.2	1.7	45.0	43.0	7800	54	228.0	2.2	45.1	42.6
1800	38	224.9	1.8	44.8	42.6	8100	54	228.0	2.2	45.1	42.7
2100	39	224.9	1.8	45.1	42.8	8400	55	225.3	2.2	44.9	42.4
2400	40	228.2	1.8	45.6	43.0	8700	56	226.3	2.3	44.9	42.5
2700	40	228.5	1.8	45.3	42.9	9000	57	229.5	2.3	45.3	42.8
3000	41	228.2	1.8	44.8	42.4	9300	58	228.0	2.3	45.2	43.0
3300	42	225.0	1.9	44.5	41.9	9600	59	228.9	2.3	45.0	42.7
3600	42	224.7	1.9	44.7	42.1	9900	60	224.7	2.4	44.6	42.3
3900	43	225.5	1.9	45.3	42.6	10200	60	223.7	2.5	44.4	42.1
4200	44	227.4	1.9	45.9	42.9	10500	61	223.8	2.5	44.5	42.0
4500	45	229.8	1.9	45.9	42.9	10800	62	225.6	2.5	45.0	42.5
4800	45	227.1	2.0	45.9	43.4	11100	63	226.7	2.5	45.3	42.9
5100	46	227.6	2.0	45.8	43.4	11400	64	228.3	2.6	44.8	42.6
5400	47	227.6	2.0	45.4	43.1	11700	64	227.9	2.6	45.2	42.7
5700	48	228.8	2.0	45.1	42.8	12000	65	227.4	2.6	45.2	42.7
6000	49	226.2	2.1	44.8	42.4						

ตารางที่ ข.25 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 50 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	229.4	1.6	50.5	48.5	6000	50	228.0	2.1	49.6	47.0
300	36	229.6	1.7	50.4	48.5	6300	51	227.3	2.1	49.4	46.7
600	36	227.4	1.7	50.2	48.2	6600	52	225.6	2.1	49.5	46.6
900	37	225.0	1.7	49.7	47.5	6900	52	225.6	2.1	49.5	46.7
1200	38	226.1	1.7	49.6	47.2	7200	53	224.4	2.2	50.0	47.2
1500	39	228.8	1.8	50.1	47.4	7500	54	225.8	2.2	50.1	47.6
1800	39	227.7	1.8	50.2	47.8	7800	55	227.3	2.3	49.7	47.2
2100	40	228.3	1.8	49.6	47.3	8100	56	227.8	2.3	49.6	47.1
2400	41	226.2	1.8	49.4	46.9	8400	56	226.7	2.3	50.0	47.4
2700	42	226.4	1.9	49.4	47.0	8700	57	227.4	2.3	49.9	47.5
3000	42	228.6	1.9	49.8	47.2	9000	58	227.0	2.4	49.5	47.2
3300	43	229.1	1.9	50.2	47.7	9300	58	227.1	2.4	49.7	47.1
3600	44	229.4	1.9	49.7	47.4	9600	59	226.8	2.4	50.0	47.5
3900	45	229.4	1.9	49.5	47.2	9900	60	226.4	2.4	49.8	47.5
4200	45	228.0	1.9	49.5	47.1	10200	61	226.5	2.5	49.6	47.2
4500	46	227.9	2.0	49.4	47.1	10500	62	225.9	2.5	49.7	47.2
4800	47	228.9	2.0	49.6	47.3	10800	63	226.7	2.5	50.0	47.4
5100	48	229.1	2.0	49.5	47.1	11100	63	226.3	2.5	50.5	47.9
5400	48	227.0	2.0	49.5	47.2	11400	64	224.9	2.5	50.5	48.3
5700	49	227.4	2.1	49.3	46.8	11700	65	225.3	2.5	50.4	48.0

ตารางที่ ข.26 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 55 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	229.5	1.6	54.9	52.9	6000	50	224.4	2.1	55.0	51.9
300	36	229.6	1.7	54.7	52.8	6300	51	224.3	2.1	55.1	52.1
600	36	227.7	1.7	54.6	52.2	6600	52	225.0	2.2	54.9	52.0
900	37	227.0	1.7	54.9	52.6	6900	53	225.9	2.2	54.7	51.7
1200	38	227.7	1.8	54.6	52.7	7200	53	224.9	2.3	54.7	51.6
1500	39	226.1	1.8	54.6	52.4	7500	54	223.5	2.3	54.8	51.8
1800	40	226.1	1.8	54.6	52.1	7800	55	222.4	2.3	55.0	52.1
2100	41	225.8	1.9	54.8	52.3	8100	56	224.4	2.3	54.8	52.0
2400	41	227.1	1.9	54.8	52.1	8400	57	225.4	2.4	54.8	51.9
2700	42	226.4	1.9	55.0	52.3	8700	58	224.3	2.4	54.8	52.0
3000	43	226.2	1.9	54.7	52.1	9000	58	224.9	2.4	55.1	52.2
3300	43	226.1	2.0	54.7	51.6	9300	59	223.5	2.4	54.7	52.1
3600	44	227.2	2.0	54.8	51.7	9600	60	224.4	2.5	54.6	51.8
3900	45	226.5	2.0	55.2	52.0	9900	61	224.3	2.5	54.7	51.9
4200	45	225.5	2.0	54.9	52.0	10200	62	225.5	2.5	54.9	52.1
4500	46	227.0	2.0	54.7	51.8	10500	62	225.0	2.5	55.1	52.2
4800	47	225.5	2.0	54.8	51.9	10800	63	225.2	2.6	55.0	52.3
5100	48	225.2	2.1	54.7	51.8	11100	64	226.4	2.6	54.7	51.9
5400	49	224.4	2.1	54.6	51.6	11400	65	225.0	2.6	54.7	52.0
5700	49	225.1	2.1	54.7	51.6						

ตารางที่ ข.27 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 60 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	230.4	1.6	59.7	57.6	6000	50	229.2	2.2	59.6	57.0
300	36	229.8	1.7	59.4	57.5	6300	51	228.6	2.2	59.9	57.3
600	36	229.4	1.7	59.4	57.3	6600	52	224.9	2.3	59.8	57.5
900	37	228.2	1.7	59.7	57.5	6900	53	223.7	2.3	59.4	57.1
1200	38	228.0	1.7	59.4	57.3	7200	54	226.2	2.3	59.5	57.0
1500	38	228.2	1.8	59.5	56.9	7500	54	226.8	2.4	60.0	57.2
1800	39	228.0	1.8	59.4	57.0	7800	55	225.0	2.4	59.6	57.1
2100	40	230.0	1.8	59.7	57.3	8100	56	225.7	2.4	59.6	57.0
2400	40	230.4	1.8	59.8	57.6	8400	57	226.7	2.4	60.0	57.3
2700	41	230.1	1.9	59.4	57.1	8700	58	224.8	2.5	59.5	57.2
3000	42	230.7	1.9	59.4	57.0	9000	58	227.6	2.5	59.6	57.1
3300	43	230.9	2.0	59.7	57.2	9300	59	227.3	2.5	59.9	57.4
3600	44	231.8	2.0	60.0	57.6	9600	60	226.0	2.5	59.8	57.6
3900	44	231.8	2.0	59.4	57.1	9900	61	226.5	2.5	59.7	57.5
4200	45	232.1	2.0	59.6	57.1	10200	62	226.5	2.5	60.0	57.7
4500	46	231.9	2.1	59.9	57.3	10500	63	225.7	2.6	59.7	57.6
4800	47	231.5	2.1	59.5	56.9	10800	63	225.8	2.6	60.0	57.7
5100	48	231.0	2.1	59.6	56.9	11100	64	226.2	2.7	59.9	57.9
5400	49	230.0	2.1	59.8	57.3	11400	65	226.5	2.7	59.7	57.6
5700	49	230.0	2.2	59.4	56.9						

ตารางที่ ข.28 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อน ที่อัตราการไหล 3.0 LPM อุณหภูมิน้ำร้อน 65 °C

Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$	Δt	T_s	V	I	$T_{I,Evap}$	$T_{O,Evap}$
0	35	230.9	1.6	64.9	62.5	5400	49	230.9	2.1	64.8	61.8
300	36	229.8	1.7	65.0	62.4	5700	50	226.4	2.2	65.2	61.9
600	36	228.0	1.7	64.9	62.5	6000	51	230.6	2.2	64.6	61.9
900	37	228.6	1.7	64.6	61.8	6300	52	230.3	2.2	64.8	61.9
1200	38	227.7	1.8	64.7	62.0	6600	53	230.1	2.3	65.3	62.1
1500	38	227.3	1.8	65.0	62.2	6900	53	230.9	2.3	64.7	61.9
1800	39	227.1	1.8	64.5	61.9	7200	54	230.7	2.3	64.5	61.6
2100	40	227.6	1.9	64.8	62.0	7500	56	228.4	2.3	65.0	61.8
2400	40	230.9	1.9	65.2	62.4	7800	56	229.3	2.4	64.7	61.9
2700	42	228.2	1.9	64.5	61.8	8100	57	228.6	2.4	64.7	61.3
3000	42	227.4	1.9	64.6	61.6	8400	58	228.9	2.4	64.8	61.6
3300	43	228.5	1.9	64.7	61.7	8700	59	227.7	2.5	65.3	62.0
3600	44	230.7	2.0	65.3	62.0	9000	60	229.7	2.5	64.7	61.9
3900	45	230.3	2.0	65.5	62.7	9300	61	230.4	2.5	64.7	61.7
4200	46	226.7	2.0	64.8	62.0	9600	62	230.7	2.5	64.8	61.9
4500	47	230.0	2.0	64.8	61.9	9900	62	231.8	2.6	64.7	61.8
4800	47	227.4	2.1	65.2	62.2	10200	63	230.6	2.6	64.5	61.5
5100	48	228.5	2.1	64.5	61.8	10500	65	231.0	2.6	64.8	61.7

ตารางที่ ข.29 การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T แบบกึ่งน้ำ

$T_{f,i \text{ Set}}$	\dot{m}_f	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$(T_{f,i}-T_a)/I_T$	η_{Th}
35	0.0376	835.67	31.7	34.9	38.6	0.0038	0.37
	0.0376	836.08	31.8	35.0	38.7	0.0038	0.37
	0.0376	835.40	31.8	35.1	38.8	0.0040	0.37
	0.0376	834.05	31.6	35.3	39.1	0.0044	0.38
	0.0376	835.28	31.6	35.4	39.1	0.0045	0.37
average	0.0376	835.30	31.7	35.1	38.9	0.0041	0.37
40	0.0376	847.50	33.5	39.9	43.2	0.0076	0.33
	0.0376	845.10	33.5	39.9	43.1	0.0076	0.32
	0.0376	846.50	33.8	40.1	43.3	0.0074	0.32
	0.0376	848.20	33.7	40.2	43.5	0.0077	0.33
	0.0376	849.80	33.6	40.4	43.6	0.0080	0.32
average	0.0376	847.42	33.6	40.1	43.3	0.0076	0.32
45	0.0376	823.03	33.6	44.7	47.2	0.0135	0.25
	0.0376	827.19	33.4	44.8	47.3	0.0138	0.25
	0.0376	822.42	33.3	45.0	47.5	0.0142	0.25
	0.0376	821.92	32.9	45.1	47.7	0.0148	0.26
	0.0376	820.90	32.8	45.2	47.8	0.0151	0.27
average	0.0376	823.09	33.2	45.0	47.5	0.0143	0.26
50	0.0376	838.26	33.4	49.8	51.5	0.0196	0.17
	0.0376	838.97	33.4	49.8	51.5	0.0195	0.17
	0.0376	839.66	33.6	49.9	51.6	0.0194	0.17
	0.0376	838.11	33.5	50.0	51.8	0.0197	0.18
	0.0376	839.40	33.4	50.0	51.7	0.0198	0.17
average	0.0376	838.88	33.5	49.9	51.6	0.0196	0.17

ตารางที่ ข.29 (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	0.0376	831.76	33.2	54.9	56.1	0.0261	0.12
	0.0376	843.13	32.9	55.0	56.2	0.0262	0.12
	0.0376	842.20	32.7	54.9	56.1	0.0264	0.12
	0.0376	841.55	32.7	54.9	56.1	0.0264	0.12
	0.0376	828.90	32.5	54.8	55.9	0.0269	0.11
average	0.0376	837.51	32.8	54.9	56.1	0.0264	0.12
60	0.0376	830.10	32.9	59.9	60.5	0.0325	0.06
	0.0376	836.39	33.0	60.0	60.5	0.0323	0.05
	0.0376	835.82	32.8	59.9	60.6	0.0324	0.07
	0.0376	830.20	32.7	60.0	60.6	0.0329	0.06
	0.0376	838.57	32.8	60.1	60.7	0.0326	0.06
average	0.0376	834.21	32.8	60.0	60.6	0.0325	0.06
65	0.0376	824.60	32.8	64.8	64.9	0.0388	0.01
	0.0376	823.03	32.7	64.8	64.8	0.0390	0.00
	0.0376	827.81	32.7	64.8	64.9	0.0388	0.01
	0.0376	828.97	32.7	64.9	65.1	0.0388	0.02
	0.0376	822.27	32.9	64.9	65.0	0.0389	0.01
average	0.0376	825.34	32.8	64.8	64.9	0.0389	0.01

ตารางที่ ข.30 การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง

$T_{f,i \text{ Set}}$	\dot{m}_f	I_T	T_a	$T_{f,i}$	$T_{f,o}$	$(T_{f,i}-T_a)/I_T$	η_{Th}
35	0.0376	854.77	33.5	35.3	37.4	0.0021	0.21
	0.0376	851.46	33.5	35.4	37.6	0.0022	0.22
	0.0376	853.20	33.5	35.4	37.5	0.0022	0.21
	0.0376	855.20	33.4	35.4	37.6	0.0023	0.22
	0.0376	854.60	33.4	35.5	37.5	0.0025	0.20
average	0.0376	853.85	33.5	35.4	37.5	0.0023	0.21
40	0.0376	864.33	32.4	40.1	41.8	0.0089	0.16
	0.0376	863.20	32.5	40.2	42.0	0.0089	0.17
	0.0376	863.41	32.5	40.2	42.1	0.0089	0.18
	0.0376	866.64	32.7	40.2	42.0	0.0087	0.17
	0.0376	860.61	32.7	40.3	41.9	0.0088	0.16
average	0.0376	863.64	32.6	40.2	42.0	0.0088	0.17
45	0.0376	850.42	33.6	45.4	46.7	0.0139	0.13
	0.0376	853.38	33.7	45.4	46.8	0.0137	0.14
	0.0376	856.89	33.6	45.5	47.0	0.0139	0.15
	0.0376	852.90	33.6	45.5	46.9	0.0140	0.14
	0.0376	855.48	33.7	45.6	46.9	0.0139	0.13
average	0.0376	853.82	33.6	45.5	46.9	0.0139	0.14
50	0.0376	849.96	33.2	50.5	51.5	0.0204	0.10
	0.0376	847.19	33.3	50.6	51.6	0.0204	0.10
	0.0376	848.67	33.4	50.6	51.7	0.0203	0.11
	0.0376	848.58	33.4	50.6	51.6	0.0203	0.10
	0.0376	849.87	33.4	50.7	51.6	0.0204	0.09
average	0.0376	848.85	33.3	50.6	51.6	0.0203	0.10

ตารางที่ ข.30 (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	0.0376	851.99	32.1	54.4	55.1	0.0262	0.07
	0.0376	850.98	32.2	54.5	55.2	0.0262	0.07
	0.0376	854.03	32.3	54.5	55.1	0.0260	0.06
	0.0376	854.77	32.2	54.5	55.2	0.0261	0.07
	0.0376	859.20	32.3	54.5	55.1	0.0258	0.06
average	0.0376	854.19	32.2	54.5	55.1	0.0261	0.06
60	0.0376	840.91	33.0	60.3	60.6	0.0325	0.03
	0.0376	843.59	33.0	60.3	60.6	0.0324	0.03
	0.0376	844.51	33.0	60.4	60.8	0.0324	0.04
	0.0376	843.68	32.9	60.4	60.7	0.0326	0.03
	0.0376	838.14	33.1	60.4	60.7	0.0326	0.03
average	0.0376	842.16	33.0	60.4	60.7	0.0325	0.03
65	0.0376	836.29	33.4	65.4	65.5	0.0383	0.01
	0.0376	833.52	33.4	65.5	65.5	0.0385	0.00
	0.0376	837.12	33.4	65.5	65.6	0.0383	0.01
	0.0376	838.41	33.4	65.4	65.4	0.0382	0.00
	0.0376	835.18	33.3	65.4	65.5	0.0384	0.01
average	0.0376	836.10	33.4	65.4	65.5	0.0383	0.01

ตารางที่ ข.31 ผลทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหล 2.0 LPM

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
9:00	460.0	24.8	29.1	30.8	29.2	38.6	149.6	11:25	804.6	30.6	34.0	37.5	34.1	41.6	233.0
9:05	472.1	24.3	29.2	30.9	29.3	38.7	152.5	11:30	809.9	30.6	34.3	37.7	34.4	41.5	234.2
9:10	491.6	24.6	29.3	31.1	29.4	38.7	156.1	11:35	812.1	31.1	34.5	38.0	34.6	41.6	234.9
9:15	508.4	24.7	29.4	31.3	29.5	38.9	160.4	11:40	813.8	31.3	34.8	38.3	34.9	42.0	235.5
9:20	525.2	25.0	29.5	31.6	29.6	39.0	164.4	11:45	818.4	31.1	35.0	38.5	35.1	41.5	235.8
9:25	543.9	25.2	29.7	31.8	29.8	38.8	169.3	11:50	821.2	31.1	35.1	38.6	35.2	43.2	231.7
9:30	552.4	25.4	29.8	32.0	29.9	38.9	170.6	11:55	816.0	31.4	35.4	38.8	35.5	43.5	234.6
9:35	562.7	25.6	29.9	32.2	30.0	39.2	172.0	12:00	826.2	31.4	35.6	39.1	35.7	43.1	233.9
9:40	585.8	25.8	30.1	32.5	30.1	39.1	178.2	12:05	822.2	31.7	35.8	39.3	35.9	43.3	235.1
9:45	604.7	26.1	30.2	32.7	30.3	39.3	185.0	12:10	825.5	32.0	36.1	39.6	36.2	44.2	234.9
9:50	618.4	26.2	30.2	32.8	30.3	39.2	189.4	12:15	823.3	32.1	36.3	39.8	36.4	43.8	233.9
9:55	631.4	26.6	30.4	32.8	30.5	39.4	193.5	12:20	821.7	32.1	36.6	40.0	36.7	43.4	234.1
10:00	646.7	26.5	30.6	33.0	30.7	39.5	196.9	12:25	823.9	32.3	36.8	40.2	36.9	45.7	232.2
10:05	660.0	26.8	30.8	33.3	30.9	39.6	199.9	12:30	815.5	32.7	37.0	40.4	37.1	45.6	230.3
10:10	670.5	26.9	31.0	33.5	31.1	39.6	202.4	12:35	814.5	32.9	37.2	40.5	37.3	45.8	229.2
10:15	686.4	27.3	31.1	33.9	31.2	39.7	204.4	12:40	813.8	32.7	37.4	40.7	37.5	46.0	229.8
10:20	695.3	27.6	31.2	34.0	31.3	39.8	208.2	12:45	808.8	32.8	37.6	40.9	37.7	46.0	229.3
10:25	705.3	27.9	31.4	34.2	31.5	39.9	211.0	12:50	807.9	32.9	37.9	41.1	38.0	46.3	229.2
10:30	716.3	28.4	31.7	34.5	31.8	39.8	214.6	12:55	800.6	33.0	38.1	41.3	38.2	45.5	227.4
10:35	730.9	28.7	31.9	34.8	32.0	39.8	218.4	13:00	794.1	33.2	38.3	41.5	38.4	47.7	224.1
10:40	738.3	29.1	32.1	35.1	32.2	40.0	219.7	13:05	787.2	33.0	38.5	41.6	38.6	47.7	222.1
10:45	744.8	29.0	32.3	35.3	32.4	40.1	220.7	13:10	778.9	33.0	38.7	41.8	38.8	47.9	218.8
10:50	758.8	29.3	32.4	35.7	32.5	40.0	222.6	13:15	777.7	32.9	38.9	41.9	39.0	47.6	219.0
10:55	764.7	28.9	32.6	35.9	32.7	40.1	224.1	13:20	754.9	32.7	39.1	42.0	39.2	47.5	213.6
11:00	771.2	29.1	32.9	36.1	33.0	41.2	226.8	13:25	759.7	32.7	39.3	42.2	39.4	48.3	215.3
11:05	781.0	29.4	33.1	36.4	33.2	41.2	228.6	13:30	745.6	32.8	39.5	42.3	39.6	46.7	210.5
11:10	786.0	30.1	33.3	36.7	33.4	41.3	230.7	13:35	735.4	32.6	39.7	42.4	39.8	48.8	207.8
11:15	794.6	30.7	33.6	37.0	33.7	41.4	231.9	13:40	721.3	32.6	39.9	42.5	40.0	49.0	203.3
11:20	801.9	31.0	33.8	37.3	33.9	41.7	231.7	13:45	719.4	32.2	40.1	42.5	40.2	48.5	202.2

ตารางที่ ข.31 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
13:50	719.4	32.5	40.2	42.7	40.3	48.5	201.8	15:00	498.1	33.2	42.0	43.3	42.1	49.5	143.5
13:55	689.5	32.7	40.4	42.8	40.5	48.8	195.5	15:05	483.4	32.8	42.1	43.3	42.2	49.6	139.8
14:00	671.9	32.8	40.6	42.8	40.7	48.8	190.1	15:10	465.7	32.5	42.2	43.2	42.4	48.7	135.0
14:05	671.1	31.9	40.7	42.8	40.8	48.1	188.4	15:15	452.5	32.4	42.2	43.2	42.5	48.9	130.9
14:10	655.9	31.9	40.9	42.9	41.0	49.7	183.7	15:20	439.8	32.2	42.3	43.2	42.5	49.5	126.8
14:15	657.6	31.6	41.0	43.0	41.1	49.5	185.2	15:25	424.6	31.8	42.4	43.1	42.6	49.4	122.6
14:20	645.0	31.7	41.1	43.1	41.2	49.6	181.3	15:30	396.6	31.6	42.4	43.0	42.7	48.9	114.2
14:25	618.0	31.1	41.3	43.1	41.4	48.8	176.2	15:35	378.9	32.2	42.4	43.0	42.7	49.1	110.6
14:30	605.9	31.4	41.4	43.1	41.5	49.4	172.7	15:40	357.2	32.2	42.5	42.9	42.8	49.0	103.2
14:35	597.3	32.1	41.5	43.2	41.6	48.6	167.7	15:45	339.5	32.0	42.5	42.9	42.8	48.8	97.7
14:40	579.9	32.9	41.6	43.3	41.7	48.6	162.6	15:50	321.5	32.0	42.5	42.9	42.9	48.9	93.3
14:45	553.7	33.4	41.7	43.3	41.8	49.8	159.0	15:55	299.4	31.9	42.5	42.8	43.0	48.6	86.2
14:50	538.9	33.5	41.8	43.4	41.9	49.7	154.5	16:00	277.0	31.9	42.5	42.8	43.0	48.8	78.8
14:55	520.8	33.3	41.9	43.4	42.0	49.5	150.1								

ตารางที่ ข.32 ผลทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบกล่องน้ำ ที่อัตราการไหล 2.25 LPM

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
9:00	459.2	25.8	30.7	32.3	30.8	32.3	154.4	11:25	825.5	31.0	36.0	39.2	36.1	41.7	244.2
9:05	475.3	26.0	30.9	32.5	30.9	31.7	156.0	11:30	824.3	31.0	36.1	39.5	36.3	41.0	243.6
9:10	485.0	26.4	30.9	32.7	31.0	32.2	161.5	11:35	831.9	31.3	36.5	39.7	36.6	43.8	246.7
9:15	502.6	26.6	31.1	32.9	31.1	32.7	165.1	11:40	838.2	31.6	36.6	40.0	36.8	43.3	244.6
9:20	518.6	26.9	31.2	33.2	31.3	33.1	172.9	11:45	838.1	31.7	37.0	40.3	37.1	43.8	247.1
9:25	551.5	27.0	31.4	33.5	31.4	34.2	179.2	11:50	845.5	31.8	37.0	40.4	37.2	43.8	244.3
9:30	562.0	27.0	31.4	33.7	31.5	33.9	183.3	11:55	839.2	31.9	37.4	40.7	37.5	43.1	245.5
9:35	579.5	27.1	31.6	33.9	31.6	33.9	188.1	12:00	844.6	32.1	37.5	40.9	37.7	44.4	246.9
9:40	592.8	27.2	31.6	34.1	31.7	34.7	191.8	12:05	848.0	32.4	37.9	41.2	38.0	44.2	246.2
9:45	612.1	27.5	31.8	34.2	31.8	33.3	195.8	12:10	847.7	32.4	38.1	41.4	38.3	45.0	245.8
9:50	622.5	27.8	31.7	34.3	31.9	34.0	198.0	12:15	850.0	32.8	38.4	41.7	38.5	44.9	246.0
9:55	635.5	28.3	32.0	34.6	32.1	35.9	202.6	12:20	852.3	33.3	38.6	42.0	38.8	46.0	244.4
10:00	646.9	28.8	32.1	34.8	32.3	34.6	205.0	12:25	848.9	33.5	38.9	42.2	39.0	46.0	245.0
10:05	659.7	29.0	32.4	35.1	32.5	36.2	208.9	12:30	845.5	33.3	39.2	42.4	39.3	45.9	243.2
10:10	671.4	29.3	32.5	35.4	32.7	36.2	212.0	12:35	843.8	33.4	39.3	42.6	39.4	46.7	241.4
10:15	688.6	29.2	32.7	35.5	32.8	37.1	216.2	12:40	838.7	33.3	39.6	42.7	39.7	46.9	241.1
10:20	700.4	29.4	32.8	35.8	33.0	37.5	217.6	12:45	835.6	33.7	39.8	43.0	39.9	47.7	240.5
10:25	708.9	29.7	33.2	36.1	33.3	37.1	220.1	12:50	837.2	33.9	40.1	43.2	40.2	47.3	239.5
10:30	718.6	29.7	33.3	36.3	33.5	38.7	223.2	12:55	832.1	33.9	40.3	43.4	40.4	47.7	237.9
10:35	734.8	29.9	33.6	36.6	33.7	38.8	226.0	13:00	828.1	33.9	40.6	43.6	40.7	48.5	235.1
10:40	743.4	30.1	33.7	36.9	33.9	38.9	228.7	13:05	821.2	33.6	40.8	43.8	40.9	47.7	232.4
10:45	754.9	30.3	34.1	37.2	34.2	38.9	229.2	13:10	809.7	33.8	41.0	43.9	41.1	49.2	231.1
10:50	758.1	30.7	34.1	37.4	34.3	40.7	233.1	13:15	802.6	33.7	41.2	44.1	41.3	48.3	226.5
10:55	769.5	30.5	34.5	37.6	34.6	40.4	233.2	13:20	791.2	34.0	41.5	44.3	41.6	49.4	223.3
11:00	776.9	30.6	34.6	37.9	34.8	39.2	236.0	13:25	780.7	34.3	41.7	44.4	41.8	49.0	223.9
11:05	790.5	30.9	34.9	38.2	35.0	41.6	238.9	13:30	779.5	34.0	41.9	44.6	42.0	49.4	223.2
11:10	797.2	31.1	35.1	38.5	35.3	41.3	238.9	13:35	771.2	34.1	42.1	44.7	42.2	49.7	219.2
11:15	807.1	31.0	35.5	38.7	35.6	41.6	240.8	13:40	760.4	34.2	42.3	44.9	42.4	50.3	217.0
11:20	811.3	31.1	35.6	39.0	35.8	41.6	243.8	13:45	754.2	34.3	42.5	45.0	42.6	49.3	213.8

ตารางที่ ข.32 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
13:50	742.8	34.2	42.7	45.1	42.8	49.5	209.5	15:00	552.8	33.9	44.6	45.8	44.7	50.7	155.7
13:55	725.7	34.1	42.9	45.2	43.0	49.1	206.3	15:05	534.1	33.8	44.8	45.8	44.8	51.4	149.8
14:00	715.8	34.1	43.1	45.3	43.2	50.2	203.1	15:10	512.6	33.7	44.8	45.9	44.9	49.3	143.6
14:05	702.2	34.0	43.2	45.4	43.3	51.4	200.1	15:15	492.2	33.8	44.8	45.9	45.0	49.3	138.2
14:10	694.6	33.9	43.4	45.5	43.5	49.7	195.4	15:20	473.0	33.8	45.0	45.9	45.1	50.8	134.4
14:15	678.8	33.8	43.6	45.5	43.7	50.9	192.7	15:25	453.7	33.8	45.1	45.9	45.1	48.9	128.9
14:20	671.6	33.9	43.7	45.6	43.8	51.5	190.0	15:30	439.5	33.9	45.1	45.9	45.2	49.0	123.9
14:25	651.0	33.7	43.9	45.7	44.0	51.2	186.2	15:35	417.5	33.9	45.2	46.0	45.3	49.4	117.1
14:30	644.0	33.8	44.0	45.8	44.1	50.3	182.7	15:40	400.8	33.9	45.3	46.0	45.3	49.4	112.1
14:35	628.5	33.8	44.1	45.8	44.2	49.5	176.7	15:45	380.1	33.9	45.3	46.0	45.4	49.9	107.1
14:40	610.8	33.9	44.2	45.8	44.3	50.3	173.5	15:50	366.5	34.0	45.4	46.0	45.5	50.1	102.2
14:45	596.8	33.9	44.3	45.8	44.4	51.0	171.1	15:55	342.6	33.9	45.5	46.0	45.6	50.1	95.8
14:50	589.4	33.8	44.4	45.8	44.5	51.5	166.6	16:00	327.7	33.7	45.5	46.0	45.6	50.8	91.3
14:55	570.9	33.7	44.5	45.8	44.6	50.2	161.5								

ตารางที่ ข.33 ผลทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบกล่อน้ำ ที่อัตราการไหล 2.5 LPM

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
9:00	465.4	25.6	29.1	30.5	29.1	31.4	150.6	11:25	823.9	31.7	35.4	38.5	35.5	42.5	242
9:05	483.6	25.8	29.1	30.8	29.2	31.6	155.8	11:30	833.5	31.7	35.7	38.6	35.7	42.6	245.1
9:10	499.5	26.2	29.4	31.1	29.4	32.0	161.4	11:35	834.8	31.5	35.9	39.0	36.0	43.3	244.6
9:15	517.1	26.3	29.6	31.3	29.6	32.1	166.3	11:40	838.6	31.6	36.3	39.3	36.3	43.6	245.1
9:20	535.4	26.8	29.6	31.5	29.7	32.5	171.9	11:45	840.4	32.0	36.6	39.6	36.6	43.7	243.9
9:25	551.6	27.1	29.8	31.7	29.9	33.1	176.6	11:50	843.6	32.3	36.7	39.8	36.8	44.3	245.2
9:30	566.7	27.3	30.0	32.0	30.0	33.7	179.9	11:55	849.2	32.6	37.0	40.1	37.1	44.6	245.4
9:35	581.3	27.4	30.1	32.2	30.2	33.8	183.8	12:00	850.1	32.8	37.3	40.3	37.3	45.1	245.3
9:40	600.3	27.5	30.5	32.5	30.5	34.4	189.0	12:05	851.3	32.5	37.5	40.5	37.6	45.4	244.9
9:45	611.8	27.4	30.7	32.7	30.7	34.7	193.2	12:10	854.3	32.0	37.9	40.7	37.9	45.9	246.1
9:50	627.8	27.5	30.7	32.9	30.8	35.0	196.8	12:15	856.1	32.4	38.2	41.1	38.2	46.2	246.8
9:55	641.4	27.9	30.9	33.1	31.0	35.5	200.7	12:20	854.9	32.9	38.4	41.4	38.5	46.5	246.0
10:00	648.1	27.7	31.2	33.3	31.2	36.0	203.9	12:25	854.6	33.3	38.7	41.7	38.8	46.8	245.5
10:05	668.9	27.8	31.3	33.5	31.4	36.1	207.7	12:30	853.5	33.7	39.0	41.9	39.0	46.7	244.5
10:10	678.6	28.3	31.6	33.8	31.6	36.8	210.2	12:35	850.9	33.1	39.1	41.9	39.2	47.2	244.2
10:15	694.1	28.9	31.8	34.1	31.8	37.1	214.5	12:40	849.2	33.1	39.4	42.2	39.4	47.6	242.6
10:20	706.3	29.6	31.9	34.5	32.0	37.6	216.9	12:45	841.0	32.9	39.7	42.4	39.7	47.9	240.6
10:25	717.5	29.8	32.2	34.8	32.3	37.8	219.4	12:50	835.8	32.8	39.9	42.6	40.0	48.1	239.3
10:30	726.6	30.2	32.5	35.0	32.5	38.1	222.3	12:55	833.3	33.1	40.2	42.8	40.3	48.4	238.1
10:35	739.9	30.6	32.7	35.4	32.8	38.6	225.3	13:00	830.1	33.4	40.4	43.0	40.4	48.7	237.3
10:40	753.6	31.1	33.0	35.8	33.0	39.0	228.3	13:05	826.2	33.8	40.6	43.2	40.7	48.9	235.6
10:45	760.6	31.7	33.3	36.1	33.3	39.3	229.9	13:10	809.6	34.3	40.9	43.4	40.9	49.3	231.5
10:50	774.7	32.1	33.4	36.4	33.5	39.8	232.9	13:15	804.7	34.2	41.2	43.6	41.2	49.1	229.8
10:55	783.2	32.1	33.7	36.8	33.8	40.2	235.1	13:20	805.6	34.2	41.3	43.8	41.4	49.5	230.3
11:00	793.2	31.3	34.1	37.0	34.1	40.4	237.3	13:25	800.5	33.5	41.6	43.9	41.7	49.8	228.5
11:05	797.7	31.5	34.3	37.3	34.4	40.8	237.7	13:30	793.7	33.5	41.8	44.0	41.8	50.3	226.7
11:10	806.2	30.9	34.7	37.6	34.7	41.3	239.4	13:35	794.6	33.8	42.0	44.3	42.1	50.1	226.6
11:15	814.3	31.0	34.9	37.9	34.9	41.8	241.7	13:40	772.6	34.4	42.3	44.4	42.3	50.5	219.9
11:20	818.7	31.4	35.1	38.2	35.2	42.0	241.5	13:45	769.5	34.4	42.5	44.6	42.5	50.4	218.8

ตารางที่ ข.33 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
13:50	754.5	34.3	42.6	44.7	42.7	51.1	214.9	15:00	559.1	34.6	44.6	45.3	44.6	51.3	161.4
13:55	743.6	34.4	42.8	44.9	42.9	51.0	212.1	15:05	543.9	34.7	44.5	45.3	44.6	51.6	157.4
14:00	726.8	33.9	43.0	44.9	43.0	51.1	207.7	15:10	522.4	34.9	44.7	45.3	44.7	51.5	151.4
14:05	716.6	33.4	43.1	44.9	43.2	51.1	204.6	15:15	503.3	35.0	44.7	45.3	44.7	51.6	145.7
14:10	708.1	33.3	43.4	45.0	43.4	51.2	202.7	15:20	487.1	35.1	44.7	45.3	44.8	51.3	141.3
14:15	695.6	33.3	43.6	45.0	43.6	51.4	199.4	15:25	466.0	35.2	44.7	45.3	44.8	51.3	134.5
14:20	685.8	33.7	43.7	45.1	43.8	51.5	196.9	15:30	443.2	35.3	44.9	45.3	44.9	51.1	128.2
14:25	673.1	33.8	43.8	45.1	43.9	51.1	192.8	15:35	421.5	35.3	44.8	45.3	44.9	51.0	121.6
14:30	654.3	33.9	44.0	45.1	44.0	51.4	187.7	15:40	387.5	35.0	45.0	45.3	45.0	50.8	114.0
14:35	640.1	33.9	44.0	45.2	44.1	51.6	183.0	15:45	385.7	34.6	45.0	45.3	45.0	50.3	111.2
14:40	620.2	34.1	44.2	45.2	44.2	51.7	178.1	15:50	364.6	34.3	45.0	45.3	45.1	50.0	105.5
14:45	603.5	34.2	44.4	45.2	44.4	51.2	173.2	15:55	349.3	34.0	45.0	45.3	45.1	49.8	101.0
14:50	604.5	34.3	44.4	45.2	44.5	51.5	173.7	16:00	327.3	33.9	45.1	45.3	45.1	49.6	94.4
14:55	580.1	34.4	44.5	45.2	44.6	51.8	165.2								

ตารางที่ ข.34 ผลทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหล 2.0 LPM

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
9:00	477.0	24.8	29.1	30.1	29.1	49.8	154.1	11:25	834.3	30.6	32.6	34.9	32.7	69.6	229.9
9:05	489.5	24.3	29.1	30.2	29.1	50.4	157.4	11:30	839.8	30.6	32.8	35.1	32.8	70.7	229.1
9:10	509.7	24.6	29.2	30.3	29.3	51.3	162.6	11:35	842.1	31.1	32.9	35.3	33.0	71.5	228.9
9:15	527.2	24.7	29.3	30.5	29.3	52.4	166.4	11:40	843.9	31.3	33.1	35.4	33.2	71.7	229.0
9:20	544.6	25.0	29.4	30.6	29.4	53.3	170.6	11:45	848.6	31.1	33.3	35.6	33.3	71.4	230.3
9:25	563.9	25.2	29.5	30.8	29.5	54.2	174.9	11:50	851.5	31.1	33.4	35.8	33.5	71.8	231.7
9:30	572.8	25.4	29.5	30.9	29.6	55.1	176.3	11:55	846.1	31.4	33.6	35.9	33.7	72.0	228.0
9:35	583.5	25.6	29.6	31.0	29.7	55.7	176.5	12:00	856.7	31.4	33.8	36.1	33.8	72.2	232.5
9:40	607.4	25.8	29.7	31.2	29.8	56.8	185.1	12:05	852.5	31.7	33.9	36.3	34.0	73.1	229.6
9:45	627.0	26.1	29.8	31.4	29.9	57.7	189.8	12:10	856.0	32.0	34.1	36.4	34.2	73.1	230.0
9:50	641.3	26.2	30.0	31.5	30.0	58.7	192.7	12:15	853.7	32.1	34.3	36.6	34.3	72.9	229.6
9:55	654.6	26.6	30.1	31.7	30.1	59.7	195.4	12:20	852.0	32.1	34.4	36.7	34.5	73.0	229.5
10:00	670.5	26.5	30.2	31.9	30.2	60.2	198.8	12:25	854.3	32.3	34.6	36.9	34.6	73.0	230.3
10:05	684.4	26.8	30.3	32.0	30.4	61.4	201.4	12:30	845.6	32.7	34.8	37.1	34.8	73.1	227.9
10:10	695.2	26.9	30.4	32.2	30.5	62.1	204.7	12:35	844.6	32.9	34.9	37.2	35.0	73.1	227.4
10:15	711.7	27.3	30.6	32.4	30.6	62.8	206.8	12:40	843.9	32.7	35.1	37.4	35.1	73.1	227.4
10:20	721.0	27.6	30.7	32.6	30.7	63.5	209.4	12:45	838.6	32.8	35.3	37.5	35.3	72.8	227.1
10:25	731.3	27.9	30.8	32.7	30.9	65.0	210.4	12:50	837.7	32.9	35.4	37.7	35.5	72.7	226.9
10:30	742.7	28.4	31.0	32.9	31.0	65.0	213.4	12:55	830.1	33.0	35.6	37.8	35.6	73.0	226.3
10:35	757.8	28.7	31.1	33.1	31.1	65.3	215.7	13:00	823.4	33.2	35.7	37.9	35.8	72.9	224.1
10:40	765.5	29.1	31.2	33.3	31.3	66.1	218.0	13:05	816.2	33.0	35.9	38.1	35.9	72.4	222.9
10:45	772.3	29.0	31.4	33.5	31.4	66.4	219.8	13:10	807.6	33.0	36.0	38.2	36.1	71.7	220.8
10:50	786.8	29.3	31.5	33.7	31.6	67.1	222.5	13:15	806.4	32.9	36.2	38.3	36.2	71.4	221.6
10:55	793.0	28.9	31.7	33.8	31.7	67.4	223.3	13:20	782.8	32.7	36.5	38.5	36.5	71.3	216.3
11:00	799.6	29.1	31.8	34.0	31.9	67.6	225.0	13:25	787.7	32.7	36.6	38.6	36.7	71.3	215.9
11:05	809.8	29.4	32.0	34.2	32.0	68.6	224.5	13:30	773.1	32.8	36.8	38.7	36.8	70.5	213.0
11:10	815.0	30.1	32.1	34.4	32.2	69.1	226.3	13:35	762.6	32.6	36.9	38.8	37.0	69.7	211.3
11:15	823.9	30.7	32.3	34.6	32.3	69.5	227.8	13:40	747.9	32.6	37.0	38.8	37.1	69.6	208.8
11:20	831.5	31.0	32.5	34.8	32.5	70.0	229.3	13:45	745.9	32.2	37.2	39.0	37.2	69.6	207.6

ตารางที่ ข.34 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
13:50	745.9	32.5	37.3	39.0	37.3	69.8	207.3	15:00	516.5	33.2	38.5	39.5	38.5	59.6	156.3
13:55	715.0	32.7	37.3	39.0	37.4	69.7	201.7	15:05	501.2	32.8	38.5	39.4	38.5	58.8	153.0
14:00	696.7	32.8	37.4	39.0	37.5	69.1	196.3	15:10	482.9	32.5	38.5	39.4	38.6	58.4	148.1
14:05	695.9	31.9	37.6	39.1	37.6	68.0	196.3	15:15	469.2	32.4	38.7	39.5	38.7	58.6	143.6
14:10	680.1	31.9	37.7	39.2	37.7	67.3	191.0	15:20	456.0	32.2	38.7	39.4	38.7	58.6	139.9
14:15	681.9	31.6	37.8	39.2	37.8	66.6	192.3	15:25	440.3	31.8	36.5	38.5	36.5	58.2	136.4
14:20	668.8	31.7	37.9	39.2	37.9	65.3	193.4	15:30	411.2	31.6	38.7	39.3	38.8	57.0	128.8
14:25	640.8	31.1	38.0	39.3	38.0	62.4	187.5	15:35	392.9	32.2	38.8	39.4	38.8	55.9	124.9
14:30	628.2	31.4	38.1	39.4	38.1	61.7	183.9	15:40	370.4	32.2	38.9	39.5	38.9	55.4	116.9
14:35	619.4	32.1	38.2	39.5	38.2	62.4	178.6	15:45	352.1	32.0	38.9	39.4	39.0	55.1	112.3
14:40	601.2	32.9	38.2	39.5	38.2	60.9	174.2	15:50	333.3	32.0	39.0	39.4	39.0	54.9	106.9
14:45	574.1	33.4	38.2	39.5	38.3	61.0	168.4	15:55	310.5	31.9	39.0	39.3	39.1	54.7	100.2
14:50	558.7	33.5	38.3	39.5	38.4	60.8	164.9	16:00	287.2	31.9	39.0	39.3	39.1	54.5	93.2
14:55	540.0	33.3	38.3	39.4	38.4	60.4	160.9								

ตารางที่ ข.35 ผลทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหล 2.25 LPM

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
9:00	476.2	25.8	29.9	30.8	29.9	46.4	154.5	11:25	856.0	31.0	33.5	35.6	33.6	67.8	234.9
9:05	492.9	26.0	29.8	30.9	29.9	46.8	158.8	11:30	854.8	31.0	33.7	35.7	33.7	68.7	234.5
9:10	502.9	26.4	30.0	31.1	30.0	48.1	161.1	11:35	862.6	31.3	33.8	35.9	33.9	69.4	234.4
9:15	521.1	26.6	30.1	31.2	30.1	49.0	165.3	11:40	869.1	31.6	33.9	36.1	34.0	69.6	236.9
9:20	537.8	26.9	30.1	31.4	30.2	50.1	167.6	11:45	869.0	31.7	34.2	36.3	34.2	70.1	234.7
9:25	571.9	27.0	30.2	31.5	30.3	51.5	177.2	11:50	876.7	31.8	34.3	36.5	34.4	70.5	236.7
9:30	582.8	27.0	30.3	31.7	30.4	52.8	179.9	11:55	870.2	31.9	34.4	36.6	34.5	70.5	234.6
9:35	600.9	27.1	30.5	31.8	30.5	54.0	184.1	12:00	875.7	32.1	34.6	36.8	34.7	70.9	235.6
9:40	614.6	27.2	30.5	31.9	30.6	55.1	188.0	12:05	879.3	32.4	34.9	37.0	34.9	71.3	236.5
9:45	634.7	27.5	30.6	32.1	30.7	55.8	190.9	12:10	879.0	32.4	35.0	37.1	35.0	71.2	236.2
9:50	645.5	27.8	30.8	32.3	30.8	57.0	193.3	12:15	881.4	32.8	35.1	37.3	35.2	71.8	235.5
9:55	659.0	28.3	30.8	32.5	30.9	58.0	195.9	12:20	883.8	33.3	35.3	37.5	35.4	72.3	235.6
10:00	670.8	28.8	30.9	32.6	31.0	58.4	199.7	12:25	880.2	33.5	35.5	37.7	35.6	72.0	235.8
10:05	684.0	29.0	31.2	32.8	31.2	59.4	201.2	12:30	876.7	33.3	35.7	37.8	35.7	72.0	235.7
10:10	696.2	29.3	31.2	33.0	31.3	60.1	205.0	12:35	874.9	33.4	35.8	38.0	35.9	72.3	234.5
10:15	714.1	29.2	31.3	33.1	31.4	60.6	207.6	12:40	869.6	33.3	36.0	38.1	36.1	72.2	233.4
10:20	726.3	29.4	31.5	33.3	31.6	61.6	210.7	12:45	866.4	33.7	36.2	38.3	36.2	72.1	233.1
10:25	735.0	29.7	31.7	33.5	31.7	62.1	212.0	12:50	868.1	33.9	36.3	38.5	36.4	72.1	232.6
10:30	745.1	29.7	31.8	33.6	31.9	63.0	213.5	12:55	862.8	33.9	36.4	38.5	36.5	72.3	230.8
10:35	761.9	29.9	31.9	33.8	32.0	63.3	217.0	13:00	858.6	33.9	36.7	38.7	36.6	72.1	230.3
10:40	770.9	30.1	32.1	34.0	32.1	63.9	218.8	13:05	851.5	33.6	36.7	38.8	36.8	72.2	228.6
10:45	782.8	30.3	32.2	34.2	32.3	64.8	221.2	13:10	839.6	33.8	36.8	38.8	36.9	71.7	227.0
10:50	786.0	30.7	32.3	34.4	32.4	65.0	221.6	13:15	832.2	33.7	36.9	38.9	37.0	71.1	226.4
10:55	797.9	30.5	32.6	34.5	32.6	65.6	224.1	13:20	820.4	34.0	37.1	38.9	37.1	71.3	220.8
11:00	805.6	30.6	32.7	34.7	32.8	66.4	225.5	13:25	809.5	34.3	37.2	39.0	37.2	70.5	218.9
11:05	819.7	30.9	32.8	34.9	32.9	67.0	227.3	13:30	808.3	34.0	37.3	39.1	37.4	69.9	222.1
11:10	826.6	31.1	33.0	35.1	33.1	67.4	229.9	13:35	799.6	34.1	37.5	39.2	37.6	70.1	220.5
11:15	836.8	31.0	33.2	35.2	33.2	67.5	230.2	13:40	788.4	34.2	37.6	39.3	37.7	69.9	217.5
11:20	841.3	31.1	33.3	35.4	33.4	68.0	230.8	13:45	782.1	34.3	37.8	39.3	37.8	69.3	216.1

ตารางที่ ข.35 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
13:50	770.2	34.2	37.9	39.4	37.9	69.2	213.1	15:00	573.2	33.9	39.4	40.1	39.4	61.8	169.6
13:55	752.5	34.1	37.9	39.4	38.0	69.1	209.9	15:05	553.8	33.8	39.4	40.1	39.4	60.7	165.8
14:00	742.2	34.1	38.1	39.4	38.1	68.5	207.6	15:10	531.5	33.7	39.4	40.1	39.5	60.1	159.6
14:05	728.1	34.0	38.1	39.5	38.2	68.2	204.9	15:15	510.3	33.8	39.6	40.2	39.6	59.4	155.7
14:10	720.2	33.9	38.3	39.6	38.4	67.3	203.3	15:20	490.5	33.8	39.5	40.2	39.6	58.2	150.8
14:15	703.9	33.8	38.5	39.7	38.5	67.0	199.5	15:25	470.4	33.8	39.6	40.2	39.7	57.6	147.1
14:20	696.4	33.9	38.5	39.8	38.6	65.8	196.4	15:30	455.7	33.9	39.7	40.3	39.8	56.5	142.2
14:25	675.0	33.7	38.6	39.8	38.7	64.0	194.6	15:35	432.9	33.9	39.7	40.3	39.8	55.8	135.6
14:30	667.8	33.8	38.7	39.9	38.8	62.9	193.2	15:40	415.6	33.9	39.9	40.4	39.9	55.0	130.5
14:35	651.7	33.8	38.9	39.9	38.9	62.4	189.7	15:45	394.1	33.9	39.8	40.4	39.9	53.9	125.7
14:40	633.3	33.9	39.0	39.9	39.0	62.5	184.1	15:50	380.0	34.0	39.9	40.4	39.9	52.8	121.6
14:45	618.8	33.9	39.0	39.9	39.1	62.0	181.4	15:55	355.2	33.9	40.0	40.4	40.0	51.8	113.9
14:50	611.1	33.8	39.2	40.0	39.2	61.9	179.3	16:00	339.8	33.7	39.9	40.4	40.0	50.8	109.6
14:55	591.9	33.7	39.2	40.0	39.3	62.0	175.1								

ตารางที่ ข.36 ผลทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบท่อทองแดง ที่อัตราการไหล 2.5 LPM

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
9:00	482.6	25.6	30.8	31.6	30.8	45.8	155.5	11:25	854.3	31.7	34.3	36.2	34.4	67.6	232.8
9:05	501.5	25.8	30.7	31.7	30.8	47.1	160.7	11:30	864.3	31.7	34.6	36.4	34.6	67.9	235.6
9:10	517.9	26.2	30.9	31.8	30.9	48.1	165.1	11:35	865.6	31.5	34.6	36.5	34.7	68.5	234.4
9:15	536.2	26.3	30.9	31.9	31.0	49.0	169.7	11:40	869.5	31.6	34.9	36.7	34.9	69.3	234.6
9:20	555.1	26.8	31.1	32.1	31.1	50.2	174.0	11:45	871.4	32.0	35.0	36.9	35.0	69.5	233.4
9:25	572.0	27.1	31.2	32.2	31.2	51.2	177.7	11:50	874.7	32.3	35.1	37.1	35.2	69.4	235.8
9:30	587.6	27.3	31.2	32.4	31.3	52.2	181.4	11:55	880.5	32.6	35.4	37.3	35.4	70.1	234.8
9:35	602.7	27.4	31.4	32.5	31.4	53.0	184.4	12:00	881.5	32.8	35.4	37.4	35.5	70.3	235.2
9:40	622.4	27.5	31.4	32.7	31.5	53.9	189.5	12:05	882.7	32.5	35.7	37.6	35.7	69.1	236.8
9:45	634.4	27.4	31.6	32.8	31.6	54.8	193.1	12:10	885.8	32.0	35.8	37.7	35.9	69.4	237.7
9:50	651.0	27.5	31.6	32.9	31.7	55.6	195.7	12:15	887.7	32.4	36.0	37.9	36.0	70.0	237.6
9:55	665.1	27.9	31.8	33.1	31.8	56.5	199.1	12:20	886.5	32.9	36.2	38.1	36.2	70.3	236.1
10:00	672.0	27.7	31.9	33.2	31.9	57.1	202.2	12:25	886.1	33.3	36.3	38.3	36.4	70.7	236.8
10:05	693.5	27.8	31.9	33.4	32.0	57.9	205.3	12:30	885.0	33.7	36.5	38.4	36.5	71.4	235.3
10:10	703.6	28.3	32.1	33.6	32.1	59.0	206.7	12:35	882.3	33.1	36.6	38.5	36.7	70.9	236.4
10:15	719.7	28.9	32.2	33.7	32.3	60.1	210.1	12:40	880.5	33.1	36.9	38.7	36.9	71.2	234.7
10:20	732.3	29.6	32.4	33.9	32.4	60.9	210.3	12:45	872.0	32.9	36.9	38.8	37.0	70.5	232.4
10:25	744.0	29.8	32.4	34.1	32.5	61.3	213.8	12:50	866.6	32.8	37.2	38.9	37.2	70.6	231.4
10:30	753.4	30.2	32.7	34.3	32.7	62.2	215.6	12:55	864.0	33.1	37.3	39.1	37.3	70.6	231.4
10:35	767.2	30.6	32.8	34.5	32.8	62.7	217.8	13:00	860.8	33.4	37.4	39.3	37.5	71.1	230.7
10:40	781.4	31.1	32.9	34.7	33.0	63.5	220.6	13:05	856.7	33.8	37.7	39.4	37.7	71.4	228.2
10:45	788.7	31.7	33.1	34.9	33.1	64.4	221.5	13:10	839.5	34.3	37.7	39.6	37.8	71.4	225.2
10:50	803.3	32.1	33.2	35.1	33.3	65.1	224.1	13:15	834.4	34.2	38.0	39.7	38.0	69.5	225.4
10:55	812.1	32.1	33.4	35.3	33.4	65.5	226.3	13:20	835.4	34.2	38.0	39.8	38.1	70.1	226.6
11:00	822.4	31.3	33.5	35.4	33.6	65.7	228.5	13:25	830.0	33.5	38.2	39.8	38.2	69.8	225.2
11:05	827.1	31.5	33.8	35.6	33.8	66.3	228.7	13:30	823.0	33.5	38.3	39.9	38.3	70.2	224.1
11:10	835.9	30.9	33.9	35.7	33.9	66.1	230.7	13:35	823.9	33.8	38.3	40.0	38.4	69.9	222.3
11:15	844.3	31.0	34.0	35.9	34.1	66.7	232.3	13:40	801.1	34.4	38.5	40.1	38.5	69.9	218.3
11:20	848.9	31.4	34.2	36.0	34.2	67.3	232.8	13:45	797.9	34.4	38.5	40.2	38.6	69.0	218.0

ตารางที่ ข.36 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W	Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	T_s °C	T_p °C	$P_{PV/T}$ W
13:50	782.3	34.3	38.7	40.2	38.7	68.7	215.2	15:00	579.7	34.6	40.0	40.8	40.0	60.6	171.6
13:55	771.1	34.4	38.7	40.3	38.8	68.9	212.4	15:05	563.9	34.7	40.0	40.8	40.1	60.0	166.6
14:00	753.6	33.9	38.9	40.3	38.9	68.0	210.2	15:10	541.7	34.9	40.1	40.9	40.1	58.9	162.0
14:05	743.1	33.4	39.0	40.4	39.0	66.5	207.7	15:15	521.9	35.0	40.2	40.9	40.2	57.5	156.4
14:10	734.2	33.3	39.0	40.5	39.1	64.8	207.1	15:20	505.1	35.1	40.2	40.9	40.3	56.7	152.3
14:15	721.3	33.3	39.2	40.5	39.2	64.7	203.5	15:25	483.2	35.2	40.4	40.9	40.4	56.4	145.9
14:20	711.1	33.7	39.2	40.6	39.3	65.0	202.4	15:30	459.5	35.3	40.3	41.0	40.4	55.6	139.1
14:25	698.0	33.8	39.4	40.6	39.4	64.5	198.6	15:35	437.1	35.3	40.5	41.0	40.5	54.9	132.4
14:30	678.4	33.9	39.4	40.6	39.5	63.8	195.0	15:40	401.8	35.0	40.4	41.0	40.5	54.9	121.9
14:35	663.7	33.9	39.6	40.7	39.6	63.7	190.3	15:45	399.9	34.6	40.6	41.0	40.6	52.8	121.4
14:40	643.1	34.1	39.7	40.7	39.7	63.9	186.4	15:50	378.0	34.3	40.6	41.1	40.6	51.5	115.5
14:45	625.7	34.2	39.7	40.7	39.8	63.4	181.4	15:55	362.2	34.0	40.6	41.1	40.7	50.8	111.2
14:50	626.8	34.3	39.9	40.8	39.9	62.4	182.7	16:00	339.4	33.9	40.7	41.1	40.7	50.6	106.1
14:55	601.5	34.4	39.8	40.8	39.9	61.6	173.7								

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T 2.0 LPM)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
9:00	302.5	26.3	29.0	30.3	34.7	88.53	76.13	0.00	35.0
9:05	313.2	26.4	29.1	30.4	34.9	91.80	78.94	0.00	35.0
9:10	328.1	26.5	29.1	30.6	35.1	96.35	82.86	0.00	35.0
9:15	344.2	26.5	29.3	30.8	35.4	101.29	87.10	0.00	35.0
9:20	354.5	26.6	29.4	30.9	35.5	104.41	89.79	0.00	35.0
9:25	376.2	26.7	29.4	31.2	35.8	111.02	95.47	0.00	35.0
9:30	403.1	26.8	29.7	31.4	36.2	119.19	102.50	0.00	35.0
9:35	429.3	26.9	29.7	31.7	36.5	127.08	109.28	0.00	35.0
9:40	450.2	27.0	29.9	31.9	36.8	133.36	114.68	0.00	35.0
9:45	449.4	27.1	30.0	32.1	36.9	132.99	114.37	0.00	35.0
9:50	471.0	27.2	30.2	32.3	37.2	139.43	119.90	0.00	35.0
9:55	487.4	27.3	30.4	32.6	37.5	144.26	124.06	0.00	35.0
10:00	531.4	27.3	30.4	32.9	37.9	157.46	135.41	281.60	35.0
10:05	536.1	27.4	30.6	33.0	38.0	158.71	136.49	283.45	36.0
10:10	534.8	27.5	30.6	33.1	38.1	158.16	136.01	285.43	36.0
10:15	557.6	27.6	30.7	33.3	38.3	164.85	141.77	289.84	37.0
10:20	580.9	27.7	30.7	33.5	38.5	171.65	147.61	291.20	37.0
10:25	591.4	27.8	30.9	33.7	38.6	174.61	150.16	292.82	38.0
10:30	614.7	27.9	31.0	33.9	38.8	181.37	155.97	297.12	39.0
10:35	628.0	27.9	31.0	34.0	39.0	185.18	159.25	298.68	39.0
10:40	636.1	28.0	31.2	34.2	39.1	187.36	161.12	300.27	40.0
10:45	653.0	28.1	31.2	34.3	39.3	192.17	165.26	304.64	40.0
10:50	671.5	28.2	31.3	34.5	39.5	197.44	169.79	305.94	41.0
10:55	686.4	28.3	31.4	34.7	39.7	201.61	173.38	307.30	42.0
11:00	705.6	28.3	31.5	34.9	39.9	207.10	178.10	311.59	43.0

ตารางที่ ข.37 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
11:05	721.2	28.4	31.7	35.1	40.1	211.45	181.84	312.88	43.0
11:10	724.0	28.5	31.7	35.2	40.2	212.01	182.32	314.43	44.0
11:15	726.7	28.6	31.9	35.3	40.3	212.55	182.79	318.97	44.0
11:20	748.6	28.6	31.9	35.5	40.5	218.78	188.15	320.12	45.0
11:25	752.8	28.7	32.1	35.7	40.6	219.77	189.00	321.59	46.0
11:30	756.0	28.8	32.1	35.8	40.7	220.43	189.56	326.07	47.0
11:35	761.2	28.9	32.3	35.9	40.9	221.71	190.67	327.48	48.0
11:40	762.1	28.9	32.4	36.0	41.0	221.80	190.74	329.04	48.0
11:45	764.2	29.0	32.4	36.1	41.1	222.15	191.04	333.51	49.0
11:50	777.7	29.1	32.6	36.3	41.3	225.82	194.20	334.70	50.0
11:55	794.7	29.1	32.6	36.5	41.5	230.57	198.29	335.85	50.0
12:00	796.5	29.2	32.8	36.6	41.6	230.85	198.53	340.26	51.0
12:05	787.8	29.3	32.8	36.6	41.6	228.06	196.13	341.90	52.0
12:10	786.6	29.3	33.0	36.7	41.8	227.57	195.71	343.43	52.0
12:15	791.9	29.4	33.1	36.9	41.9	228.85	196.81	347.74	53.0
12:20	790.6	29.4	33.1	36.9	42.0	228.31	196.34	349.25	53.0
12:25	789.4	29.5	33.3	37.0	42.1	227.73	195.84	350.69	54.0
12:30	793.6	29.6	33.3	37.1	42.2	228.70	196.68	355.00	55.0
12:35	795.6	29.6	33.5	37.2	42.3	229.13	197.05	356.41	55.0
12:40	798.6	29.7	33.5	37.3	42.4	229.76	197.59	357.72	56.0
12:45	804.6	29.7	33.6	37.4	42.5	230.51	198.23	362.08	56.0
12:50	801.7	29.8	33.7	37.5	42.6	231.11	198.75	363.37	57.0
12:55	788.6	29.8	33.7	37.5	42.6	226.38	194.68	365.13	58.0
13:00	789.1	29.9	33.9	37.6	42.7	226.33	194.64	369.47	58.0
13:05	780.3	29.9	33.9	37.6	42.8	223.69	192.37	371.07	59.0
13:10	777.9	29.9	34.0	37.7	42.8	222.85	191.65	372.53	59.0

ตารางที่ ข.37 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
13:15	771.5	30.0	34.0	37.7	42.9	220.84	189.92	377.01	60.0
13:20	772.3	30.0	34.2	37.8	42.9	220.96	190.02	378.37	61.0
13:25	762.7	30.1	34.3	37.8	43.0	218.03	187.50	379.91	61.0
13:30	768.5	30.1	34.2	37.9	43.1	219.59	188.84	384.15	62.0
13:35	764.3	30.1	34.4	37.9	43.1	218.28	187.72	385.60	62.0
13:40	761.0	30.2	34.3	38.0	43.2	217.19	186.78	386.97	63.0
13:45	750.6	30.2	34.5	38.0	43.2	214.11	184.13	391.55	63.0
13:50	745.0	30.2	34.5	38.0	43.2	212.41	182.67	393.03	64.0
13:55	739.8	30.2	34.6	38.0	43.2	210.85	181.33	394.48	64.0
14:00	708.4	30.3	34.7	37.9	43.1	201.74	173.49	399.47	65.0
14:05	691.5	30.3	34.6	37.8	43.1	196.84	169.28	0.00	65.0
14:10	675.5	30.3	34.9	37.9	43.0	192.21	165.30	0.00	65.0
14:15	662.8	30.3	35.0	38.0	43.0	188.51	162.11	0.00	65.0
14:20	654.3	30.3	35.3	38.2	43.0	186.03	159.98	0.00	65.0
14:25	647.0	30.4	35.5	38.3	42.9	183.84	158.10	0.00	65.0
14:30	640.8	30.4	35.7	38.5	42.9	182.03	156.54	0.00	65.0
14:35	633.1	30.4	35.9	38.6	42.9	179.80	154.62	0.00	65.0
14:40	625.2	30.4	36.0	38.7	42.9	177.49	152.64	0.00	65.0
14:45	624.5	30.4	36.3	38.9	42.9	177.28	152.46	0.00	65.0
14:50	608.3	30.4	36.4	38.9	42.8	172.62	148.45	0.00	65.0
14:55	591.8	30.4	36.7	39.0	42.7	167.85	144.35	0.00	65.0
15:00	586.5	30.4	36.7	39.1	42.7	166.32	143.03	0.00	65.0
15:05	561.9	30.4	37.0	39.1	42.5	159.23	136.93	0.00	65.0
15:10	534.3	30.4	37.1	39.1	42.3	151.26	130.08	0.00	65.0
15:15	524.9	30.4	37.2	39.1	42.3	148.54	127.74	0.00	65.0
15:20	507.6	30.4	37.4	39.2	42.1	143.55	123.45	0.00	65.0

ตารางที่ ข.37 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
15:25	498.7	30.4	37.4	39.2	42.0	140.99	121.25	0.00	65.0
15:30	470.0	30.4	37.6	39.2	41.8	132.66	114.08	0.00	65.0
15:35	443.3	30.4	37.7	39.1	41.6	124.91	107.42	0.00	65.0
15:40	426.6	30.3	37.9	39.1	41.4	120.10	103.28	0.00	65.0
15:45	415.6	30.3	37.9	39.1	41.3	116.91	100.54	0.00	65.0
15:50	403.3	30.3	37.9	39.1	41.1	113.34	97.47	0.00	65.0
15:55	385.5	30.3	38.1	39.1	40.9	108.14	93.00	0.00	65.0
16:00	376.5	30.3	38.1	39.1	40.8	105.53	90.75	0.00	65.0



ตารางที่ ข.38 ผลการทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T 2.25 LPM)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
9:00	304.5	26.7	29.7	30.8	33.1	89.58	77.03	0.00	35.0
9:05	315.2	26.8	29.8	31.0	33.3	92.84	79.84	0.00	35.0
9:10	330.1	26.9	29.8	31.1	33.5	97.38	83.74	0.00	35.0
9:15	346.1	27.0	30.0	31.3	33.7	102.24	87.92	0.00	35.0
9:20	356.5	27.1	30.1	31.5	33.9	105.37	90.61	0.00	35.0
9:25	378.2	27.2	30.1	31.7	34.2	111.95	96.27	0.00	35.0
9:30	405.1	27.3	30.3	31.9	34.5	120.09	103.27	0.00	35.0
9:35	431.2	27.4	30.4	32.2	34.9	127.94	110.02	0.00	35.0
9:40	452.2	27.5	30.6	32.4	35.2	134.21	115.42	0.00	35.0
9:45	451.4	27.6	30.6	32.5	35.3	133.86	115.11	0.00	35.0
9:50	473.0	27.7	30.9	32.8	35.6	140.28	120.64	0.00	35.0
9:55	489.3	27.8	31.0	33.0	35.9	145.07	124.76	0.00	35.0
10:00	535.3	27.9	31.1	33.3	36.3	158.77	136.54	279.83	35.0
10:05	540.0	28.0	31.2	33.4	36.4	160.03	137.62	281.79	36.0
10:10	538.7	28.1	31.2	33.5	36.5	159.49	137.16	283.84	36.0
10:15	561.6	28.2	31.4	33.7	36.6	166.19	142.92	288.39	37.0
10:20	584.8	28.3	31.3	33.8	36.8	172.94	148.72	289.90	37.0
10:25	595.4	28.4	31.5	34.0	37.0	175.93	151.29	291.62	38.0
10:30	618.7	28.5	31.6	34.1	37.1	182.67	157.09	296.06	38.0
10:35	632.0	28.5	31.5	34.3	37.3	186.48	160.37	297.72	39.0
10:40	640.0	28.6	31.7	34.4	37.4	188.65	162.23	299.40	40.0
10:45	656.9	28.7	31.7	34.6	37.6	193.45	166.36	303.89	41.0
10:50	675.5	28.8	31.9	34.7	37.8	198.73	170.90	305.31	41.0
10:55	690.4	28.9	31.8	34.9	37.9	202.90	174.49	306.78	42.0
11:00	707.6	29.0	32.0	35.0	38.1	207.72	178.63	311.17	43.0

ตารางที่ ข.38 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
11:05	723.2	29.1	32.1	35.2	38.2	212.07	182.38	312.56	43.0
11:10	725.9	29.2	32.1	35.3	38.3	212.63	182.86	314.19	44.0
11:15	728.6	29.3	32.3	35.4	38.4	213.19	183.34	318.81	45.0
11:20	750.5	29.3	32.3	35.6	38.7	219.41	188.69	320.07	46.0
11:25	754.8	29.4	32.5	35.7	38.8	220.42	189.56	321.61	46.0
11:30	757.9	29.5	32.5	35.8	38.9	221.09	190.13	326.16	47.0
11:35	763.2	29.6	32.7	35.9	39.0	222.40	191.26	327.65	48.0
11:40	764.1	29.7	32.8	36.0	39.1	222.42	191.28	329.21	48.0
11:45	766.1	29.8	32.7	36.1	39.2	222.77	191.58	333.74	49.0
11:50	779.6	29.8	32.9	36.3	39.4	226.52	194.80	335.07	50.0
11:55	796.6	29.9	32.9	36.5	39.5	231.20	198.83	336.26	50.0
12:00	800.5	30.0	33.1	36.6	39.6	232.08	199.58	340.69	51.0
12:05	791.7	30.1	33.1	36.6	39.7	229.31	197.20	342.36	52.0
12:10	790.6	30.1	33.3	36.7	39.8	228.84	196.80	343.93	52.0
12:15	795.9	30.2	33.4	36.8	39.9	230.14	197.92	348.30	53.0
12:20	794.6	30.3	33.4	36.9	40.0	229.54	197.40	349.80	54.0
12:25	793.4	30.3	33.5	36.9	40.1	229.05	196.98	351.33	54.0
12:30	797.5	30.4	33.5	37.0	40.2	230.02	197.81	355.70	55.0
12:35	799.6	30.4	33.7	37.1	40.3	230.47	198.20	357.15	55.0
12:40	802.5	30.5	33.7	37.2	40.3	231.10	198.74	358.52	56.0
12:45	805.7	30.6	33.9	37.3	40.4	231.81	199.35	362.86	57.0
12:50	808.5	30.6	33.9	37.4	40.5	232.47	199.92	364.26	57.0
12:55	792.5	30.7	33.9	37.4	40.5	227.70	195.82	365.97	58.0
13:00	791.1	30.7	34.1	37.5	40.6	227.17	195.36	370.44	58.0
13:05	782.3	30.8	34.0	37.5	40.6	224.47	193.04	372.00	59.0
13:10	779.8	30.8	34.2	37.5	40.7	223.65	192.33	373.48	60.0

ตารางที่ ข.38 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
13:15	773.4	30.9	34.2	37.6	40.7	221.65	190.61	377.99	60.0
13:20	774.3	30.9	34.3	37.6	40.8	221.81	190.75	379.39	61.0
13:25	764.7	31.0	34.4	37.6	40.8	218.90	188.25	380.94	61.0
13:30	770.5	31.0	34.3	37.7	40.9	220.46	189.59	385.23	62.0
13:35	766.2	31.1	34.5	37.8	40.9	219.08	188.40	386.65	62.0
13:40	763.0	31.1	34.5	37.8	41.0	218.08	187.54	388.09	63.0
13:45	752.5	31.1	34.6	37.8	41.0	215.01	184.90	392.68	64.0
13:50	746.9	31.2	34.6	37.8	41.0	213.27	183.41	394.11	64.0
13:55	741.7	31.2	34.7	37.8	41.0	211.71	182.07	395.58	65.0
14:00	712.3	31.2	34.7	37.7	40.9	203.27	174.81	0.00	65.0
14:05	695.4	31.2	34.9	37.8	41.1	198.39	170.61	0.00	65.0
14:10	679.5	31.3	35.2	38.0	41.3	193.75	166.62	0.00	65.0
14:15	666.7	31.3	35.3	38.1	41.5	190.05	163.44	0.00	65.0
14:20	658.2	31.3	35.6	38.3	41.7	187.59	161.32	0.00	65.0
14:25	650.9	31.3	35.8	38.4	41.9	185.47	159.50	0.00	65.0
14:30	644.7	31.4	36.1	38.6	42.1	183.62	157.91	0.00	65.0
14:35	637.0	31.4	36.3	38.7	42.3	181.39	155.99	0.00	65.0
14:40	629.1	31.4	36.4	38.8	42.5	179.11	154.03	0.00	65.0
14:45	628.5	31.4	36.6	39.0	42.7	178.92	153.87	0.00	65.0
14:50	612.3	31.4	36.7	39.1	42.8	174.26	149.86	0.00	65.0
14:55	595.7	31.4	37.0	39.2	42.9	169.49	145.76	0.00	65.0
15:00	590.5	31.4	37.1	39.3	43.1	167.99	144.47	0.00	65.0
15:05	563.9	31.4	37.4	39.3	43.1	160.35	137.90	0.00	65.0
15:10	536.3	31.4	37.5	39.3	43.1	152.41	131.07	0.00	65.0
15:15	526.8	31.4	37.6	39.4	43.2	149.68	128.72	0.00	65.0
15:20	509.6	31.4	37.8	39.4	43.2	144.73	124.46	0.00	65.0

ตารางที่ ข.38 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
15:25	500.7	31.4	37.8	39.5	43.3	142.17	122.26	0.00	65.0
15:30	472.0	31.4	38.0	39.5	43.2	133.88	115.13	0.00	65.0
15:35	445.3	31.4	38.1	39.5	43.1	126.15	108.48	0.00	65.0
15:40	428.5	31.4	38.3	39.5	43.1	121.29	104.30	0.00	65.0
15:45	417.5	31.3	38.4	39.5	43.1	118.15	101.60	0.00	65.0
15:50	405.3	31.3	38.4	39.5	43.1	114.62	98.57	0.00	65.0
15:55	387.4	31.3	38.5	39.5	43.0	109.41	94.09	0.00	65.0
16:00	378.5	31.3	38.5	39.5	43.0	106.84	91.88	0.00	65.0



ตารางที่ ข.39 ผลการทดสอบระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump (อัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ Solar PV/T 2.5 LPM)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
9:00	297.0	26.5	29.1	30.1	34.4	86.75	74.60	0.00	35.0
9:05	307.7	26.6	29.2	30.3	34.5	90.03	77.42	0.00	35.0
9:10	322.6	26.7	29.2	30.4	34.8	94.58	81.34	0.00	35.0
9:15	338.7	26.8	29.4	30.6	35.0	99.50	85.57	0.00	35.0
9:20	349.0	26.9	29.5	30.7	35.2	102.62	88.25	0.00	35.0
9:25	370.7	27.0	29.5	30.9	35.5	109.23	93.94	0.00	35.0
9:30	397.6	27.1	29.8	31.2	35.8	117.41	100.97	0.00	35.0
9:35	423.8	27.2	29.8	31.4	36.2	125.31	107.77	0.00	35.0
9:40	444.7	27.3	30.0	31.6	36.5	131.60	113.17	0.00	35.0
9:45	443.9	27.3	30.1	31.8	36.6	131.27	112.90	0.00	35.0
9:50	465.5	27.4	30.3	32.0	36.9	137.73	118.45	0.00	35.0
9:55	481.9	27.5	30.4	32.2	37.2	142.57	122.61	0.00	35.0
10:00	526.9	27.6	30.5	32.5	37.6	156.03	134.19	283.22	35.0
10:05	531.6	27.7	30.7	32.6	37.7	157.30	135.28	285.16	36.0
10:10	530.3	27.8	30.6	32.7	37.8	156.76	134.81	287.18	36.0
10:15	553.1	27.9	30.8	32.9	38.0	163.46	140.57	291.76	37.0
10:20	576.4	28.0	30.7	33.0	38.2	170.27	146.43	293.28	37.0
10:25	586.9	28.1	30.9	33.1	38.3	173.25	148.99	295.00	38.0
10:30	610.2	28.2	31.0	33.3	38.5	180.01	154.81	299.47	38.0
10:35	623.5	28.3	31.0	33.5	38.6	183.78	158.05	301.08	39.0
10:40	631.6	28.4	31.1	33.6	38.7	185.98	159.94	302.76	39.0
10:45	648.5	28.5	31.1	33.7	38.9	190.80	164.08	307.25	40.0
10:50	667.0	28.5	31.3	33.9	39.1	196.15	168.69	308.74	41.0
10:55	681.9	28.6	31.3	34.0	39.2	200.33	172.28	310.21	42.0
11:00	700.1	28.7	31.5	34.2	39.4	205.48	176.71	314.61	43.0

ตารางที่ ข.39 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
11:05	715.7	28.8	31.6	34.3	39.6	209.84	180.47	316.01	44.0
11:10	718.5	28.9	31.6	34.4	39.7	210.43	180.97	317.63	44.0
11:15	721.2	29.0	31.7	34.6	39.8	210.98	181.44	322.24	45.0
11:20	743.1	29.0	31.7	34.7	40.0	217.23	186.82	323.52	46.0
11:25	747.3	29.1	31.9	34.8	40.1	218.24	187.68	325.06	46.0
11:30	750.5	29.2	31.9	34.9	40.2	218.92	188.27	329.60	47.0
11:35	755.7	29.3	32.1	35.1	40.3	220.22	189.39	331.09	48.0
11:40	756.6	29.3	32.2	35.1	40.4	220.33	189.48	332.68	48.0
11:45	758.7	29.4	32.2	35.2	40.5	220.69	189.79	337.21	49.0
11:50	772.2	29.5	32.4	35.4	40.7	224.38	192.97	338.51	50.0
11:55	789.2	29.6	32.4	35.5	40.9	229.08	197.01	339.72	50.0
12:00	792.0	29.6	32.5	35.6	41.0	229.74	197.58	344.22	51.0
12:05	783.3	29.7	32.5	35.7	41.0	226.97	195.19	345.86	52.0
12:10	782.1	29.8	32.7	35.8	41.1	226.42	194.72	347.37	52.0
12:15	787.4	29.8	32.8	35.9	41.2	227.80	195.90	351.80	53.0
12:20	786.1	29.9	32.8	35.9	41.3	227.20	195.39	353.29	53.0
12:25	784.9	30.0	33.0	36.0	41.4	226.64	194.91	354.77	54.0
12:30	789.1	30.0	32.9	36.1	41.5	227.70	195.82	359.18	55.0
12:35	791.1	30.1	33.1	36.2	41.6	228.08	196.15	360.58	55.0
12:40	794.1	30.1	33.1	36.3	41.7	228.79	196.76	362.00	56.0
12:45	800.1	30.2	33.3	36.4	41.8	229.49	197.36	366.35	56.0
12:50	797.2	30.3	33.3	36.5	41.8	230.12	197.90	367.70	57.0
12:55	784.1	30.3	33.3	36.5	41.9	225.39	193.84	369.42	58.0
13:00	783.6	30.4	33.5	36.5	41.9	225.08	193.56	373.82	58.0
13:05	774.8	30.4	33.5	36.5	42.0	222.44	191.30	375.41	59.0
13:10	772.4	30.5	33.6	36.6	42.0	221.55	190.53	376.83	59.0

ตารางที่ ข.39 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
13:15	766.0	30.5	33.6	36.6	42.0	219.62	188.87	381.36	60.0
13:20	766.8	30.5	33.7	36.7	42.1	219.76	188.99	382.76	61.0
13:25	757.2	30.6	33.8	36.7	42.1	216.84	186.49	384.29	61.0
13:30	763.0	30.6	33.7	36.8	42.2	218.42	187.84	388.59	62.0
13:35	758.8	30.7	33.9	36.8	42.2	217.05	186.66	390.00	62.0
13:40	755.5	30.7	33.8	36.8	42.3	216.04	185.79	391.44	63.0
13:45	745.1	30.7	34.0	36.8	42.3	212.97	183.15	396.00	63.0
13:50	739.5	30.8	33.9	36.9	42.3	211.22	181.65	397.42	64.0
13:55	734.3	30.8	34.1	36.9	42.3	209.67	180.32	398.87	64.0
14:00	703.9	30.8	34.1	36.8	42.2	200.90	172.77	403.78	65.0
14:05	687.0	30.9	34.0	36.8	42.1	195.94	168.51	0.00	65.0
14:10	671.0	30.9	34.4	36.9	42.3	191.31	164.52	0.00	65.0
14:15	658.3	30.9	34.5	37.0	42.5	187.61	161.34	0.00	65.0
14:20	649.8	30.9	34.8	37.2	42.7	185.14	159.22	0.00	65.0
14:25	642.5	30.9	34.9	37.3	42.9	183.01	157.39	0.00	65.0
14:30	636.3	31.0	35.2	37.5	43.1	181.16	155.79	0.00	65.0
14:35	628.6	31.0	35.4	37.7	43.3	178.93	153.88	0.00	65.0
14:40	620.7	31.0	35.5	37.8	43.5	176.62	151.90	0.00	65.0
14:45	620.0	31.0	35.8	38.0	43.7	176.42	151.72	0.00	65.0
14:50	603.8	31.0	35.9	38.1	43.9	171.75	147.71	0.00	65.0
14:55	587.3	31.0	36.2	38.1	44.0	166.98	143.60	0.00	65.0
15:00	581.0	31.0	36.3	38.3	44.1	165.16	142.04	0.00	65.0
15:05	556.4	31.0	36.5	38.3	44.2	158.06	135.93	0.00	65.0
15:10	528.8	31.0	36.7	38.3	44.2	150.07	129.06	0.00	65.0
15:15	519.4	31.0	36.7	38.4	44.3	147.35	126.72	0.00	65.0
15:20	502.1	31.0	37.0	38.5	44.3	142.35	122.42	0.00	65.0

ตารางที่ ข.39 (ต่อ)

Time	I_T W/m ²	T_a °C	$T_{f,i}$ °C	$T_{f,o}$ °C	$T_{PV/T}$ °C	$P_{PV/T,DC}$ W	$P_{PV/T,AC}$ W	P_{Comp} W	T_{Cond} °C
15:25	493.2	31.0	37.0	38.6	44.4	139.79	120.22	0.00	65.0
15:30	464.5	31.0	37.2	38.5	44.3	131.44	113.04	0.00	65.0
15:35	437.8	31.0	37.3	38.5	44.2	123.67	106.36	0.00	65.0
15:40	421.1	31.0	37.5	38.5	44.2	118.80	102.17	0.00	65.0
15:45	410.1	30.9	37.6	38.6	44.2	115.64	99.45	0.00	65.0
15:50	397.8	30.9	37.5	38.6	44.2	112.07	96.38	0.00	65.0
15:55	380.0	30.9	37.7	38.6	44.1	106.85	91.89	0.00	65.0
16:00	371.0	30.9	37.7	38.6	44.1	104.24	89.65	0.00	65.0





ภาคผนวก ค.
ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย

การเผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการ

- ชื่อผู้แต่ง:** Piyaphone Mungkhaly
Sulaksana Mongkon
- ชื่อบทความ:** The investigation of mass flow rate and inlet fluid temperature effect on the boosted heat pump performance
- งานประชุมวิชาการ:** The 5th RSU National and International Research Conference on Science and Technology, Social Science, and Humanities 2020 (RSUSSH 2020)
- สถานที่จัดงาน:** Student Center building, Rangsit University, Pathum Thani, Thailand, on 1st May 2020, Page 548-554





RSUSSH 2020
ACCEPTANCE & INVITATION LETTER
The 5th RSU National and International Research Conference on Science and Technology,
Social Science, and Humanities 2020 (RSUSSH 2020)
Rangsit University, Pathum Thani, Thailand

March 30, 2020

Dear: Piyaphone Mungkhaly and Sulaksana Mongkon

Thank you for submitting a paper to **The 5th RSU National and International Research Conference on Science and Technology, Social Science, and Humanities 2020 (RSUSSH 2020)**. Herewith, the RSUSSH 2020 scientific committees are delighted to inform that, your paper entitled "The investigation of mass flow rate and inlet fluid temperature effect on the boosted heat pump performance" has been accepted for **Oral (Full Paper)** in our conference. Your paper will be enclosed in our conference proceeding of RSUSSH 2020 with the detail described below;

Code: IN20-143
Author(s): Piyaphone Mungkhaly and Sulaksana Mongkon
Title: The investigation of mass flow rate and inlet fluid temperature effect on the boosted heat pump performance
Session: Science, Engineer-Tech, Agricultural & Biotech, Food Science, Information Technology
Presentation: Oral (Full Paper)

We cordially invite you to participate, share your experience and give your presentation in the RSUSSH 2020 conference held at the **Student Center building, Rangsit University**, Pathum Thani, Thailand, on **1st May 2020**. The Organizing Committee members would like to thank you in advance for your participation.

Sincerely yours,




Assoc. Prof. Dr. Kanda Wongwailikhit
 Program Chair of RSUSSH 2020
 Rangsit University, THAILAND.





G3-1 INTERACTIVE VDO CONFERENCE Engineering and Technology

IN20-142 Estimation of Long Term Pile Capacity from Results of Short Term Pile Load Tests.

Pisit Kuntiwattanakul, Kezang Wangmo
Rangsit University, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>

IN20-143 The investigation of mass flow rate and inlet fluid temperature effect on the boosted heat pump performance

Piyaphone Mungkhaly and Sulaksana Mongkon
Maejo university, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>

IN20-282 Optimization of Washing Conditions and Adsorption Process for Petroleum Hydrocarbon Removal from Drill Cuttings

Theary Peng Orng, Thaksina Poyai, Nattawin Chawaloephonsiya, Saret Bun, Pisut Painmanakul
Chulalongkorn University, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>

IN20-283 Development of Flotation Enhanced Stirred Tank (FEST) Process for Petroleum Hydrocarbons Removal from Drill Cuttings

Marina Phea, Nattawin Chawaloephonsiya, Thaksina Poyai, Saret Bun, Pisut Painmanakul
Chulalongkorn University, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>

IN20-285 Effect of packing media addition on mass transfer and power consumption in a bubble column

Nawaphat Techathangkun, Kritchart Wongwailikhit, Pisut Painmanakul
Chulalongkorn University, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>

G3-2 INTERACTIVE VDO CONFERENCE Food and Agricultural Technology

IN20-163 Screening of phytochemicals and Antibacterial activities of various extracts of Sadao din (*Glinus oppositifolius*)

Agarat Kamcharoen, Sirilak Kamonwannasit
Burapha University, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>

IN20-222 Effect of Dekkera and Komagataeibacter ratio on kombucha quality in different percent of sugar

Yupakanit Puangwerakul, Suvimol Soitongsuk
Rangsit University, Thailand
<http://rsucon.rsu.ac.th/2020/>



The investigation of mass flow rate and inlet fluid temperature effect on the boosted heat pump performance

Piyaphone Mungkhaly and Sulaksana Mongkon*

School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding author, E-mail: s_mongkon@hotmail.com

Abstract

The aim of this research is to study the mass flow rate and inlet water temperature effect of hot water that fed to evaporator section of the boosted heat pump comparing the case study of using air source. Both heat pumps were test under the hot water temperature condition of 35-65 °C that produced hot water of 100 liter storage tank. For methodology, the boosted heat pump was adapted with the water box installed at the evaporator section and the variation of hot water temperature was controlled by the electric heater and then fed the hot water into the evaporator section at the mass flow rate of 1 kg/min, 2 kg/min, and 3 kg/min under the inlet temperature variation of 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, and 65 °C, respectively. While the conventional heat pump, the fan blown the ambient air into evaporator section. The coefficient of performance (COP) of both heat pumps were calculated and it was found COP of the boosted heat pump was higher than the conventional heat pump at every the mass flow rate, moreover, COP would be decreased when the water temperature in storage tank increased because the power of heat pump increased. The suitable of mass flow rate was clearly at 2 kg/min and the hot water temperature that fed to the evaporation section of boosted heat pump was equal to 45 °C. COP of boosted heat pump could be raise the highest value of 3.69 while COP of conventional heat pump was equal to 2.51.

Keywords: Boosted heat pump, Hot water mass flow rate, Coefficient of Performance (COP).

1. Introduction

Currently, the demand of hot water using in residence home, hotels, hospitals and various industrial sectors is growing. The conventional hot water production is commonly used the electric heater because its investment is cheap and easy installation. However, the disadvantage of electric hot water heater is mainly to use a high power consumption about 3.5-4.5 kW, which is a huge waste of energy. Heat pump is an alternative method for hot water production instead of electric heater using that uses an electricity less than electric heater about 3-4 times (Techato, 2012). The coefficient of performance (COP) the heat pump is approximately 3.00. Heat pump can classify of four types such as Ground Source Heat Pumps (GSHPs), Air Source Heat Pumps (ASHPs), Solar Assisted HPs (SAHP) and Gas-Engine Driven Heat Pumps (GEHPs). The heat resource for evaporator of each type is different for example; ground source, ambient air, solar heat source, and gas source while the condenser of all type is the hot water storage tank (Hepbasli & Kalinci, 2009). The efficient improvement of heat pump systems, together with their cost reduction, has led to publish not only use in air-conditioning, but also widely uses in other applications such as drying or hot water production (Daghighi, Ruslan, Sulaiman, Sopian et al, 2010). During the whole heating process, it noted that the condensation temperature of heat pump unit varied with the change of water temperature in the water tank load (Shiyu et al, 2007). Heat pump performance is studied in many case studies. (Morrison, Anderson, Behnia, 2004) studied Seasonal performance rating of heat pump water heaters in Sydney, Australia. The results found that the coefficient of performance (COP) was 2.3 for a heat pump system in a laboratory situation with an integral condenser and COP of 1.8 for systems with an external condenser. (Pramote, 1999) studied the hot water system of vapor compression heat pump, which the system had the highest COP value about 4.0-4.2 and was able to produce the hot water with a maximum temperature of 41.7 °C at the mass flow rate of 3 kg/min. (Huang & Lin, 1997) studied the hot water heater production by using a small heat pump that used R22 as a working fluid and 100 liters of hot water tank. The hot water temperature was up to 54 °C, which COP was in the range of 2.0-3.0. (Wang et al, 2017) studied the coefficient of performance (COP) of air source heat pump by using R22 as a working fluid. The hot water

[548]



of 300 liters was produced from 30-54.2 °C under the variation of ambient air temperature at -7 °C, 2 °C, 7 °C, 20 °C, and 30 °C, respectively. The experimental results investigated that when the water temperature increased, the power consumption would be increased of 56 %, 48 %, 42 %, 39%, and 34% respectively and the COP decreased 43 %, 48 %, 51 %, 64 %, 48 %, respectively.

From the previous research, that shows heat pump systems can work with solar heat from solar hot water production. Anyway, the effect mass flow rate is lack therefore in this study need to investigate the effect from the hot water mass flow rate in evaporator section of the boosted heat pump comparing with the conventional heat pump (an air source heat pump type) by using R22 as a working fluid. The both heat pumps was test under the condition of hot water temperature in the 100 liters storage tank from 35 °C to 65 °C. By changing the flow rate of 3 values under the inlet temperature condition evaporator of 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, and 65 °C, respectively.

2. Objectives

To study the effect of hot water mass flow rate and inlet water temperature on boosted heat pump performance.

3. Materials and Methods

3.1 Boosted heat pump concept

The boosted heat pump has the similar equipment like a conventional heat pump. The equipment consists of compressor, condenser, expansion valve and evaporator. But inside the evaporator section will feed the hot water instead of air. The boosted heat pump working principle is shown in Figure 1. At the evaporator section, the refrigerant R22 (a working fluid) absorbs heat from the hot water and change from fluid to vapor, then the refrigerant vapor will flow to the compressor and is pressed up to high temperature and pressure before high pressure vapor transfers to condenser section. At this section, the high pressure vapor is reduced temperature so the vapor reforms to liquid and flows to the expansion valve. When the refrigerant liquid passes through the expansion valve, the pressure is reduced and the state of refrigerant is a mixture between liquid and vapor and then be continue to receive heat at the evaporator, (Pramote, 1999).

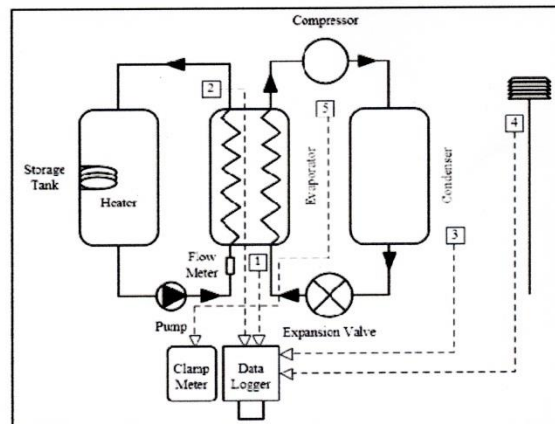


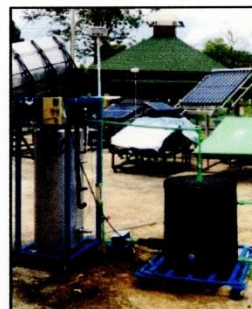
Figure 1 Boosted heat pump working principle

[549]



3.2 Experiment Method

In Figure 2(a) shows the boosted heat pump experiment setting. The boosted heat pump by using R22 as a working fluid was adapted with the water box that installed at the evaporator section as shown in Figure 2(b). The flow rate variation of hot water temperature was controlled by the electric heater and fed the hot water into the evaporator section at the mass flow rate of 1 kg/min, 2 kg/min, and 3 kg/min under the inlet temperature condition of 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, and 65 °C, respectively. Hot water would be supplied to the evaporator using water pump Green-03 DC 12 V. The experiment consisted of two cases; using hot water in evaporator and using air source (a conventional heat pump).



(a) Boosted heat pump



(b) The water box that installed at the evaporator section

For data collection, thermocouples type K were used to measure temperature in various points as shown in Figure 1, namely point 1 the inlet water temperature to evaporator, point 2 the outlet water temperature to evaporator, point 3 the temperature of hot water in a condenser tank, point 4 the ambient temperature. All of measured temperature were recorded in the multi-channel data logger (Model; Lutron TM-1947SD). For the compressor power of heat pump (point 5) was used clamp meter (Model; Mastech MS2203). The mass flow rate of hot water was measured by flow meter (Model; Treaton Z-4001). After that, the test was conducted to collect data every 5 minutes for coefficient performance (COP) that can be calculated following equation (1) and equation (2).

Coefficient of performance (COP) of heat pump can be calculated from the useful heat from the condenser divided by the power input the compressor.

$$\text{COP}_{\text{Heatpump}} = \frac{Q_{\text{Cond}}}{W_{\text{Comp}}} \quad (1)$$

Where $\text{COP}_{\text{Heatpump}}$ is coefficient of performance of heat pump. Q_{Cond} is useful heat from the condenser. W_{Comp} is power consumption of compressor.

The heat removal from condenser, can be calculated from the equation (2)

$$Q_{\text{Cond}} = \frac{M_s C_p (T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} \quad (2)$$

[550]



Where M_s is the amount of water in the hot water tank (kg). C_p is specific heat capacity of water (J/kg·K). $T_s^{t+\Delta t}$ is the water temperature in the hot water tank when the time is changing ($^{\circ}\text{C}$). T_s is the water temperature in the hot water storage tank ($^{\circ}\text{C}$) and Δt is time (s).

4. Results and Discussion

4.1 Compressor Power

Figure 3, shows the changing compressor power at various mass flow rate and various hot water temperatures condition that supplied to the evaporator section. At the mass flow rate of 1 kg/min, 2 kg/min and 3 kg/min, the compressor power of boosted heat pump in each average period was in the range of 0.251 - 0.404 kW_e , 0.235 - 0.379 kW_e and 0.238 - 0.399 kW_e , respectively. While the compressor of conventional heat pump that used air source in evaporator section use the power approximately 0.297 - 0.462 kW_e .

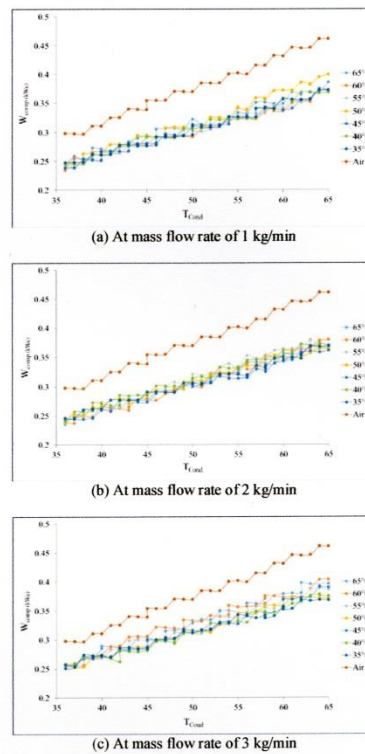


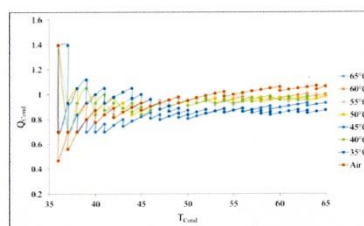
Figure 3 The variation of compressor power at various mass flow rate

[551]

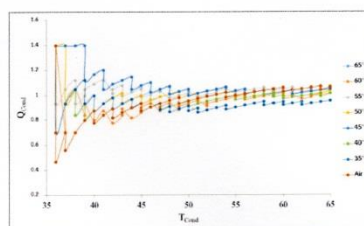


3.2 The useful heat form condenser

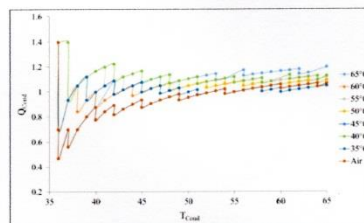
From the Figure 4 shows the variation of useful heat from the condenser (Q_{Cond}) of the heat pump that used the hot water boosted inside evaporator section of heat pump at various mass flow rate of 1 kg/min, 2 kg/min and 3 kg/min, respectively. It was found that the heat pump compressor would use more electric power, and made the useful heat from condenser decreased. The useful heat from the condenser in each mass flow rate was in the range of 0.558 – 1.396 kW, 0.698 - 1.396 kW and 0.698 - 1.196 kW, respectively. While the compressor of conventional heat pump that used air source in evaporator section consumed the electric power in the range of 0.465 – 1.396 kW.



(a) At mass flow rate of 1 kg/min



(b) At mass flow rate of 2 kg/min



(c) At mass flow rate of 3 kg/min

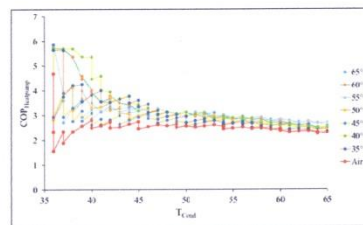
Figure 4 The variation of useful heat from condenser at various mass flow rate

[552]

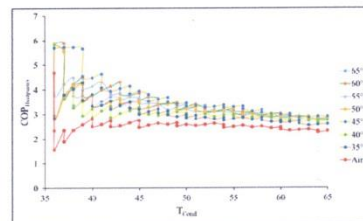


3.3 Coefficient of performance (COP)

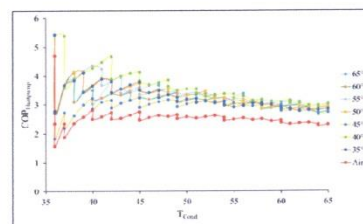
Figure 5 shows the coefficient of performance a heat pumps. COP of the boosted heat pump obtained in the range of 2.85-3.36. The optimum hot water temperature at the flow rate of 1 kg/min was at 40 °C, which could raise the highest coefficient of performance (COP) of 3.36. For the coefficient of performance (COP) of the conventional heat pump (air source type) was equal to 2.51. For the mass flow rate of 2 kg/min, COP was higher than the results of mass flow rate 1 kg/min with a value between 2.95-3.69. The optimum hot water temperature at the flow rate of 2 kg/min was 45 °C, while the coefficient of performance (COP) of the conventional heat pump was equal to 2.51. Finally, at the mass flow rate of 3 kg/min. The coefficient of performance (COP) was in the range of 2.97-3.63 while the coefficient of performance (COP) of the conventional heat pump was equal to 2.51. From the experiments, could increase higher than with the conventional heat pump (an air source heat pump type) the coefficient of performance (COP) of the boosted heat pump a value between 2.97 to 3.63.



(a) At mass flow rate of 1 kg/min



(b) At mass flow rate of 2 kg/min



(c) At mass flow rate of 3 kg/min

Figure 5 Coefficient of performance (COP) of heat pump at various mass flow rate [553]



3.4 Experimental summary

From Table 1, shows the summarize of the coefficient of performance (COP) of boosted heat pump and it was found the coefficient of performance (COP) of the boosted heat pump could increase higher than the conventional heat pump at every mass flow rate. Moreover, the coefficient of performance (COP) would be decreased when the water temperature in the storage tank increased because the power using of the heat pump was increased. The optimum mass flow rate was clear that at 2 kg/min provided the highest COP of 3.69 and the suitable hot water temperature that supplied to the evaporation section was equal to 45 °C.

Table 1 Coefficient of performance of boosted heat pump

Boundary	Coefficient of Performance (COP)						
	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C
1 kg/min	3.11	3.36	2.85	3.04	3.24	3.16	3.05
2 kg/min	3.10	3.07	3.69	3.36	2.95	3.51	3.31
3 kg/min	3.29	3.63	2.97	3.36	3.40	3.21	3.35

5. Conclusion

This research studied the effect study of hot water mass flow rate and inlet water temperature on boosted heat pump performance comparing with the conventional heat pump. The results showed that COP of the boosted heat pump was higher than the conventional heat pump at every mass flow rate, moreover, COP would be decreased when the water temperature in storage tank increased because the power consumption of heat pump increased. The suitable of mass flow rate was clearly at 2 kg/min and the hot water temperature that fed to the evaporation section of boosted heat pump was equal to 45 °C. The boosted heat pump could be reached the highest COP of 3.69 while COP of conventional heat pump was equal to 2.51.

6. References

- Daghigh, R., Ruslan, M. H., Sulaiman, M. Y., Sopian, K. (2010). Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 14(9), 2564-2579.
- Shiyu, F., Xiufeng, G., Wei, H., Yun, L., Zhaolin, G., Huiyu, W., & Cong, L. (2007). Performance study on heat pump sub-system in parallel of solar assisted heat pump water heater. *Acta Energetica Sinica*, 28(2), 125.
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229.
- Huang, B. J., & Lin, F. H. (1997). A compact and fast temperature-response heat pump water heater. In *ASME 1997 Turbo Asia Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Morrison, G.L., Anderson, T., Behnia, M. (2004). Seasonal performance rating of heat pump water heater. *Solar Energy*, 76(1-3), 147-152.
- Pramote, L. (1999). *Performance analysis of a heat pump water heating system in the home*. A thesis for the degree of Master of engineering in Energy Technology. School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Techato, K. (2012). Heat pump Market in Thailand. *Energy Procedia*, 14, 9-13.
- Wang, Y., You, S., Sun, Y., & Li, Z. (2017). Experimental investigations and operational performance analysis on an air source heat pump unit for domestic hot water supply in South China. *Procedia Engineering*, 205, 2407-2414.

[554]

การเผยแพร่ผลงานโดยการตีพิมพ์ในวารสาร

- ชื่อผู้แต่ง:** Piyaphone Mungkhaly
สรารุช พลวงษ์ศรี
สุลักษณ์ มงคล
- ชื่อบทความ:** การศึกษาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงแรมไก่อันคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว
- ชื่อวารสาร:** วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- ปีที่ตีพิมพ์:** ปี 2022 (ปีที่ 15) ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม – สิงหาคม)





Certification Letter
for journal publication consideration on RMUTI Journal:
Sciences and Technology

To certify that

The journal of

**“An optimization study of hot water generation with Solar PV/T Boosted Heat Pump of
Kai Nakhon Hotel, Vientiane Capital, Laos PDR”**

By

Mr. Piyaphone Mungkhaly, Assistant Professor Dr.Sarawut Polvongsri, and
Assistant Professor Dr.Sulaksana Mongkon

has been approved and evaluated by qualified committee
and has been published on RMUTI Journal: Sciences and Technology
Vol 15 No 2 (May - August, 2022)

(Associate Professor Dr. Tanakorn Phoo-ngernkham)
Editorial Board of RMUTIIST
Rajamangala University of Technology Isan



การศึกษาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงแรมไก่อนคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว

An optimization study of hot water generation from Solar PV/ T Boosted Heat Pump; Case study of Kai Nakorn Hotel, Vientiane Capital, Laos PDR

Piyaphone Mungkhaly, Sarawut Polvongsri และ สุลักษณา มงคล^{1*}

Piyaphone Mungkhaly, Sarawut Polvongsri and Sulaksana Mongkon^{1*}

Received :; Revise :; Accepted :

บทคัดย่อ

โรงแรมไก่อนคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว มีความต้องการใช้น้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส จำนวน 2,000 ลิตรต่อวัน สำหรับการอุปโภค โดยในกระบวนการผลิตน้ำร้อนมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 95.54 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาขนาดระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมกับการใช้น้ำร้อนในโรงแรมไก่อนคร เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาและทดสอบสมรรถนะทั้งทางด้านไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 เพื่อสร้างสมการทำนายสมรรถนะของแผง Solar PV/T ขนาด 330 วัตต์ โดยจากการศึกษาพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_r(TC)_0$ และค่า $F_{r,U}$ เท่ากับ 0.4018 และ 10.466 วัตต์ต่อตารางเมตร*องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.00 เปอร์เซ็นต์ และได้สมการเอมพิริกัลสำหรับใช้ในการทำนายสมรรถนะของ ระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการศึกษารายละเอียดจะใช้สมการที่ได้จากการทดสอบระบบในส่วนที่ 1 มาทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบระบบที่เหมาะสมและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อเลือกขนาดที่เหมาะสมของระบบทำน้ำร้อนของโรงแรมทดแทนการใช้ระบบผลิตน้ำร้อนเดิมที่มีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส จำนวน 2,000 ลิตรต่อวัน ผลการศึกษาพบว่า ระบบทำน้ำร้อนที่ใช้แผง Solar PV/T ขนาด 330 วัตต์ จำนวน 12 แผง ร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ มีความเหมาะสมที่สุด การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานจะสามารถลดลงได้ 28,072.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานขดลวดไฟฟ้าเท่ากับ 84,779.58 บาทต่อปี ใช้เงินลงทุน 604,180 บาท และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.13 ปี

คำสำคัญ : สมรรถนะ แผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ น้ำร้อน ปั๊มความร้อน ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

Abstract

Kai Nakorn Hotel, Vientiane Capital, Laos PDR has a hot water demand with a temperature of 60-65 °C, amount of 2,000 L/day for consumption. In the hot water production, a 20 kW heater coil was used, resulting 95.54 kWh/day of electricity consumption caused a lot of electric energy use. Therefore, this research has an idea to study an optimum size of the hot water production system from Solar PV/T Boosted Heat Pump for hot water use in the Kai Nakorn Hotel for reducing the amount of electricity consumption. The first part is testing of the electrical and thermal performance of Solar PV/T following to ASHRAE Standard 93-2003 to simulate a performance prediction equation of a 330 Wp Solar PV/T. The results found that the thermal performance of Solar PV/T panels obtained $F_{R(\tau\alpha)_e}$ and F_{RUL} equal to 0.4018 and 10.466 $W/m^2 \cdot ^\circ C$, respectively. While the averaged power generation efficiency of solar PV/T panel was 16.00% and got an empirical equation for prediction performance of hot water generation with Solar PV/T Boosted Heat Pump. For the second part of the study, the equations that obtained from the first part study was used to create a mathematical model to design an optimized system and analyzed the economic for choosing the appropriate size of the hot water use in hotel. The conventional hot water production system used an electric heater of 20 kW to produce hot water at a temperature of 60-65 °C, with an amount of 2,000 L/day. The results found that an optimized system was used the 330 W_p solar PV/T with 12 panels together with a 17.8 kW_{th} heat pump. The electricity consumption was able to reduce by 28,072.71 kWh/year, or equivalent the electricity costs when compared to use heater equal to 86,952.84 Baht/year, with an investment of 604,180 Baht and a payback period was equal to 7.13 years.

Keyword : Performance, Solar panel, Hot water, Heat pump, Solar PV/T Boosted Heat Pump.

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

¹ School of Renewable Energy Maejo University Chiangmai

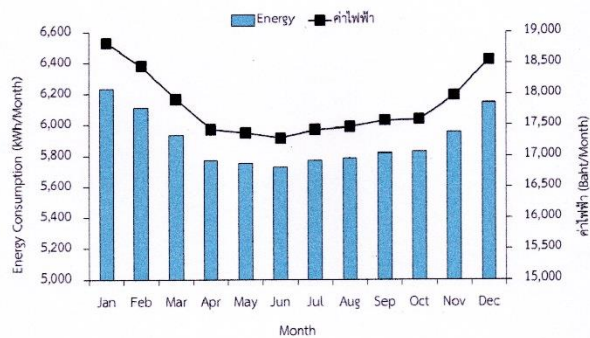
• Corresponding Author E - mail Address: s_mongkon@hotmail.com

บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำร้อนเพิ่มขึ้นทั้งในบ้านที่อยู่อาศัย โรงแรม โรงพยาบาล รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมต่างๆ การผลิตน้ำร้อนเดิมนิยมใช้เครื่องทำน้ำร้อนแบบขดลวดไฟฟ้าเนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อง่ายและมีภาคติดตั้งไม่ซับซ้อนแต่การใช้ขดลวดทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงตามไปด้วย ในการลดค่าใช้จ่ายในส่วนการผลิตน้ำร้อนมีหลายวิธี เช่น การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [1] การใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [2] การใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อน [3] เป็นต้น โดยการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัยทั้งด้านต้นทุน และความเสถียรในการผลิตน้ำร้อนโดยเฉพาะกรณีใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้นปัญหาที่พบคือในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆบังหรือวันที่มีฝนตกจะไม่สามารถผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตามที่ต้องการ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน [4] ซึ่งก็สามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าลงได้ในระดับหนึ่ง นอกจากเทคโนโลยีข้างต้นแล้วยังมีอีกเทคโนโลยีที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้เป็นจำนวนมาก เช่น การใช้เทคโนโลยีที่นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้ามาติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้าไปด้านหลังแผงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผงไปสู่ น้ำ ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีอุณหภูมิแผงลดลงช่วยให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [5] สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวเรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) [6] นอกจากนี้ยังมี

การใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อนที่พบว่าใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าขดลวดความร้อนประมาณ 2-3 เท่า [3] และยังมีหลายงานวิจัยที่มีการนำเอาปั๊มความร้อนและแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [7], [8] มาทำงานร่วมกัน เรียกว่า ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวถูกพัฒนามาจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [9] ที่มีรูปแบบการทำงานของระบบก็คือใช้ความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน และเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ปั๊มความร้อนอีกด้วย งานวิจัยของ [10] ได้จำลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำนวน 1-5 แผง ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนคือ 300-1,200 ลิตร ปั๊มความร้อนใช้สารทำงานแบบผสม R22 20 เปอร์เซ็นต์ R124 57 เปอร์เซ็นต์ และ R152a 23 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารทำงาน พบว่าระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 4.1-4.6 [11] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน ทำการติดตั้งที่บรรจุสารทำงานไว้ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 4.59 ตารางเมตร โดยใช้ปั๊มความร้อนขนาด 2.12 กิโลวัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) มีค่าประมาณ 3.8-8.4 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์ และทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

โรงแรมไถ่กันครในนครหลวงเวียงจันทน์ ขนาดจำนวนห้องพัก 30 ห้อง จากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้าของโรงแรมย้อนหลังตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม ปี พ.ศ. 2563 แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า เดือนมกราคมมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุด 6,235 กิโลวัตต์ชั่วโมง ส่วนเดือนมิถุนายน มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด 5,725 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยตลอดปี พ.ศ 2563 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 70,823 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าไฟฟ้า 213,885.46 บาทต่อปี



รูปที่ 1 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2563

เมื่อแยกเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละบิล พบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนมากที่สุด 2,961.74 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 34,812.10 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 49.15 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นเครื่องปรับอากาศ ใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 27,323.51 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 38.58 เปอร์เซ็นต์ และส่วนอื่น ๆ ใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 8,687.39 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 12.27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากข้อมูลจะพบว่าการใช้พลังงานในการผลิตน้ำร้อนค่อนข้างสูงเนื่องจากการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ เพื่อผลิตน้ำร้อนปริมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน ที่อุณหภูมิประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส สำหรับใช้ในการอุปโภค โดยค่าใช้จ่ายส่วนนี้ทำให้ต้นทุนของโรงแรมสูงตามไปด้วย ดังนั้นโรงแรมจึงมีความต้องการนำเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว

และจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบสมรรถนะของระบบ ร่วมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิต ไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการน้ำร้อน ของโรงแรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบผลิตน้ำร้อนของโรงแรมในนครหลวงเวียงจันทน์

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบอุปกรณ์ในระบบเพื่อสร้างสมการทำนายสมรรถนะแล้วนำสมการที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบ ผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงแรม โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการ ดำเนินงานวิจัย หลัก ๆ 2 ส่วน ดังนี้

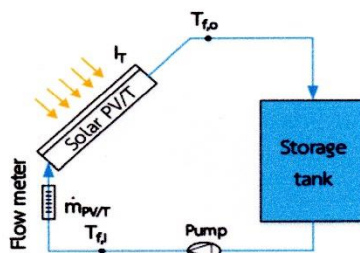
ส่วนที่ 1 ทำการทดสอบและสร้างสมการทำนายสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการ วิเคราะห์ข้อมูลด้านต่าง ๆ ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ของการทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ปรับ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านแผง 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงตั้งแต่ 35 องศาเซลเซียส จนถึง 65 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 องศาเซลเซียส เก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากแผง Solar PV/T อุณหภูมิอากาศ แวดล้อม ค่ารังสีอาทิตย์ เพื่อคำนวณสมรรถนะทางความร้อนและไฟฟ้าของแผง Solar PV/T ตามสมการที่ (1) ถึง สมการ ที่ (2) โดยมีรายละเอียดระบบที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2

$$\eta_{\text{coll}} = \dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) = F_R (\tau\alpha)_e - \frac{F_R U_L (T_{f,i} - T_a)}{I_T} \quad (1)$$

เมื่อ	η_{coll}	คือ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์
	\dot{m}	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)
	C_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (กิโลจูลต่อกิโลกรัม*องศาเซลเซียส)
	$T_{f,o}$	คือ อุณหภูมิของไหลขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ องศาเซลเซียส)
	$T_{f,i}$	คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (องศาเซลเซียส)
	$(\tau\alpha)_e$	คือ ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
	U_L	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร*องศา
	แกนวิน)	
	F_R	คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor)
	I_T	คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

$$\eta_{e, \text{PV/T}} = \frac{P_{\text{PV/T}}}{A_{\text{PV}} I_T} \quad (2)$$

- เมื่อ $\eta_{s,PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง Solar PV/T (เปอร์เซ็นต์)
- $P_{PV/T}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T (วัตต์)
- A_{PV} คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ตารางเมตร)



รูปที่ 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

นอกจากนี้ทำการทดสอบปั๊มความร้อนเพื่อสร้างสมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (P_{Comp}) ของปั๊มความร้อนจากงานวิจัย [12] โดยในการทดสอบใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a เพื่อนำไปออกแบบในขั้นตอนต่อไป

ส่วนที่ 2 ใช้สมการสมรรถนะของระบบและอุปกรณ์จากส่วนที่ 1 นำมาหาขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนรวมถึงใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์ เพื่อมาวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่สามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมและผลความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์จะทำการวิเคราะห์ตามสมการที่ (3) ถึง สมการที่ (5) โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะป้อนให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอก็จะมีการดึงไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานเข้ามาช่วยในการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบดังกล่าว

$$\text{ระยะเวลาดำเนินทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \quad (3)$$

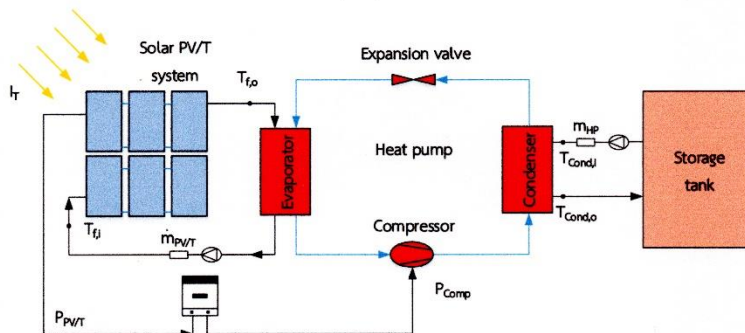
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คำนวณจากสมการที่ (4)

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \quad (4)$$

- เมื่อ R_n คือ ผลตอบแทนในปีที่ n (บาท)
- C_n คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n (บาท)
- N คือ ระยะเวลาของโครงการ
- i คือ อัตราส่วนลด (เปอร์เซ็นต์)
- TIC คือ เงินลงทุนทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบัน (บาท)

อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal rate of return : IRR) คือค่า i ที่ทำให้ NPV = 0 คำนวณจากสมการที่ (5)

$$\sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC = 0 \tag{5}$$



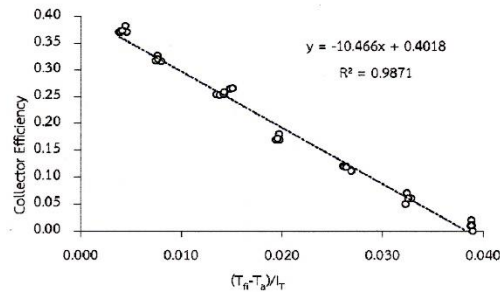
รูปที่ 3 ระบบผลิตน้ำร้อนจากบ้มีความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการวิจัย

สมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

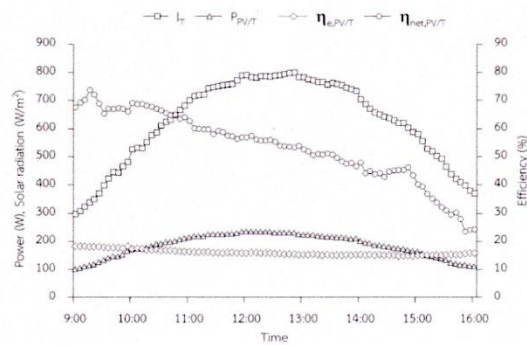
การทดสอบสมรรถนะทางด้านความร้อนของแผง Solar PV/T ทดสอบตามมาตรฐาน ASHREA STANDARD 93-2003 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงตามมาตรฐานการทดสอบที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที*ตารางเมตร ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิน้ำที่เข้าแผง Solar PV/T สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น สมรรถนะของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(T\Delta)_c = 0.4018$ และ $F_{R,U_L} = 10.466$ วัตต์ต่อตารางเมตร*องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้ผลการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผง Solar PVT ดังสมการที่ (6)

$$Q_{PVT} = A_{PVT} [(0.4018 I_T) - (10.466 (T_{fi} - T_a))] \tag{6}$$



รูปที่ 4 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผง Solar PV/T

จากรูปที่ 5 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ขนาดกำลังการผลิต 330 วัตต์ ตั้งแต่เวลา 9.00 – 16.00 น. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุดที่ 235.40 วัตต์ ในช่วงเวลา 12.15 น. และมีค่าเฉลี่ย 186.60 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 16.00 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ตลอดทั้งวันพบว่ามีค่าเฉลี่ย 53.30 เปอร์เซ็นต์



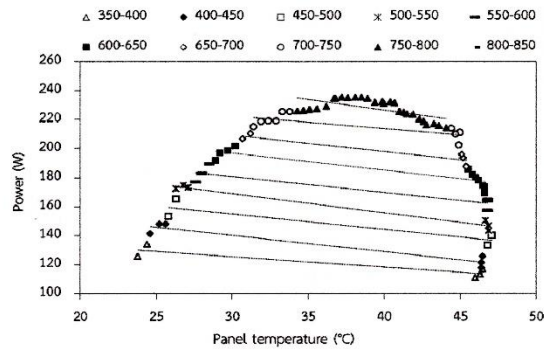
รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง คาร์รังสีอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่า เมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จากการพิจารณาเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะพบว่า อุณหภูมิแผงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยที่อุณหภูมิแผงจะขึ้นกับความร้อนสะสมที่ได้จากรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้ามาระบายความร้อนของแผง Solar PV/T ดังนั้น ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของ Solar PV/T ก่อนอื่นต้องทราบอุณหภูมิแผง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$T_{PVT,Sim} = 1.0234 \times (I_T^{0.09286}) \times (T_a^{-0.17333}) \times (T_{fi}^{1.0357}) \quad (7)$$

การทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$P_{PVT,Sim} = 1.170 \times (I_T^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{fi}^{0.17826}) \times (T_{PVT}^{-0.38333}) \quad (8)$$



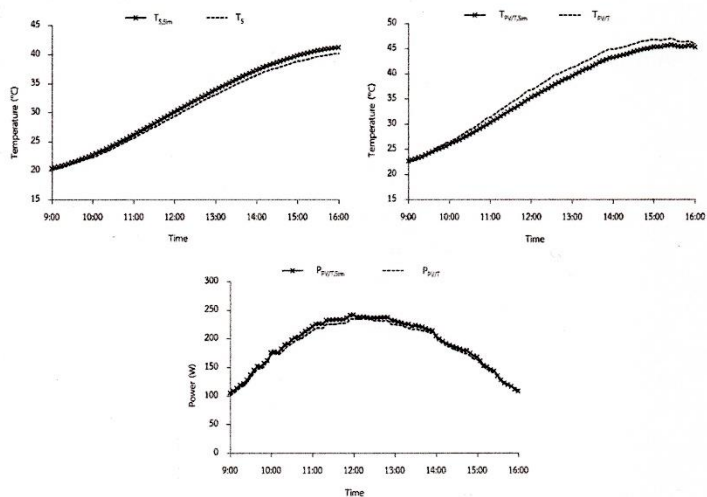
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์

โดยเมื่อนำสมการที่ (6) สมการที่ (7) และสมการที่ (8) จำนวนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิน้ำร้อนในถังจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากสมการตามสมการที่ (6) 1.85 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สมการที่ (7) และสมการที่ (8) พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 3.33 เปอร์เซ็นต์ และ 2.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 7

และในส่วนสมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (P_{Comp}) ของปั๊มความร้อนจากงานวิจัย [12]

$$EER = 81.8378 \times (I_T^{0.016628}) \times (T_a^{0.19456}) \times (T_{fo}^{-0.30281}) \times (T_s^{-0.77417}) \quad (9)$$

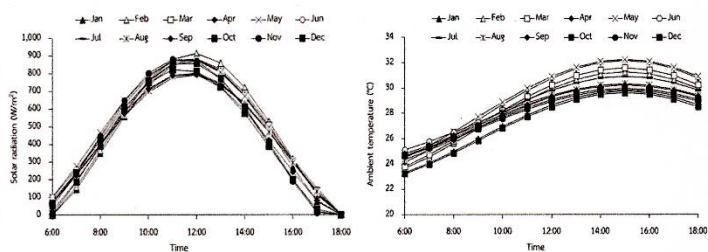
$$P_{Comp} = 267.31 \times (T_{fo}^{0.20834}) \times (T_s^{0.56875}) \times (EER_{HP}^{-0.11192}) \quad (10)$$



รูปที่ 7 ผลการทดลองและการทำนายของอุณหภูมิน้ำในถัง อุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าจากสมการทำนาย

ขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากบิ๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทำขนาดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์ [13] แสดงดังรูปที่ 8

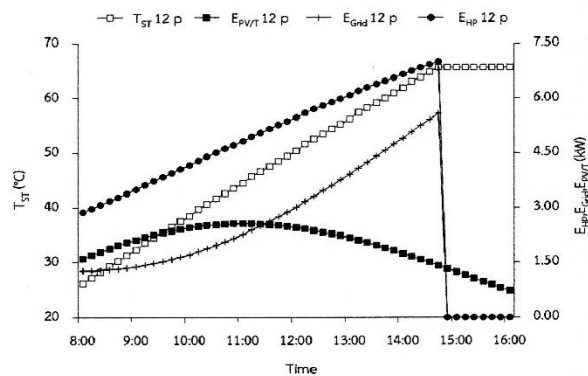


รูปที่ 8 ค่ารังสีอาทิตย์รายเดือนของนครหลวงเวียงจันทน์

จากการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบขดลวดไฟฟ้าของโรงแรม พบว่ามีการใช้พลังงาน 95.54 กิโลวัตต์ต่อวัน จากข้อมูลการผลิตน้ำร้อนของโรงแรมที่มีความต้องการใช้น้ำร้อนปริมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิ ตั้งแต่ 20 องศาเซลเซียส ถึง 65 องศาเซลเซียส จากการคำนวณจะต้องใช้บิ๊มความร้อนขนาดอย่างน้อย 17.45 กิโลวัตต์ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้บิ๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ที่ใช้สารทำงาน R134a ที่มีขายตามท้องตลาดมาใช้ และใช้แผง

Solar PV/T ขนาดกำลังการผลิต 330 วัตต์ต่อแผง ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ได้ทำการปรับจำนวนแผง Solar PV/T ตั้งแต่จำนวน 10 แผง 12 แผง 14 แผง และ 16 แผง โดยค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์เดือนกันยายน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่ำสุด ซึ่งพบว่าโรงแรมแห่งนี้มีการใช้น้ำร้อนส่วนมากในช่วงเวลา 07:00 – 8:00 น. และ 18:00 – 19:00 น. ดังนั้นในการทำนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกำหนดให้ระบบทำงาน 08:00 – 16:00 น. โดยใช้อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้นตามอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเวลานั้น ๆ เพื่อผลิตน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส และเพียงพอต่อการใช้น้ำในทั้ง 2 ช่วงเวลาดังกล่าว

จากรูปที่ 9 เป็นตัวอย่างผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump กรณีใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง และปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ พบว่า ในช่วงระบบเริ่มทำงานในเวลา 08:00 น. อุณหภูมิน้ำร้อนในถัง 26.2 องศาเซลเซียส ปั๊มความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้า 2.87 กิโลวัตต์ และจะมีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 65 องศาเซลเซียส เมื่อเวลา 14:40 น. ปั๊มความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้า 7.00 กิโลวัตต์ โดยใช้เวลาทำงานของระบบในการผลิตน้ำร้อน 6.66 ชั่วโมง คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 34.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ในขณะที่เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2.56 กิโลวัตต์ ที่เวลา 11:00 น. ซึ่งกรณีใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ทำให้ปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ อยู่ระหว่าง 1.74 – 4.95 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [14] และงานวิจัยของ [12] ดังตารางที่ 1 พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน โดยในงานวิจัยของ Anderson et al. ระบบเดิมที่ใช้อากาศจ่ายให้ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Air source heat pump) มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ อยู่ระหว่าง 2.6 – 4.4 ในขณะที่เมื่อใช้น้ำร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จ่ายให้ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Solar boosted heat pump) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเพิ่มขึ้นประมาณ 10-11 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าระหว่าง 2.5 – 5.0 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะก็ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เพียงแต่งานวิจัยนี้ระบบเป็น Solar PV/T heat pump ซึ่งนอกจากจะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นแล้วแผง Solar PV/T ยังสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับปั๊มความร้อน ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลดลงประมาณ 80.50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ [12] ที่ใช้แผง Solar PV/T boosted heat pump

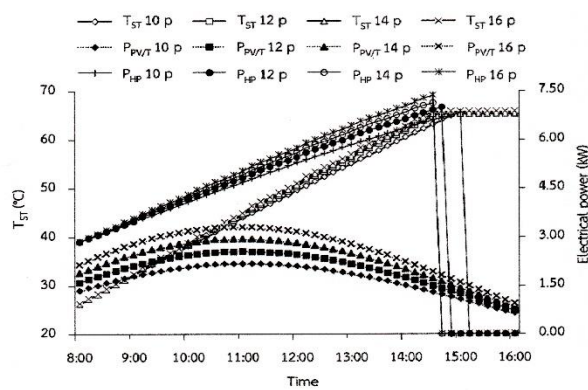


รูปที่ 9 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลในการเปรียบเทียบกับงานวิจัย

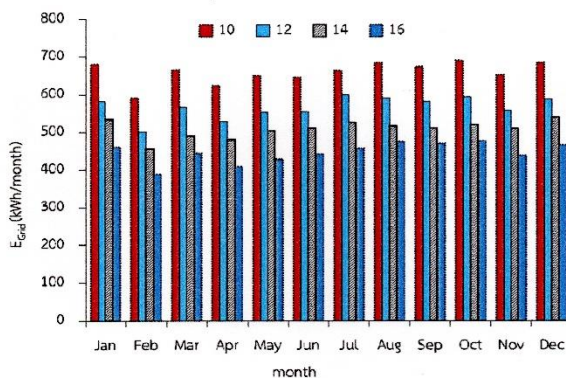
งานวิจัย	Air Source heat pump		Solar Boosted heat pump			COP เพิ่มขึ้น
	สารทำงาน	COP	สารทำงาน	ระบบที่ใช้	COP	%
Anderson et al.	-	2.6 – 4.4	-	Solar Collector Boosted heat pump	2.5 – 5.0	10-11
Saysana and Sulaksana	R134a	2.79 - 4.09	R134a	Solar PV/T Boosted heat pump	2.79 – 4.37	6-7
งานวิจัยนี้	R134a	2.79 - 4.09	R134a	Solar PV/T Boosted heat pump	1.74 – 4.90	11-12

เมื่อพิจารณาจำนวนแผงทั้งกรณี 10 แผง 12 แผง 14 แผง และ 16 แผง พบว่าทุกกรณีสามารถผลิตน้ำร้อนที่ 65 องศาเซลเซียสได้ แต่จะใช้เวลาต่างกันส่งผลทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานแตกต่างกันไปด้วย โดยระบบที่ใช้จำนวนแผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง ใช้เวลาในการทำงานน้อยสุด 6.50 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 แผง 12 แผง และ 10 แผง ใช้เวลาในการทำงาน 6.50 ชั่วโมงต่อวัน 6.66 ชั่วโมงต่อวัน และ 7.0 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ โดยทุกกรณีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะแปรผันโดยตรงกับจำนวนแผง Solar PV/T โดยระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด 18.86 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 แผง 12 แผง และ 10 แผง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 16.75 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน 14.84 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน และ 12.97 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 10 ในขณะที่ปั๊มความร้อนทำงานจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากสองแหล่ง คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะช่วยลดการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนแผง ระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 15.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 แผง 12 แผง และ 10 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 17.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน 19.41 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน และ 22.45 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ



รูปที่ 10 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อน

ดังนั้น จากข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมจะประกอบด้วยปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a เสริมด้วยแผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ต่อขนานกันเพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,000 ลิตร เมื่อใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปีมาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ พบว่า เดือนกรกฎาคมเป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานสูงสุด 599.23 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน สำหรับเดือนกุมภาพันธ์เป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่ำสุด 501.76 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน แสดงดังรูปที่ 11 กรณีจำนวนแผง Solar PV/T เพิ่มขึ้นจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลง โดยพบว่าระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผงใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลงมากที่สุด 5,364.21 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี รองลงมาเป็นจำนวน 14 แผง 12 แผง และ 10 แผง ใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 6,113.79 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี 6,799.39 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี และ 7,903.42 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ตามลำดับ เมื่อนำเอาค่าเหล่านี้ไปวิเคราะห์ร่วมกับเงินลงทุนสร้างระบบแสดงตารางที่ 2 เพื่อหาระยะคืนทุนโดยพบว่า ในกรณีแผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด 7.13 ปี ลำดับถัดไปคือจำนวน 10 แผง 14 แผง และ 16 แผง มีระยะคืนทุน 7.15 ปี 7.48 ปี และ 7.86 ปี ตามลำดับ



รูปที่ 11 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในแต่ละเดือน

ตารางที่ 1 มูลค่าเงินลงทุนและพลังงานที่ประหยัดได้ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

รายละเอียด	ขดลวดไฟฟ้า	Solar PV/T Boosted heat pump			
		จำนวนแผง			
		10	12	14	16
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)	34,872.10	7,903.42	6,799.39	6,113.79	5,364.21
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)		26,968.68	28,072.71	28,758.31	29,507.89
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ประหยัดได้ (เปอร์เซ็นต์)		77.34	80.50	82.47	84.62

คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (บาทต่อปี)	81,445.41	84,779.58	86,850.10	89,113.83
เงินลงทุน (บาท)	582,000	604,180	649,460	700,740
Solar PV/T (บาท)	200,000	220,000	240,000	260,000
Heat Pump			240,000	
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	7.15	7.13	7.48	7.86
NPV (บาท)	104,613.55	110,541.78	82,717.00	50,521.04
IRR	10.37	11.30	10.86	9.89

*ค่าไฟฟ้าประมาณ 3.02 บาท/หน่วย

*คิดอัตราดอกเบี้ย 8.25 เปอร์เซ็นต์ (ธนาคารการค้าต่างประเทศลาว, 2565)

อภิปรายผลการวิจัยและสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ร่วมกับการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ในระบบดังกล่าว จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ใน ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าในการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_{r(TO)} = 0.4018$ และ $F_{r,U_L} = 10.466$ วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่า 16.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ดังนี้

สมการทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T ดังสมการ

$$T_{PVT,Sim} = 1.0234 \times (T_r^{0.09286}) \times (T_a^{-0.17333}) \times (T_{fi}^{1.0357})$$

สมการทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ดังสมการ

$$P_{PVT,Sim} = 1.170 \times (T_r^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{fi}^{0.17826}) \times (T_{PVT}^{-0.38333})$$

ใน ส่วนที่ 2 เมื่อได้สมรรถนะและสมการที่ใช้ในการทำนายแล้วจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกระบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีการปรับเปลี่ยนจำนวนแผง Solar PV/T ตั้งแต่ 10, 12, 14 และ 16 แผง เพื่อเลือกจำนวนที่เหมาะสมโดยพิจารณาทั้งปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน สมรรถนะของระบบ และความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted heat pump ที่เหมาะสมกับการใช้ผลิตน้ำร้อนของโรงแรมไก่นคร จะใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a และใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.74 – 4.90 ทำให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าลงได้ 28,072.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 84,779.58 บาทต่อปี โดยลงทุนทั้งสิ้น 604,180 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 7.13 ปี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนทุนและค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (SEEU) ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน และขอขอบคุณโรงแรมไถ่กันคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว ที่เอื้อเพื่อให้ข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

References

- [1] Sonsaree, St, Asaoka, JT., Jijitsawat, JS., Aguirre, H. & Tanaka, i. (2017). VCHP-ORC power generation from low-grade industrial waste heat combined with solar water heating system: Power generation and CO₂ emission in industrial estate of Thailand. *Cogent Engineering*, 4(1), 1359397.
- [2] ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และ โสภิตสุดา ทองโสภิต. (2558). การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. *วารสารวิจัยพลังงาน*. 12(2), 59-74.
- [3] กระทรวงพลังงาน (2552). เทคโนโลยีการใช้ปั๊มความร้อนสำหรับการทำความร้อน. กรุงเทพฯ:โครงการวิสาขิต เทคโนโลยีเชิงลึกเพื่อการอนุรักษ์พลังงานกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- [4] Xiaolin Sun, Yanjun Dai, V.Novakovic, J. Wu and Ruzhu Wang. (2015). Performance comparison of direct expansion solar-assisted heat pump and conventional air source heat pump for domestic hot water. *Energy Procedia*, vol. 70. (pp. 394-401).
- [5] Herrando,, R., Alba, Z, lo d Markides, C. N. (2019). A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PV/T-water collectors. *Applied Energy*, vol. 235. (pp. 1583-1602).
- [6] Huide,, nX., Zhao,, L. Ma, Tao, Zg, Qixing, Wu d Hongyuan, n. (2017). A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, Solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems. *Energy conversion and management*, vol. 140. (pp. 1-13).
- [7] Saysana Chanthaseng และ สุลักษณ์ มงคล. (2021). การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดต้นทุนด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงพยาบาล. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 28(1), 110-126.
- [8] นฤพนธ์ วันชูเพลา และ สราวุธ พลวงษ์ศรี. (2021). ขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำร้อนในโรงพยาบาล. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 28(1), 127-140.
- [9] วงศ์สุวรรณค์ จันทะบุลย์ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2550). การทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์แผ่นเรียบไม่มีกระจกปิดเป็นอิวาปอเรเตอร์. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่6). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่.

- [10] Chaichana, C., Kiatsiroat, 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). (pp. 419–429).
- [11] J. Ji, k. Liu, T. Chow, G. Pei, W. He, and H. He. (2008). Performance analysis of a photovoltaic heat pump. *Applied Energy*, vol. 85. (pp. 680-693).
- [12] Saysana Chanthaseng. (2021). การลดต้นทุนด้านพลังงานของโรงฆ่าสัตว์ด้วยการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [13] NASA POWER Data Access Viewer. (2563). Solar radiation and ambient temperature. Access (17 May 2021). Available (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/?fbclid=IwAR21o8oBtosEgetYzfm0HfWGFm3G6Xfj_t1nFLLBFNv-ito6j6mN_iYavkk).
- [14] T.N. Anderson, G.L. Morrison and M. Behnia. (2003). An Experimental Evaluation of an Air Source and a Solar Boosted Heat Pump Water Heater. *Destination Renewables – ANZSES*.

บรรณานุกรม

- Backus, C. E. 1976. Solar Cell. **New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc.**
- Culprit design. 2018. PV-Thermal. [Online]. Available <http://zerocarbonsolution.co.uk/technology/pv-thermal/>.
- Faherbruch, A. L. and Bube. R. H. 1983. Fundamentals of Solar Cell. **New York, NY: Academic Press.**
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Ibrahim, A. & Kazem, H. A. 2014. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. **Energy Conversion and Management**, 78(641-651).
- Hawladar, M. N. A., Chou, S. K. & 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. & Chyng, J. P. 2005. Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater. **Solar Energy**, 78(3), 375-381.
- Ji, J., Pei, G., Chow, T.-t., Liu, K., He, H., Lu, J. & Han, C. 2008. Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. **Solar Energy**, 82(1), 43-52.
- Nuntaphan, A., Chansena, C. & Kiatsirirot, T. 2009. Performance analysis of solar water heater combined with heat pump using refrigerant mixture. **Applied Energy**, 86(5), 748-756.
- Techato, K. 2012. Heat Pump Market in Thailand. **Energy Procedia**, 14(9-13).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2561. สถิติพลังงานของประเทศไทย.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2562. การใช้พลังงานของประเทศไทย.
- ชนิดและความหมายของโซลาร์เซลล์หรือเซลล์แสงอาทิตย์. 2557. [Online]. Available <https://solarcellthailand96.com/knowledge/what-solar-cell/>.
- ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2537. การออกแบบระบบพลังงานความร้อน. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นัฐพร ไชยญาติ. 2562. เทคโนโลยีพลังงานทดแทนด้านความร้อน. วิทยาลัยพลังงานทดแทน, 3787962221 MJU iThesis 6115301030 thesis / recv: 27042564 11:30:55 / seq: 19 -

194 มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

บริษัท Leonics. 2558. ความรู้เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์. [Online]. Available

http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php.

แบงค์ ศรีสุข & วิทยา ยงเจริญ. 2556. สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบรับความร้อน. *Journal of Energy Research*, 10(2), 57-70.

วงศ์สุวรรณค์ จันทะบูลย์ & ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2550. การทดสอบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์แผ่นเรียบไม่มีกระจกปิดเป็นอิวาปอเรเตอร์. การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน, (ครั้งที่6) 132-137.

วิศิษฐ์ ชูประเสริฐ & จิตดิน แดงเที่ยง. 2012. การนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบทำน้ำเย็นร่วมกับการใช้ฮีตปั๊มในการผลิตน้ำร้อน. *Journal of Energy Research*, 9(2), 48-59.

สรารุช พลวงษ์ศรี. 2547. เอกสารประกอบการสอน เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สิริชัย ปัญญาสมาธิ. 2548. การปรับปรุงประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	Mr. Piyaphone Mungkhaly
เกิดเมื่อ	22 October 1995
ประวัติการศึกษา	2001-2006 Nongbuathongtay Elementary School, Vientiane, Laos. 2006 - 2013 Vientiane High School, Vientiane, Laos. 2013 - 2017 Bachelor of Mechanical Engineering Department at National University of Laos, Vientiane, Laos.
ประวัติการทำงาน	August 1 - 31, 2015, I also had been succesfully completely trained intership Program with Centrale Hydroelectrique Namngum-1 at Vientiane province, Lao PDR. January 1, 2016 - February 25, 2016, I also had been succesfully completely trained intership Program with Centrale Hydroelectrique Namngum-1 at Vientiane province, Lao PDR. 2017 - 2018, I also had been teachers in Mechanical Engineering Department at National University of Laos, Vientiane, Laos.