

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ
ปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์



นฤพนธ์ วันชูเพลา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ
ปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ
ปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์

นฤพนธ์ วันชูเพลา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฬารมณ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์
ชื่อผู้เขียน	นายณฤพนธ์ วันชูเพลา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ พลวงษ์ศรี

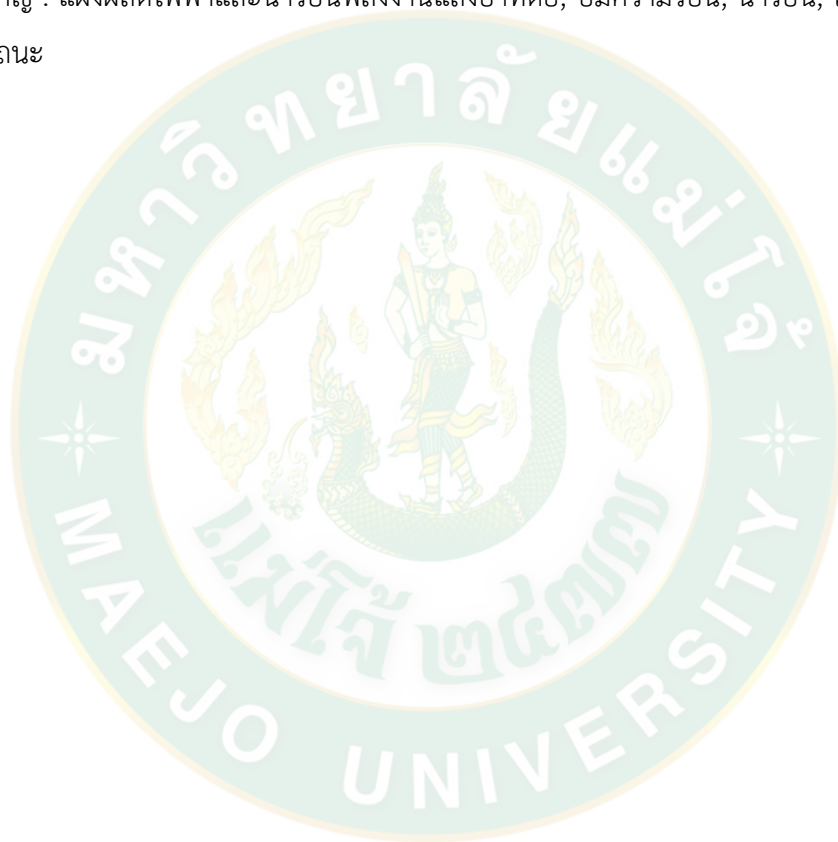
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกขนาดและชนิดของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 65 °C เพื่อใช้ในการลวกและชูดขนสุกรในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกใช้ในการศึกษาหาขนาดระบบที่เหมาะสม พบว่า ระบบที่มีค่าใช้จ่ายน้อยและระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด และสามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามที่ต้องการจะประกอบด้วย แผง Solar PV/T ที่มีกระจกครอบ ชนิด mono-Si PV/T ขนาด 295 W_p/แผง จำนวน 16 แผง ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ที่ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน และถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,500 L เมื่อนำระบบต้นแบบไปติดตั้งใช้งานจริง ณ โรงฆ่าสัตว์และทำการทดสอบหารูปแบบการทำงานที่เหมาะสมในช่วงฤดูหนาว พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min ปั๊มความร้อนเริ่มทำงานเวลา 9:00 น. แผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพรวมและสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงที่สุด คือ 45.20% และ 78.58% ตามลำดับ ปั๊มความร้อนมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน 3.13 kW_{th}/kW_e และใช้เวลาผลิตน้ำร้อนสั้นที่สุด 5 h ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 16.16 kWh/day เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายเวลาเริ่มการทำงานที่เหมาะสมในฤดูร้อนและฤดูฝน พบว่า ในฤดูร้อนควรเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. จะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 5.68 kWh/day สำหรับฤดูฝนควรเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. จะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 20.02 kWh/day

เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งปีของระบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าและระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อน พบว่า ขดลวดไฟฟ้าจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 34,358.75 kWh/year ในขณะที่ระบบที่ติดตั้งใช้งานมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเพียง 4,861.72 kWh/year โดยมีมูลค่าการลงทุน

888,314 Baht คิดเป็นระยะเวลาคืนทุน 6.65 year เมื่อพิจารณาดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEC) และต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร พบว่า มีค่าลดลงจากการใช้งานขดลวดไฟฟ้า โดยระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump มีค่า SEC และค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร 2.05 kWh/ตัว และ 9.30 Baht/ตัว ตามลำดับ ลดลงจากการใช้ขดลวดไฟฟ้าที่มีค่า SEC และค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร เท่ากับ 5.95 kWh/ตัว และ 26.96 Baht/ตัว ตามลำดับ

คำสำคัญ : แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, ป้อนความร้อน, น้ำร้อน, โรงฆ่าสัตว์, สมรรถนะ



Title	PERFORMANCE STUDY OF SOLAR PHOTOVOLTAIC THERMAL HYBRID ASSISTED HEAT PUMP FOR SLAUGHTERHOUSE
Author	Mr. Narupon Wanchupela
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sarawut Polvongsri

ABSTRACT

This research aims to study the performance of the solar photovoltaic thermal hybrid (Solar PV/T) assisted heat pump for a slaughterhouse and the mathematical model was used to select the suitable size and type of solar PV/T hybrid assisted heat pump system for water production about 65 °C in blanching and scraping process at Chiang Dao Municipality slaughterhouse. The mathematical model was used to analyze the optimum system with the lowest cost and fastest payback time. The optimum system was able to produce hot water consist of 16 panels of 295 W_p mono-Si PV/T together with a 17.8 kW_{th} heat pump using R-134a as the working fluid and the size of the hot water storage tank was 2,500 liters.

When the prototype system was installed in the slaughterhouse and investigated for the best working pattern during winter, it was found that the heat pump starts working at 9:00 AM and the water flow rate through the Solar PV/T panel was operated at 32.5 L/min. The Solar PV/T panel had the highest net efficiency and Performance Ratio (PR) was 45.20% and 78.58%, respectively. The heat pump had Energy Efficiency Ratio (EER) of 3.13 kW_{th}/kW_e and the shortest hot water production time was 5 hours. The minimum use of electricity from the grid utility was 16.16 kWh/day. Moreover, the mathematical models were used to predict the optimal start-up time in the summer and rainy season and it was found that the heat pump should be turned on at 10:00 AM in summer which consumed the lowest amount of electricity from the grid utility about 5.68 kWh/day. For the rainy season,

the heat pump should be turned on at 9:00 AM with the least electricity use from the grid system about 20.02 kWh/day.

When comparing the yearly electricity consumption of the electric heater and solar PV/T hybrid assisted heat pump system, it was found that the electric heater consumed the electricity from the grid utility about 34,358.75 kWh/year while the solar PV/T hybrid assisted heat pump system uses electricity from grid utility only 4,861.72 kWh/year by using the investment of 888,314 Baht, the payback period of 6.65 years. For the Specific Electricity Consumption (SEC) and the electricity cost per number of pigs, it was found that Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump system has SEC and the electricity cost per number of pigs. 2.05 kWh/head and 9.30 Baht/head, respectively, decreased from the use of electric heater that was equal to 5.95 kWh/head and 26.96 Baht/head, respectively.

Keywords : Solar PV/T, Heat Pump, Hot Water, Slaughterhouse, Performance

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ พลวงษ์ศรี ที่ให้ความกรุณามาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และให้คำปรึกษา ความรู้ แนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนคำแนะนำในการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ให้ความกรุณามาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และได้ชี้แนะวิธีการดำเนินงาน และคำแนะนำในการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรณิศร์ ตีทยายาท ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาชี้แนะและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ทูสนันสนุนงานวิจัย จากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ และขอบคุณโครงการการลดต้นทุนกระบวนการผลิตของโรงฆ่าสัตว์ต้นแบบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

ขอขอบพระคุณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับข้อมูลและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

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

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ นายมรกต วันชูเพลลา นางพัชรินทร์ วันชูเพลลา นางสาวพิมลพรรณ วันชูเพลลา และนางสาวชนากานต์ บัวศรี สำหรับกำลังใจและคอยสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา รวมทั้งเพื่อน พี่ น้อง จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน โดยเฉพาะ Mr. Saysana Chanthaseng นายศุภกิตต์ นิลขาว นางสาวภัทรภรณ์ อัจจุลสา นายเทพประสิทธิ์ ญาติสันเทียะ นายธนวัฒน์ นิลขาว นายธีรพันธุ์ แสงสุวรรณ และนายจักรารัฐ นิลทา สำหรับการสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน

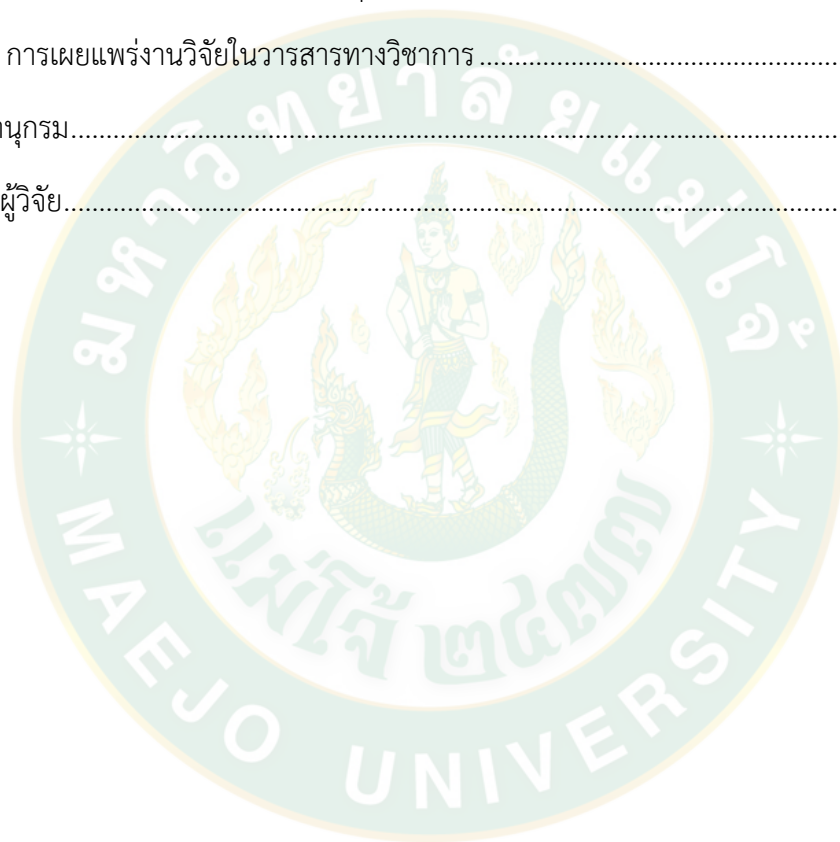
นฤพนธ์ วันชูเพลลา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	4
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	6
แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	8
ปั๊มความร้อน.....	10
ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน.....	11
การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	24
ปั๊มความร้อน	25
อินเวอร์เตอร์	26
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	26
ถังเก็บน้ำร้อน	27
ปั๊มสำหรับหมุนเวียนน้ำ	28
เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล.....	29
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	33
ศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว	34
ทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน	34
ออกแบบและติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump	36
ทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump.....	37
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	40
4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว	40
4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน	45
ผลการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T	45
ผลการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน	53
4.3 ผลการออกแบบและติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump.....	55
4.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump.....	66
การทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T	66
การทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน	80
การทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์	94
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	110

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย.....	111
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณ.....	113
ภาคผนวก ข. การเผยแพร่งานวิจัย.....	127
การเผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ.....	128
การเผยแพร่งานวิจัยในวารสารทางวิชาการ.....	141
บรรณานุกรม.....	158
ประวัติผู้วิจัย.....	160



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
ตารางที่ 2 ป้อนน้ำที่ใช้ในการศึกษาระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump	28
ตารางที่ 3 เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	30
ตารางที่ 4 เงื่อนไขในการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T	38
ตารางที่ 5 เงื่อนไขในการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน	39
ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของสมการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่แผง Solar PV/T ผลิตได้.....	52
ตารางที่ 7 สมรรถนะของแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อนจากการทดสอบ	56
ตารางที่ 8 มูลค่าการลงทุนเริ่มต้นและผลประโยชน์รายปีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปี.....	62
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	64
ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์	100
ตารางที่ 11 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump เปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว	109

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
ภาพที่ 2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	7
ภาพที่ 3 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	8
ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของแผง Solar PV/T.....	9
ภาพที่ 5 การทำงานของวงจรถักไอ.....	10
ภาพที่ 6 ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump.....	12
ภาพที่ 7 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนร่วมพลังงานแสงอาทิตย์	14
ภาพที่ 8 ระบบแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบกรณีหมุนเวียนน้ำแบบบังคับและกรณี หมุนเวียนน้ำตามธรรมชาติ.....	15
ภาพที่ 9 แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบ	16
ภาพที่ 10 แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	17
ภาพที่ 11 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 18	
ภาพที่ 12 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริม.....	19
ภาพที่ 13 ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนให้ความร้อนเสริม เมื่อสารทำงานในตัวรับรังสี อาทิตย์เป็นสารละลายเงินนาโน.....	21
ภาพที่ 14 mono-Si PV/T.....	24
ภาพที่ 15 poly-Si PV/T	25
ภาพที่ 16 ปั๊มความร้อน	25
ภาพที่ 17 อินเวอร์เตอร์	26
ภาพที่ 18 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	27
ภาพที่ 19 ถังเก็บน้ำร้อน	27
ภาพที่ 20 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	34

ภาพที่ 21 การทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T.....	36
ภาพที่ 22 แผนภาพการติดตั้งระบบและจุดตรวจวัดข้อมูล	37
ภาพที่ 23 โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว	40
ภาพที่ 24 อ่างลวกสุกร	41
ภาพที่ 25 รายได้และรายจ่ายของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวในปี พ.ศ. 2561.....	42
ภาพที่ 26 พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวในปี พ.ศ. 2561	43
ภาพที่ 27 กำลังไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้า	44
ภาพที่ 28 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรของขดลวดไฟฟ้า.....	44
ภาพที่ 29 กำลังไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้าในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562.....	45
ภาพที่ 30 ความร้อนที่ผลิตได้จากแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T.....	46
ภาพที่ 31 สมรรถนะทางความร้อนของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T	47
ภาพที่ 32 สภาพอากาศและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง mono-Si PV/T.....	48
ภาพที่ 33 สภาพอากาศและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง poly-Si PV/T.....	48
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผง mono-Si PV/T ตามช่วงของค่ารังสีอาทิตย์	50
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผง poly-Si PV/T ตามช่วงของค่ารังสีอาทิตย์	50
ภาพที่ 36 อุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของ mono-Si PV/T จากการทดสอบและสมการทำนาย ...	51
ภาพที่ 37 อุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของ poly-Si PV/T จากการทดสอบและสมการทำนาย	51
ภาพที่ 38 ประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	52
ภาพที่ 39 ผลการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน.....	53
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานกับผลต่างของอุณหภูมิน้ำ ในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม	54
ภาพที่ 41 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนจากการทดสอบและสมการทำนาย.....	54
ภาพที่ 42 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2562.....	57

ภาพที่ 43 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำถังเก็บน้ำร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีใช้แผง mono-Si PV/T.....	58
ภาพที่ 44 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำถังเก็บน้ำร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีใช้แผง poly-Si PV/T	59
ภาพที่ 45 ค่ารังสีอาทิตย์ตลอดปีของจังหวัดเชียงใหม่	60
ภาพที่ 46 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดปีของจังหวัดเชียงใหม่	60
ภาพที่ 47 พลังงานไฟฟ้ารายเดือนจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน	61
ภาพที่ 48 ผลประหยัดค่าไฟฟ้ารายเดือน	62
ภาพที่ 49 ระยะเวลาคืนทุนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปี	63
ภาพที่ 50 ผลการติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump.....	65
ภาพที่ 51 การทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump	65
ภาพที่ 52 ค่ารังสีอาทิตย์ในการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T.....	66
ภาพที่ 53 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T	67
ภาพที่ 54 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่อัตราการไหล 27.5 L/min	68
ภาพที่ 55 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่อัตราการไหล 32.5 L/min	68
ภาพที่ 56 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่อัตราการไหล 37.5 L/min	69
ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้แผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 27.5 L/min.....	70
ภาพที่ 58 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้แผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 32.5 L/min.....	70
ภาพที่ 59 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้แผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 37.5 L/min.....	71

ภาพที่ 60 ประสิทธิภาพทางความร้อน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของ แผง Solar PV/T จากการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T.....	72
ภาพที่ 61 สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากการปรับอัตราการไหล ของน้ำผ่าน แผง Solar PV/T.....	73
ภาพที่ 62 อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการ ไหล 27.5 L/min	74
ภาพที่ 63 อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการ ไหล 32.5 L/min	74
ภาพที่ 64 อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการ ไหล 37.5 L/min	75
ภาพที่ 65 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำผ่าน แผง Solar PV/T 27.5 L/min	75
ภาพที่ 66 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำผ่าน แผง Solar PV/T 32.5 L/min	76
ภาพที่ 67 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำผ่าน แผง Solar PV/T 37.5 L/min	76
ภาพที่ 68 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยของปั๊มความร้อนจากการปรับอัตราการไหล ของน้ำ ผ่านแผง Solar PV/T	77
ภาพที่ 69 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 27.5 L/min	78
ภาพที่ 70 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min	79
ภาพที่ 71 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 37.5 L/min	79
ภาพที่ 72 สัดส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าจากระบบ ไฟฟ้าพื้นฐาน ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ทั้ง 3 ค่า.....	80
ภาพที่ 73 ค่ารังสีอาทิตย์ของการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน	81

ภาพที่ 74 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมของการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน.....	81
ภาพที่ 75 อัตราความร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน เมื่อทำการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น.	82
ภาพที่ 76 อัตราความร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน เมื่อทำการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น.	83
ภาพที่ 77 อัตราความร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน เมื่อทำการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น.	83
ภาพที่ 78 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น.....	84
ภาพที่ 79 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น.....	85
ภาพที่ 80 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น.....	85
ภาพที่ 81 สัดส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลาต่างกัน.....	86
ภาพที่ 82 ประสิทธิภาพทางความร้อน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T จากการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน.....	86
ภาพที่ 83 สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากการปรับเวลาเริ่มทำงาน ของปั๊มความร้อน.....	87
ภาพที่ 84 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนจากการปรับเวลาเริ่มทำงาน ของปั๊มความร้อน.....	87
ภาพที่ 85 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของวันที่เป็นตัวแทนของฤดูร้อนและฤดูฝน	89
ภาพที่ 86 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในฤดูร้อน.....	89
ภาพที่ 87 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. ในฤดูร้อน.....	90

ภาพที่ 88 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในฤดูร้อน.....	90
ภาพที่ 89 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในฤดูฝน.....	91
ภาพที่ 90 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. ในฤดูฝน.....	91
ภาพที่ 91 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในฤดูฝน.....	92
ภาพที่ 92 พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของตัวแทนฤดูร้อนและฤดูฝน จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์.....	93
ภาพที่ 93 พลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยในแต่ละวัน	94
ภาพที่ 94 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อนตลอด 7 วัน	96
ภาพที่ 95 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากแผง Solar PV/T และกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานตลอด 7 วัน.....	97
ภาพที่ 96 ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T และสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า พลังงาน แสงอาทิตย์ตลอด 7 วัน	98
ภาพที่ 97 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนตลอด 7 วัน.....	98
ภาพที่ 98 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและจำนวนสุกรจากการทดสอบ สมรรถนะของระบบใน การใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์	100
ภาพที่ 99 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรจากการทดสอบ สมรรถนะ ของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์	101
ภาพที่ 100 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนมกราคม.....	102
ภาพที่ 101 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในเดือนกุมภาพันธ์.....	103
ภาพที่ 102 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในเดือนมีนาคม	103

ภาพที่ 103 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในเดือนเมษายน 104

ภาพที่ 104 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนพฤษภาคม 104

ภาพที่ 105 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนมิถุนายน 105

ภาพที่ 106 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนกรกฎาคม 105

ภาพที่ 107 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนสิงหาคม 106

ภาพที่ 108 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนกันยายน 106

ภาพที่ 109 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนตุลาคม 107

ภาพที่ 110 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนพฤศจิกายน 107

ภาพที่ 111 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนธันวาคม 108

ภาพที่ 112 พลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าที่ขดลวดไฟฟ้าใช้ตลอดทั้งปี 108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การบริโภคเนื้อสุกรในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี จากสถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี พ.ศ. 2561 พบว่า ช่วงปี พ.ศ. 2556-2560 ประเทศไทยมีการผลิตสุกรเพิ่มขึ้น 9.42% ต่อปี เนื่องจากความต้องการบริโภคภายในประเทศยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) ทำให้การผลิตเนื้อสุกรจำเป็นต้องมีโรงฆ่าสัตว์ที่ได้มาตรฐานในการผลิตเพื่อควบคุมคุณภาพเนื้อสุกรให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค สะอาด และปราศจากอันตรายจากสารตกค้าง โรงฆ่าสัตว์ที่ผลิตเนื้อสุกรเป็นกิจการทางการเกษตรรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้พลังงานปริมาณมาก โดยเฉพาะในขั้นตอนการลวกสุกรเพื่อทำการชำแหละ เครื่องลวกสุกรส่วนใหญ่นิยมใช้ขดลวดไฟฟ้าในการต้มน้ำเนื่องจากสะดวกในการใช้งาน โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ เป็นโรงฆ่าสัตว์ที่มีการใช้ขดลวดไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 15 kW ในการต้มน้ำเพื่อใช้ในขั้นตอนการลวกสุกร มีอัตราการใช้น้ำร้อนประมาณ 2,500 L/day อุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการประมาณ 65 °C ใช้เวลาในการต้มน้ำประมาณ 7.5 h จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2561 พบว่าต้นทุนค่าไฟฟ้าเป็นต้นทุนหลักของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว โดยมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปี 237,933.72 Baht/year คิดเป็นค่าเฉลี่ย 19,827.81 Baht/month และเมื่อพิจารณารายรับและรายจ่ายพบว่า มีรายจ่ายรวม 2,181,104.75 Baht ขณะที่มีรายได้จากค่าเชือดสุกรรวม 1,469,880.00 Baht จากข้อมูลดังกล่าวหากสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและลดระยะเวลาในขั้นตอนการเตรียมน้ำเพื่อลวกสุกรลงได้ จะสามารถช่วยลดต้นทุนและประหยัดเวลาในการผลิตเนื้อสุกรให้กับโรงฆ่าสัตว์

ปั๊มความร้อน (Heat pump) เป็นอุปกรณ์ผลิตความร้อนสมรรถนะสูง ที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตน้ำร้อน โดยนำแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำจากอากาศแวดล้อมมาทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ โดยใช้หลักการทำงานของวัฏจักรอัดไอ (Vapor compression cycle) จากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดไฟฟ้าและปั๊มความร้อน พบว่าเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าประมาณ 2 เท่า และจะสามารถประหยัดเพิ่มขึ้นอีก ถ้าวัดการสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนโดยการเพิ่มความหนาของฉนวนกันความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อน (อาทิตย์, 2543) การนำปั๊มความร้อนมาใช้ทดแทนขดลวดไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

ข้อมูลจากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยระบุว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าประมาณ 17.6 MJ/m²·day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560a) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์สูง เหมาะแก่การใช้งานเป็นพลังงานทางเลือก ทั้งในรูปแบบของการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเทคโนโลยีสำหรับผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic/thermal panel, Solar PV/T) เป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อน โดยความร้อนที่ได้รับจะอยู่ในรูปของน้ำร้อน เป็นการประยุกต์ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV panel) ร่วมกับหลักการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่อุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงจากค่ามาตรฐานที่ระบุไว้ น้ำที่นำมาระบายความร้อนจะช่วยลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าการใช้น้ำระบายความร้อนทำให้แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 6% (Kazem, 2019)

ดังนั้นหากสามารถผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนเพื่อลวกสุกร รวมทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวลงได้ และถ้าประยุกต์ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนร่วมกับปั๊มความร้อน จะสามารถลดภาระในการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนได้ โดยนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ร่วมกับการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในลักษณะแบ่งปันโหลดผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน (Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump) เพื่อนำมาใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้าสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว โดยเลือกระบบที่สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์และมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนและรูปแบบการทำงานที่เหมาะสมสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว
2. เพื่อศึกษาดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกระจกครอบที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิด คือ ซิลิคอนผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon) ขนาดกำลังไฟฟ้าประมาณ 295 W_p/panel และซิลิคอนผลึกรวม (polycrystalline silicon) ขนาดกำลังไฟฟ้าประมาณ 270 W_p/panel เพื่อเลือกชนิดที่เหมาะสมต่อการทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

2. ทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนตาม ASHRAE STANDARD 93-2003 และการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

3. ใช้ถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนกันการสูญเสียความร้อนสำหรับชั้นตอนลวกหนังเพื่อชุดขนสุกรขนาดประมาณ 2,500 L

4. ใช้ปั๊มความร้อนที่ใช้แหล่งความร้อนจากอากาศ ขนาดประมาณ 17.8 kW_{th} ที่มี R-134a เป็นสารทำงาน

5. ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ผ่านแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างน้อย 3 ค่า ในช่วงอัตราการไหลประมาณ 27.5-37.5 L/min

6. ทำการปรับช่วงเวลาเริ่มการทำงานของปั๊มความร้อนอย่างน้อย 3 ช่วงเวลา เพื่อให้ได้รูปแบบที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเหมาะสมกับการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

7. ทำการทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

2. ได้รูปแบบการทำงานที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

3. สามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวและทราบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แผงเซลล์แสงอาทิตย์

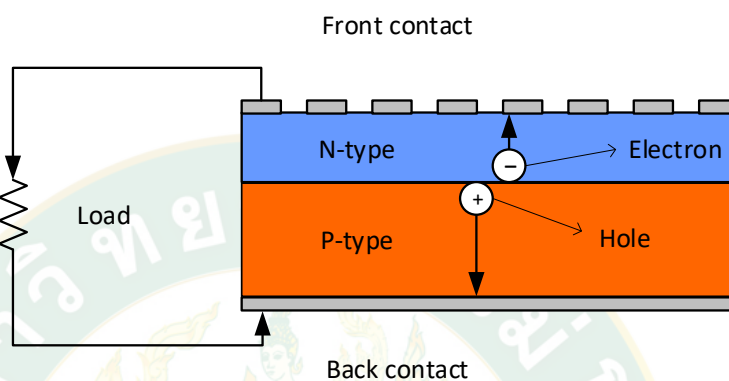
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์รวมกัน ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์นั้นประกอบขึ้นโดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมสารอื่นเข้าไป สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) จะมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี เพราะอิเล็กตรอนวงนอกจะจับตัวรวมกัน โดยใช้ อิเล็กตรอนร่วมกัน เพื่อให้เกิดภาวะเสถียรเสมือนมีอิเล็กตรอนวงนอก 8 ตัว จึงไม่เหมาะต่อการใช้งาน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการเติมสารอื่นเข้าไปเพื่อให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าที่ดีกว่าเดิม เหมาะกับการใช้งาน โดยการเติมสารหรือที่เรียกกันทับศัพท์ว่า การโด๊ป (Doping) ซึ่งจะมีได้ 2 ลักษณะ คือ

เติมสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว เช่น โบรอน หรือแกเลียมลงไป ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอน คือ จะมีที่ว่างของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) มากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ ด้วยเหตุที่โฮลมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าบวกและเป็นพาหะส่วนใหญ่ของสาร ส่วนอิเล็กตรอนจะเป็นพาหะส่วนน้อย เราจึงเรียกสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิด P (P-type Semiconductor)

เติมสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว เช่น สารหนู หรือฟอสฟอรัสลงไป ทำให้เกิดสภาวะมีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าจำนวนของโฮล ด้วยเหตุที่อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าลบและเป็นพาหะส่วนใหญ่ ส่วนโฮลเป็นพาหะส่วนน้อยของสารเราจึงเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N (N-type Semiconductor)

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N มาเชื่อมต่อกัน จะเกิดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลบริเวณใกล้เคียงกัน โดยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด N จะรวมตัวกับโฮลของสารกึ่งตัวนำชนิด P ทำให้อะตอมบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิด N จะขาดอิเล็กตรอนไปเกิดเป็นสภาวะเป็นประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งจะต้านการเคลื่อนที่ของโฮล ในขณะที่อะตอมบริเวณรอยต่อของสาร P จะมีอิเล็กตรอนเกินมา ทำให้มีประจุไฟฟ้าลบซึ่งจะผลักอิเล็กตรอนอิสระที่จะวิ่งข้ามมาทางฝั่งของสาร P บริเวณดังกล่าวจึงเป็นบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) โดยจะเสมือนกำแพงกันไม่ให้ อิเล็กตรอนและโฮลของอะตอมอื่น ๆ ภายในสารกึ่งตัวนำมารวมกัน ถ้าต้องการให้พาหะทั้งสองฝั่งมารวมตัวกัน จะต้องให้แรงดันไฟฟ้าแก่สารให้มากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งเกิดจากประจุบริเวณรอยต่อ โดยถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากซิลิคอน ระดับแรงดันดังกล่าวจะอยู่ประมาณ 0.7 V (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560)

เมื่อแสงในรูปของโฟตอน (photon) มาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานของแสงจะแบ่งแยกคู่ของอิเล็กตรอน-หลุม (electron-hole pairs) ออกจากกัน ซึ่งทำให้เกิดเป็นหลุมว่างและอิเล็กตรอนอิสระ ถ้าเราจัดหาเส้นทางภายนอกให้อิเล็กตรอนเดินทางไปด้วยด้าน P จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

พิจารณากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จากสมการที่ 1

$$P_{PV} = I V$$

สมการที่ 1

เมื่อ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (W) I คือ กระแสไฟฟ้า (A) และ V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

พิจารณาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด สามารถคำนวณจากสมการที่ 2

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{I_T A_{PV}}$$

สมการที่ 2

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ (W/m^2) A_{PV} คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2)

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน IEC 61724 จะทำการประเมินโดยมีการพิจารณาดังต่อไปนี้

ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าด้านกระแสตรงที่ได้จากระบบ (Array yield, Y_A) หาได้จากสมการที่ 3

$$Y_A = \frac{E_{DC}}{P_0}$$

สมการที่ 3

ผลผลิตสุดท้ายของระบบ (Final yield, Y_F) หาได้จากสมการที่ 4

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_0} \quad \text{สมการที่ 4}$$

ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎี (Reference yield, Y_R) หาได้จากสมการที่ 5

$$Y_R = \frac{H_t}{G_{STC}} \quad \text{สมการที่ 5}$$

สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Performance Ratio, PR) หาได้จากสมการที่ 6

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad \text{สมการที่ 6}$$

พลังงานสูญเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Capture losses, L_C) หาได้จากสมการที่ 7

$$L_C = Y_R - Y_A \quad \text{สมการที่ 7}$$

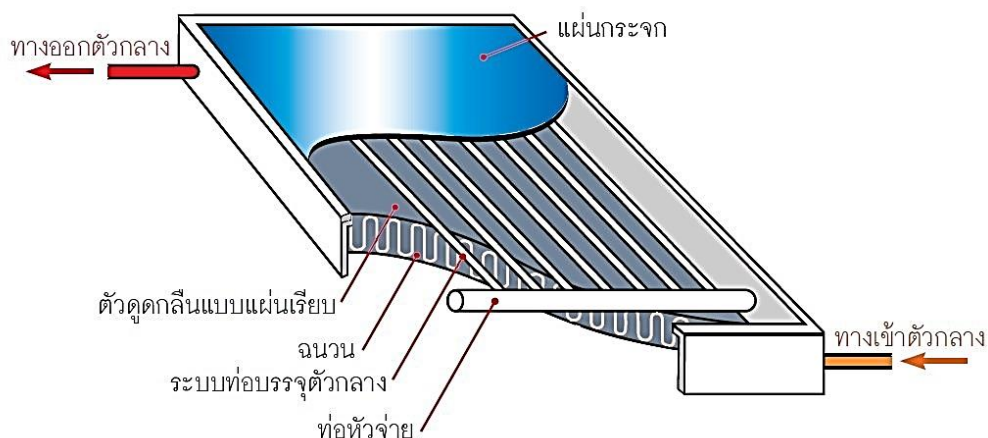
พลังงานสูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (System losses, L_S) หาได้จากสมการที่ 8

$$L_S = Y_A - Y_F \quad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อ E_{DC} คือ พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากระบบ (kWh) E_{AC} คือ พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จากระบบ (kWh) P_0 คือ กำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของระบบ (kW_p) H_t คือ พลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m^2) และ G_{STC} คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ ($1 kW/m^2$)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) เป็นอุปกรณ์หลักซึ่งทำหน้าที่ผลิตความร้อนให้กับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากรังสีอาทิตย์จะถูกถ่ายโอนให้กับของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ น้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะถูกเก็บในถังเก็บน้ำร้อน และนำไปใช้งานต่อไป ระบบผลิตน้ำร้อนที่ดีต้องมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนสูงและสามารถจ่ายความร้อนนั้นไปยังผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดเท่าที่จะทำได้ ส่วนประกอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบจะแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557)

สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยจะพิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state condition) ที่ขณะใด ๆ ซึ่งพิจารณาดังนี้ (นัฐพร, 2561)

$$Q_{\text{Solar}} = Q_{\text{Coll}} - Q_{\text{Loss}} \quad \text{สมการที่ 9}$$

$$A_{\text{Coll}} (\tau\alpha)_e I_T = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i}) + U_L A_{\text{Coll}} (T_p - T_a) \quad \text{สมการที่ 10}$$

อัตราการความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้รับจัดรูปเป็นสมการใหม่ได้ว่า

$$Q_{\text{Coll}} = A_{\text{Coll}} [(\tau\alpha)_e I_T - U_L (T_p - T_a)] \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ Q_{Solar} คือ อัตราพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน (W) Q_{Coll} คือ อัตราความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้รับ (W) Q_{Loss} คือ อัตราการสูญเสียความร้อน (W) A_{Coll} คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2) $(\tau\alpha)_e$ คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ I_T คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2) \dot{m}_f คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s) C_{p_f} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) $T_{f,o}$ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$) $T_{f,i}$ คือ อุณหภูมิของของไหลที่เข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$) U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) T_p คือ อุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$) และ T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

ในทางปฏิบัติแล้วการวัดอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (T_p) นั้นเป็นไปได้ยาก จึงต้องมีการกำหนดค่าขึ้นมาค่าหนึ่ง คือ ค่าตัวประกอบการดึงความร้อน (Heat removal factor, F_R) เป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ได้จริงต่อพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้ของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถจัดรูปของสมการใหม่ดังนี้

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

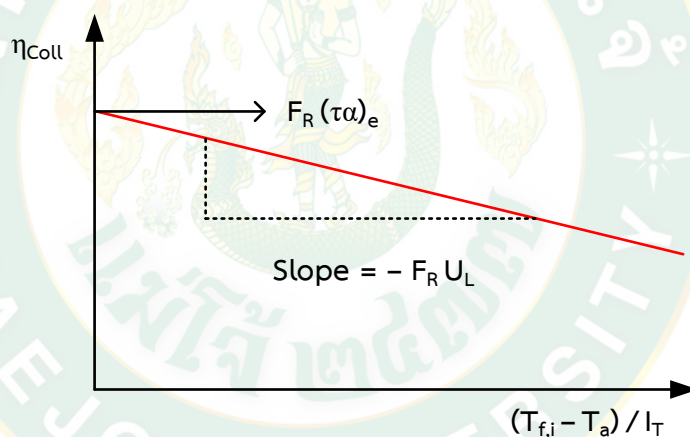
พิจารณาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์จากอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้รับต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ผิวของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะได้ว่า

$$\eta_{\text{Coll}} = \frac{Q_{\text{Coll}}}{I_T A_{\text{Coll}}} \quad \text{สมการที่ 13}$$

หรือ

$$\eta_{\text{Coll}} = F_R (\tau\alpha)_e - \left[F_R U_L \frac{(T_{f,i} - T_a)}{I_T} \right] \quad \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อนำค่า η_{Coll} และ $(T_{f,i} - T_a)/I_T$ มาสร้างแผนภูมิโดยที่ให้แกน y เป็น η_{Coll} และแกน x เป็น $(T_{f,i} - T_a)/I_T$ ดังภาพที่ 3 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองตัวจะอยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยตัวแปร $F_R (\tau\alpha)_e$ คือจุดตัดบนแกน y และความชันของเส้นตรงคือตัวแปร $- F_R U_L$



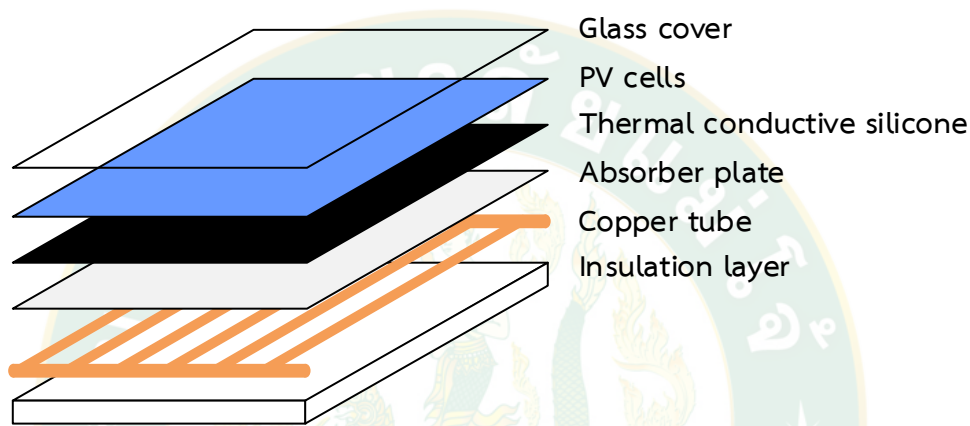
ภาพที่ 3 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{Coll} และ $(T_{f,i} - T_a)/I_T$ มาใช้ในการพิจารณา โดยค่า $F_R U_L$ จะบ่งบอกถึงการสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ถ้ามีค่าสูงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ก็จะมี การสูญเสียความร้อนรวมสูง ส่วนค่า $F_R (\tau\alpha)_e$ บ่งบอก การส่องผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าแสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านและถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าลดลง

ทำให้เกิดแนวคิดที่ต้องการจะลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นที่มาของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนได้ในเวลาเดียวกัน เป็นการประยุกต์ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับหลักการผลิตน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อนำความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำหน้าที่ระบายความร้อน ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน นอกจากนี้ น้ำร้อนที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของแผง Solar PV/T

ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T จะใช้หลักการพิจารณาค้นคว้ากับประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณได้ดังสมการที่ 15 และสมการที่ 16

$$\eta_{th,PV/T} = \frac{Q_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{I_T A_{PV/T}} \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$\eta_{e,PV/T} = \frac{P_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} = \frac{IV}{I_T A_{PV/T}} \quad \text{สมการที่ 16}$$

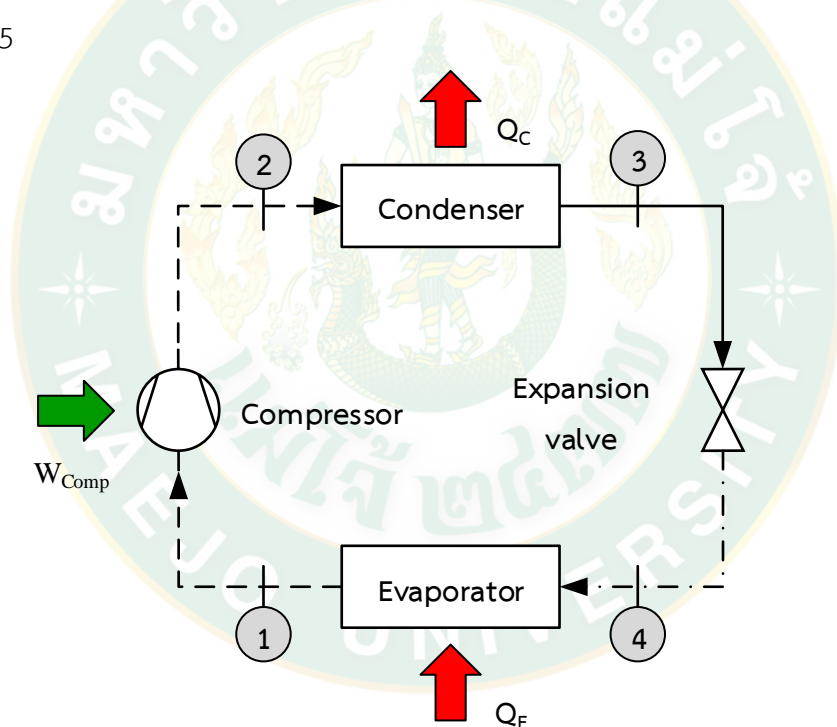
ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T คือ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าและความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 17

$$\eta_{Net,PV/T} = \frac{Q_{PV/T} + P_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad \text{สมการที่ 17}$$

เมื่อ $\eta_{th,PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง Solar PV/T $\eta_{e,PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T $\eta_{Net,PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพรวมของ Solar PV/T $Q_{PV/T}$ คือ อัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ได้รับ (W) $P_{PV/T}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T (W) และ $A_{PV/T}$ คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของแผง Solar PV/T (m^2)

ปั๊มความร้อน

การทำงานของปั๊มความร้อนสามารถอธิบายได้โดยใช้หลักการทำงานของวัฏจักรอัดไอ (Vapor compression cycle) วัฏจักรอัดไอมีลักษณะการทำงาน 2 รูปแบบ คือ การทำความเย็นและการเพิ่มคุณภาพความร้อน ปั๊มความร้อนจัดเป็นวัฏจักรอัดไอในรูปแบบการเพิ่มคุณภาพความร้อน ซึ่งประกอบด้วย เครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องอัดไอ (Compressor) และวาล์วลดความดัน (Expansion valve) หลักการทำงานของปั๊มความร้อนแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การทำงานของวัฏจักรอัดไอ

พิจารณาวัฏจักรอัดไอจากสมการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล โดยสภาวะต่าง ๆ ในระบบคงที่และไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ สมดุลมวลของสารทำงานในวัฏจักรอัดไอแสดงดังสมการที่ 18 (นัฐพร, 2561)

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

สมการที่ 18

ทำการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้แทนอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานแต่ละจุดดังนี้

$$\dot{m}_{\text{ref}} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad \text{สมการที่ 19}$$

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดสารทำงานแบบไอเซนทรอปิกด้วยเครื่องอัดไอ (Isentropic process) ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นพิจารณาที่เครื่องอัดไอ งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอคำนวณได้จากสมการที่ 20

$$W_{\text{Comp}} = \dot{m}_{\text{ref}}(h_2 - h_1) \quad \text{สมการที่ 20}$$

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการคายความร้อนของสารทำงานโดยไอของสารทำงานกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เครื่องควบแน่น เป็นกระบวนการความดันคงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$Q_C = \dot{m}_{\text{ref}}(h_2 - h_3) \quad \text{สมการที่ 21}$$

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการที่สารทำงานสถานะของเหลวถูกลดความดันที่วาล์วลดความดัน เป็นกระบวนการเอนทัลปีคงที่ (Throttling process) ดังนั้นคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$h_3 = h_4 \quad \text{สมการที่ 22}$$

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการที่สารทำงานสถานะของเหลวได้รับความร้อนทำให้เกิดการเดือดการเป็นไอที่เครื่องระเหย เป็นกระบวนการความดันคงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยคำนวณได้จากสมการที่ 23

$$Q_E = \dot{m}_{\text{ref}}(h_1 - h_4) \quad \text{สมการที่ 23}$$

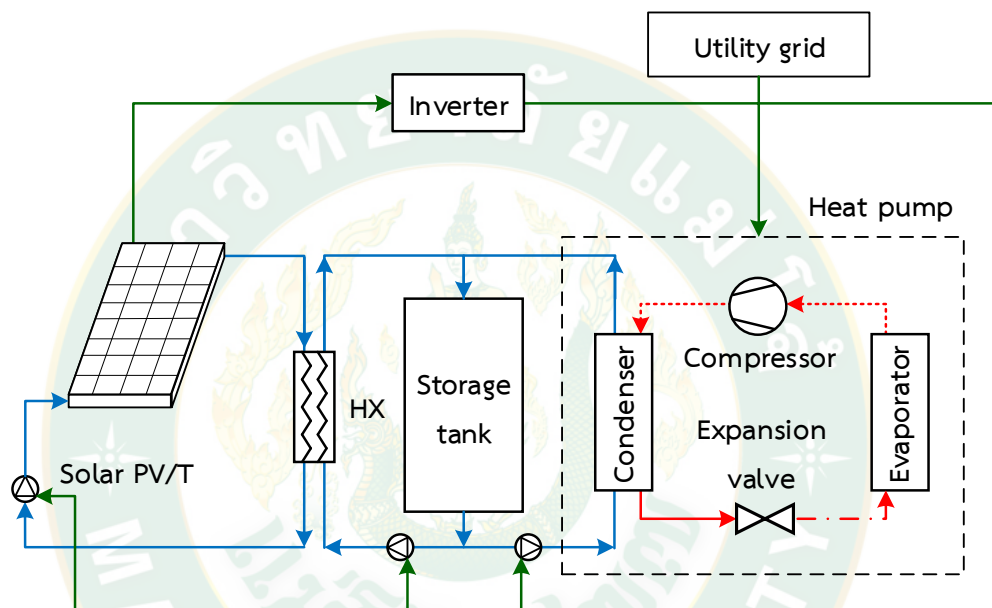
ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency ratio, EER) คือ สัดส่วนของความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_C) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ (P_{Comp}) ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานแสดงดังสมการที่ 24

$$EER = \frac{Q_C}{P_{\text{Comp}}} \quad \text{สมการที่ 24}$$

ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน (Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump) เป็นระบบผลิตน้ำร้อนจากสองแหล่ง คือ ผลิตน้ำร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน การผลิตน้ำร้อนจากแผง Solar PV/T จะใช้ปั๊มน้ำเพื่อไหลเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T ทำให้ได้น้ำร้อนไปถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) และการผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนจะใช้สารทำงาน ทำหน้าที่รับความร้อนจากอากาศแวดล้อมที่เครื่องระเหย จากนั้นจะถูกอัดตัวด้วยเครื่องอัดไอ ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น นำความร้อนไปถ่ายเทให้กับน้ำที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่น สารทำงานเมื่อผ่านเครื่องควบแน่นจะถูกลดความดันที่วาล์วลดความดันเพื่อไปรับความร้อนที่เครื่องระเหยต่อไป น้ำในถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) จะถูก

หมุนเวียนเพื่อไปปรับความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน น้ำร้อนที่ผลิตได้จะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจะใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) อุปกรณ์ในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ประกอบด้วย แผง Solar PV/T อินเวอร์เตอร์ ปั๊มหมุนเวียนน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปั๊มความร้อน และถังเก็บน้ำร้อน แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

พิจารณาระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่สภาวะคงที่ (Steady state condition) อัตราความร้อนที่ได้รับจากแผง Solar PV/T คำนวณได้จากสมการที่ 25

$$Q_{PV/T} = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad \text{สมการที่ 25}$$

พิจารณาที่ถังเก็บน้ำร้อน กรณีถังเก็บน้ำร้อนมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่างดี สามารถคำนวณอัตราความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อนได้รับได้ดังสมการที่ 26

$$Q_{ST} = \frac{M_f C_{p_f} (T_{ST}^{t+\Delta t} - T_{ST}^t)}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 26}$$

เมื่อ Q_{ST} คือ อัตราความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อนได้รับ (W) M_f คือ มวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (kg) $T_{ST}^{t+\Delta t}$ คือ อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}\text{C}$) T_{ST}^t คือ อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาที่พิจารณา ($^{\circ}\text{C}$) และ Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนไป (s)

ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ดังนี้ เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน พัดลมของปั๊มความร้อน ปั๊มน้ำที่ไหลเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T ปั๊มน้ำที่ไหลเวียนน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และปั๊มน้ำที่ไหลเวียนน้ำผ่านปั๊มความร้อน โดย กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบคำนวณจากสมการที่ 27

$$P_{Use,total} = P_{Comp} + P_{Fan} + P_{Pump,PV/T} + P_{Pump,HX} + P_{Pump,HP} \quad \text{สมการที่ 27}$$

เมื่อ $P_{Use,total}$ คือ กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump (W) P_{Comp} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน (W) P_{Fan} คือ กำลังไฟฟ้าที่พัดลมของปั๊มความร้อนใช้ (W) $P_{Pump,PV/T}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มน้ำที่ไหลเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T (W) $P_{Pump,HX}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มน้ำที่ไหลเวียนน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (W) และ $P_{Pump,HP}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มน้ำที่ไหลเวียนน้ำผ่านปั๊มความร้อน (W)

กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานคำนวณได้จากสมการที่ 28

$$P_{Grid} = P_{Use,total} - P_{PV/T,AC} \quad \text{สมการที่ 28}$$

เมื่อ P_{Grid} คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (W) และ $P_{PV/T,AC}$ คือ กำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากแผง Solar PV/T (W)

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คือ ระยะเวลาที่มูลค่าผลตอบแทนจากการดำเนินงาน ในหน่วย Baht/year มีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนเริ่มต้นในหน่วย Baht โดยการคำนวณระยะเวลาคืนทุนที่นิยมใช้คือการคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (Simple payback period) คำนวณได้จากสมการที่ 29

$$\text{ระยะระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนเริ่มต้น}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \quad \text{สมการที่ 29}$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) คือ อัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมดมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายทั้งหมด พิจารณาจากสมการที่ 30

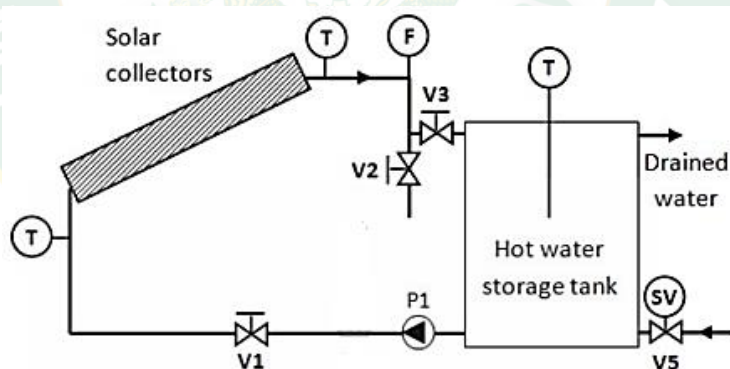
$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{B_n - C_n}{(1 + IRR)^n} - C_0 = 0 \quad \text{สมการที่ 30}$$

ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนของปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในหน่วย kWh ต่อปัจจัยที่มีผลในการใช้พลังงานไฟฟ้า คือ จำนวนสุกร ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะพิจารณาจากสมการที่ 31

$$SEC = \frac{\text{ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า}}{\text{จำนวนสุกร}} \quad \text{สมการที่ 31}$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พงศักดิ์ (2557) ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนร่วมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกระจกครอบด้านหน้า 2 แบบ คือ มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานและระบบที่ไม่มีการระบายความร้อน ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนทั้งกรณีที่มีและไม่มี การระบายความร้อนด้วยน้ำ ระบบทั้ง 2 ชุดมีการเชื่อมต่อกับระบบดังภาพที่ 7 ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอน (Amorphous silicon solar cell) ขนาด 1 m^2 จำนวน 105 แผง ติดตั้งแผงโดยหันหน้าไปทางทิศใต้ ทำมุมกับแนวระนาบ 14° ใช้การหมุนเวียนน้ำแบบบังคับด้วยปั๊มน้ำและเชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 400 L ทำการทดสอบในช่วงเวลา 9:00-17:00 น. ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า โดยระบบที่มีการใช้น้ำระบายความร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ โดยระบบมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.2 kW และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบที่ใช้น้ำและไม่ใช้น้ำระบายความร้อนมีค่าเป็น 1.785% และ 1.618% ตามลำดับ ระบบที่ใช้น้ำระบายความร้อนมีประสิทธิภาพทางความร้อน 21.69% สรุปได้ว่าอุณหภูมิของแผงมีผลต่อการผลิตไฟฟ้า อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.236 kg/s และน้ำร้อนที่ได้มีอุณหภูมิสูงสุด 64°C (พงศักดิ์, 2557)

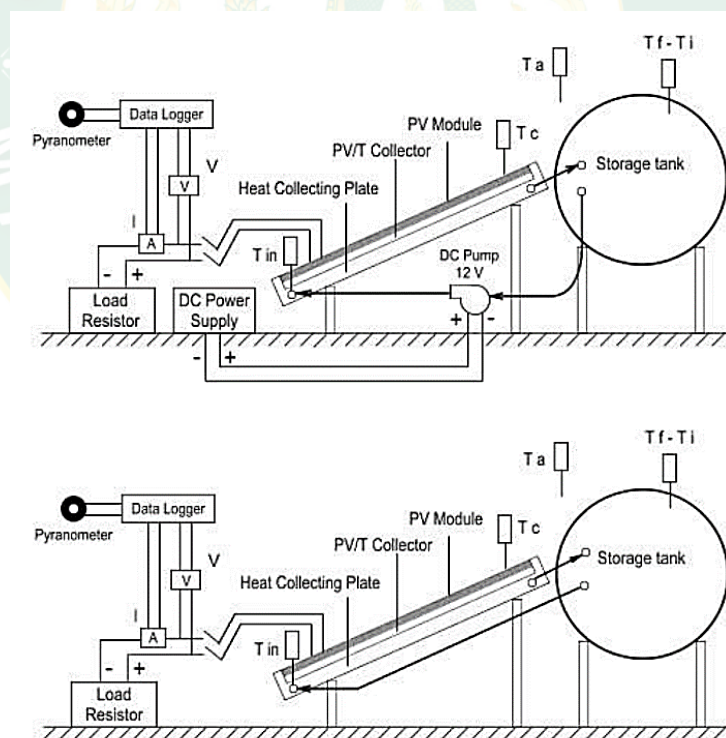


ภาพที่ 7 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนร่วมพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา: (พงศักดิ์, 2557)

เรียวริชัญญ์ และวิทยา (2555) ทำการศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบแบบใช้น้ำถ่ายเทความร้อน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนที่มีขนาดพื้นที่ 0.79 m^2 กำลังไฟฟ้าสูงสุด 40 W นำมาติดตั้งร่วมกับท่อทองแดงที่ยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียม จากนั้นต่อเข้ากับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 120 L ทดสอบระบบ 2 รูปแบบ คือ กรณีหมุนเวียนน้ำแบบบังคับโดยใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็ก และกรณีหมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติ ระบบแสดงดังภาพที่ 8 ติดตั้งแผงผลิตไฟฟ้า

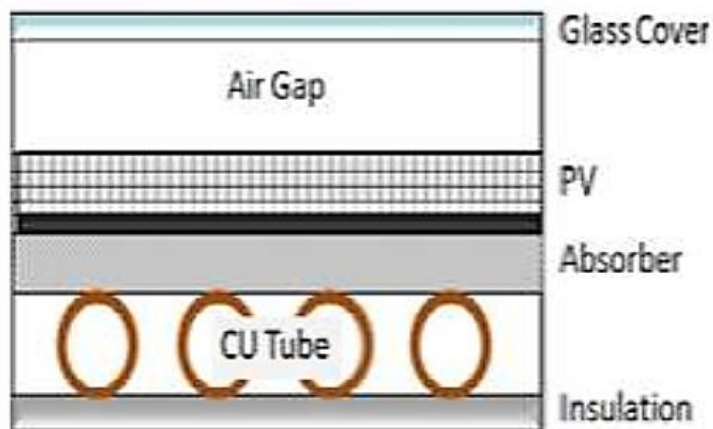
และความร้อนชนิดแผ่นเรียบวางหันไปทางทิศใต้ ทำมุม 15° กับแนวระนาบ เก็บข้อมูลในช่วงเวลา 8:00-16:00 น. ทุก 2 min แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาทำเป็นข้อมูลรายชั่วโมง และข้อมูลรายวัน จากนั้นนำข้อมูลรายวันมาคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า จากการทดสอบพบว่าข้อมูลที่ได้จากกรณีหมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติมีความแปรปรวนมากและได้พลังงานความร้อนน้อย ผลการทดสอบรายวันของกรณีหมุนเวียนน้ำแบบบังคับได้ผลการประสิทธิภาพทางความร้อนและไฟฟ้าของระบบแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบดัดสมการต่อไปนี้ $\eta_{th} = 0.25 - 0.06 [(T_i - T_a) / H]$ และ $\eta_{el} = 0.03 - 0.01 [(T_i - T_a) / H]$ โดย T_i คืออุณหภูมิน้ำเริ่มต้นในถังเก็บน้ำร้อน ($^\circ\text{C}$) T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย ($^\circ\text{C}$) และ H คือ พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยที่แผงได้รับในช่วงเวลาหนึ่ง (MJ) ได้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 25% และได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 3% ส่วนพลังงานที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยอาศัยสมการทั้งสองสมการร่วมกับข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่เดือนธันวาคม 2553 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2554 เป็นระยะเวลา 1 year พลังงานความร้อนที่ได้มีค่าเท่ากับ 1,023 MJ และพลังงานไฟฟ้าที่ได้มีค่าเท่ากับ 127 MJ (เจียรวิชัย และวิทยา, 2555)



ภาพที่ 8 ระบบแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบกรณีหมุนเวียนน้ำแบบบังคับและกรณีหมุนเวียนน้ำตามธรรมชาติ

ที่มา: (เจียรวิชัย และวิทยา, 2555)

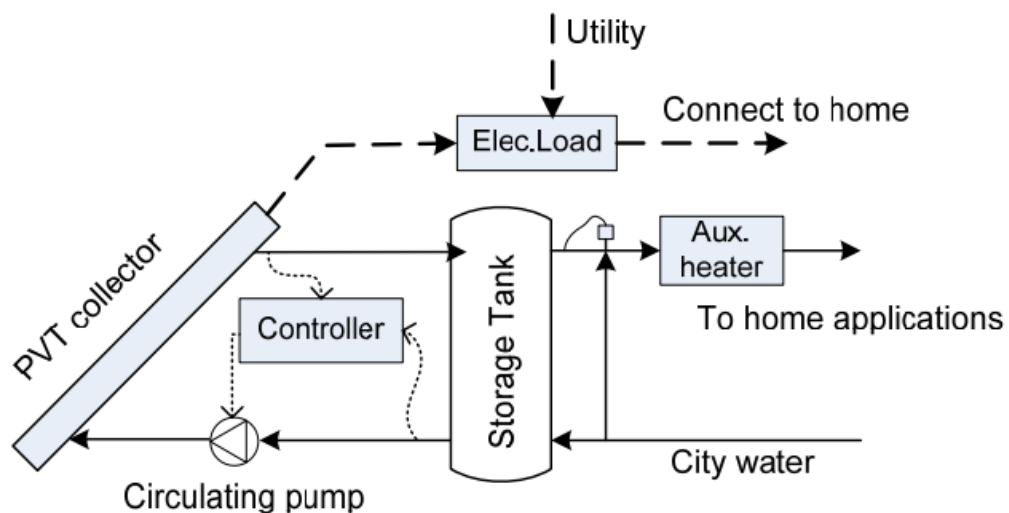
แบนค์ และวิทยา (2556) ศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผงรับความร้อนแบบใช้น้ำเป็นตัวถ่ายเทความร้อนของระบบ แสดงดังภาพที่ 9 สร้างแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน ขนาด 0.79 m^2 กำลังไฟฟ้าสูงสุด 40 W ด้านล่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแผ่นอะลูมิเนียมและท่อทองแดงรับความร้อนเชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 80 L อุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบประกอบด้วย เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก เครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ เครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่ และแบตเตอรี่ ติดตั้งระบบบนดาดฟ้าของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร โดยให้แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์วางหันหน้าไปทางทิศใต้ ทำมุมกับแนบระนาบ 15° ทำการทดสอบในช่วงเดือนตุลาคม 2555 กำหนดอัตราการไหลของน้ำคงที่ 1.2 L/min เก็บข้อมูลทุก 2 min จากเวลา $8:00-16:00 \text{ น.}$ เป็นเวลา 10 days ในส่วนการวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยต้องวางจรวดกับตัวต้านทานชนิดไว้วาต์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า จากนั้นคูณกับเวลาที่ดึงประจุออกจากแบตเตอรี่จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพทางความร้อนรายวันเฉลี่ยที่ 40.9% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ารายวันเฉลี่ยที่ 3% เมื่อใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมปี 2553 มาใช้พยากรณ์พลังงานไฟฟ้าและความร้อนพบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนเฉลี่ยได้ 78 Wh/day และ $1,181 \text{ Wh/day}$ ที่อุณหภูมิน้ำร้อน 41.7°C ตามลำดับ (แบนค์ และวิทยา, 2556)



ภาพที่ 9 แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบ

ที่มา: (แบนค์ และวิทยา, 2556)

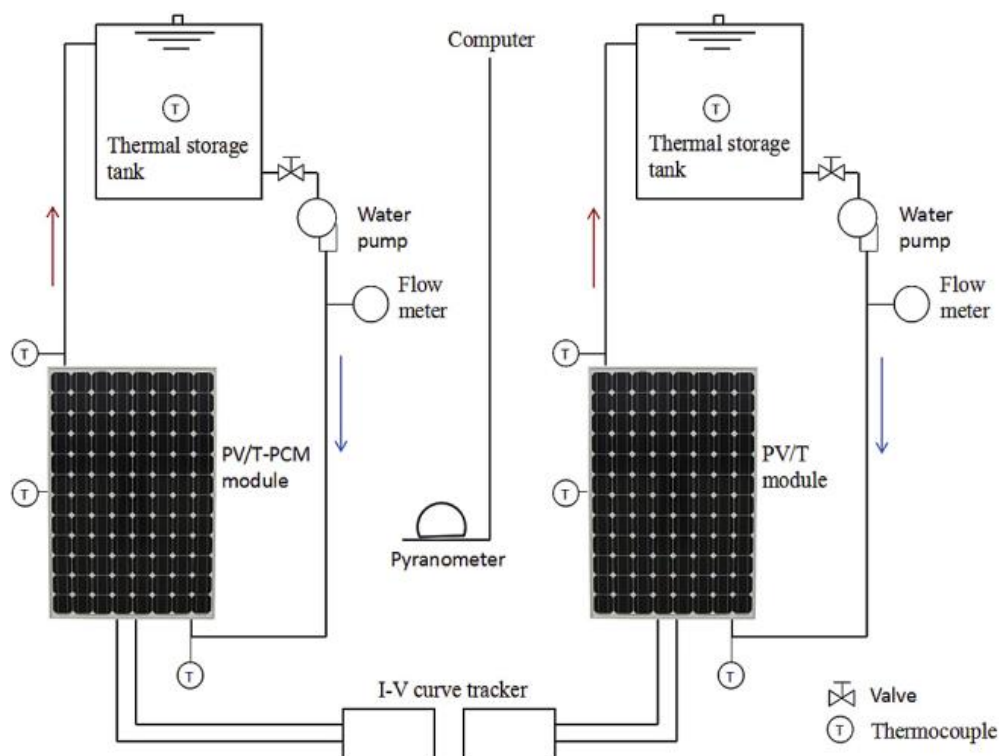
Nualboonrueng et al. (2012) นำเสนอผลการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและชนิดผลึกรวมซิลิคอน เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แผนภาพของระบบแสดงดังภาพที่ 10 ทำการทดสอบกลางแจ้งในภูมิภาคอากาศของกรุงเทพมหานครที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้พลังงานของครอบครัวชาวไทยขนาดกลาง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสะสมความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนนั้นเกือบจะเหมือนกับแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน ในขณะที่การผลิตไฟฟ้าของชนิดผลึกรวมซิลิคอน นั้นมากกว่าชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน 1.2 เท่า ความร้อนสูงสุดที่ได้รับจากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เกิดขึ้นในเดือนมีนาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน จากการทดลองพบว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตความร้อนต่อหน่วยพื้นที่รายปีได้ 1.1×10^3 kWh/m²·year และผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รายปีได้ 55-83 kWh/m²·year การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ตามต้นทุนพลังงานในประเทศไทยซึ่งคาดว่าระยะเวลาคืนทุนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนจะเป็น 7 years และ 14 years สำหรับแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Nualboonrueng et al., 2012)



ภาพที่ 10 แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

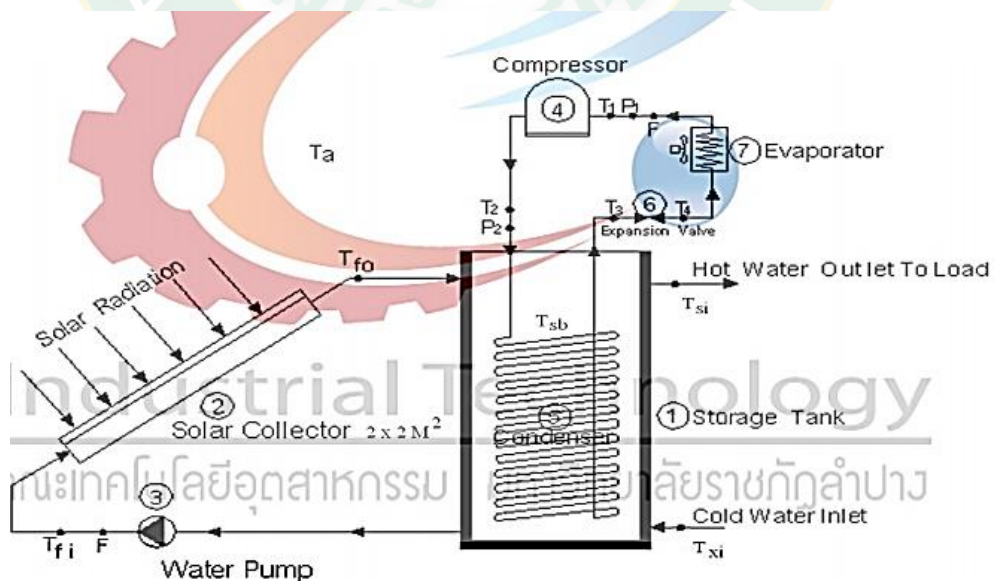
ที่มา: (Nualboonrueng et al., 2012)

Yang et al. (2018) ใช้สารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCMs) ในการเพิ่มสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ แผนภาพของระบบแสดงดังภาพที่ 11 ทำการทดลองโดยการตรวจวัดกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิด้านหลังแผง และอุณหภูมิของน้ำในถัง คำนวณประสิทธิภาพทางความร้อน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพการประหยัพลังงานปฏุมภูมิของทั้งสองระบบ ภายใต้สภาพแวดล้อมในอาคารที่ควบคุมค่ารังสีอาทิตย์ 800 W/m^2 และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ $0.15 \text{ m}^3/\text{h}$ การเพิ่มขึ้นของสารเปลี่ยนสถานะเข้าไปในแผงเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าช่วยลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อไม่มีแสงอาทิตย์ความร้อนที่เก็บไว้ในสารเปลี่ยนสถานะจะถ่ายเทสู่น้ำ จึงเป็นการยืดระยะเวลาการผลิตน้ำร้อนของระบบออกไปอีก ประสิทธิภาพการประหยัพลังงานปฏุมภูมิของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสารเปลี่ยนสถานะเพิ่มขึ้น 14% เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม จากผลการทดลองบ่งชี้ว่าการติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Yang et al., 2018) (Yang และ



ภาพที่ 11 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ
ที่มา: (Yang et al., 2018)

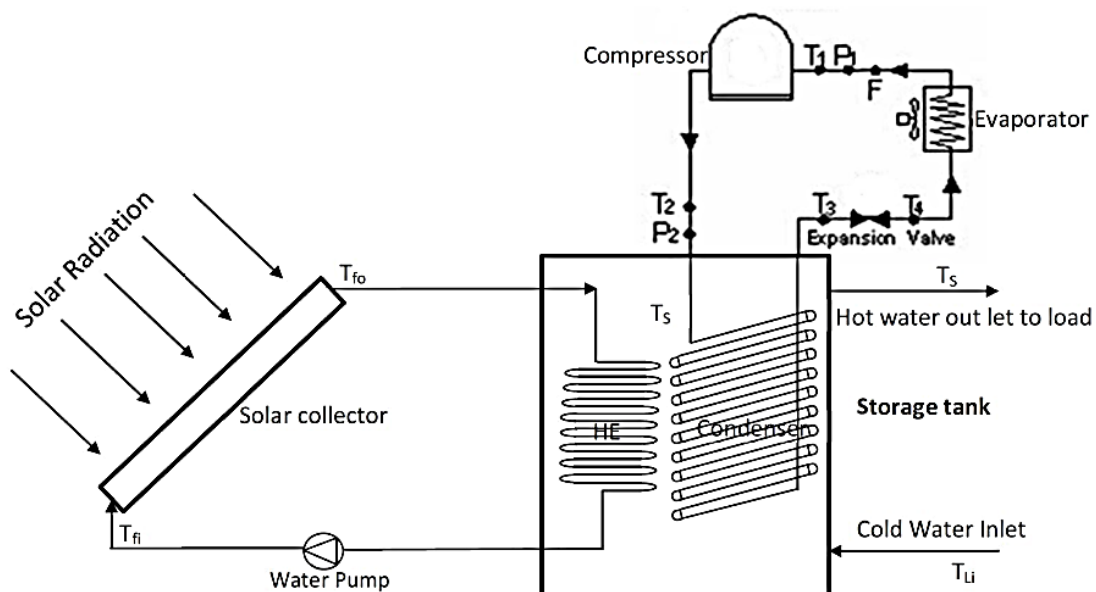
มารุต และคณะ (2552) พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ทำความร้อนเสริม แสดงดังภาพที่ 12 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 2 m^2 จำนวน 2 แผง ต่อขนานกัน มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ 0.8 และ F_{RUL} เท่ากับ $10.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 180 L หุ้มฉนวนอย่างดี ปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-134a ถูกใช้เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้า 380 W อุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการ $55 \text{ }^\circ\text{C}$ เครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนมีลักษณะเป็นชุดท่อทองแดงจุ่มอยู่ในถังเก็บน้ำร้อน มีการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ พิจารณาสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อน สมรรถนะทางความร้อนในรูปของความสามารถในการทำน้ำร้อน และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency ratio, EER) จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิ น้ำของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มจาก $27 \text{ }^\circ\text{C}$ จนถึง $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ใช้เวลามากกว่า 3 h ในขณะที่ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมใช้เวลาเพียง 2.25 h ในกรณีที่ ไม่มีการดึงน้ำไปใช้งาน ในส่วนของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานกรณีมีการดึงน้ำไปใช้งาน จะแปรผกผันกับอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ถ้าน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิต่ำ เครื่องควบแน่นจะ สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำงานและน้ำมีค่ามาก และถ้า มีการดึงน้ำร้อนไปใช้งานในอัตราที่มากจะทำให้อุณหภูมิน้ำมีค่าลดลงจากค่าที่ต้องการ อัตราการดึงน้ำ ไปใช้ในการทดลองนี้คือ 120 kg/h (มารุต และคณะ, 2551)



ภาพที่ 12 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริม

ที่มา: (มารุต และคณะ, 2551)

สรารุช และทนงเกียรติ (2556) ศึกษาศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่มีการใช้ปั๊มความร้อนให้ความร้อนเสริม โดยของไหลที่ไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือ สารละลายเงินนาโน ความเข้มข้นของอนุภาค 10,000 ppm และปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-134a อัตราการใช้ไฟฟ้า 380 W แสดงดังภาพที่ 13 การศึกษาจะใช้โมเดลของตัวรับรังสีอาทิตย์ โมเดลของปั๊มความร้อน และโมเดลการวิเคราะห์พลังงานที่ถึงเก็บน้ำร้อน จำลองการทำงานของระบบ ภายใต้ข้อมูลความต้องการการใช้น้ำร้อนของอาคารแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่ และสภาพภูมิอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ระยะเวลาการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ปั๊มความร้อน รวมถึงปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก ในช่วงที่ปั๊มความร้อนทำงาน จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน ผลการศึกษาพบว่าอัตราความร้อนที่จ่ายให้แก่ถังเก็บน้ำร้อนของกรณีที่ใช้สารละลายเงินนาโนจะมีค่าสูงกว่าและช่วงระยะเวลาการทำงานจะนานขึ้นกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน รวมถึงสามารถลดการทำงานของปั๊มความร้อนในการให้ความร้อนเสริม ทำให้ลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก และเมื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาที่ปั๊มความร้อนทำงานกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารละลายเงินนาโนและกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน พบว่าในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารละลายเงินนาโน ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของปั๊มความร้อนจะมีค่า 412.41 kWh/year เทียบกับ 688.19 kWh/year ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในการทำงานของปั๊มความร้อนได้ปีละ 2,727.81 kgCO₂ ซึ่งสามารถลดมูลค่าความเสียหายแก๊สเรือนกระจกได้ 1,145.68 Baht/year ดังนั้นการใช้สารละลายเงินนาโนเป็นสารทำงานในระบบ จึงมีความเหมาะสมในการลงทุนและยังสามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมลงได้ (สรารุช และทนงเกียรติ, 2556)



ภาพที่ 13 ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนให้ความร้อนเสริม เมื่อสารทำงานในตัวรับรังสีอาทิตย์เป็นสารละลายเงินนาโน
ที่มา: (สราวุธ และทองเกียรติ, 2556)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวข้างต้น ผู้วิจัยสามารถสรุปประโยชน์ที่ได้รับเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
พงศักดิ์ (2557)	การศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลดอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น และส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
เจียรวิชญ์ และวิทยา (2555)	สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบแบบใช้น้ำถ่ายเทความร้อนสำหรับใช้กับบ้านพักอาศัย	ถ้าอุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้นมีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและความร้อนลดลง

ตารางที่ 1 (ต่อ) สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
แบงค์ และวิทยา (2556)	สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบรับความร้อน	แนวทางการพยากรณ์พลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้ตลอดทั้งปีโดยใช้สมการสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
Nualboonrueng et al. (2012)	Field Experiments of PV-Thermal Collectors for Residential Application in Bangkok	แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนผลิตความร้อนได้ใกล้เคียงกับชนิดผลึกรวม แต่ผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่า 1.2 เท่า
Yang et al. (2018)	Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system	การใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มสมรรถนะให้ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะทำให้แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นและยืดระยะเวลาผลิตน้ำร้อนของระบบ
มารุต และคณะ (2552)	โมเดลอย่างง่ายของการทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ที่มีปั๊มความร้อนเสริม	การใช้ปั๊มความร้อนเสริมทำให้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีระยะเวลาการทำงานสั้นลง และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนจะแปรผกผันกับผลต่างของอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

ตารางที่ 1 (ต่อ) สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
สรารุช และทงเกียรติ (2556)	การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมโดยการใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์	สามารถนำโมเดลการทำนายมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้ และการใช้สารละลายเงินนาโนทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับความร้อนเพิ่มขึ้นและลดการใช้ความร้อนเสริมจากปั๊มความร้อนได้ ทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมสารละลายเงินนาโนเป็นอีกทางหนึ่งที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบ



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาศมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สำหรับโรงฆ่าสัตว์ มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้ ศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว ทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ออกแบบระบบที่เหมาะสมและติดตั้งระบบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว ทดสอบสมรรถนะและวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ในการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ก่อนการติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump จะทำเปรียบเทียบแผง Solar PV/T 2 ชนิด คือ แผง Solar PV/T ที่มีกระจกครอบ ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon PV/T, mono-Si PV/T) ยี่ห้อ 5STAR กำลังไฟฟ้าสูงสุด 295 W_p พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ 1.698 m² และซิลิคอนผลึกรวม (polycrystalline silicon PV/T, poly-Si PV/T) ยี่ห้อ DYY SOLAR กำลังไฟฟ้าสูงสุด 270 W_p พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ 1.624 m² แสดงดังภาพที่ 14 และภาพที่ 15 เพื่อเลือกชนิดที่เหมาะสมต่อการทำงานในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว



ภาพที่ 14 mono-Si PV/T

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (STC)			
Peak Power Watts-*	PMAX	(Wp)	270
Power Output Tolerance	PMAX	(W)	0 ~ +3%
Maximum Power Voltage	VMPP	(V)	30.98
Maximum Power Current	IMPP	(A)	8.91
Open Circuit Voltage	VOC	(V)	43.3
Short Circuit Current	ISC	(A)	9.71
Module Efficiency	η	(%)	18.40
STC: Irradiance 1000W/m ² , Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.			
Thermal collector specification			
Peak Power Watts	760W		
Thermal Efficiency	46%		
Insulation layer	Glass wool		
Flowing tube	Aluminium-copper $\Phi 8 \times 0.6$ mm		
Number of flowing tube	6pcs		
Passageway	copper $\Phi 16 \times 0.8$ mm, 1/2inch Male Thread		
Back sheet	Galvanized steel , thickness:0.4mm		
Working Pressure	0.6Mpa		
Working temperature	Minus 35 degree celsius to 150 degree celsius		

ภาพที่ 15 poly-Si PV/T

ปั๊มความร้อน

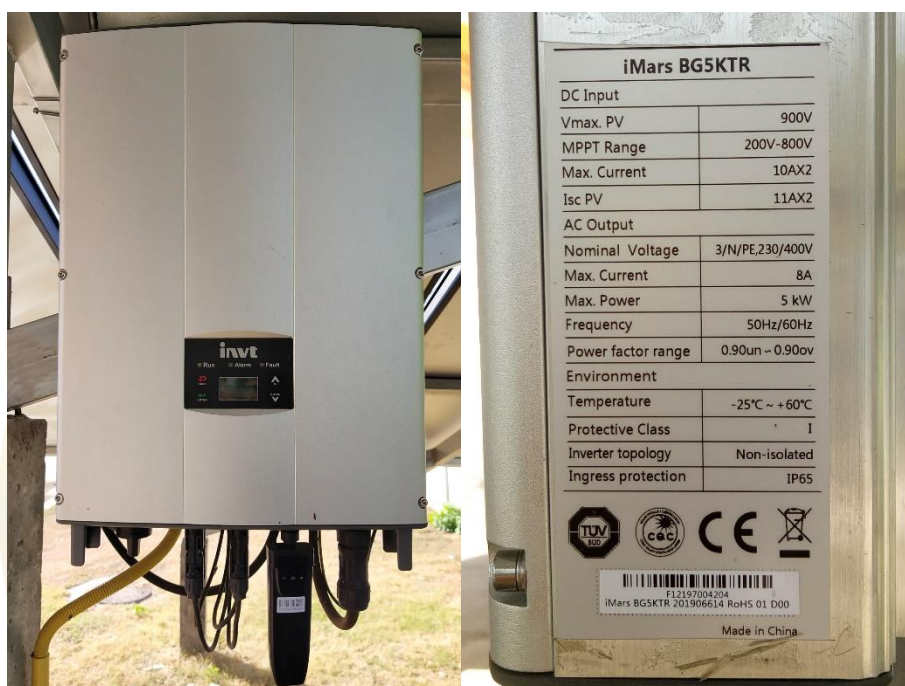
งานวิจัยนี้ใช้ปั๊มความร้อน ยี่ห้อ KONNEN รุ่น Volcano series HT7P-E7 ขนาด 17.8 kW_{th} ที่ใช้แหล่งความร้อนจากอากาศแวดล้อมมาผลิตน้ำร้อน แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ปั๊มความร้อน

อินเวอร์เตอร์

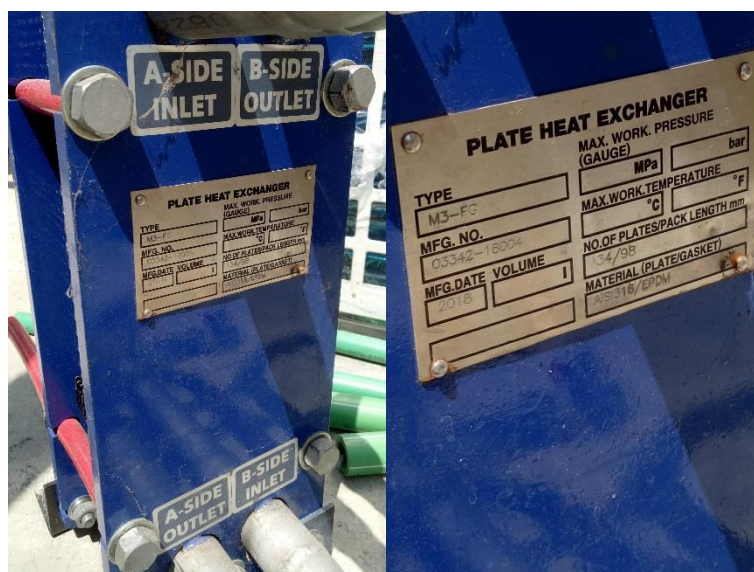
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะผ่านอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ invt รุ่น iMars BG5KTR กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 5 kW เพื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วจ่ายให้แก่ปั๊มความร้อนร่วมกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน อินเวอร์เตอร์แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 อินเวอร์เตอร์

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger) รุ่น M3-FG แสดงดังภาพที่ 18 ถูกใช้เพื่อรับความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T แล้วนำความร้อนที่ได้ไปถ่ายเทให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเพื่อสะสมความร้อน



ภาพที่ 18 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ถังเก็บน้ำร้อน

ถังเก็บน้ำร้อนหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนขนาด 145 L ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T และถังเก็บน้ำร้อนสแตนเลสที่มีการหุ้มฉนวนกันความร้อนขนาด 2,500 L ใช้สำหรับเก็บน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump เพื่อนำไปใช้งานในโรงฆ่าสัตว์ ถังเก็บน้ำร้อนทั้ง 2 ถัง แสดงดังภาพที่ 19



(ก) ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 145 L (ข) ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,500 L

ภาพที่ 19 ถังเก็บน้ำร้อน

ปั๊มสำหรับหมุนเวียนน้ำ

ปั๊มน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 3 ส่วน คือ ปั๊มน้ำที่ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T ปั๊มน้ำที่ใช้ทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน และปั๊มน้ำที่ใช้ในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการศึกษาระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

ปั๊มน้ำ	รายละเอียด	การทำงาน
การทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T		
	<p>ยี่ห้อ: SEAFLO</p> <p>รุ่น: SFDP1-014-080-22</p> <p>อัตราการไหลสูงสุด: 4.0 L/min</p> <p>แรงดันไฟฟ้า: 12 V</p> <p>กระแสไฟฟ้า: 2.1 A</p>	หมุนเวียนน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนผ่านแผง Solar PV/T
การทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน		
	<p>ยี่ห้อ: SAER</p> <p>รุ่น: KF/1</p> <p>อัตราการไหล: 0.6-2.4 m³/h</p> <p>กำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 W</p>	หมุนเวียนน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนไปรับความร้อนจากปั๊มความร้อน

ตารางที่ 2 (ต่อ) ปั๊มน้ำที่ใช้ในการศึกษาระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

ปั๊มน้ำ	รายละเอียด	การทำงาน
ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump		
	ยี่ห้อ: burks รุ่น: UPBASIC 25-12 180 อัตราการไหลสูงสุด: 3.6 m ³ /h กำลังไฟฟ้าสูงสุด 245 W	ใน ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้ปั๊มน้ำชนิดนี้ จำนวน 2 ตัวหมุนเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T
	ยี่ห้อ: burks รุ่น: UPBASIC 25-8 180 อัตราการไหลสูงสุด: 5.6 m ³ /h กำลังไฟฟ้าสูงสุด 200 W	หมุนเวียนน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนมารับความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
	ยี่ห้อ: SAER รุ่น: KF/1 อัตราการไหล: 0.6-2.4 m ³ /h กำลังไฟฟ้าสูงสุด 370 W	หมุนเวียนน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนไปรับความร้อนจากปั๊มความร้อน

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

รายละเอียดเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลที่ใช้บันทึกข้อมูล อุณหภูมิ ค่ารังสีอาทิตย์ ค่าทางไฟฟ้า และอัตราการไหลของน้ำ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	รายละเอียด	การทำงาน
เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ		
	<p>เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ: Lutron รุ่น: TM-1947SD ความเที่ยงตรง: $\pm 0.4\% + 1^{\circ}\text{C}$ (ที่ -50.1 to -100.0°C)</p>	<p>บันทึกอุณหภูมิ</p>
	<p>เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ: GRAPHTEC รุ่น: midi LOGGER GL240 ความเที่ยงตรง: $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ (Temperature)</p>	<p>บันทึกอุณหภูมิ</p>
	<p>สายบันทึกอุณหภูมิ Thermocouple type K ช่วงการวัด: -270-$1,260^{\circ}\text{C}$ ความเที่ยงตรง: $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$</p>	<p>วัดอุณหภูมิ</p>

ตารางที่ 3 (ต่อ) เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	รายละเอียด	การทำงาน
เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์		
	<p>เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์</p> <p>ยี่ห้อ: apogee</p> <p>ความไว: 0.2 mV ต่อ W/m^2</p> <p>ความคลาดเคลื่อนจากเมฆ: 10-15%</p>	วัดค่ารังสีอาทิตย์
	<p>เครื่องวัดและบันทึกค่ารังสีอาทิตย์</p> <p>ยี่ห้อ: Lutron</p> <p>รุ่น: SPM-1116SD</p> <p>ช่วงการวัด: 0-2,000 W/m^2</p> <p>ความเที่ยงตรง: $\pm 10 W/m^2$</p>	วัดและบันทึกค่ารังสีอาทิตย์
	<p>เครื่องบันทึกค่ารังสีอาทิตย์</p> <p>ยี่ห้อ: GRAPHTEC</p> <p>รุ่น: midi LOGGER GL240</p> <p>ความเที่ยงตรง: $\pm 0.1\%$ (Voltage)</p>	บันทึกค่ารังสีอาทิตย์

ตารางที่ 3 (ต่อ) เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	รายละเอียด	การทำงาน
เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้า		
	<p>เครื่องวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์</p> <p>ยี่ห้อ: PROVA 210</p> <p>ช่วงการวัด: 0.01-12 A, 0-60 V</p> <p>ความเที่ยงตรง: $\pm 1\%$</p>	<p>วิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์</p>
	<p>เครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า</p> <p>ยี่ห้อ: CHAUVIN ARNOUX</p> <p>รุ่น: C.A 8334B</p> <p>ช่วงการวัด: 100 mA-120 A, 0-960 V</p> <p>ความเที่ยงตรง: $\leq 0.7\% + 1A$, $\pm 0.5\% + 0.2 V$</p>	<p>วัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้ากระแสสลับ</p>
เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ		
	<p>เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ</p> <p>ยี่ห้อ: TREATON</p> <p>รุ่น: Z-3001</p> <p>ช่วงการวัด: 0.8-8 L/min</p>	<p>วัดอัตราการไหลของน้ำในการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T</p>

ตารางที่ 3 (ต่อ) เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	รายละเอียด	การทำงาน
	<p>เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ</p> <p>ยี่ห้อ: TREATON</p> <p>รุ่น: Z-3003</p> <p>ช่วงการวัด: 5-40 L/min</p>	<p>วัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแผง Solar PV/T ที่ใช้ในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump</p>
	<p>เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ</p> <p>ยี่ห้อ: TREATON</p> <p>รุ่น: Z-3004</p> <p>ช่วงการวัด: 4-65 L/min</p>	<p>วัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน</p>

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการศึกษาสมรรถนะระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สำหรับโรงฆ่าสัตว์ แสดงวิธีการดำเนินงานวิจัยในรูปแบบของแผนผัง ดังภาพที่ 20 ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และติดตั้งระบบ ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว และขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยในขั้นตอนที่ 4 จะแบ่งการดำเนินงานออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้ การทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T การทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน และการทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์



ภาพที่ 20 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

ทำการศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว โดยพิจารณาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 65 °C เพื่อใช้ในขั้นตอนลวกสุกร

ทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบเพื่อให้ได้สมรรถนะของแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน สมรรถนะจากการทดสอบทั้ง 2 นี้ จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การดำเนินงานมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T

นำแผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิด คือ mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T มาทดสอบสมรรถนะทางความร้อน และทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวม แสดงดังภาพที่ 21 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย แผง mono-Si PV/T และแผง poly-Si PV/T ถึงเก็บน้ำร้อนขนาด 145 L ปั๊มน้ำ ยี่ห้อ SEAFLO อัตราการไหลสูงสุด 4.0 L/min เครื่องมือวัดที่ใช้ในขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ Lutron รุ่น TM-1947SD สาย

Thermocouple type K เครื่องวัดและบันทึกค่ารังสีอาทิตย์ ยี่ห้อ Lutron รุ่น SPM-1116SD เครื่องวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ยี่ห้อ PROVA 210 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ยี่ห้อ TREATTON รุ่น Z-3001 การทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

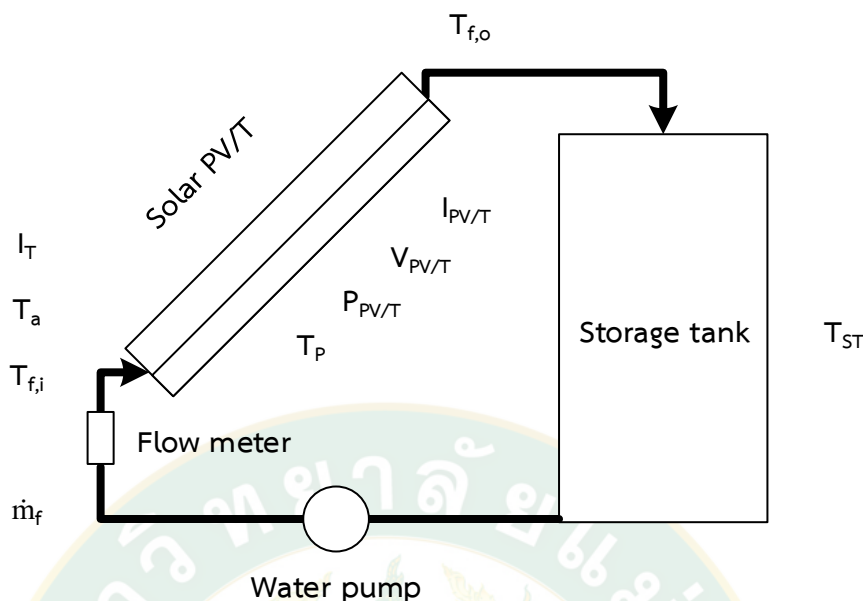
1. การทดสอบสมรรถนะทางความร้อน

การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนตาม ASHRAE STANDARD 93-2003 มีจุดประสงค์เพื่อหาค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ F_{R,U_L} ของแผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งเป็นการทดสอบในสภาวะคงที่ มีเงื่อนไขในการทดสอบดังต่อไปนี้

- ติดตั้งแผง Solar PV/T โดยหันหน้าไปทางทิศใต้และทำมุมเอียงกับแนวระนาบตามละติจูดของสถานที่ทดสอบ
- ป้อนน้ำเข้าสู่แผง Solar PV/T ให้มีอุณหภูมิ 35 °C 40 °C 45 °C 50 °C 55 °C 60 °C และ 65 °C โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 °C
- ควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่อยู่ที่ 0.02 kg/s·m² หรือ 1.2 L/min·m²
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1.5 °C
- ควบคุมการสูญเสียความร้อนให้คงที่ด้วยพัดลม โดยความเร็วลมมีค่า 2.2-4.5 m/s
- ทำการทดสอบในช่วงที่มีค่ารังสีอาทิตย์มากกว่า 790 W/m² และมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 32 W/m²

2. การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวม

ทำการทดสอบในช่วงเวลากลางวัน ควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ต่อพื้นที่แผง 0.02 kg/s·m² เพื่อหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T และนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างสมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T



ภาพที่ 21 การทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T

ทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน

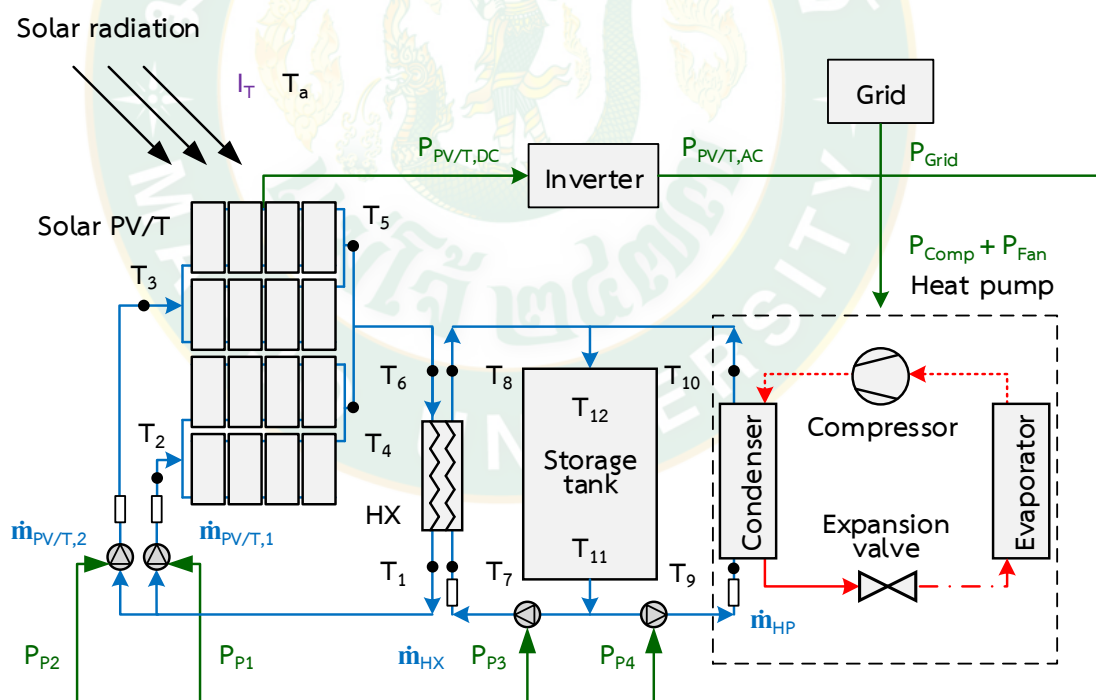
ทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน โดยให้ปั๊มความร้อนเริ่มทำงานที่เวลา 9:00 น. ผลิตน้ำร้อน 2,500 L จากอุณหภูมิ 30 °C ให้มีอุณหภูมิเหมาะสมต่อการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์ 65 °C ทำการทดสอบ เพื่อให้ได้สมการทำนายอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน ใช้ปั๊มความร้อนที่ผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงขนาด 17.8 kW_{th} ปั๊มน้ำ ยี่ห้อ SAER รุ่น KF/1 และถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,500 L

ออกแบบและติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

นำสมรรถนะของแผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิด และสมรรถนะของปั๊มความร้อน มาใช้ในการออกแบบระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนเพื่อทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงจากเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุดเพื่อศึกษาการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ส่วนที่ 2 เป็นการใช้อุณหภูมิสภาพแวดล้อมจากวันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน เพื่อทำนายการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตลอดทั้งปี พร้อมทั้งเลือกขนาดและชนิดของระบบที่เหมาะสมต่อการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ที่อุณหภูมิ 65 °C และมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด

เมื่อได้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงทำการติดตั้งระบบและจุดตรวจวัดข้อมูล ณ โรงฆ่า

สัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ดังภาพที่ 22 โดยอุปกรณ์ในระบบประกอบด้วย แผง Solar PV/T เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังเก็บน้ำร้อน ปั๊มความร้อน ปั๊มน้ำเพื่อไหลเวียนน้ำ และอินเวอร์เตอร์ ปั๊มน้ำจะหมุนเวียนน้ำไปรับความร้อนจากแผง Solar PV/T แล้วมาถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถ่ายเทความร้อนต่อไปให้กับน้ำที่ไหลเวียนมาจากถังเก็บน้ำร้อน เป็นการผลิตน้ำร้อนจากแผง Solar PV/T การผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนจะใช้แหล่งความร้อนจากอากาศแวดล้อมมาทำให้สารทำงานในปั๊มความร้อนระเหยที่เครื่องระเหย จากนั้นสารทำงานจะถูกอัดตัวให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นด้วยเครื่องอัดไอ แล้วไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ไหลเวียนมาจากถังเก็บน้ำร้อนที่เครื่องควบแน่น สารทำงานจะถูกลดความดันเพื่อไปรับความร้อนที่เครื่องระเหยต่อไปเป็นวงจร พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะถูกแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่อินเวอร์เตอร์แล้วป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ โดยจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานร่วมด้วยในกรณีที่พลังงานไฟฟ้าจากแผง Solar PV/T ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน



ภาพที่ 22 แผนภาพการติดตั้งระบบและจุดตรวจวัดข้อมูล

ทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

ในขั้นตอนนี้จะทำการแบ่งการดำเนินงานในการทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ออกเป็นหัวข้อดังนี้ ทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง

Solar PV/T ทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน และทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์ การดำเนินงานในแต่ละหัวข้อมียละเอียดดังต่อไปนี้

ทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

ทำการทดสอบสมรรถนะระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ทำการทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำ 3 อัตราการไหล คือ 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min เพื่อหาอัตราการไหลที่ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด และวิเคราะห์สมรรถนะระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยพิจารณาที่ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ($\eta_{Net,PV/T}$) สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PR) และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) การทดสอบปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T มีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เงื่อนไขในการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

รายการ	ข้อมูล
เวลาเริ่มต้นการทดสอบ	9:00 น.
อุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการ	65 °C
อุณหภูมิน้ำร้อนเริ่มต้น	30 °C
อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T	27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min
อัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊มความร้อน	30 L/min
ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	2,500 L

ทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

เมื่อได้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ที่เหมาะสมต่อการทำงานในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวแล้ว นำอัตราการไหลดังกล่าวมาปรับใช้ในการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อนในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยกำหนดเวลาเริ่มทำงานในการทดสอบ คือ 9:00 น. 9:30 น. และ 10:00 น. เพื่อหาเวลาเริ่มทำงานที่ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด และวิเคราะห์สมรรถนะระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยพิจารณาที่ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ($\eta_{Net,PV/T}$) สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PR) และอัตราส่วน

ประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) การทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน มีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เงื่อนไขในการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

รายการ	ข้อมูล
เวลาเริ่มต้นการทดสอบ	9:00 น. 9:30 น. และ 10:00 น.
อุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการ	65 °C
อุณหภูมิน้ำร้อนเริ่มต้น	30 °C
อัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊มความร้อน	30 L/min
ปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	2,500 L

ทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

เมื่อได้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T และเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อนที่ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด และเหมาะสมต่อการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวแล้ว นำค่าดังกล่าวมาทดสอบการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตามการใช้งานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวเป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบ และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้าและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สำหรับโรงฆ่าสัตว์ ทำการแบ่งผลการศึกษาของวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. การศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว
2. การทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน
3. การออกแบบและติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump
4. การทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว แสดงดังภาพที่ 23 เป็นโรงฆ่าสัตว์ภายใต้การดูแลของเทศบาลตำบลเชียงดาว ตั้งอยู่ในตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ กระบวนการผลิตเนื้อสุกรในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว มีดังนี้ การนำสุกรมาพักไว้ในโรงฆ่าสัตว์ การทำให้สุกรสลบด้วยการช็อตด้วยไฟฟ้า การนำเลือดออกจากสุกร การลวกสุกร การชำแหละ และการชำแหละสุกรเดิมโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวใช้ขดลวดไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิประมาณ 65 °C สำหรับขั้นตอนการลวกสุกร สุกรต้องผ่านการลวกเพื่อให้ชำแหละได้ง่าย หากอุณหภูมิน้ำร้อนที่ใช้ลวกสุกรสูงเกินไปจะทำให้หนังสุกรแข็ง และถ้าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ใช้ลวกสุกรต่ำเกินไปจะทำให้ชำแหละออกยาก อ่างลวกสุกรที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 24

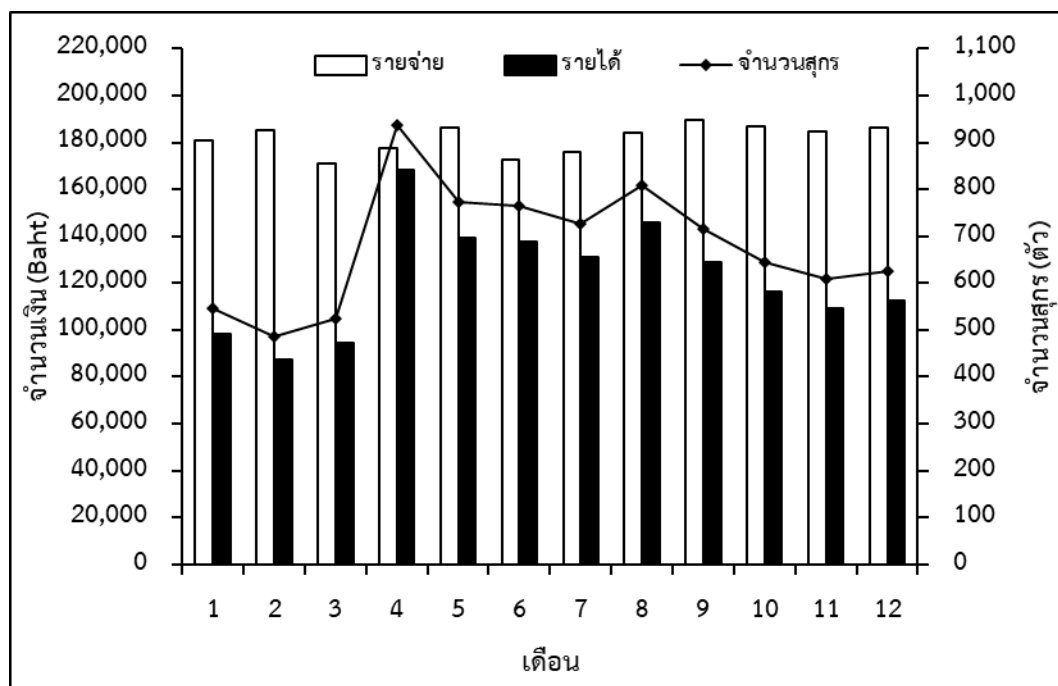


ภาพที่ 23 โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว



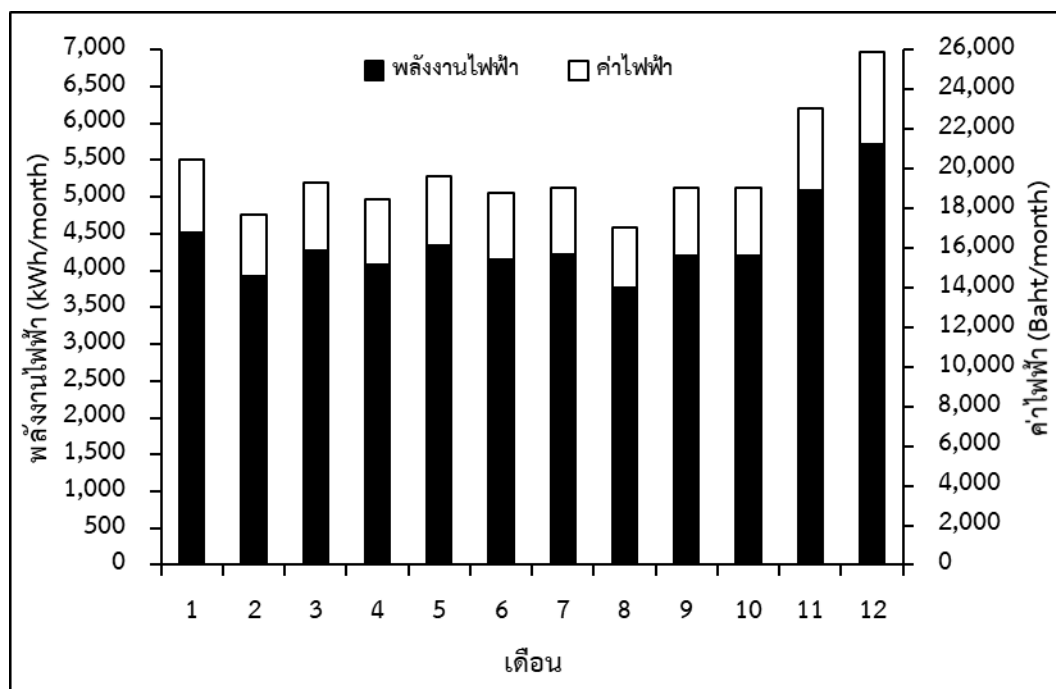
ภาพที่ 24 อ่างลวกสุกร

ในปี พ.ศ. 2561 โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวประสบปัญหาการขาดทุน ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลในปีดังกล่าวมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว โดยโรงฆ่าสัตว์มีรายจ่ายตลอดปี 2,181,104.75 Baht แต่มีรายได้รวมทั้งปี 1,469,880.00 Baht แสดงดังภาพที่ 25 รายจ่ายของโรงฆ่าสัตว์มีค่ามากที่สุดในเดือนกันยายน 189,857.41 Baht และต่ำสุดในเดือนมีนาคม 171,020.71 Baht ค่าเฉลี่ยของรายจ่ายตลอดปี พ.ศ. 2561 มีค่าเป็น 181,758.73 Baht/month รายได้ของโรงฆ่าสัตว์มาจากค่าเชือดสุกร โดยมีค่าสูงที่สุดในเดือนเมษายน 168,480 Baht จากการเชือดสุกร 936 ตัว และต่ำที่สุดในเดือนกุมภาพันธ์ 87,480 Baht จากการเชือดสุกร 486 ตัว ในปี พ.ศ. 2561 โรงฆ่าสัตว์มีรายได้เฉลี่ยเท่ากับ 122,490 Baht/month และเชือดสุกรเฉลี่ยประมาณ 680 ตัว/month



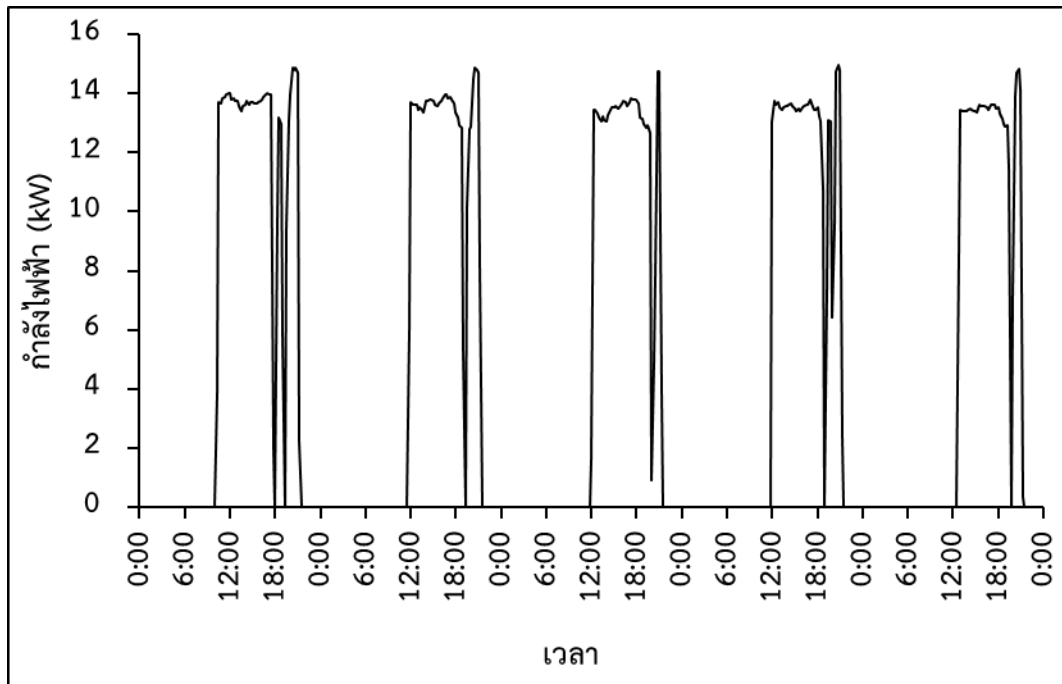
ภาพที่ 25 รายได้และรายจ่ายของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวในปี พ.ศ. 2561

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์จากภาพที่ 26 พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับค่าไฟฟ้าของโรงฆ่าสัตว์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยโรงฆ่าสัตว์มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในเดือนธันวาคม 5,719 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 25,892.49 Baht และเดือนสิงหาคมใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด 3,770 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 17,002.92 Baht จะเห็นได้ว่าในช่วงฤดูหนาวโรงฆ่าสัตว์จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของอำเภอเชียงดาวมีค่าต่ำกว่าฤดูอื่น ๆ ทำให้ใช้ระยะเวลาในการต้มน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 52,524.00 kWh/year คิดเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน 4,377.00 kWh/month และจ่ายค่าไฟฟ้ารวม 237,933.72 Baht/year เฉลี่ยรายเดือน 19,827.81 Baht/month

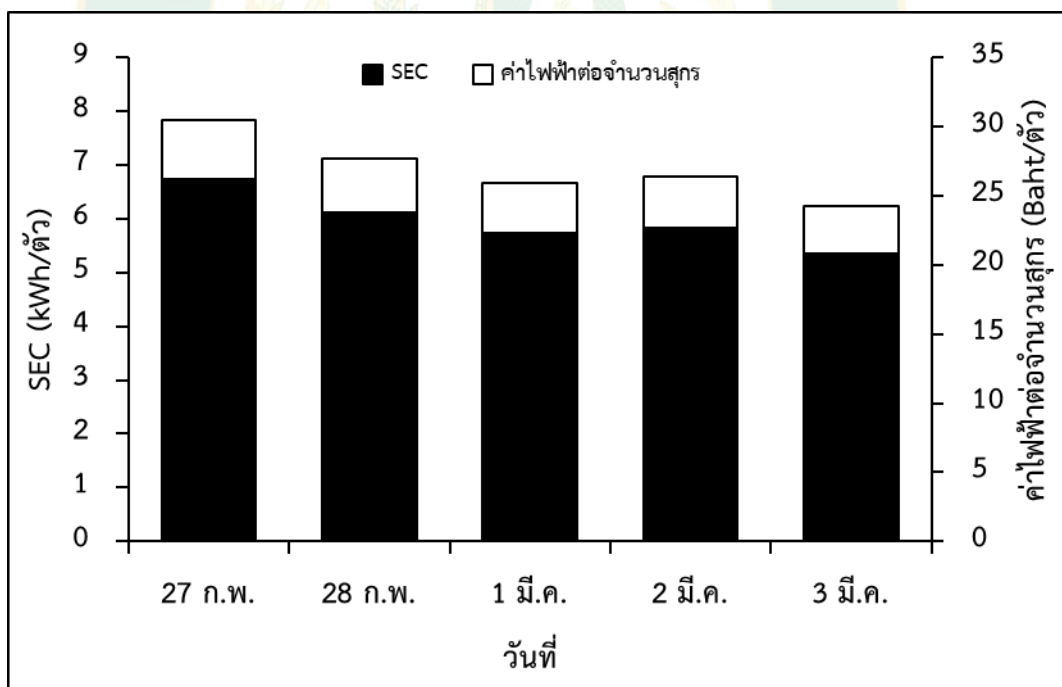


ภาพที่ 26 พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าของโรงพยาบาลสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวในปี พ.ศ. 2561

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้าเป็นเวลา 5 วัน คือ วันที่ 27 กุมภาพันธ์ ถึง วันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2562 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของขดลวดไฟฟ้า จากภาพที่ 27 พบว่า ช่วงเวลากลางวันจะเป็นช่วงที่ขดลวดไฟฟ้าเตรียมน้ำให้มีอุณหภูมิ 65 °C เพื่อใช้สำหรับลวกสุกรในช่วงเวลาหลังจาก 18:00 น. การลวกสุกรจะทำให้อุณหภูมิน้ำในอ่างลวกลดลง ขดลวดไฟฟ้าจึงทำงานอีกครั้งเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำไว้ให้คงที่ ตลอดระยะเวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล ขดลวดไฟฟ้ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 120.51 kWh/day และเมื่อวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEC) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร พบว่า ค่า SEC จากการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลการทำงานของขดลวดไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ย 5.95 kWh/ตัว และเมื่อคำนวณค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร โดยใช้อัตราค่าไฟฟ้า 4.53 Baht/kWh ซึ่งเป็นอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยจากข้อมูลในปี พ.ศ. 2561 พบว่าค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.96 Baht/ตัว รายละเอียดแสดงในภาพที่ 28



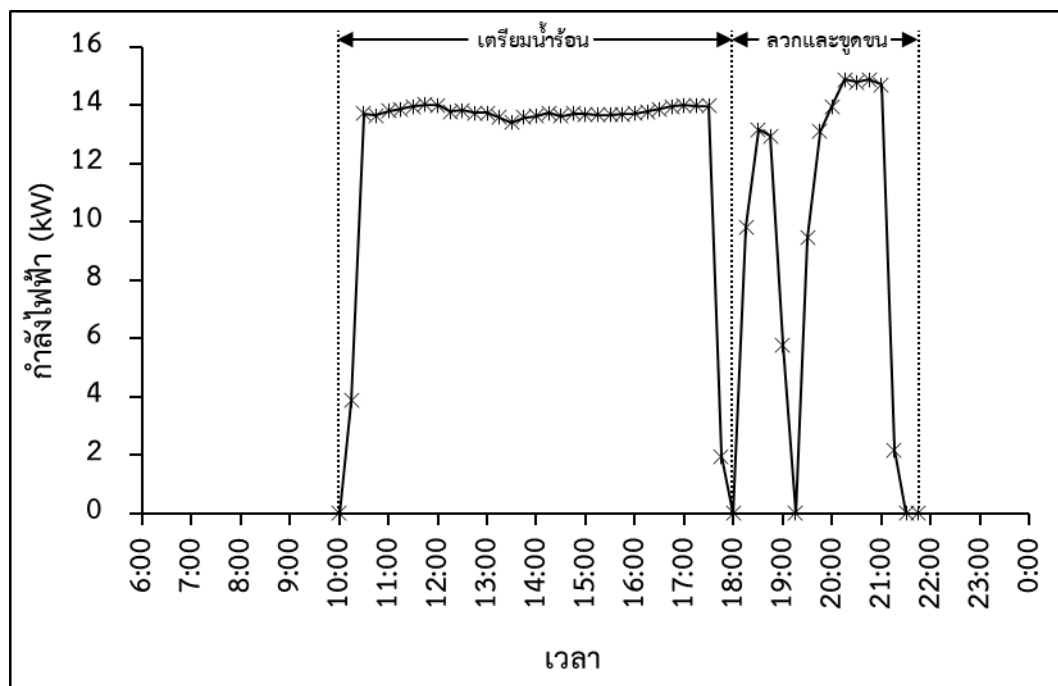
ภาพที่ 27 กำลังไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้า



ภาพที่ 28 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรของขดลวดไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาการผลิตน้ำร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 ดังแสดงในภาพที่ 29 พบว่า ขดลวดไฟฟ้าใช้เวลาในการเตรียมน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิประมาณ 65 °C ประมาณ

7.5 h ที่เวลาประมาณ 10:30-17:30 น. หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการลวกสุกร โดยขดลวดไฟฟ้าจะควบคุมอุณหภูมิน้ำในอ่างลวกให้คงที่ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของ การเตรียมน้ำร้อน เนื่องจากเป็นช่วงที่ใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก คิดเป็น 112.50 kWh/day



ภาพที่ 29 กำลังไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้าในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562

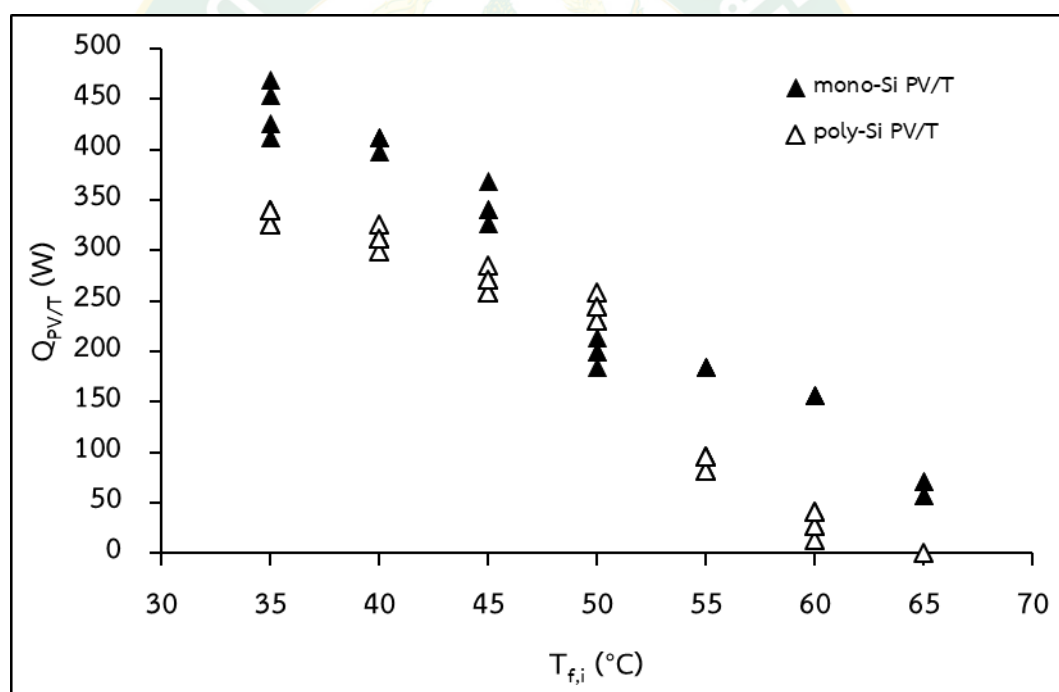
4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน

ผลการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T

ทำการทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T ชนิด mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T เพื่อให้ได้สมรรถนะทางความร้อน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T สำหรับนำไปใช้ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น การทดสอบสมรรถนะทางความร้อน และการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

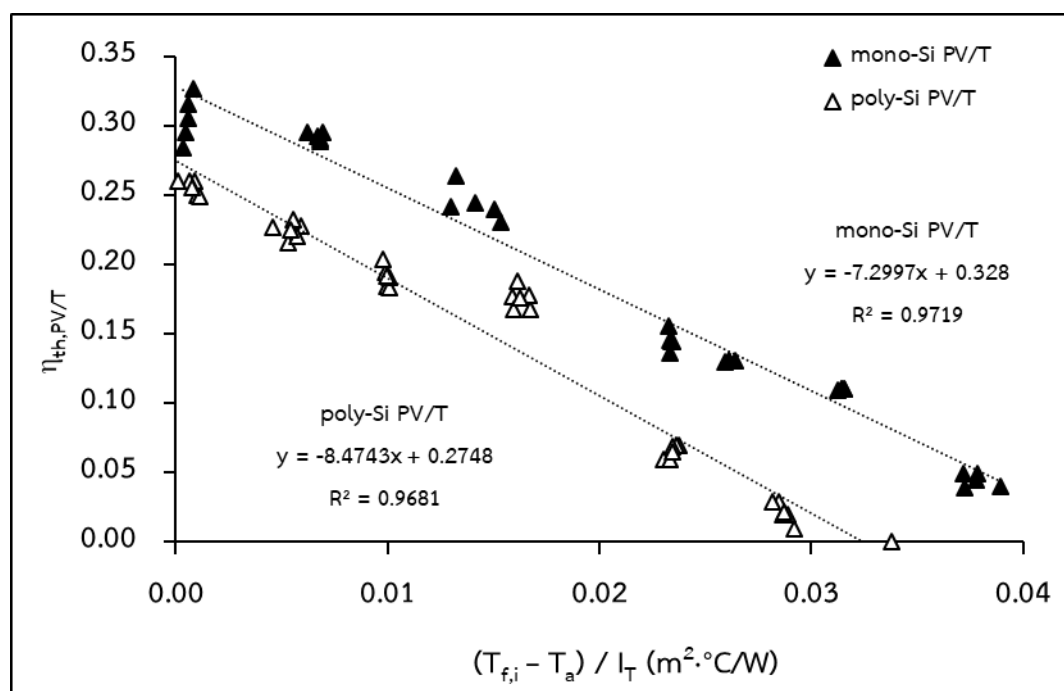
ผลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อน

การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 เมื่อพิจารณาความร้อนที่แผง Solar PV/T ผลิตได้จากภาพที่ 30 พบว่า ที่อุณหภูมิน้ำเข้าแผง 35 °C ผลิตความร้อนได้มากที่สุด และเมื่ออุณหภูมิ น้ำเข้าแผงมีค่าเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ผลิตได้จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิ น้ำเข้าแผงที่มีค่า สูงขึ้นจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผง Solar PV/T กับอากาศแวดล้อม ยิ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิดังกล่าวมีค่ามาก จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกจากแผง Solar PV/T มากยิ่งขึ้น เป็นผลให้ความร้อนที่ผลิตได้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบความร้อนที่ผลิตได้ของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T จะพบว่าแผง mono-Si PV/T เหมาะสำหรับการผลิตความร้อน ที่อุณหภูมิสูงมากกว่าแผง poly-Si PV/T



ภาพที่ 30 ความร้อนที่ผลิตได้จากแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T

เมื่อคำนวณหาสมรรถนะแผง Solar PV/T ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 ดังภาพที่ 31 พบว่า ค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ ของแผง mono-Si PV/T มีค่า 0.3280 สูงกว่าแผง poly-Si PV/T ที่มีค่า 0.2748 และค่า $F_R U_L$ ของแผง mono-Si PV/T มีค่า 7.2997 W/m²·K ต่ำกว่าแผง poly-Si PV/T ที่มีค่า 8.4743 W/m²·K แสดงให้เห็นว่าแผง mono-Si PV/T ยอมให้แสงส่องผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่า และสูญเสียความร้อนรวมออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าแผง poly-Si PV/T และเหมาะสมต่อการนำมาผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงมากกว่าเมื่อเทียบกับแผง poly-Si PV/T

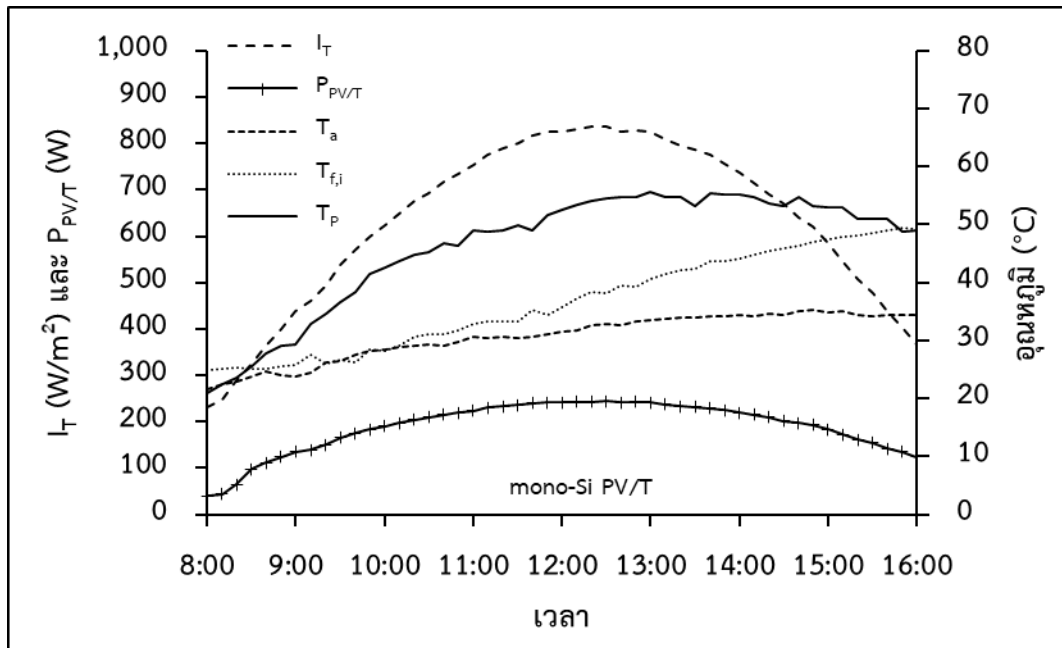


ภาพที่ 31 สมรรถนะทางความร้อนของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T

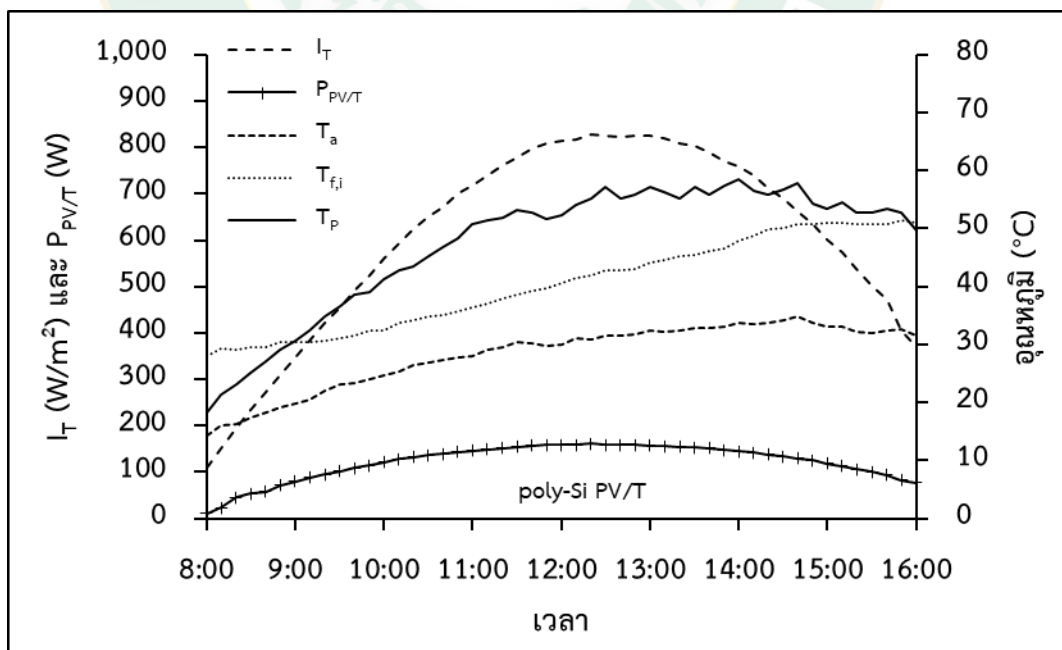
ผลการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวม

การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมเป็นการทดสอบการทำงานของแผง Solar PV/T แบบกลางแจ้ง ตั้งแต่เวลา 8:00-16:00 น. กำหนดอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ ผลการทดสอบของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T แสดงดังภาพที่ 32 และภาพที่ 33 ค่ารังสีอาทิตย์ของการทดสอบแผงทั้ง 2 ชนิดมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 12:30 น. มีค่าเฉลี่ยเป็น 631.44 W/m^2 สำหรับการทดสอบแผง mono-Si PV/T การทดสอบแผง poly-Si PV/T มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 606.10 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมของการทดสอบแผง mono-Si PV/T มีค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ย $35.40 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $30.69 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมของการทดสอบแผง poly-Si PV/T มีค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ย $34.88 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $28.23 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ในช่วงเริ่มต้นการทดสอบถึงเวลาประมาณ 12:30 น. อุณหภูมิแผง Solar PV/T จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ารังสีอาทิตย์ แต่หลังจากเวลาดังกล่าว ค่ารังสีอาทิตย์จะเริ่มลดลง ขณะที่อุณหภูมิแผง Solar PV/T ยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเริ่มลดลงหลังจากเวลาประมาณ 14:30 น. สาเหตุมาจากน้ำในถังเก็บน้ำร้อนทำหน้าที่มารับความร้อนจากแผง Solar PV/T แล้วนำความร้อนที่ได้ไปสะสมไว้ในถังเก็บน้ำร้อน เมื่อเวลาผ่านไปน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนในแผง Solar PV/T อุณหภูมิแผง Solar PV/T จึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ในการทดสอบแผง mono-Si PV/T อุณหภูมิแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยเท่ากับ $55.60 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $46.21 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 243.70 W และมีค่าเฉลี่ย 188.45 W การทดสอบแผง poly-Si PV/T อุณหภูมิ
 แผง Solar PV/T มีค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.57 °C และ 47.21 °C ตามลำดับ ผลิตกำลังไฟฟ้า
 สูงสุด 161.30 W และมีค่าเฉลี่ย 121.45 W



ภาพที่ 32 สภาพอากาศและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง mono-Si PV/T



ภาพที่ 33 สภาพอากาศและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง poly-Si PV/T

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผง Solar PV/T ตามค่ารังสีอาทิตย์ที่ถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ละ 100 W/m^2 ของแผงทั้ง 2 ชนิด แสดงได้ดังภาพที่ 34 และภาพที่ 35 หากพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ค่ารังสีอาทิตย์ช่วงใดช่วงหนึ่งของแผง mono-Si PV/T จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิแผง Solar PV/T มีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงนั้น ๆ แผง mono-Si PV/T ผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นผลมาจากค่ารังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีอิทธิพลมากกว่าผลของอุณหภูมิแผง Solar PV/T ในกรณีของแผง poly-Si PV/T ที่ช่วงค่ารังสีอาทิตย์ต่ำกว่า 400 W/m^2 แนวโน้มของความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผง Solar PV/T มีลักษณะคล้ายกับแผง mono-Si PV/T แต่เมื่อค่ารังสีอาทิตย์สูงกว่า 400 W/m^2 แนวโน้มดังกล่าวเริ่มเปลี่ยนแปลงไป เมื่ออุณหภูมิแผง Solar PV/T มีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงที่สูงกว่า 400 W/m^2 พบว่าแผง poly-Si PV/T ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ลดลง เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิแผง Solar PV/T ส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่าค่ารังสีอาทิตย์ จากผลกระทบดังกล่าว หากเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ เข้าไป คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้าแผง Solar PV/T จะได้สมการในรูปแบบดังต่อไปนี้ เมื่อ C_0-C_8 เป็นค่าคงที่ แสดงดังตารางที่ 6

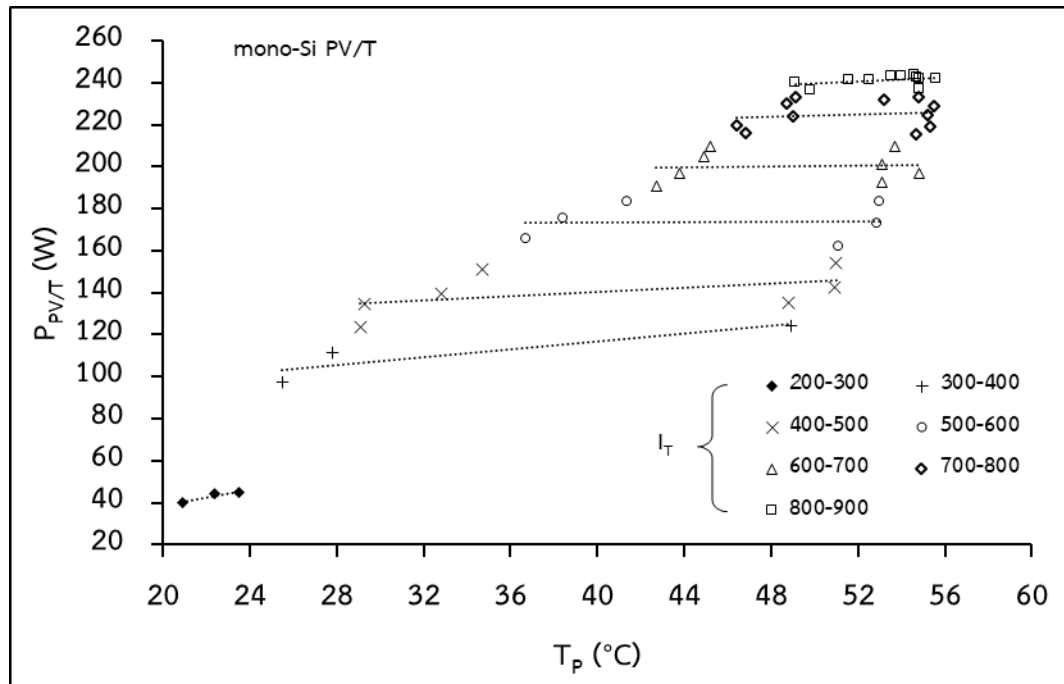
$$T_p = f(I_T, T_a, T_{f,i}) \quad \text{สมการที่ 32}$$

$$P_{PV/T} = f(I_T, T_a, T_{f,i}, T_p) \quad \text{สมการที่ 33}$$

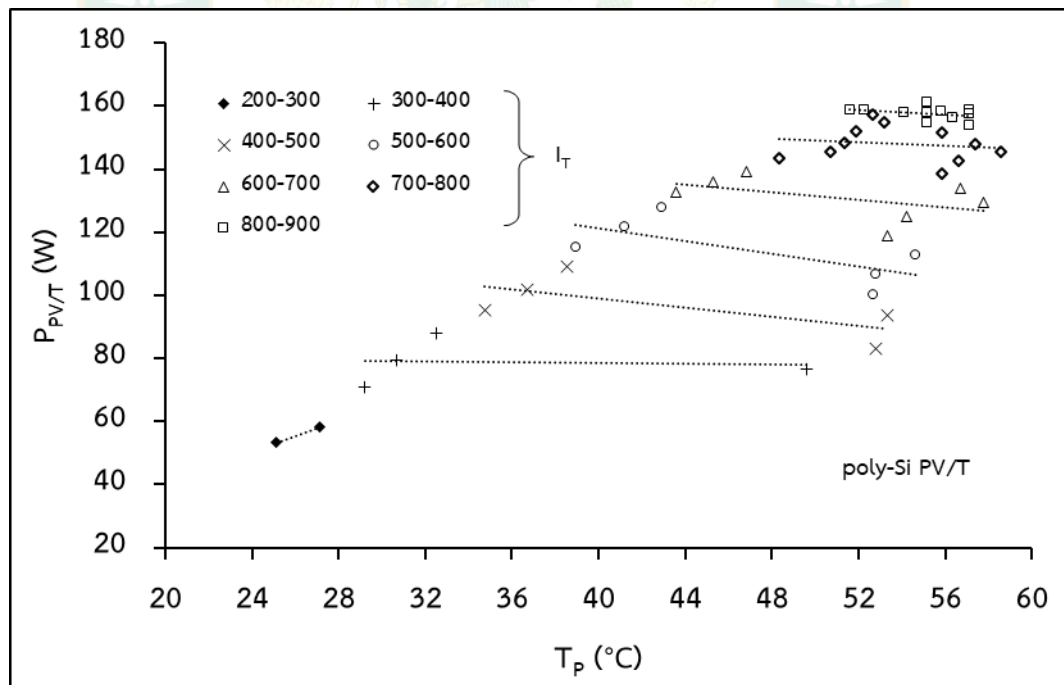
$$T_p = C_0 (I_T^{C_1}) (T_a^{C_2}) (T_{f,i}^{C_3}) \quad \text{สมการที่ 34}$$

$$P_{PV/T} = C_4 (I_T^{C_5}) (T_a^{C_6}) (T_{f,i}^{C_7}) (T_p^{C_8}) \quad \text{สมการที่ 35}$$

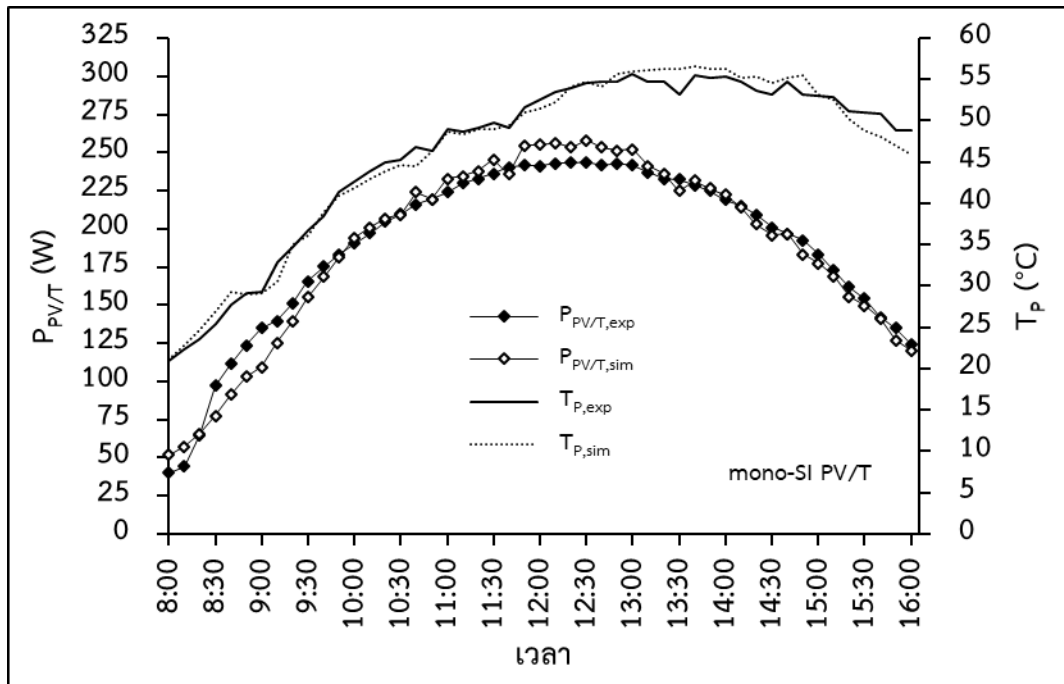
เมื่อนำสมการที่ได้มาไว้เพื่อทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T ทำให้ทราบว่าสมการทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.41% และ 1.57% ในกรณีของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T ตามลำดับ ดังภาพที่ 36 สมการทำนายกำลังไฟฟ้าของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.92% และ 6.77% ตามลำดับ ดังภาพที่ 37



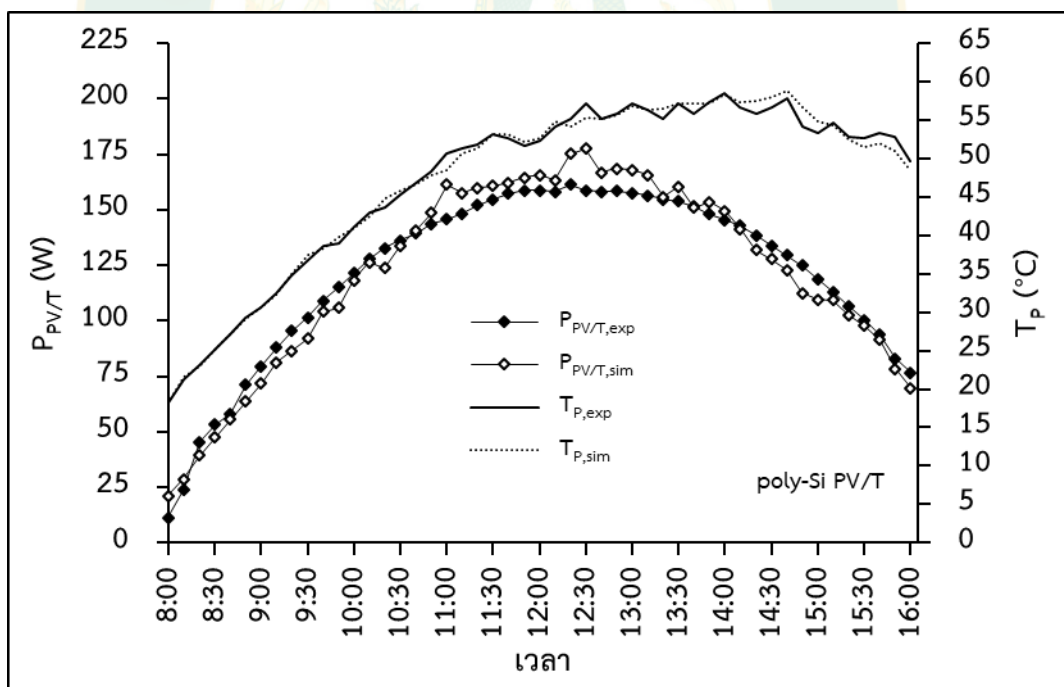
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผง mono-Si PV/T ตามช่วงของค่ารั้งสี่อาทิตย์



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิแผง poly-Si PV/T ตามช่วงของค่ารั้งสี่อาทิตย์



ภาพที่ 36 อุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของ mono-Si PV/T จากการทดสอบและสมการทำนาย

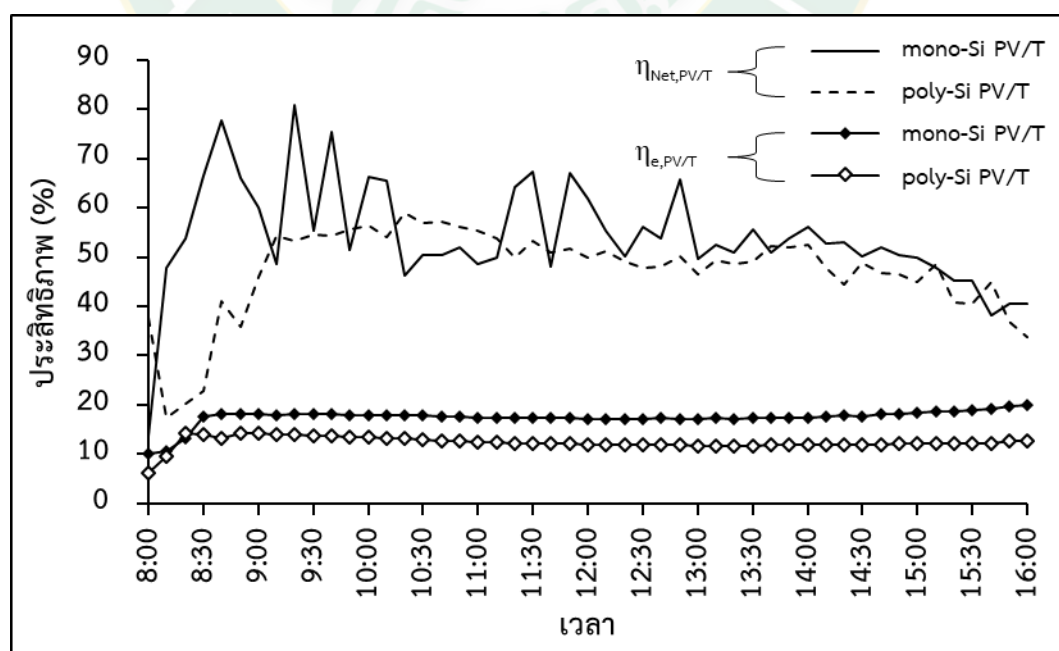


ภาพที่ 37 อุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของ poly-Si PV/T จากการทดสอบและสมการทำนาย

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของสมการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่แผง Solar PV/T ผลิตได้

รายการ	mono-Si PV/T	poly-Si PV/T
C_0	0.058310	0.688030
C_1	0.275760	0.153390
C_2	1.526200	1.043000
C_3	-0.092972	-0.064284
C_4	0.827070	0.481370
C_5	0.563270	0.864310
C_6	-0.478340	-1.907100
C_7	-0.477050	-0.017907
C_8	1.339400	1.669000

ประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T แสดงดังภาพที่ 38 จากสมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่าและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่า ทำให้แผง mono-Si PV/T มีประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่าแผง poly-Si PV/T คือ 54.14% และ 17.42% ตามลำดับ ขณะที่แผง poly-Si PV/T มีประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 46.80% และ 12.44% ตามลำดับ



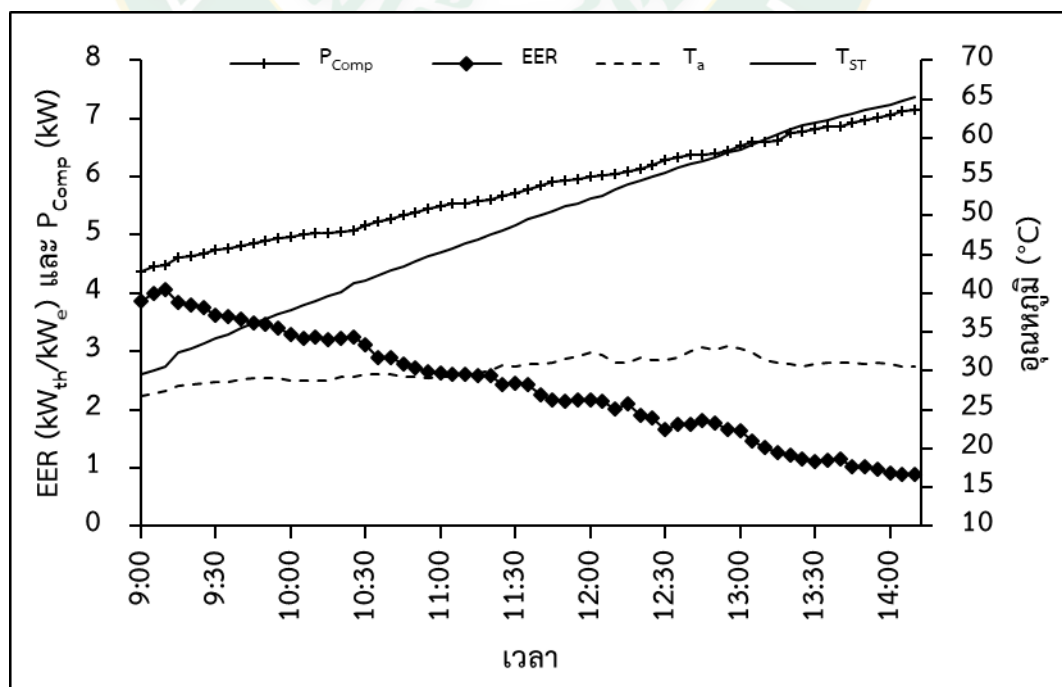
ภาพที่ 38 ประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

ผลการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน

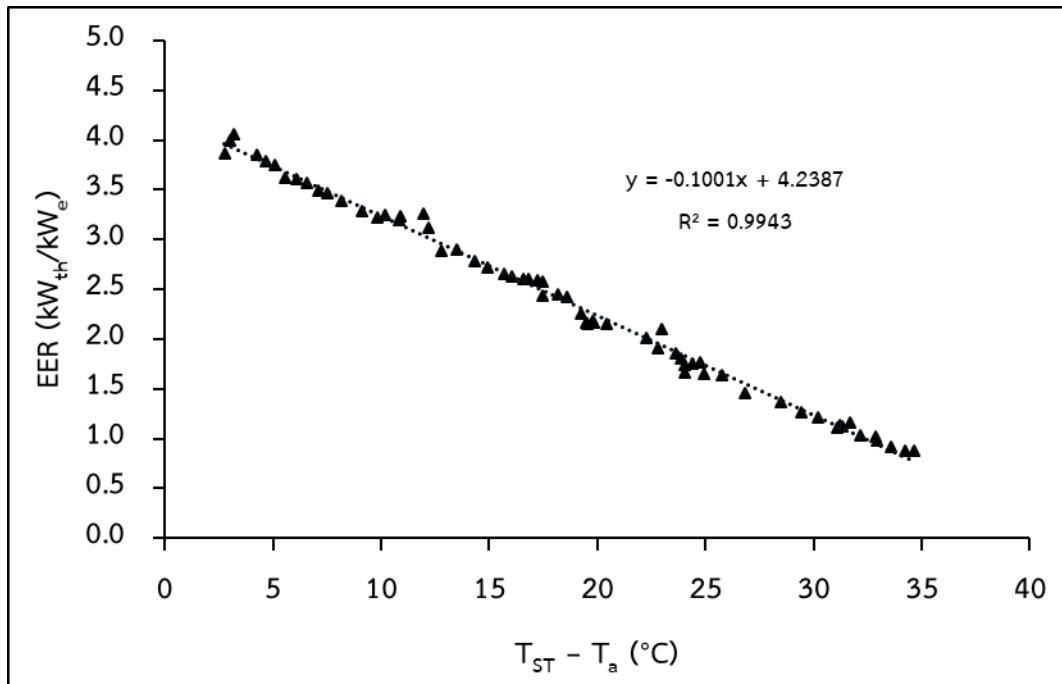
ทดสอบปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. เพื่อผลิตน้ำร้อน 2,500 L จากอุณหภูมิ 30 °C ให้มีอุณหภูมิ 65 °C ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 39 เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน (P_{Comp}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนทางกับ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ที่มีค่าลดลง การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มขึ้น เครื่องอัดไอจึงต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงาน ส่งผลให้ใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องอัดไอมากขึ้น อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานจึงลดลงตามไปด้วย เครื่องอัดไอใช้กำลังไฟฟ้ามากที่สุด 7.15 kW เฉลี่ย 5.78 kW ความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้เฉลี่ย 13.01 kW และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนมีค่าเฉลี่ยเป็น 2.38 $\text{kW}_{th}/\text{kW}_e$ ใช้เวลาผลิตน้ำร้อน 5.17 h ภาพที่ 40 อธิบายถึงผลกระทบของผลต่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ออัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน เนื่องจากปั๊มความร้อนใช้แหล่งความร้อนจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมาผลิตน้ำร้อน เมื่อผลต่างของอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะลดลง เครื่องอัดไอทำงานหนักขึ้น และค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพมีค่าลดลง การทำนายอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนคำนวณได้จากสมการการถดถอยเชิงเส้นดังนี้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 2.82% แสดงดังภาพที่ 41

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

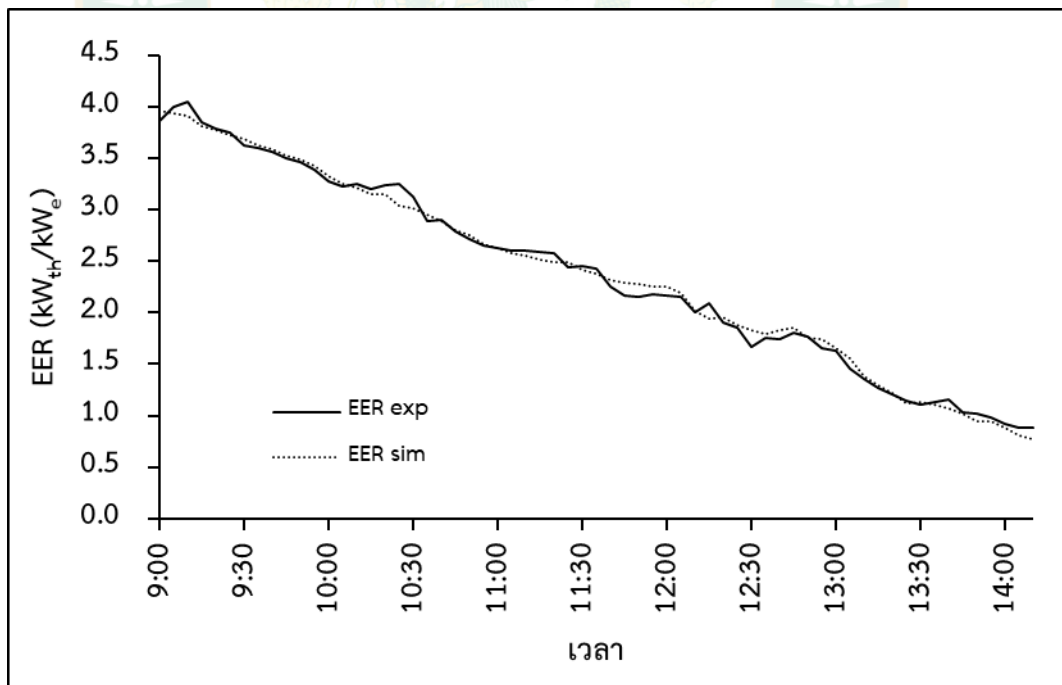
สมการที่ 36



ภาพที่ 39 ผลการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานกับผลต่างของอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม



ภาพที่ 41 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนจากการทดสอบและสมการทำนาย

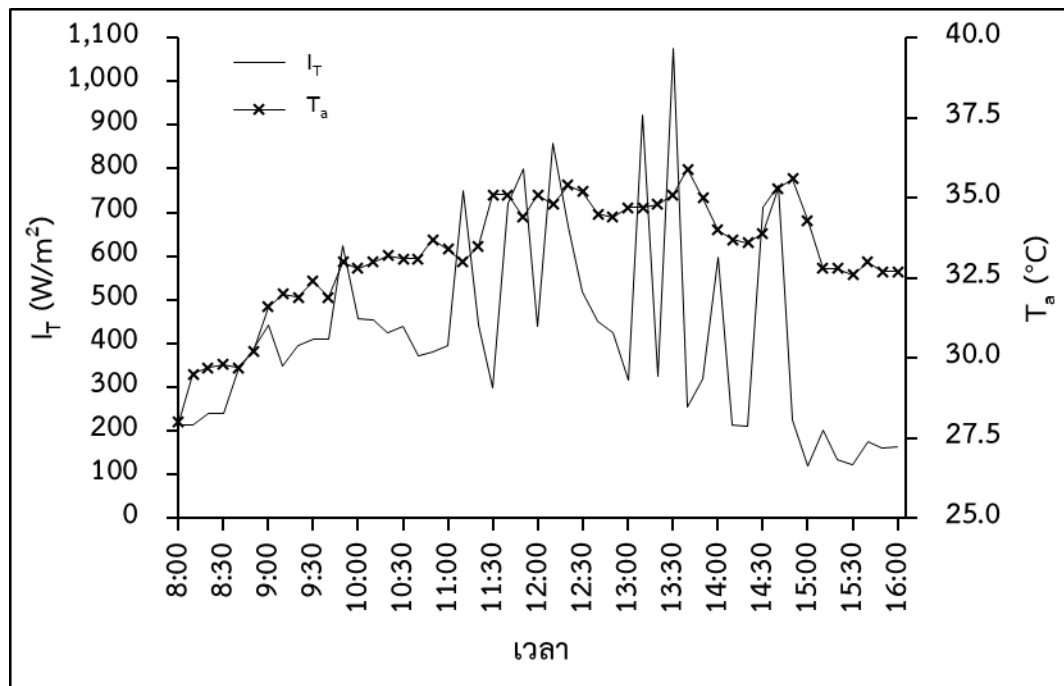
4.3 ผลการออกแบบและติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ออกแบบระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สำหรับใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนเพื่อทดแทนการใช้หลอดไฟฟ้า จะเปรียบเทียบจำนวนของแผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T ที่ใช้ในระบบ ซึ่งใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผงตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 คือ $1.2 \text{ L/min}\cdot\text{m}^2$ เพื่อหาระบบที่สามารถผลิตน้ำร้อน 2,500 L ให้มีอุณหภูมิ $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบ่งเป็น การใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงของเดือนที่มีค่ารังสีอาทิตย์ต่ำที่สุด คือ เดือนสิงหาคม เพื่อหาขนาดของระบบที่เหมาะสม และการใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมของวันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน เพื่อจำลองการทำงานของระบบตลอดทั้งปี ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะและมูลค่าของแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน จากข้อมูลดังกล่าว เนื่องจากแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบที่มีขายในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะเป็นชนิด mono-Si PV/T ส่วนแผง poly-Si PV/T แบบมีกระจกครอบไม่นิยมนำมาขายในเชิงพาณิชย์ ผู้วิจัยจึงนำแผง poly-Si PV/T แบบไม่มีกระจกครอบมาติดตั้งกระจกเพิ่มเพื่อลดการสูญเสียความร้อน แล้วนำมาใช้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิดกัน จึงทำให้มูลค่าของแผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิดมีค่าแตกต่างกัน และการเลือกขนาดของปั๊มความร้อนเพื่อใช้ผลิตน้ำร้อนร่วมกับแผง Solar PV/T จะเลือกตามพฤติกรรมการทำงานของระบบ เนื่องจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวจะทำการเชือดสุกรหลังจากเวลา 18:00 น. เป็นต้นไป ดังนั้น ระบบจะต้องผลิตน้ำร้อนในช่วงเวลากลางวัน การเลือกขนาดของปั๊มความร้อนจึงใช้ค่าชั่วโมงแสงอาทิตย์สูงสุด (Peak sun-hour, PSH) ในการคำนวณอัตราการผลิตความร้อนของปั๊มความร้อน เพื่อผลิตน้ำร้อน 2,500 L ให้มีอุณหภูมิ $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างการคำนวณอัตราการผลิตความร้อนของปั๊มความร้อนที่เลือกใช้แสดงดังภาคผนวก ก.

ตารางที่ 7 สมรรถนะของแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อนจากการทดสอบ

อุปกรณ์	ข้อมูล
mono-Si PV/T	<p>พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ ($A_{PV/T}$) : 1.698 m²</p> <p>$F_R(\tau\alpha)_e$: 0.328</p> <p>สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($F_R U_L$) : 7.2997 W/m²·K</p> <p>กำลังไฟฟ้าสูงสุด ($P_{PV/T}$) : 295 W_p</p> <p>ประสิทธิภาพรวม ($\eta_{Net,PV/T}$) : 54.14%</p> <p>ราคา : 18,200 Baht</p>
poly-Si PV/T	<p>พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ ($A_{PV/T}$) : 1.624 m²</p> <p>$F_R(\tau\alpha)_e$: 0.275</p> <p>สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($F_R U_L$) : 8.4743 W/m²·K</p> <p>กำลังไฟฟ้าสูงสุด ($P_{PV/T}$) : 270 W_p</p> <p>ประสิทธิภาพรวม ($\eta_{Net,PV/T}$) : 46.80%</p> <p>ราคา : 31,860 Baht</p>
ปั๊มความร้อน	<p>อัตราความร้อนที่ผลิตได้เฉลี่ย (Q_C) : 13.01 kW</p> <p>กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องอัดไอ (P_{Comp}) : 5.78 kW</p> <p>อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) : 2.38 kW_{th}/kW_e</p> <p>ราคา : 40,093.42 Baht</p>

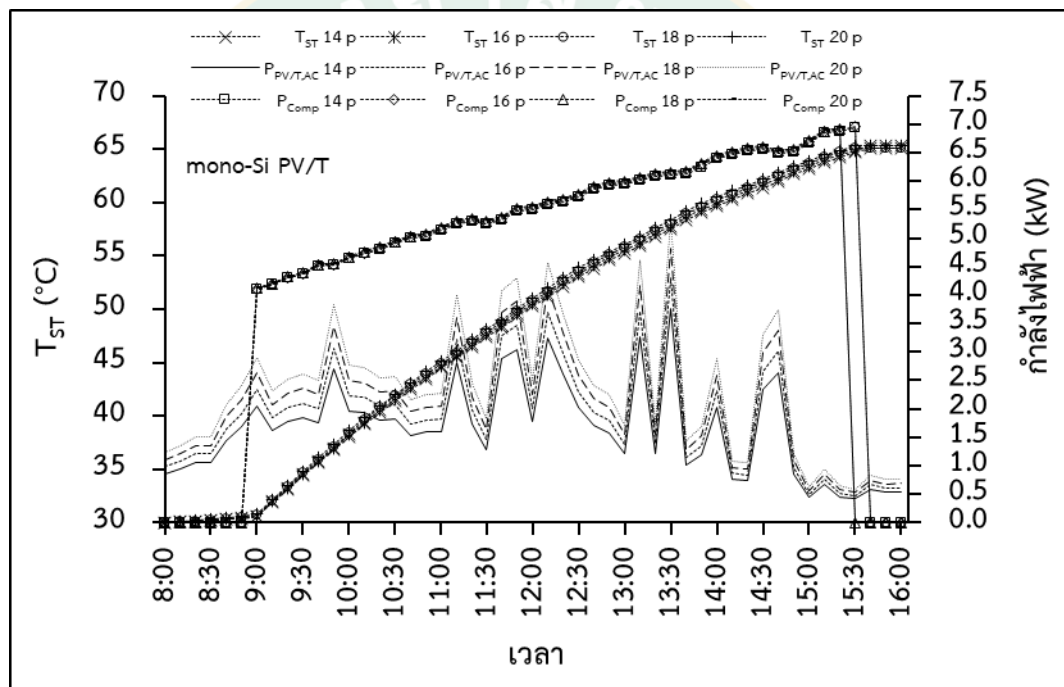
ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจริง ของวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2562 แสดงดังภาพที่ 42 ซึ่งเป็นเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุด ของจังหวัดเชียงใหม่ และเป็นวันที่มีเมฆเป็นช่วง ๆ สลับกับท้องฟ้าโปร่ง สังเกตได้จากความแปรปรวนของค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยมีค่า 432.67 W/m² และ 33.31 °C ตามลำดับ



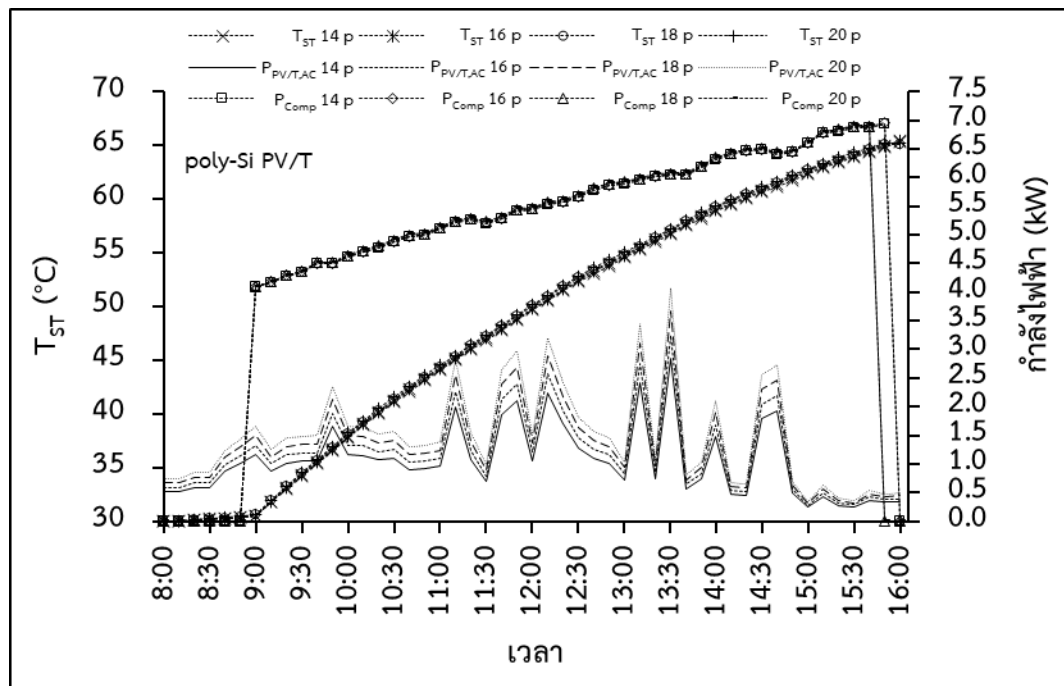
ภาพที่ 42 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2562

จากภาพที่ 43 และภาพที่ 44 แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T จำนวนตั้งแต่ 14-20 แผง สามารถผลิตน้ำร้อน 2,500 L ให้มีอุณหภูมิ 65 °C ได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ โดยผู้วิจัยต้องการเลือกจำนวนแผงให้สอดคล้องกับช่วงเวลาการทำงาน ซึ่งจะให้ระบบเริ่มทำงานที่เวลา 9:00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ค่ารังสีอาทิตย์สูงกว่า 400 W/m^2 อ้างอิงจากข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ตลอดปีในภาพที่ 45 และระบบต้องผลิตน้ำร้อนให้ มีอุณหภูมิ 65 °C ก่อนเวลา 16:00 น. เพราะหลังจากเวลาดังกล่าวโรงฆ่าสัตว์จะประสบปัญหาแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลดลง ส่งผลให้ปั๊มความร้อนทำงานผิดปกติ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า การเลือกชนิดแผง Solar PV/T มาทำงานในระบบจะส่งผลโดยตรงต่อการผลิตน้ำร้อน การใช้แผง mono-Si PV/T ซึ่งเป็นแผงที่มีสมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า จะลดภาระการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนลงได้มากกว่า ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.73-4.81 kW ต่างจากการใช้แผง poly-Si PV/T ที่มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 4.95-5.04 kW โดยกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง ทำให้เครื่องอัดไอทำงานมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อลดภาระการทำงานของปั๊มความร้อนได้มากขึ้นจะทำให้ระบบมีระยะเวลาการผลิตน้ำร้อนลดลงตามไปด้วย กรณีที่ใช้แผง mono-Si PV/T ใช้เวลาผลิตน้ำร้อนน้อยกว่า เวลาที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 6.33-6.50 h/day โดยปั๊มความร้อนที่ทำงานร่วมกับแผง mono-Si PV/T 18 แผง และ 20 แผง ใช้เวลาผลิตน้ำร้อนน้อยที่สุด ขณะที่ปั๊มความร้อนที่ใช้งาน

ร่วมกับแผง poly-Si PV/T จะใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนระหว่าง 6.67-6.83 h/day โดยปั๊มความร้อนที่ใช้งานร่วมกับแผง poly-Si PV/T 14 แผง และ 16 แผง ใช้เวลาผลิตน้ำร้อนมากที่สุด กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T ($P_{PV/T,AC}$) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบและการเพิ่มจำนวนแผงจะทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น กรณีใช้แผง mono-Si PV/T สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า poly-Si PV/T โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ระหว่าง 1.89-2.68 kW ขณะที่การใช้แผง poly-Si PV/T มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.30-1.86 kW ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 20 แผง ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด คือ 18.89 kWh/day และการใช้แผง poly-Si PV/T จำนวน 14 แผง ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยที่สุด คือ 8.48 kWh/day

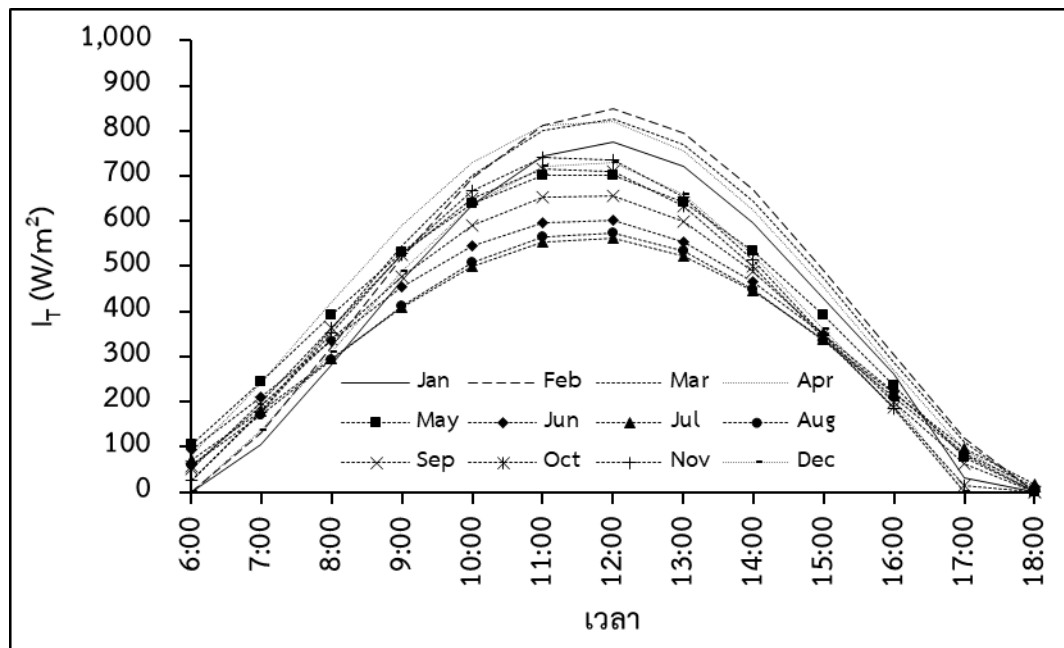


ภาพที่ 43 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำถึงเก็บน้ำร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
กรณีใช้แผง mono-Si PV/T

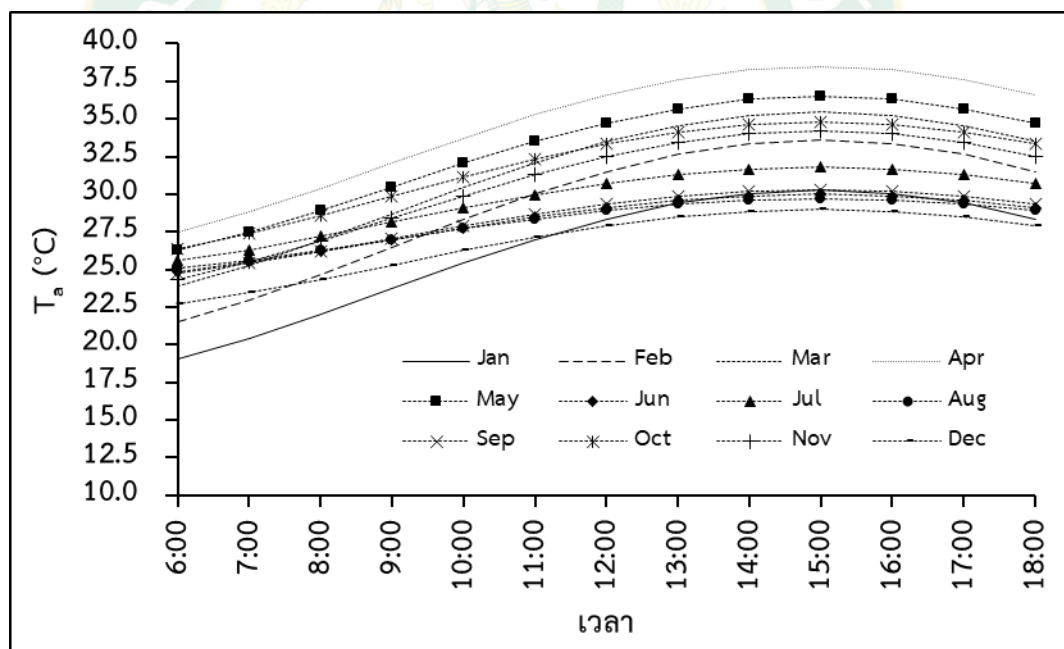


ภาพที่ 44 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำถึงเก็บน้ำร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
กรณีใช้แผง poly-Si PV/T

จากข้อมูลข้างต้น ทำให้ทราบว่ากรณีที่ใช้แผง mono-Si PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่ากรณีที่ใช้แผง poly-Si PV/T อีกทั้งยังลดภาระการทำงานของปั๊มความร้อนลง ส่งผลให้เครื่องอัดไอของปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลง และลดระยะเวลาการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนลงอีกด้วย ต่อมาผู้วิจัยได้ใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจากวันที่เป็นตัวแทนในแต่ละเดือนของจังหวัดเชียงใหม่ทำนายการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตลอดทั้งปี เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจเลือกขนาดและชนิดของระบบที่เหมาะสมต่อการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว โดยจะพิจารณาที่ระยะเวลาคืนทุนของระบบ ใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์จากฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ ระดับตำบล ปี 2560 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560b) คำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากหนังสือ Solar engineering of thermal processes (Duffie and Beckman, 2013) และใช้ข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจาก ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ (ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ, 2561) คำนวณจากงานวิจัยของ Chaichana et al. (Chaichana et al., 2010) ได้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 45 และภาพที่ 46 ตัวอย่างการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมทั้งปีแสดงดังภาคผนวก ก.



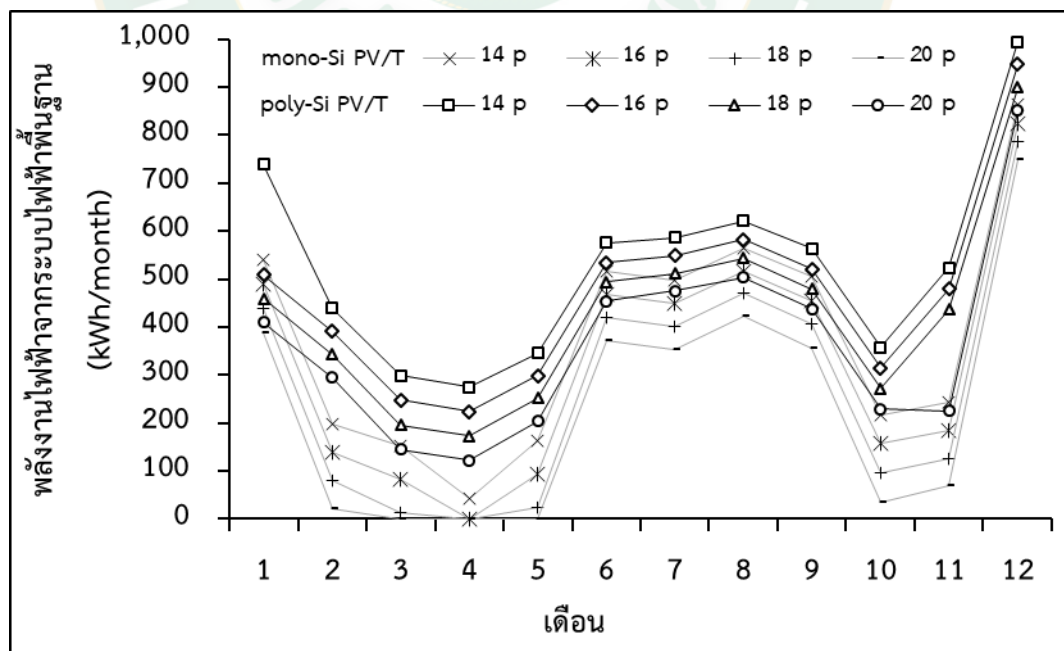
ภาพที่ 45 ค่ารังสีอาทิตย์ตลอดปีของจังหวัดเชียงใหม่



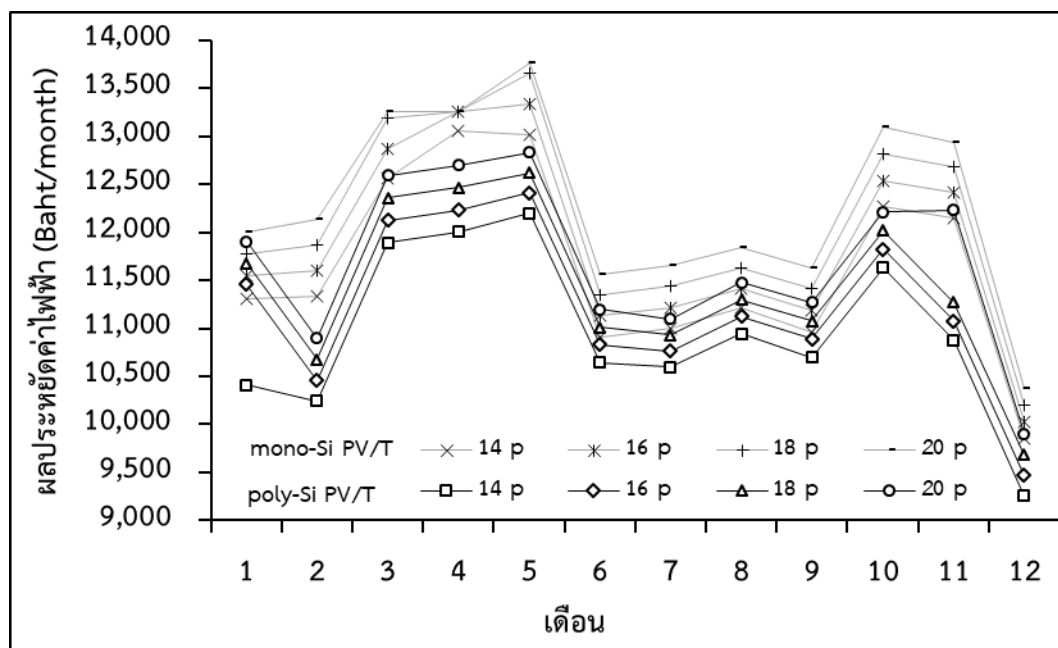
ภาพที่ 46 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดปีของจังหวัดเชียงใหม่

จากการทำนายการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตลอดทั้งปี ทำให้ทราบถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน จากภาพที่ 47 กรณีที่ใช้แผง mono-Si PV/T 14 แผง 16 แผง 18 แผง และ 20 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานทั้งปี 4,503.74 kWh/year 3,859.94 kWh/year 3,261.62 kWh/year และ 2,767.48 kWh/year ตามลำดับ กรณี

ที่ใช้แผง poly-Si PV/T 14 แผง 16 แผง 18 แผง และ 20 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานทั้งปี 6,320.92 kWh/year 5,599.79 kWh/year 5,060.34 kWh/year และ 4,353.07 kWh/year ตามลำดับ การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานทั้ง 2 กรณีจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนแผง กรณีที่ใช้แผง mono-Si PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า poly-Si PV/T ส่งผลให้ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยกว่า สอดคล้องกับผลประหยัดค่าไฟฟ้ารายเดือนดังภาพที่ 48 ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T จึงทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าได้มากกว่า โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T 14 แผง 16 แผง 18 แผง และ 20 แผง ประหยัดค่าไฟฟ้าตลอดทั้งปีให้กับโรงฆ่าสัตว์ได้ 139,620.30 Baht/year 142,536.72 Baht/year 145,247.12 Baht/year และ 147,485.54 Baht/year ตามลำดับ ผลประหยัดค่าไฟฟ้ารวมทั้งปีกรณีใช้แผง poly-Si PV/T 14 แผง 16 แผง 18 แผง และ 20 แผง คือ 131,388.47 Baht/year 134,655.22 Baht/year 137,098.90 Baht/year และ 140,302.84 Baht/year ตามลำดับ ผลประหยัดดังกล่าวสัมพันธ์กับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน แตกต่างกันเพียงแค่วันกุมภาพันธ์ ที่มีวันทำงานน้อยที่สุด การตัดสินใจเลือกกระบวนที่เหมาะสมไม่อาจพิจารณาเพียงแค่ผลประหยัดได้ การเพิ่มจำนวนแผงทำให้ผลประหยัดเพิ่มขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มมูลค่าการลงทุนด้วยเช่นกัน การเลือกระยะเวลาคืนทุนซึ่งเป็นตัวแปรที่พิจารณาทั้งผลประหยัดและมูลค่าการลงทุนมาใช้ในการตัดสินใจ จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม



ภาพที่ 47 พลังงานไฟฟ้ารายเดือนจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน



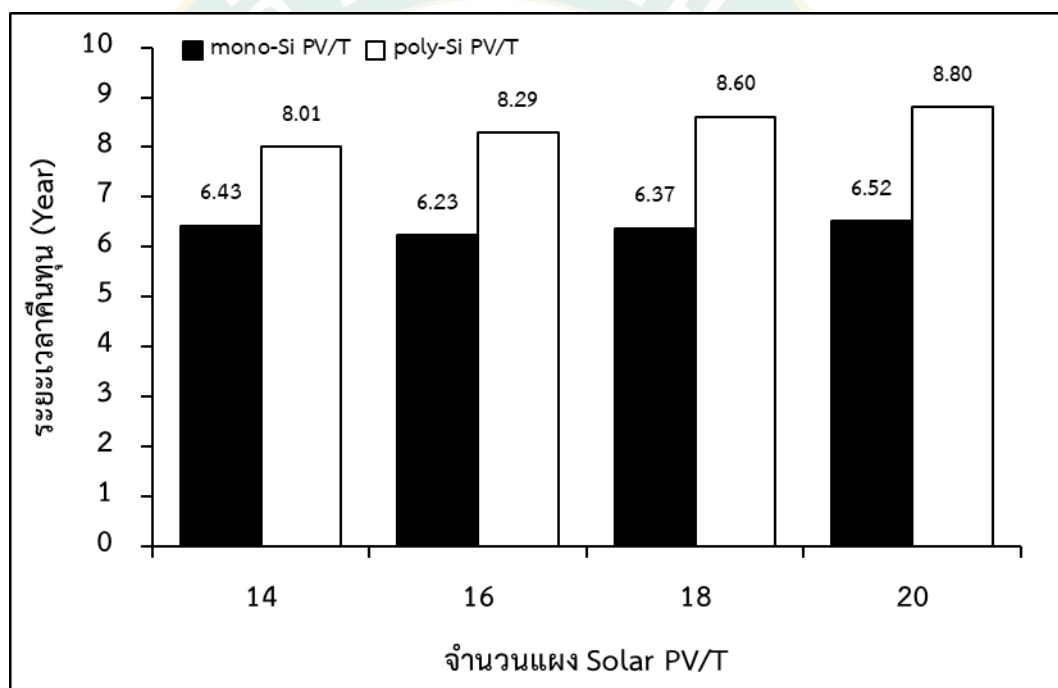
ภาพที่ 48 ผลประหยัดค่าไฟฟ้ารายเดือน

มูลค่าการลงทุนเริ่มต้นของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump เป็นผลรวมของมูลค่าแผง Solar PV/T ป้อนความร้อน ถังเก็บน้ำร้อน อินเวอร์เตอร์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ป้อนน้ำสำหรับไหลเวียนน้ำในระบบ และอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 มูลค่าการลงทุนเริ่มต้นและผลประหยัดรายปีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปี

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

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่าและมีผลประหยัดรายปีที่สูงกว่า จึงทำให้มีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T ดังแสดงในภาพที่ 49 โดยมีระยะเวลาคืนทุน 6.23-6.52 Year ส่วนระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T มีระยะเวลาคืนทุน 8.01-8.80 Year จำนวนแผง Solar PV/T ที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลประหยัดรายปีมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ก็มาพร้อมกับมูลค่าการลงทุนที่สูงขึ้น ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด คือ ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง มีระยะเวลาคืนทุน 6.23 year จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปีจึงสรุปได้ว่า ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง เป็นระบบที่สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว และมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด



ภาพที่ 49 ระยะเวลาคืนทุนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปี

ทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนระหว่างระบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าและระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง จากตารางที่ 9 พบว่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่ใช้ในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump มีค่าลดลงจากการใช้ขดลวดความร้อน 31,465.06 kWh/year คิดเป็น 89.07% และสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าจากระบบเดิมได้ 142,536.72 Baht/year มีมูลค่าการลงทุน 888,314 Baht ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat

Pump มีระยะเวลาคืนทุน 6.23 year และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 15.28% ต่อปี เมื่อคำนวณด้วยอายุการทำงานของระบบ 20 year

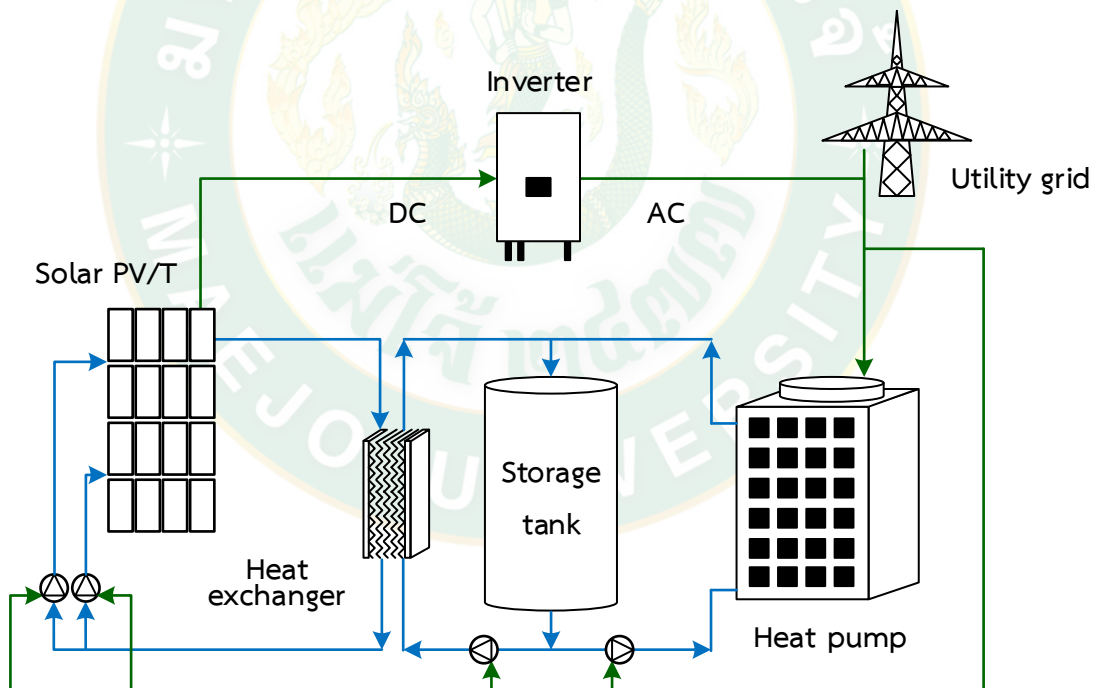
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

รายการ	ขดลวดไฟฟ้า	Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump
อัตราค่าไฟฟ้า (Baht/kWh)		4.53
พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (kWh/year)	35,325.00	3,859.94
ค่าไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (Baht/year)	160,022.25	17,485.53
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kWh/year)	-	31,465.06
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (Baht/year)	-	142,536.72
มูลค่าการลงทุน (Baht)	-	888,314
ระยะเวลาคืนทุน (year)	-	6.23
อายุการใช้งานของระบบ (Year)	-	20
IRR (% ต่อปี)	-	15.28

ทำการติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง ณ โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ดังภาพที่ 50 ระบบจะผลิตน้ำร้อนจาก 2 แหล่ง คือ ผลิตน้ำร้อนด้วยแผง Solar PV/T ที่ถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนมารับความร้อน และผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนดังภาพที่ 51 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะถูกแปลงจากกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และจะป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบประกอบด้วย แผง Solar PV/T ชนิด mono-Si PV/T ขนาดกำลังไฟฟ้า $295 \text{ W}_p/\text{แผง}$ จำนวน 16 แผง ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวนกันความร้อนปริมาตร 2,500 L เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปั๊มน้ำ และอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 50 ผลการติดตั้งระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump



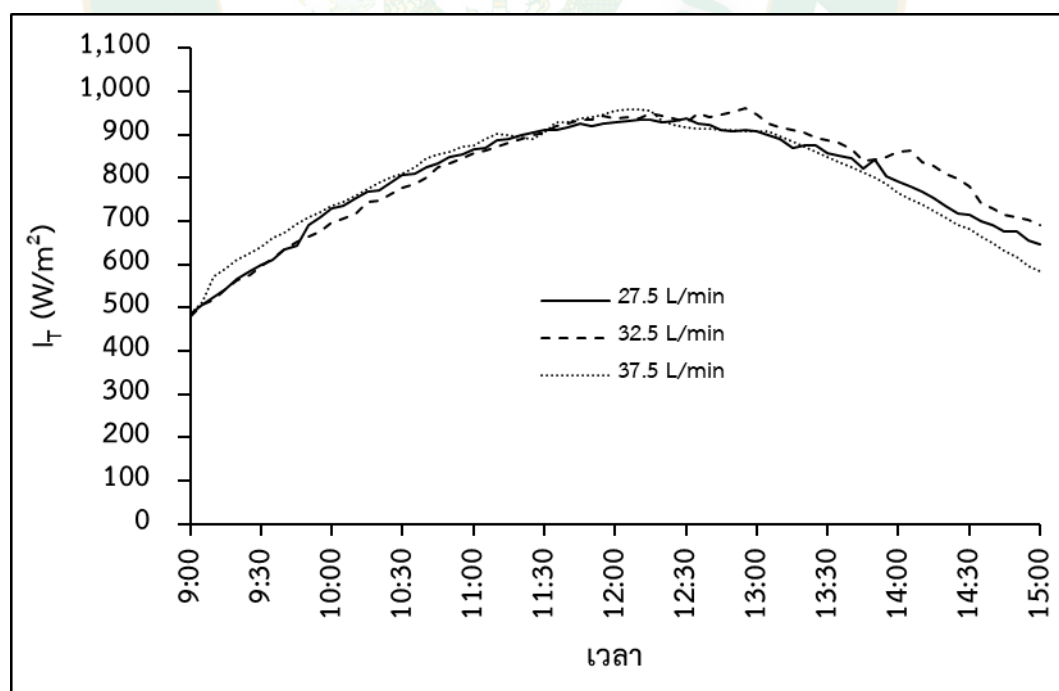
ภาพที่ 51 การทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

4.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

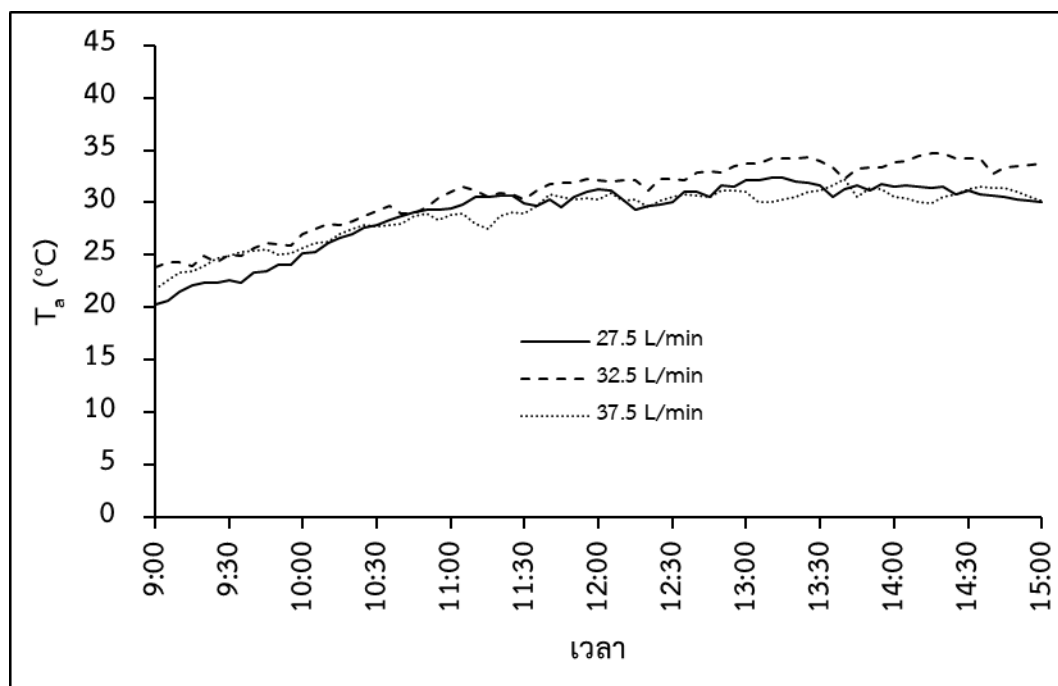
การทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

ทำการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยต้องการทราบผลที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผงที่ต่ำกว่ามาตรฐาน (ASHRAE STANDARD 93-2003) ตามมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐาน คือ 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min ตามลำดับ ทดสอบโดยการผลิตน้ำร้อน 2,500 L จากอุณหภูมิประมาณ 30 °C ให้มีอุณหภูมิ 65 °C ทดสอบระหว่างวันที่ 15 พฤศจิกายน ถึง วันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2563 และจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงที่ระบบทำงานเพื่อผลิตน้ำร้อนให้ได้ 65 °C โดยแบ่งตามอุปกรณ์และการใช้พลังงานไฟฟ้า มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T แสดงดังภาพที่ 52 และภาพที่ 53 พิจารณาในช่วงที่ระบบทำงาน พบว่า ค่าสภาพแวดล้อมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับ กรณีที่ใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min มีค่าเป็น 16.17 MJ/m²-day 15.42 MJ/m²-day และ 16.09 MJ/m²-day ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศแวดล้อม คือ 28.81 °C 30.37 °C และ 28.68 °C ตามลำดับ



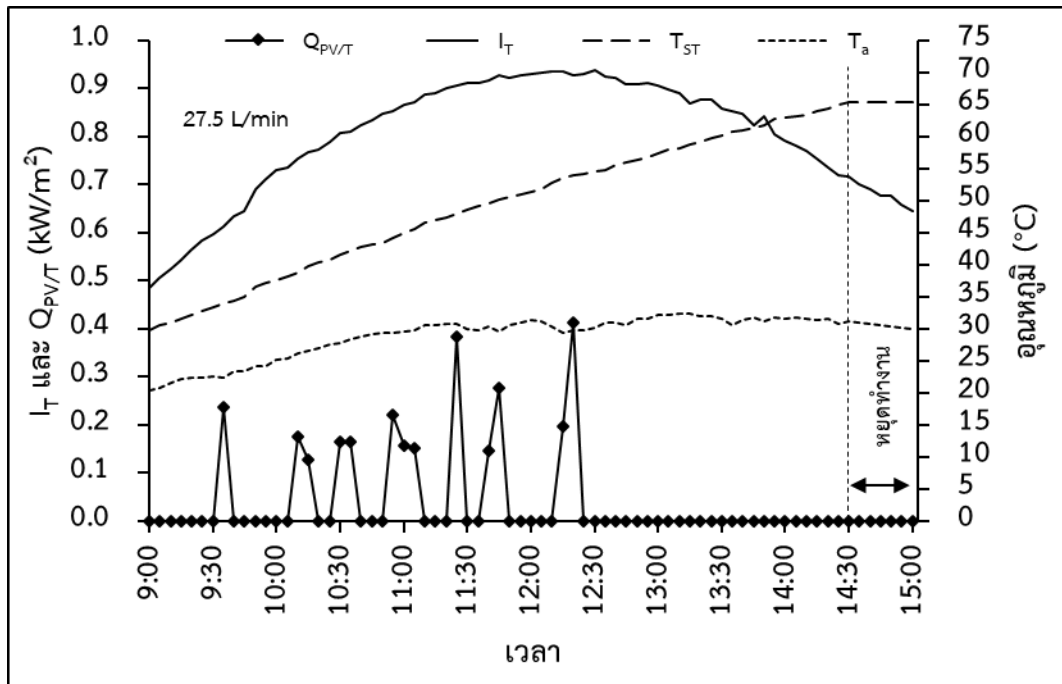
ภาพที่ 52 ค่ารังสีอาทิตย์ในการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T



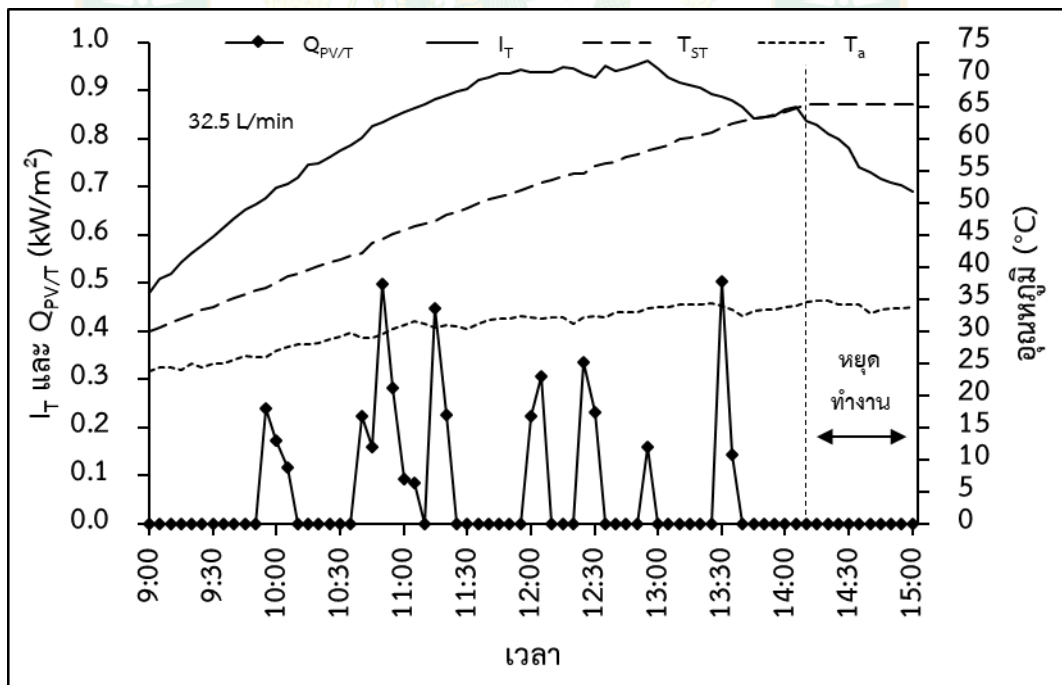
ภาพที่ 53 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

แผง Solar PV/T

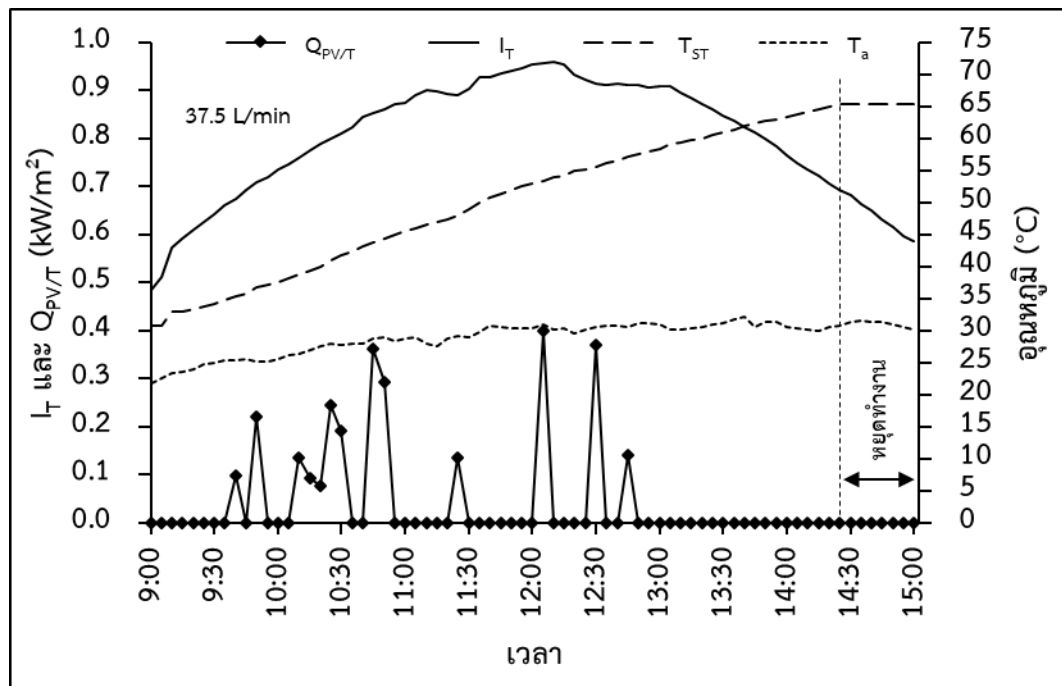
การผลิตน้ำร้อนของแผง Solar PV/T ในทางทฤษฎีจะอาศัยค่ารังสีอาทิตย์วิกฤตกำหนดการทำงานของแผง Solar PV/T แต่ในการทำงานจริง จะใช้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ($T_{f,o} - T_{ST}$) เป็นตัวกำหนด หากผลต่างอุณหภูมิดังกล่าวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4°C ปั๊มน้ำที่หมุนเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T จะทำงาน แต่ถ้าหากผลต่างอุณหภูมิดังกล่าวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2°C ปั๊มน้ำจะหยุดทำงาน ทำให้อุณหภูมิที่แผง Solar PV/T ผลิตได้เกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ เนื่องจากหน้าที่หลักในการผลิตน้ำร้อนจะเป็นของปั๊มความร้อน แผง Solar PV/T มีหน้าที่ช่วยลดภาระการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อน หากแผง Solar PV/T สามารถผลิตความร้อนให้กับน้ำร้อนได้มากจะทำให้ปั๊มความร้อนทำงานน้อยลงและลดระยะเวลาทำงานของระบบลงอีกด้วย จากภาพที่ 54 ภาพที่ 55 และภาพที่ 56 แสดงอัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ จะเห็นว่าที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump มีระยะเวลาการทำงานสั้นที่สุด คือ 5.17 h (9:00-14:10 น.) และทำให้แผง Solar PV/T ผลิตความร้อนได้มากที่สุด คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนได้ 36.14 MJ ขณะที่อัตราการไหล 27.5 L/min มีระยะเวลาการทำงาน 5.5 h (9:00-14:30 น.) แผง Solar PV/T ผลิตความร้อนได้ 22.87 MJ และอัตราการไหล 37.5 L/min แผง Solar PV/T ผลิตความร้อนได้ 22.54 MJ มีระยะเวลาการทำงาน 5.42 h (9:00-14:25 น.)



ภาพที่ 54 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน
ที่อัตราการไหล 27.5 L/min

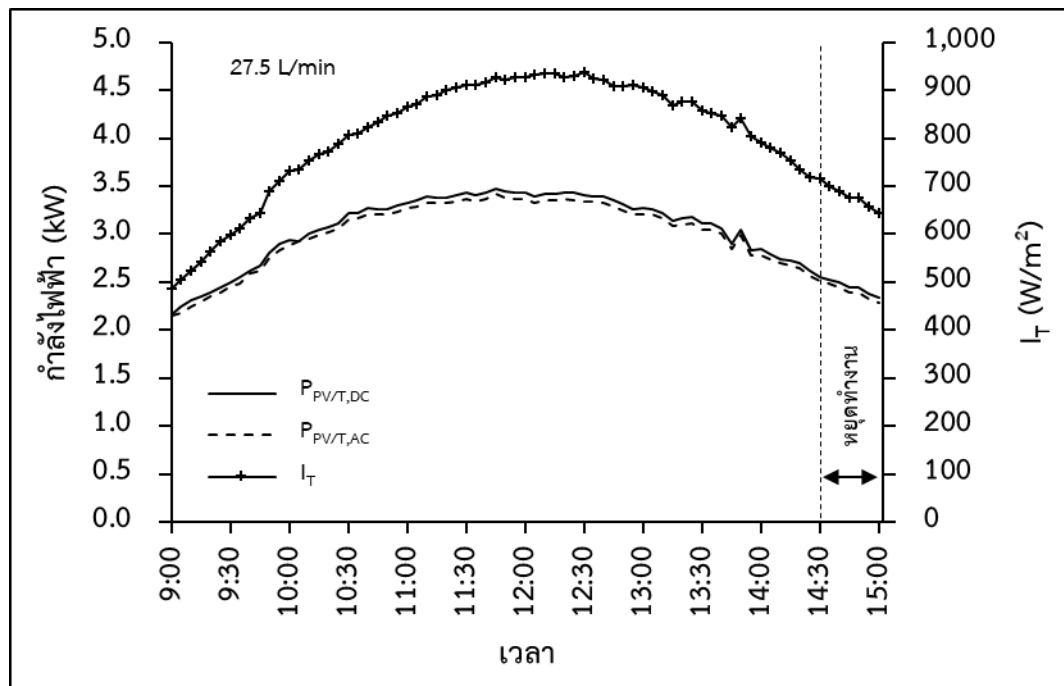


ภาพที่ 55 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน
ที่อัตราการไหล 32.5 L/min

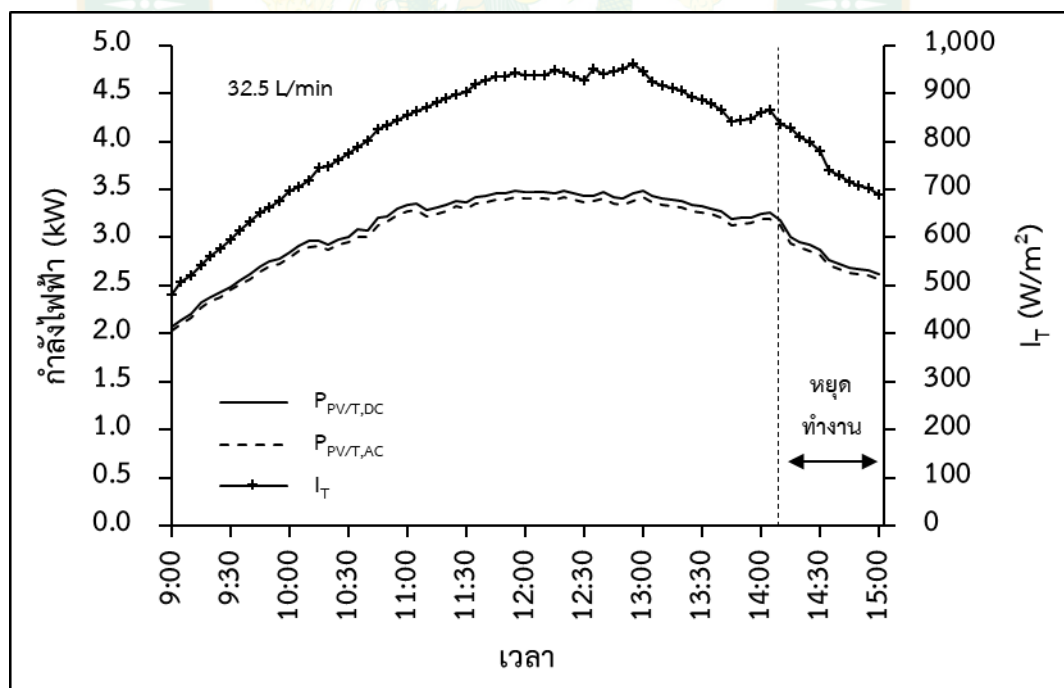


ภาพที่ 56 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่อัตราการไหล 37.5 L/min

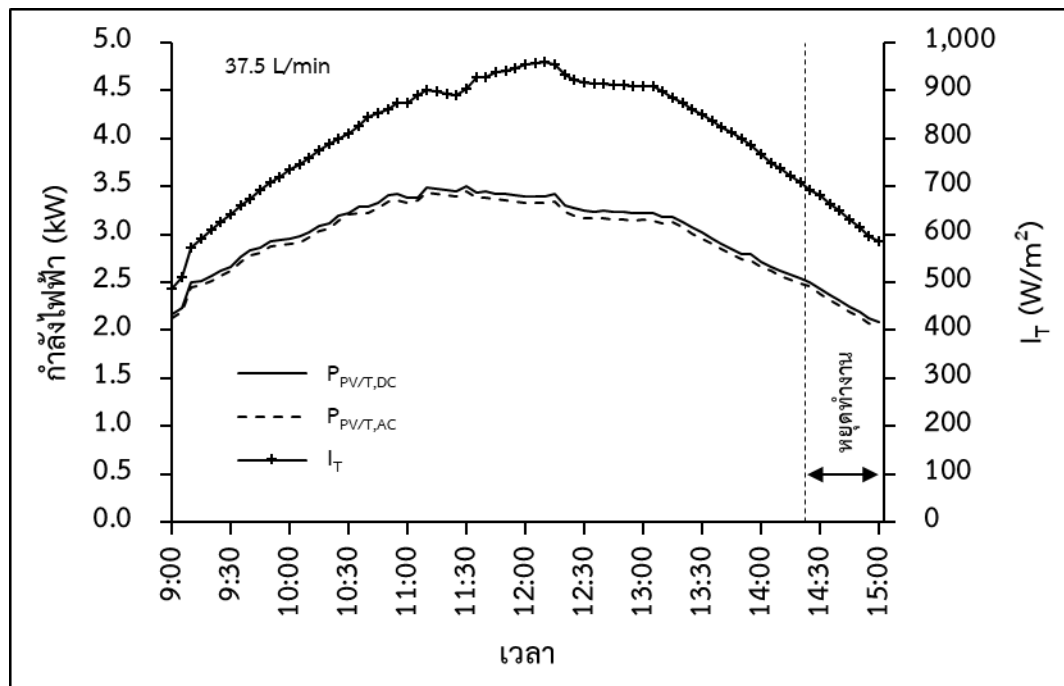
แผง Solar PV/T ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับปั๊มความร้อน รวมถึงอุปกรณ์ในระบบและเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานของโรงฆ่าสัตว์ แต่เนื่องจากแผง Solar PV/T ผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจึงจำเป็นต้องผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับอุปกรณ์ ภาพที่ 57 ภาพที่ 58 และภาพที่ 59 แสดงกำลังไฟฟ้าจากแผง Solar PV/T ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ที่อัตราการไหล 27.5 L/min แนวโน้มของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T จะมีลักษณะคล้ายกับแนวโน้มของค่ารังสีอาทิตย์ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของค่ารังสีอาทิตย์ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าจากแผง Solar PV/T แนวโน้มนี้ปรากฏให้เห็นในการทดสอบทุกอัตราการไหล กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับของแผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 27.5 L/min มีค่าสูงสุด 3.47 kW (เฉลี่ย 3.07 kW) และ 3.43 kW (เฉลี่ย 3.01 kW) ตามลำดับ กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับของแผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 32.5 L/min มีค่าสูงสุด 3.49 kW (เฉลี่ย 3.14 kW) และ 3.42 kW (เฉลี่ย 3.08 kW) ตามลำดับ กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับของแผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 37.5 L/min มีค่าสูงสุด 3.50 kW (เฉลี่ย 3.07 kW) และ 3.44 kW (เฉลี่ย 3.01 kW) ตามลำดับ



ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้แผง Solar PV/T
ที่อัตราการไหล 27.5 L/min

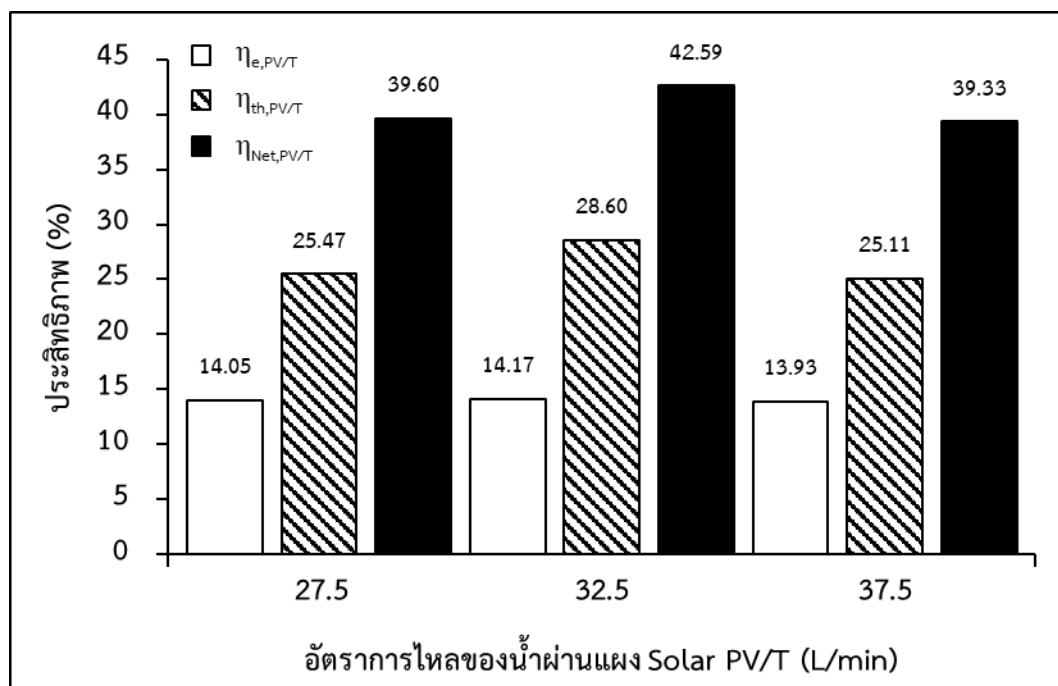


ภาพที่ 58 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้แผง Solar PV/T
ที่อัตราการไหล 32.5 L/min



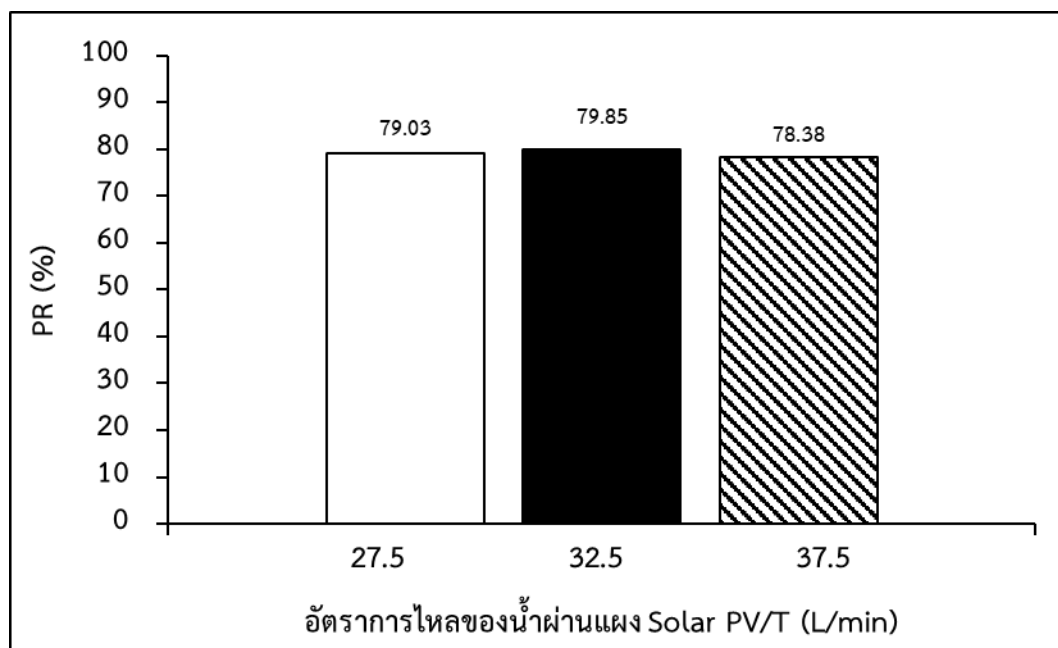
ภาพที่ 59 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ผลิตได้แผง Solar PV/T ที่อัตราการไหล 37.5 L/min

ประสิทธิภาพทางความร้อน ($\eta_{th,PV/T}$) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ($\eta_{e,PV/T}$) และ ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ($\eta_{Net,PV/T}$) แสดงดังภาพที่ 60 สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน ที่อัตราการไหล 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่าเป็น 14.05% 14.17% และ 13.93% ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่าแตกต่างกัน โดยอัตราการไหลที่ 32.5 L/min แผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด 28.60% เนื่องจากที่อัตราการไหลนี้แผง Solar PV/T ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ไหลผ่านได้มากที่สุด แล้วจึงส่งผลถึงประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T อีกด้วย ทำให้แผง Solar PV/T ที่ใช้อัตราการไหล 32.5 L/min มีประสิทธิภาพรวมสูงที่สุด 42.59%



ภาพที่ 60 ประสิทธิภาพทางความร้อน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T จากการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

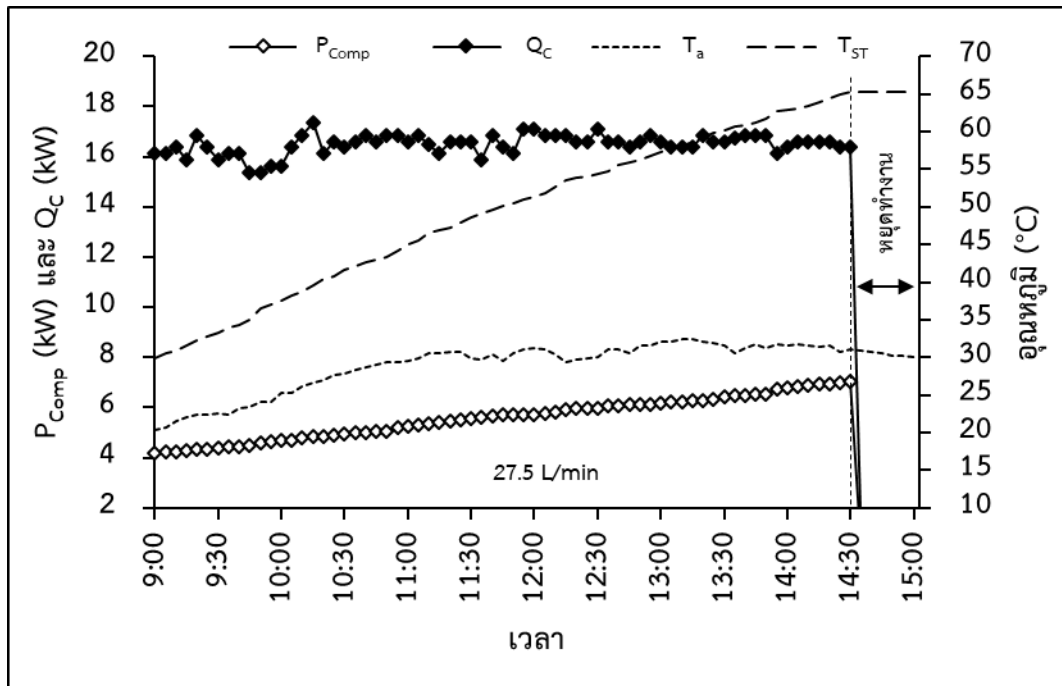
สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PR) เป็นการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จากระบบต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในทางทฤษฎี จากภาพที่ 61 พบว่า แผง Solar PV/T ที่ใช้อัตราการไหล 32.5 L/min มีค่า PR สูงที่สุด 79.85% รองลงมา คือ อัตราการไหล 27.5 L/min ที่ทำให้แผง Solar PV/T มีค่า PR เท่ากับ 79.03% และแผง Solar PV/T ที่ใช้อัตราการไหล 37.5 L/min มีค่า PR ต่ำที่สุด 78.38% จากข้อมูลข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min ทำให้แผงมีประสิทธิภาพรวมและค่า PR มากที่สุด เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากแผง Solar PV/T มากที่สุด ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าและความร้อนได้มากที่สุด



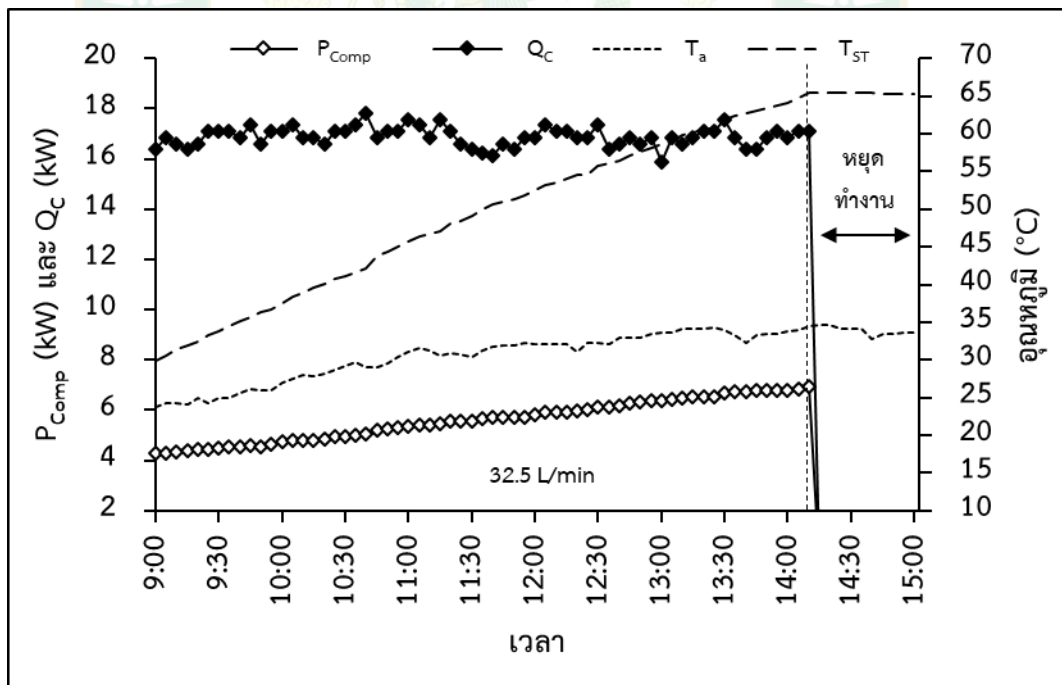
ภาพที่ 61 สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

ปั๊มความร้อน

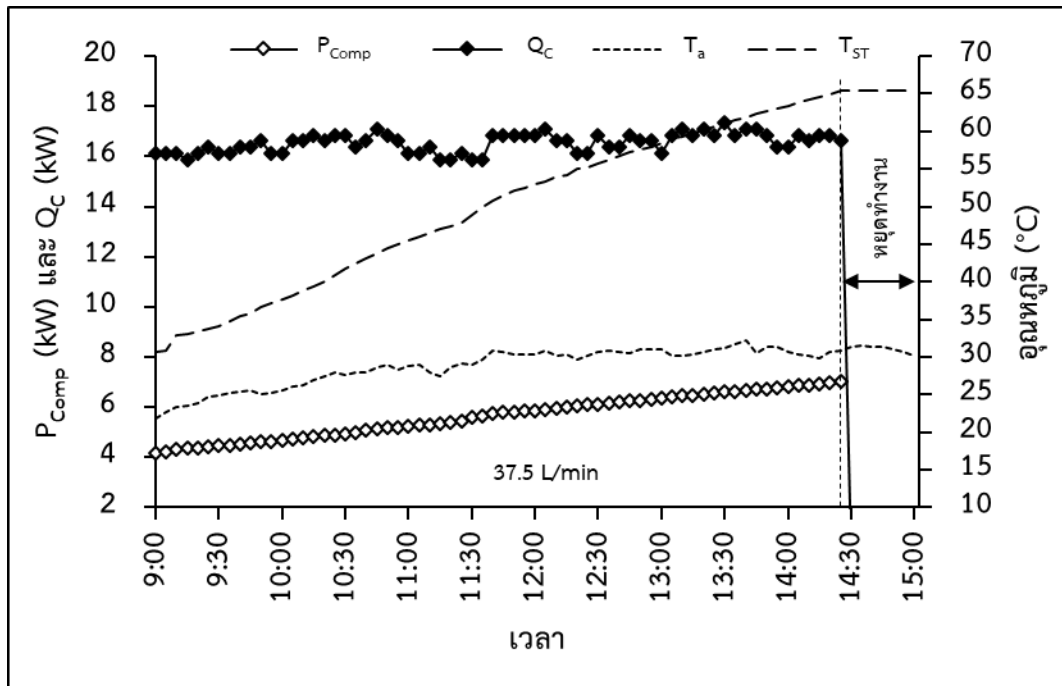
อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการไหลทั้ง 3 ค่า มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้มีค่าเฉลี่ย 16.50 kW 16.89 kW และ 16.54 kW ที่อัตราการไหล 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 62 ภาพที่ 63 และภาพที่ 64 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน เมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนจะลดลง ทำให้เครื่องอัดไอทำงานเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับการถ่ายเทความร้อน กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอมีค่าเฉลี่ย 5.59 kW (สูงสุด 7.04 kW) 5.60 kW (สูงสุด 6.92 kW) และ 5.65 kW (สูงสุด 7.04 kW) ในกรณีของอัตราการไหล 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min ตามลำดับ ภาพที่ 65 ภาพที่ 66 และภาพที่ 67 แสดงอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) ที่อัตราการไหลทั้ง 3 ค่า อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานสัมพันธ์กับอัตราความร้อนที่ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ เมื่อเครื่องอัดไอใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น อัตราส่วนประสิทธิภาพจึงมีค่าลดลง โดยที่อัตราการไหล 32.5 L/min มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยสูงสุด 3.08 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ ตามมาด้วย อัตราการไหล 27.5 L/min และ 37.5 L/min มีค่าเท่ากับ 3.01 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ และ 2.99 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{e}}$ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 68



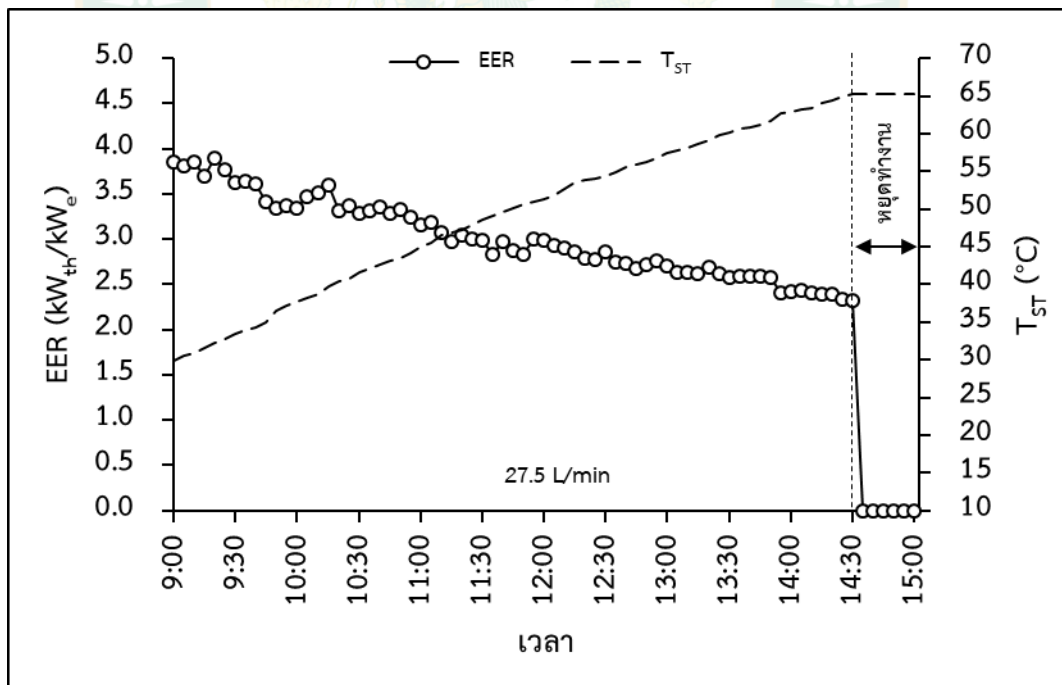
ภาพที่ 62 อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการไหล 27.5 L/min



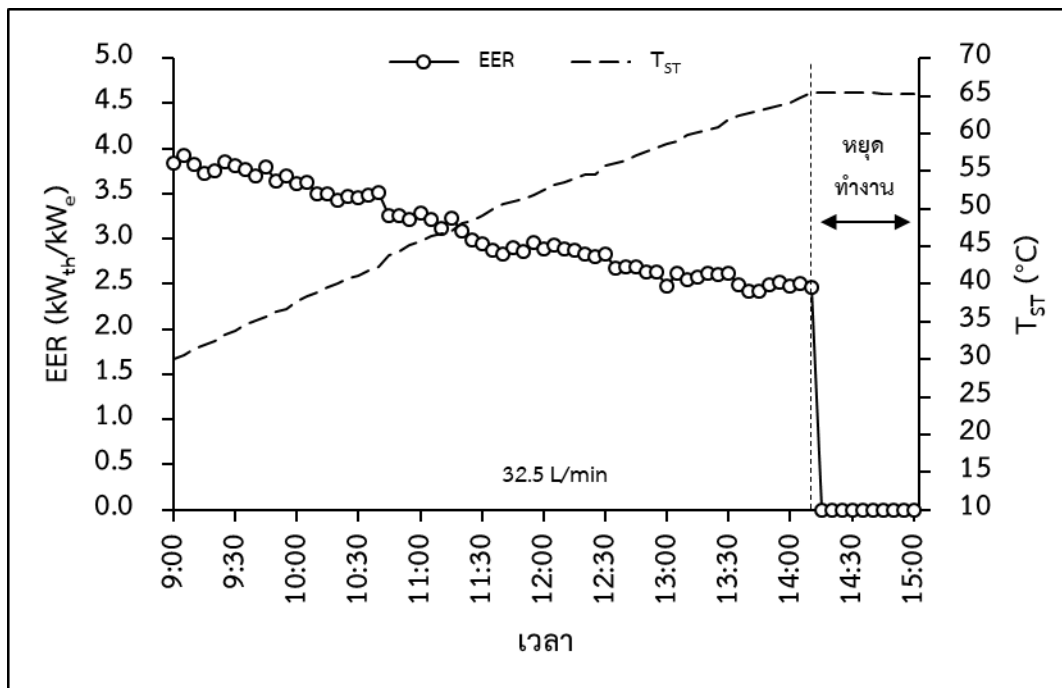
ภาพที่ 63 อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการไหล 32.5 L/min



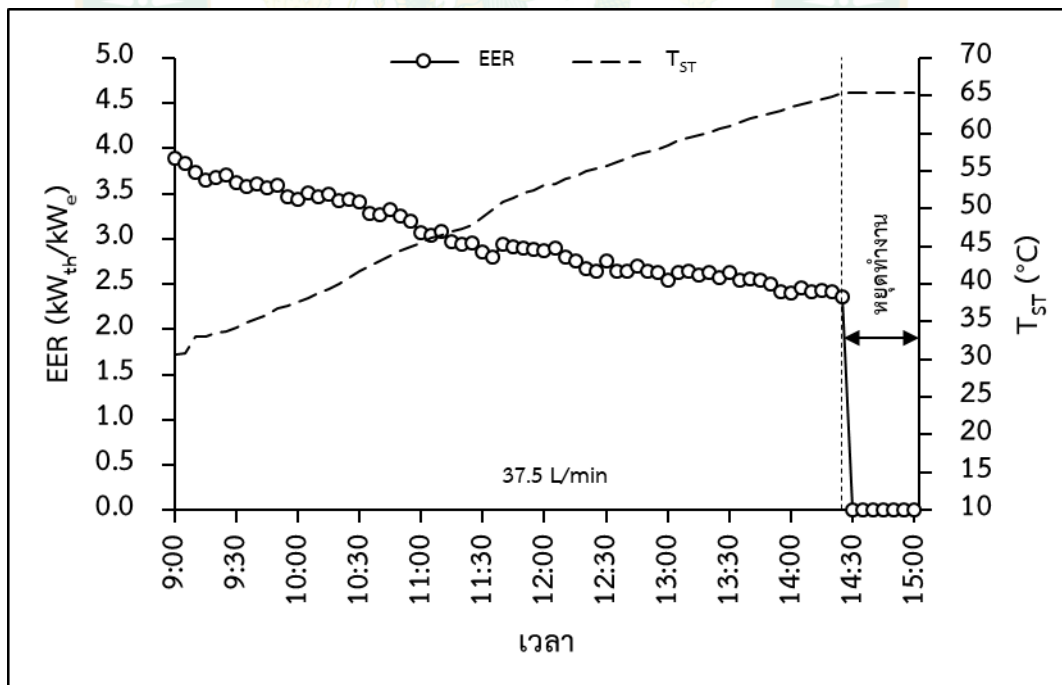
ภาพที่ 64 อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ ที่อัตราการไหล 37.5 L/min



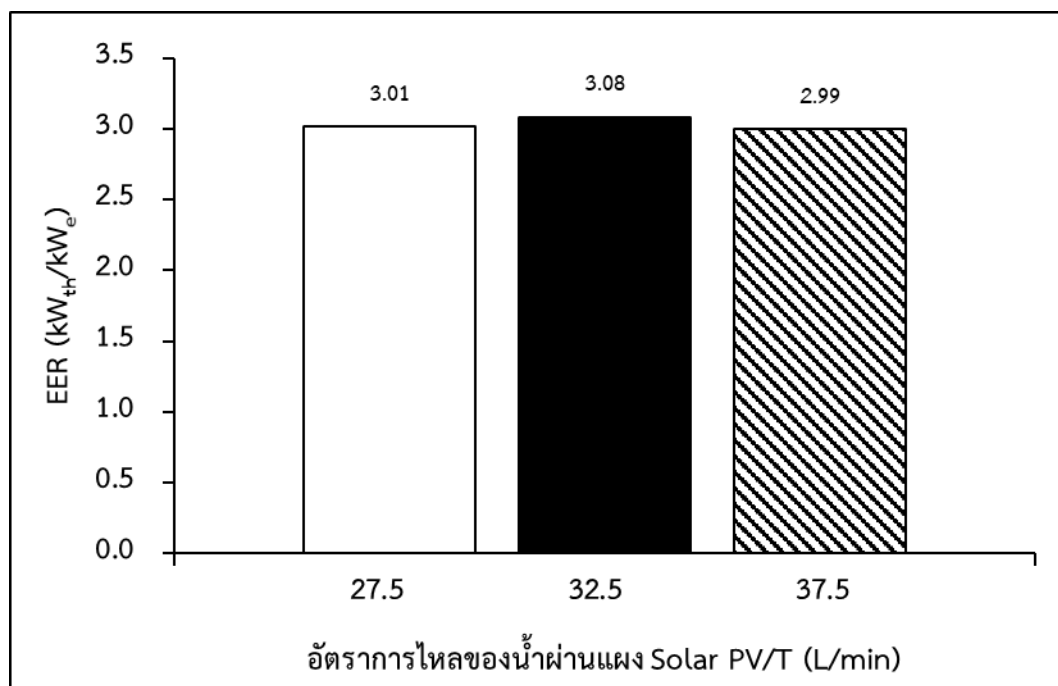
ภาพที่ 65 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 27.5 L/min



ภาพที่ 66 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min



ภาพที่ 67 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 37.5 L/min



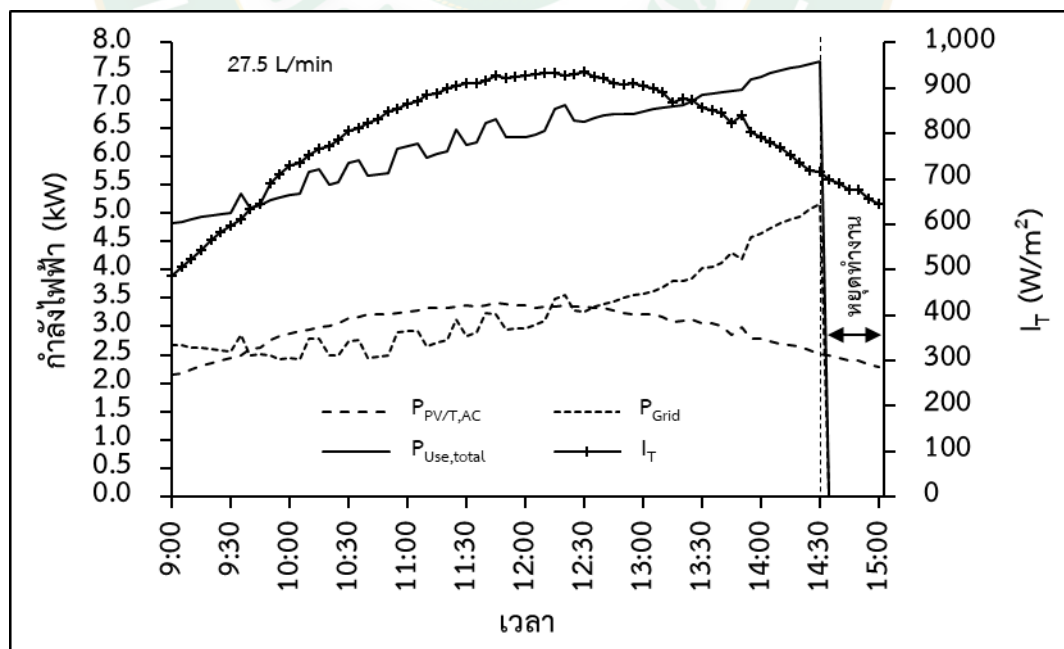
ภาพที่ 68 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยของปั๊มความร้อนจากการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T

การใช้พลังงานไฟฟ้า

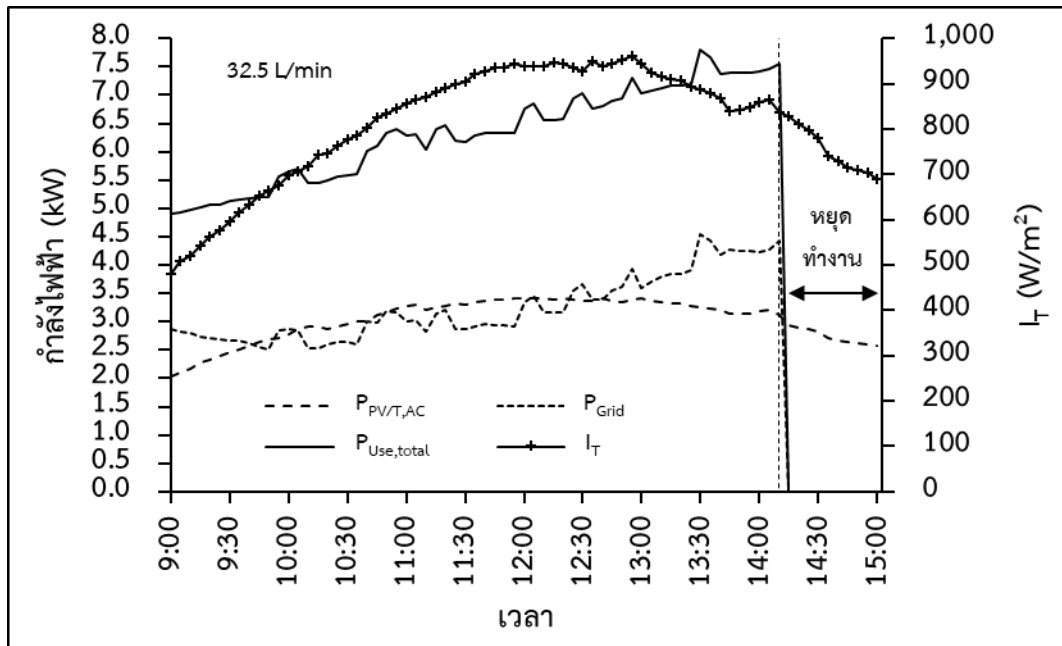
ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากสองแหล่ง คือ แผง Solar PV/T และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ในกรณีที่แผง Solar PV/T ผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ระบบจะนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาเสริม กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานจะสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T คือ ถ้าแผง Solar PV/T ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มาก ระบบจะใช้กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลง แสดงดังภาพที่ 69 ภาพที่ 70 และภาพที่ 71 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ($P_{Use, total}$) เป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อนและปั๊มน้ำสำหรับหมุนเวียนน้ำในระบบ จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นช่วง ๆ เกิดจากการทำงานของปั๊มน้ำที่หมุนเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T ซึ่งจะเริ่มทำงานเมื่อผลต่างอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ($T_{f,o} - T_{ST}$) มีค่ามากกว่า 4°C และจะหยุดทำงานเมื่อผลต่างดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า 2°C ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบเปลี่ยนแปลงไปตามการเปิดและปิดของปั๊มน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 27.5 L/min 32.5 L/min และ 37.5 L/min ระบบใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 34.86 kWh 33.00 kWh และ 34.68 kWh ตามลำดับ ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 18.15 kWh 16.93 kWh และ 18.19 kWh ตามลำดับ และผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 16.70 kWh 16.07 kWh และ 16.48 kWh ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ที่อัตราการไหล 32.5 L/min ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด

สอดคล้องกันกับอัตราการความร้อนที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ จากภาพที่ 55 ที่อัตราการไหล 32.5 L/min แผง Solar PV/T สามารถผลิตความร้อนได้มากที่สุด แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการไหลดังกล่าว แผง Solar PV/T สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำได้มากที่สุด ทำให้ลดภาระการผลิตน้ำร้อนของปั๊ม ความร้อน ส่งผลให้ระยะเวลาในการผลิตน้ำร้อนสั้นลง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบน้อยลง และใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างพลังงานไฟฟ้าจากแผง Solar PV/T และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานแสดงดังภาพที่ 72 จากการทดสอบปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ทั้งหมด 3 ค่า พบว่าที่อัตราการไหล 32.5 L/min มีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คิดเป็น 51.31% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบ และผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จากแผง Solar PV/T มากที่สุด 48.69% ในการทดสอบปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T นี้จึงสามารถสรุปได้ว่า แผง Solar PV/T ที่ใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง 32.5 L/min จะทำให้ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด

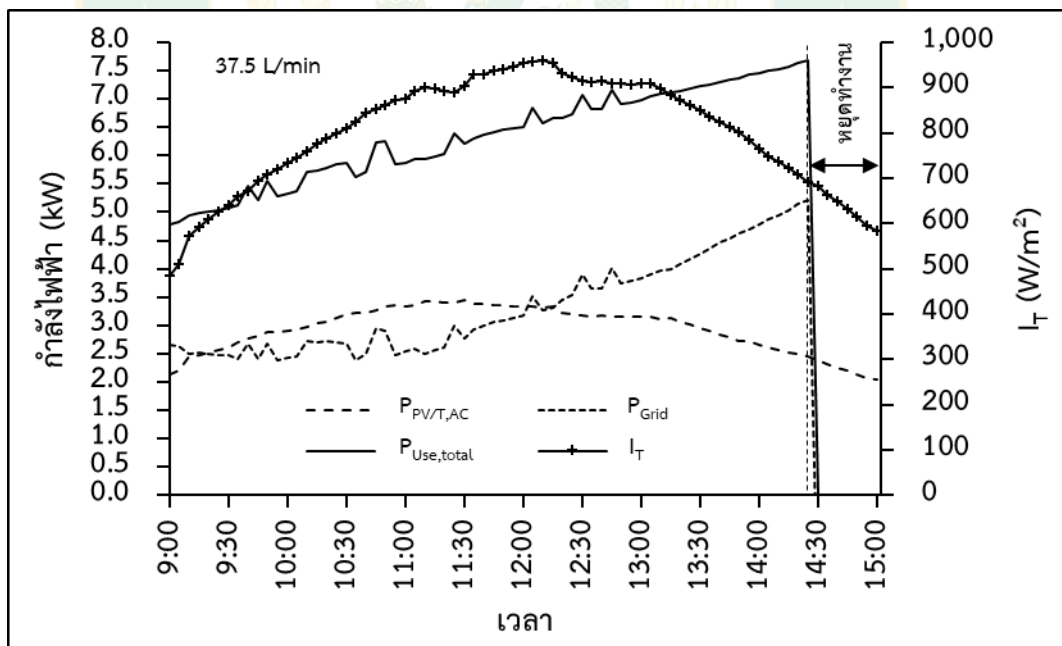
จากผลการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ทำให้ทราบว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min ทำให้แผง Solar PV/T ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนได้ดีที่สุด แผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพรวมและค่า PR สูงที่สุด นอกจากนี้ปั๊มความร้อนยังมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด และระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ยังใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุดอีกด้วย



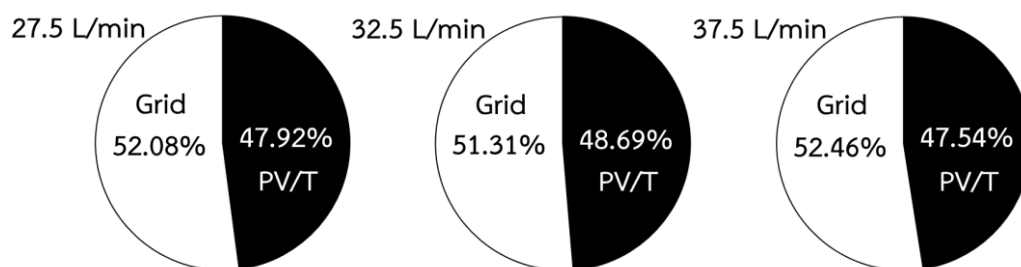
ภาพที่ 69 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 27.5 L/min



ภาพที่ 70 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min



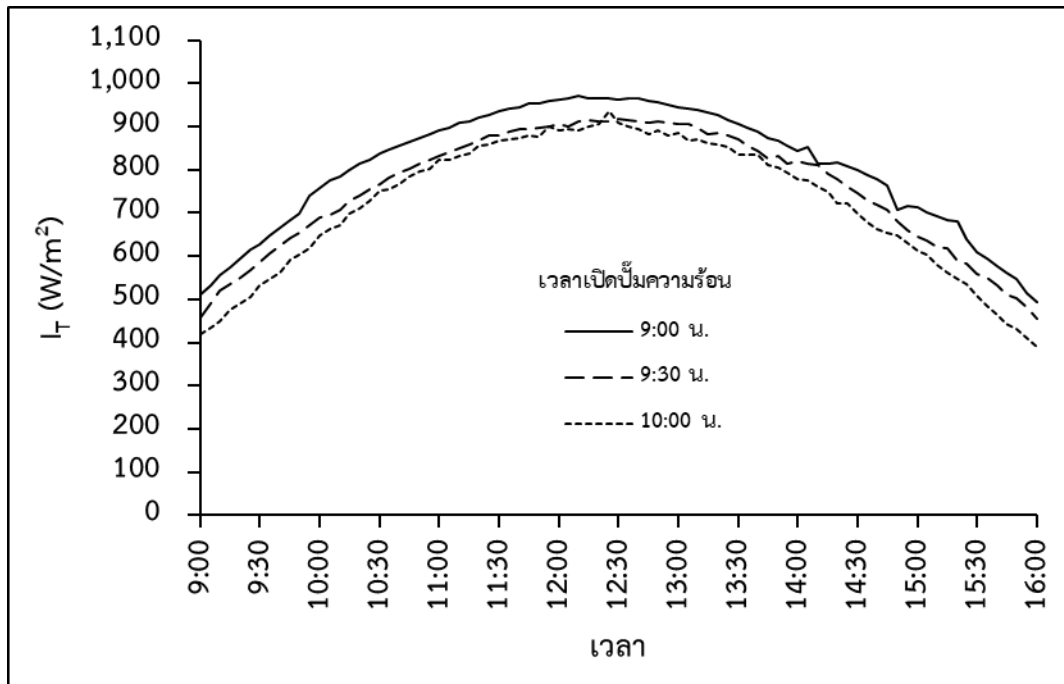
ภาพที่ 71 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 37.5 L/min



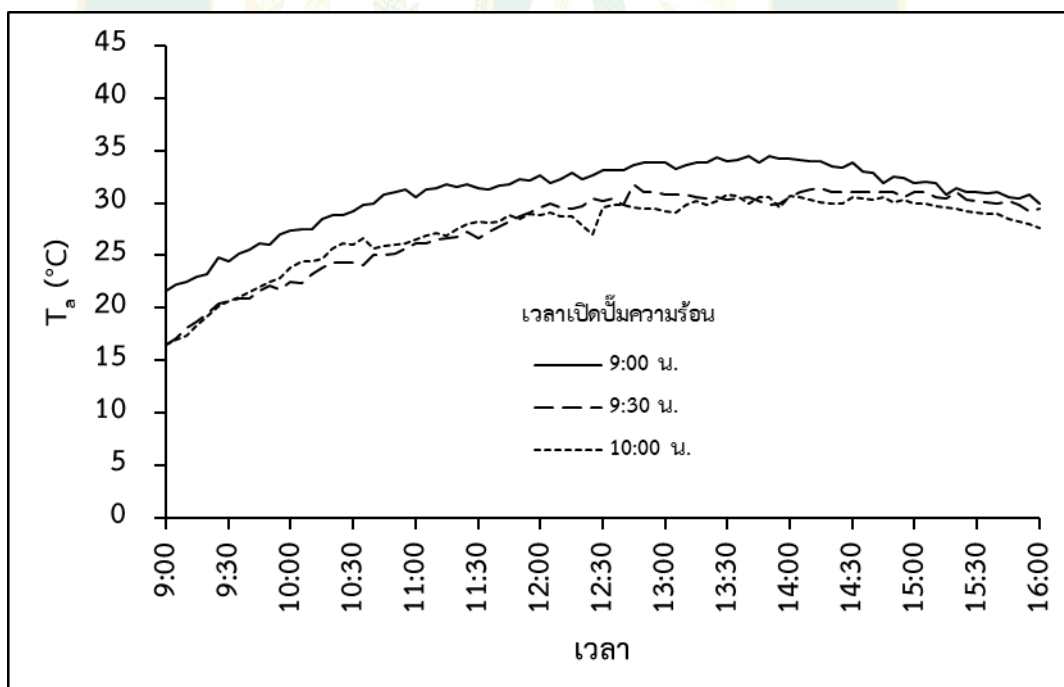
ภาพที่ 72 สัดส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ทั้ง 3 ค่า

การทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

การทดสอบที่ผ่านมาทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ที่ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 32.5 L/min จึงนำอัตราการไหลดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน โดยกำหนดให้ปั๊มความร้อนเริ่มทำงานที่เวลา 9:00 น. 9:30 น. และ 10:00 น. ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงที่ระบบทำงานเพื่อผลิตน้ำร้อน 2,500 L จากอุณหภูมิ 30 °C ให้มีอุณหภูมิ 65 °C ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในการทดสอบแสดงดังภาพที่ 73 และภาพที่ 74 เมื่อพิจารณาในช่วงที่ระบบทำงาน พบว่า เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. จะทำให้ระบบได้รับค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย 849.14 W/m² และ 30.47 °C ตามลำดับ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. ระบบจะได้รับค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 806.07 W/m² และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย 28.09 °C และเมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ระบบจะได้รับค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 772.99 W/m² และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย 28.64 °C

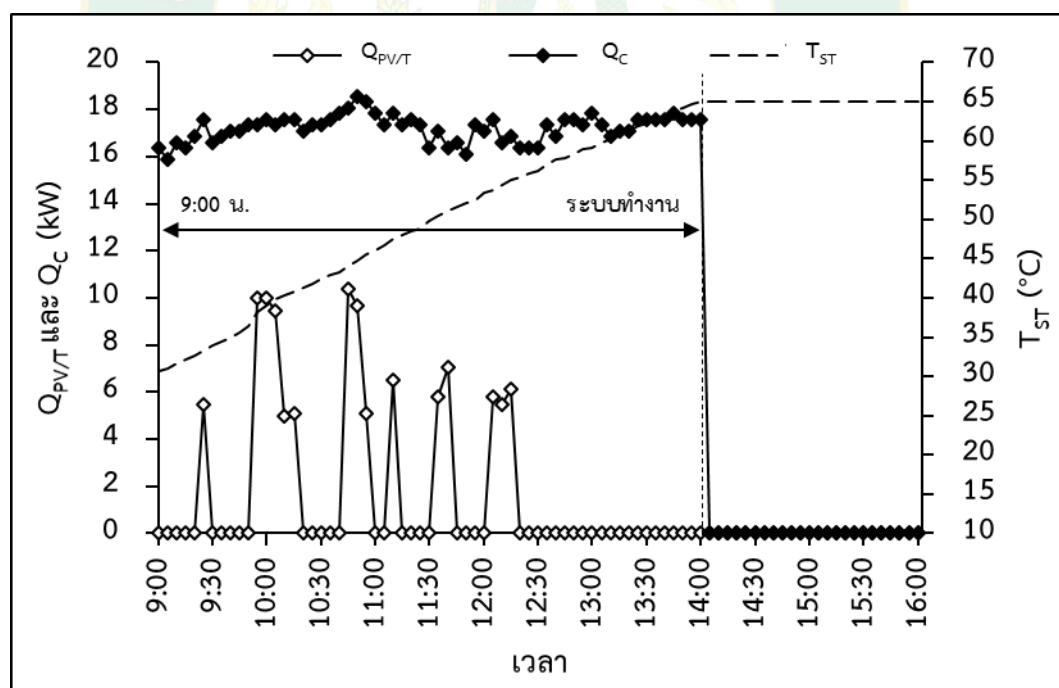


ภาพที่ 73 ค่ารังสีอาทิตย์ของการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

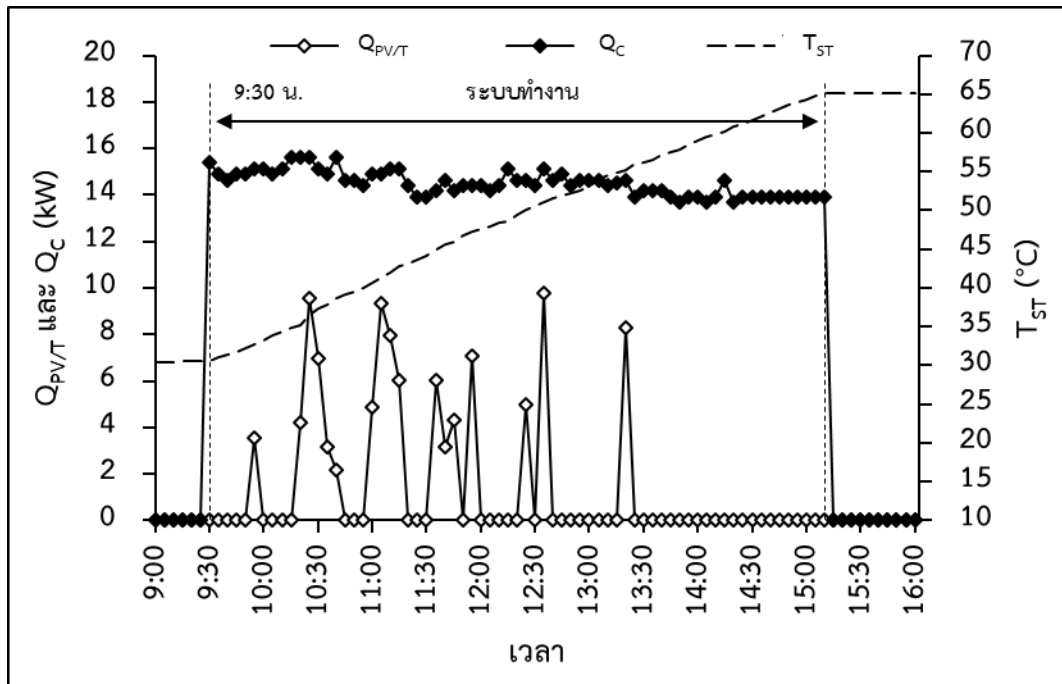


ภาพที่ 74 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมของการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

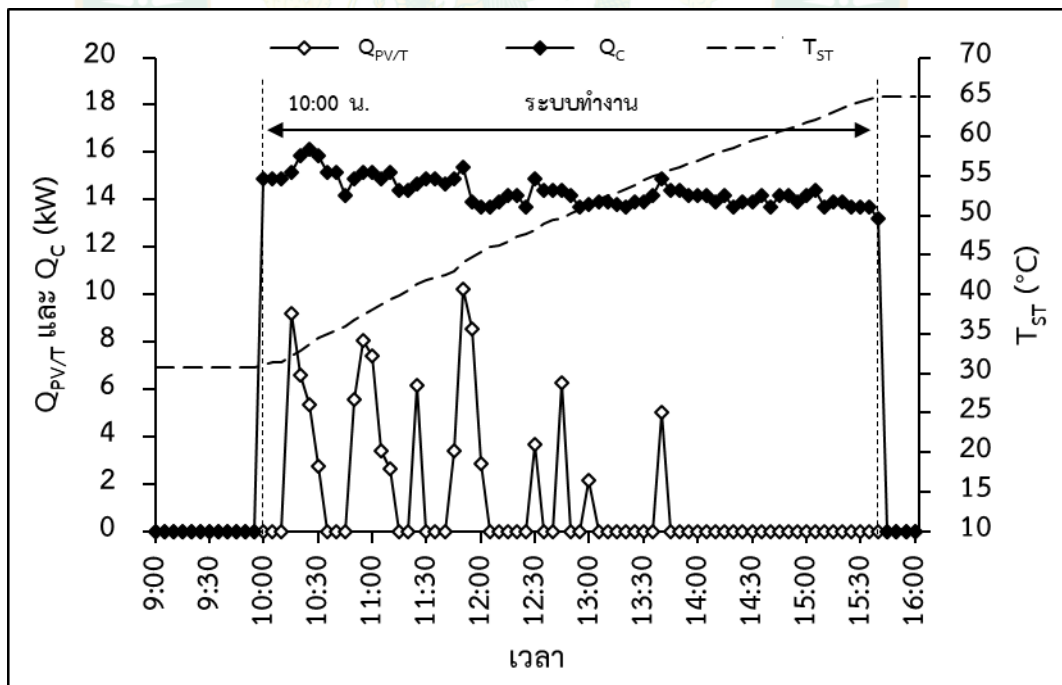
อิทธิพลจากค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมส่งผลต่อการผลิตน้ำร้อนของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump แตกต่างกันไปตามช่วงเวลาที่ระบบทำงาน จากภาพที่ 75 ภาพที่ 76 และภาพที่ 77 พบว่า เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. อัตราความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้จะมีค่าเฉลี่ย 17.22 kW ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่น รองลงมาคือ 14.51 kW เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. และต่ำที่สุด 14.35 kW เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. จะเห็นได้ว่าการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump จะได้รับอิทธิพลจากค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมากที่สุด สังเกตได้จากค่าเฉลี่ยของปัจจัยดังกล่าว เช่นเดียวกับอัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. แผง Solar PV/T สามารถผลิตความร้อนได้มากที่สุด 32.08 MJ คิดเป็น 9.30% ของความร้อนที่ผลิตได้ทั้งหมด และระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้เวลาทำงานสั้นที่สุด 5.00 h ส่วนการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. แผง Solar PV/T สามารถผลิตความร้อนได้น้อยที่สุด 29.76 MJ คิดเป็น 9.17% ของความร้อนที่ผลิตได้ทั้งหมด และระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้เวลาทำงานมากที่สุด 5.67 h



ภาพที่ 75 อัตราความร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน เมื่อทำการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น.

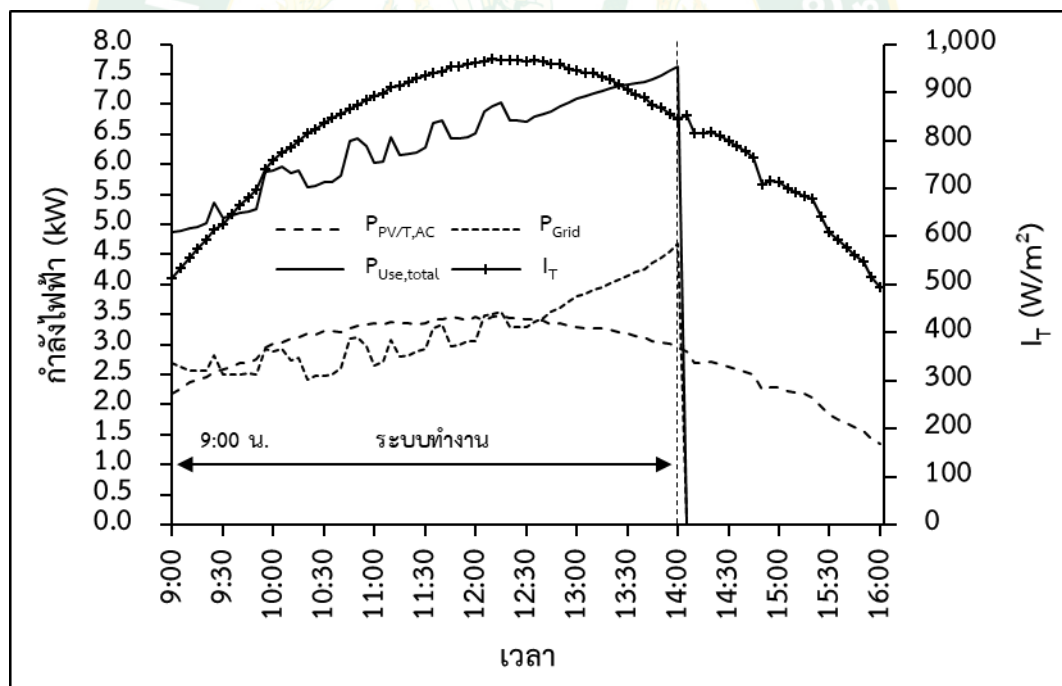


ภาพที่ 76 อัตราความร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน
เมื่อทำการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น.

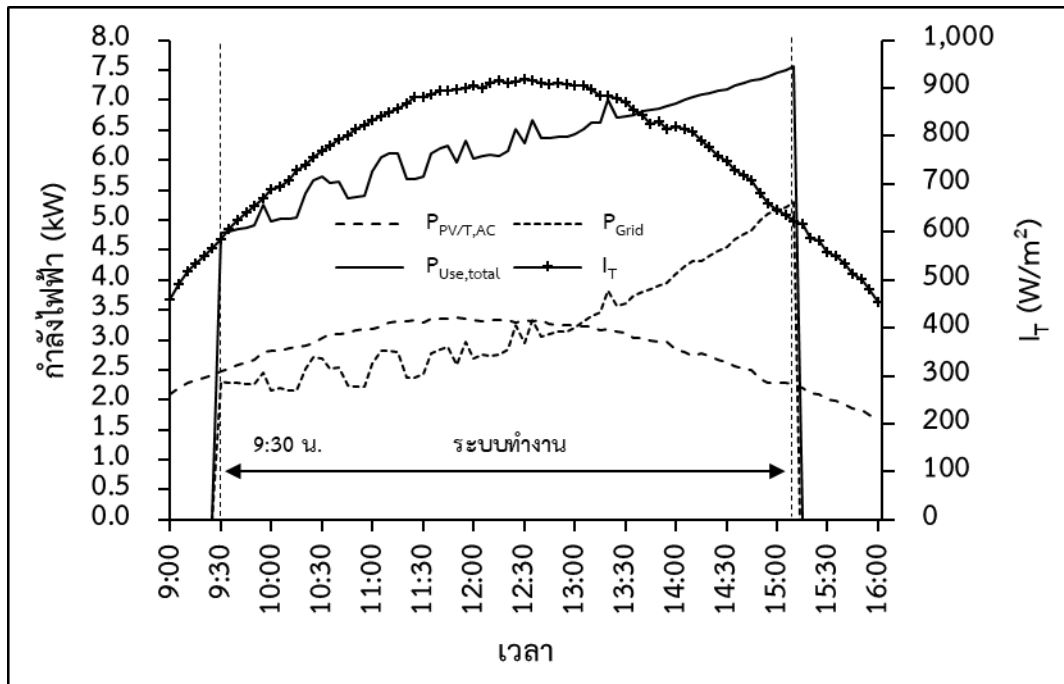


ภาพที่ 77 อัตราความร้อนจากแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน
เมื่อทำการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น.

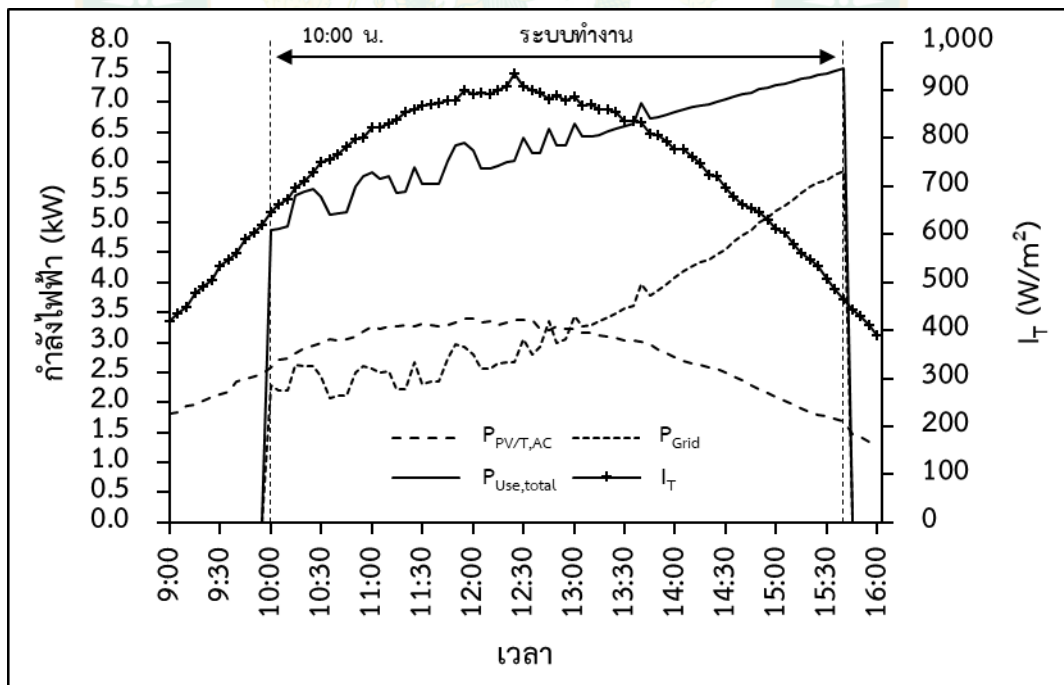
จากอิทธิพลของค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่เปลี่ยนไปตามช่วงระยะเวลาทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump นอกจากจะส่งผลต่อการผลิตน้ำร้อนของระบบแล้ว ยังส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าอีกด้วย ดังภาพที่ 78 ภาพที่ 79 และภาพที่ 80 การเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ส่งผลให้ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 16.16 kWh รองลงมา คือ 18.59 kWh เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. และใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมากที่สุด 19.94 kWh เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. และเมื่อพิจารณาสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จากภาพที่ 81 พบว่า เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. แผง Solar PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าในสัดส่วนที่มากที่สุด 49.52% ของพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบ และการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. แผง Solar PV/T สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าในสัดส่วนที่น้อยที่สุด 45.05% จากการทดสอบปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน ทำให้ทราบว่า การเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด



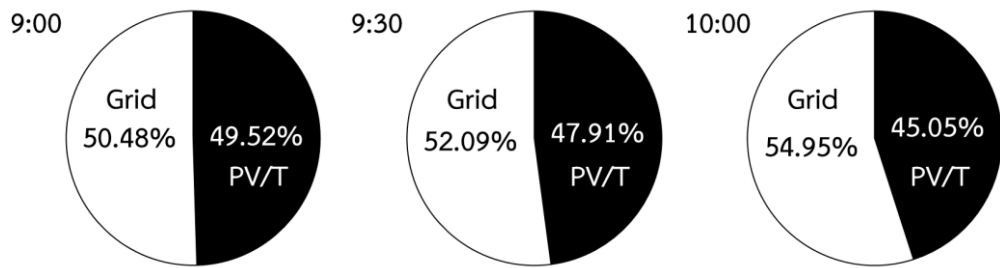
ภาพที่ 78 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น.



ภาพที่ 79 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น.

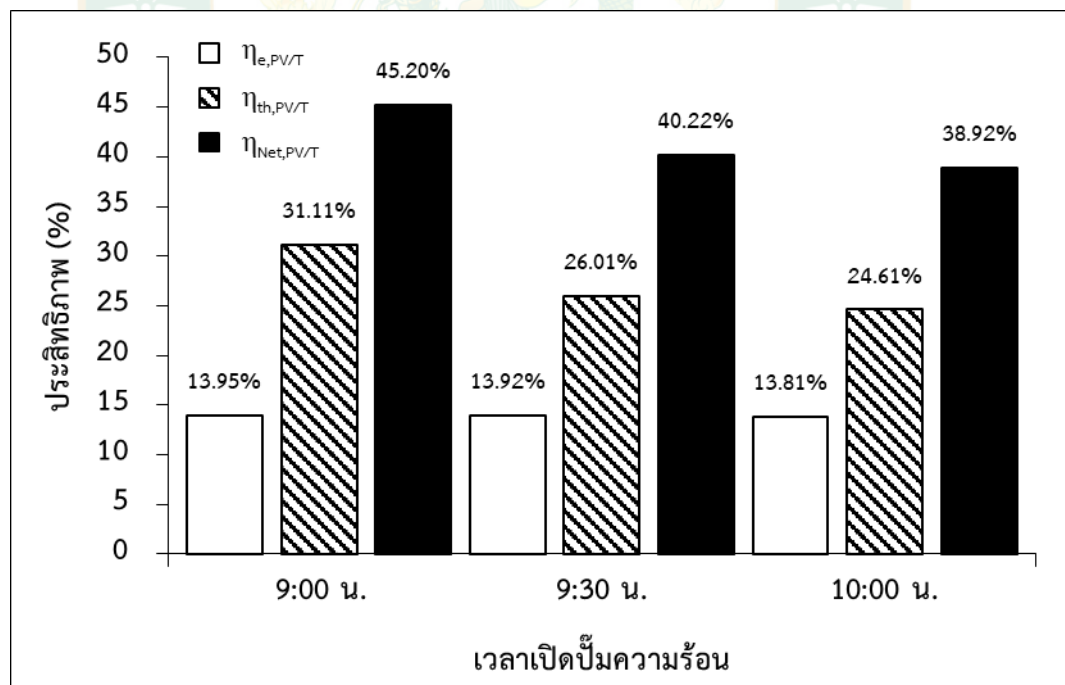


ภาพที่ 80 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น.

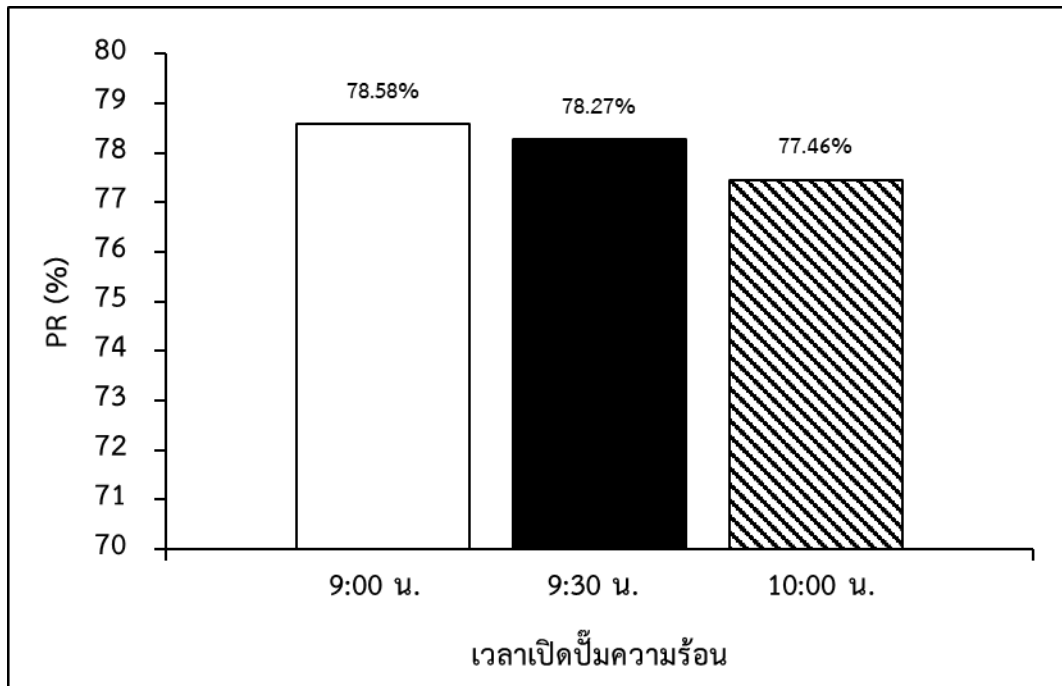


ภาพที่ 81 สัดส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลาต่างกัน

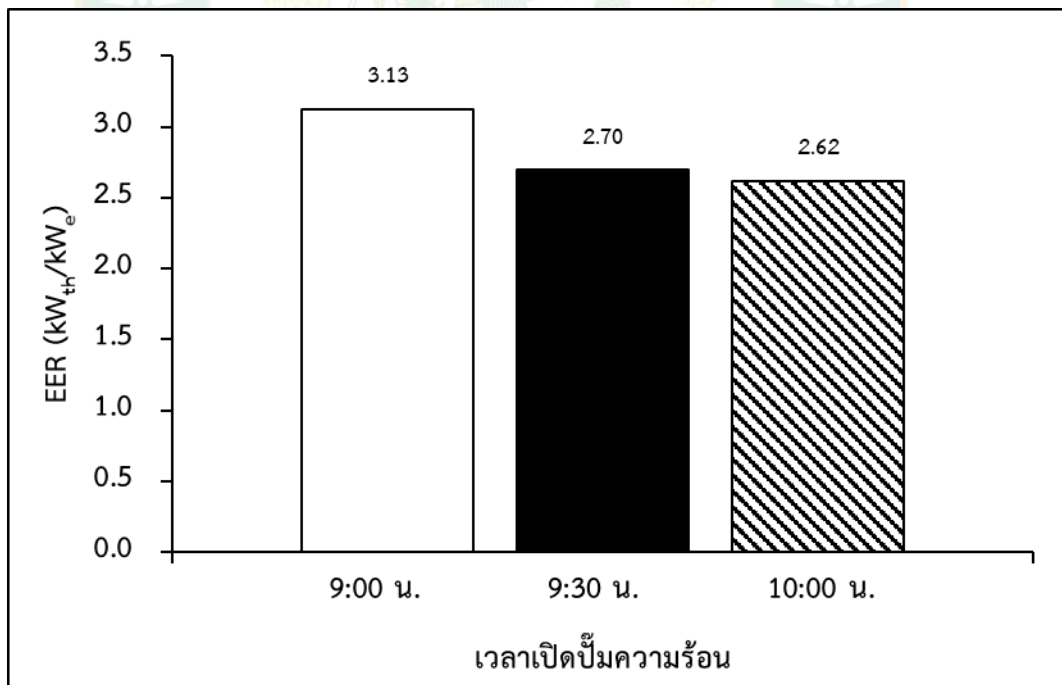
จากการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อนในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ทำให้ทราบว่า การเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ส่งผลให้แผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพรวมสูงสุด 45.20% เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. มีค่า 40.22% และต่ำสุด 38.92% เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. แสดงดังภาพที่ 82 นอกจากนี้การเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ยังทำให้ค่า PR และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนสูงสุด มีค่าเฉลี่ยเป็น 78.58% และ $3.13 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$ ดังภาพที่ 83 และภาพที่ 84 ตามลำดับ



ภาพที่ 82 ประสิทธิภาพทางความร้อน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T จากการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

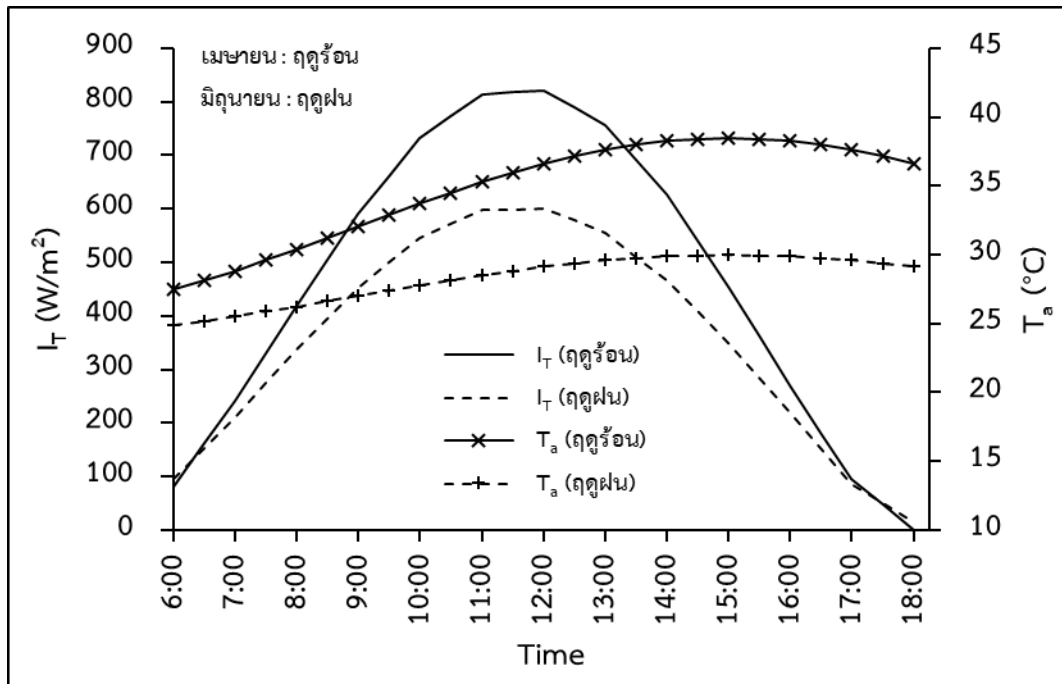


ภาพที่ 83 สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

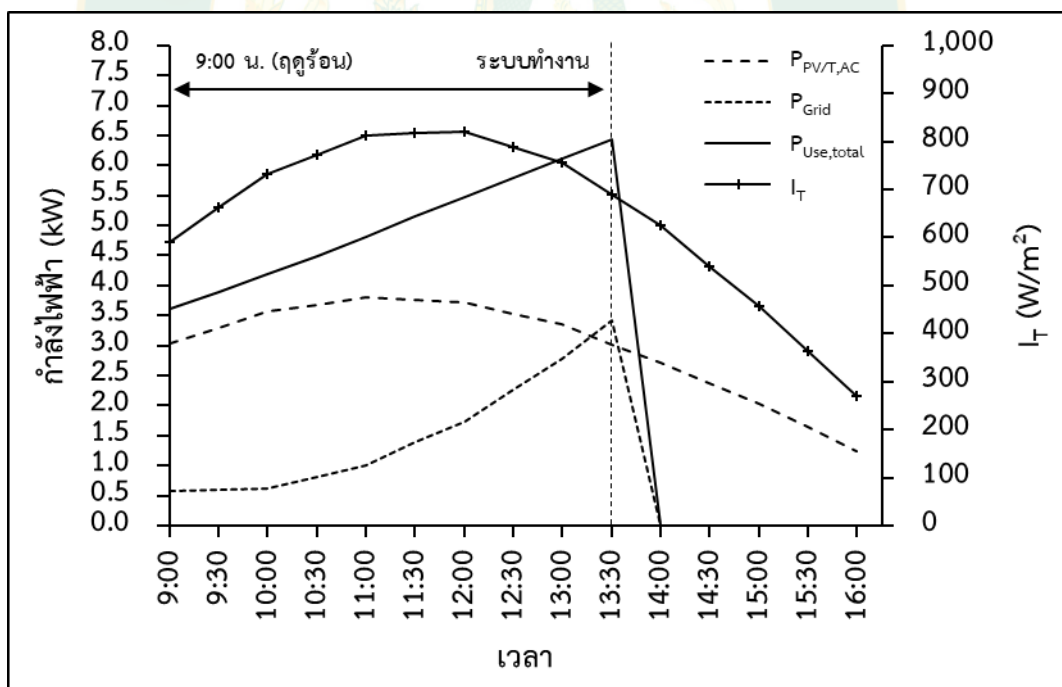


ภาพที่ 84 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนจากการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน

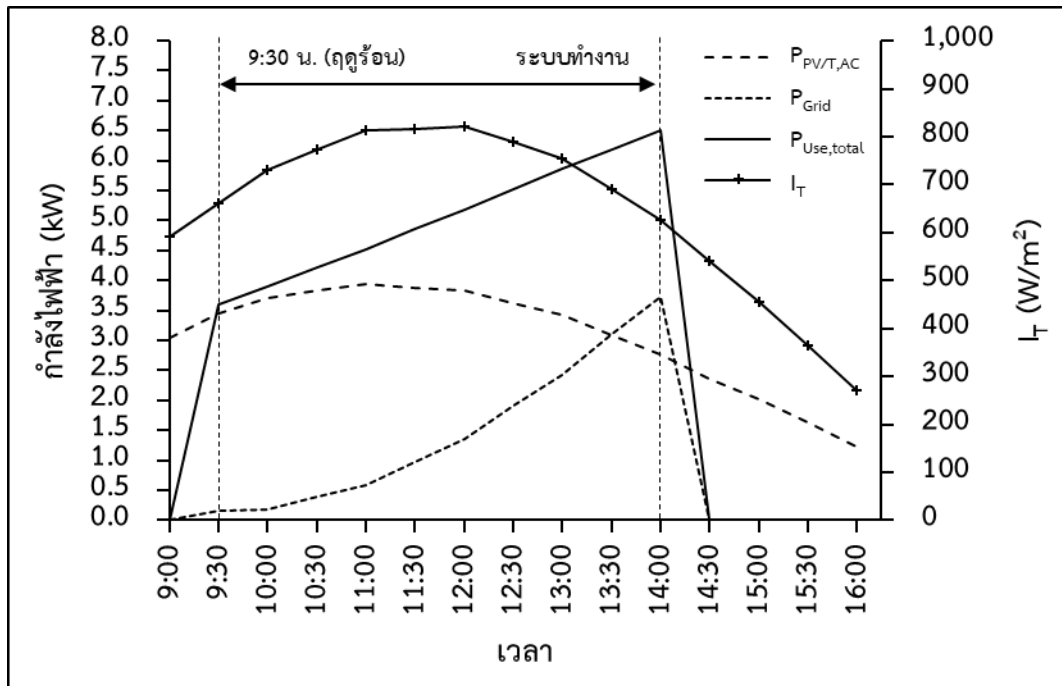
เนื่องจากการทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อนเป็นการทดสอบในเดือน ธันวาคม ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูหนาว ดังนั้น เพื่อความสมบูรณ์ของการใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตลอดทั้งปี ผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วันที่ที่เป็นตัวแทนของ เดือนมาทำนายการทำงานของระบบในช่วงฤดูอื่น คือ ใช้เดือนเมษายนเป็นตัวแทนฤดูร้อน และใช้ เดือนมิถุนายนเป็นตัวแทนฤดูฝน โดยจะเปรียบเทียบการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. 9:30 น. และ 10:00 น. เพื่อเลือกเวลาเปิดปั๊มความร้อนที่เหมาะสมในช่วงฤดูดังกล่าว และใช้ข้อมูลจากการ ทดสอบการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน ที่แสดงให้เห็นว่า การเปิดปั๊มความร้อนให้เริ่ม ทำงานที่เวลา 9:00 น. ในเดือนธันวาคม ทำให้ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อย ที่สุด เป็นตัวแทนของฤดูหนาว ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของเดือนเมษายนและ เดือนมิถุนายนแสดงดังภาพที่ 85 พิจารณาการทำงานของระบบในฤดูร้อน จากภาพที่ 86 พบว่า เมื่อ เปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบมีค่าสูงสุด 6.44 kW (เฉลี่ย 4.99 kW) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุด 3.81 kW (เฉลี่ย 2.99 kW) และ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมีค่าสูงสุด 3.41 kW (เฉลี่ย 1.52 kW) ระบบใช้เวลาทำงาน 4.5 h ภาพที่ 87 แสดงการทำงานของระบบเมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. พบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ ในระบบมีค่าสูงสุด 6.50 kW (เฉลี่ย 5.04 kW) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุด 3.94 kW (เฉลี่ย 3.06 kW) และกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมีค่าสูงสุด 3.72 kW (เฉลี่ย 1.48 kW) ระบบใช้เวลาทำงาน 4.5 h เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. จากภาพที่ 88 พบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบมีค่าสูงสุด 6.25 kW (เฉลี่ย 4.92 kW) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุด 4.09 kW (เฉลี่ย 3.14 kW) และกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า พื้นฐานมีค่าสูงสุด 3.42 kW (เฉลี่ย 1.63 kW) ระบบใช้เวลาทำงาน 4 h พิจารณาการทำงานของ ระบบในฤดูฝน จากภาพที่ 89 เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. พบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ใน ระบบมีค่าสูงสุด 7.16 kW (เฉลี่ย 5.63 kW) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มี ค่าสูงสุด 2.10 kW (เฉลี่ย 1.65 kW) และกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมีค่าสูงสุด 5.70 kW (เฉลี่ย 3.74 kW) ระบบใช้เวลาทำงาน 5 h จากภาพที่ 90 เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. พบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบมีค่าสูงสุด 7.22 kW (เฉลี่ย 5.67 kW) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุด 2.18 kW (เฉลี่ย 1.70 kW) และกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า พื้นฐานมีค่าสูงสุด 5.93 kW (เฉลี่ย 3.77 kW) ระบบใช้เวลาทำงาน 5 h จากภาพที่ 91 เมื่อเปิดปั๊ม ความร้อนที่เวลา 10:00 น. พบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบมีค่าสูงสุด 7.27 kW (เฉลี่ย 5.71 kW) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มีค่าสูงสุด 2.27 kW (เฉลี่ย 1.74 kW) และ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมีค่าสูงสุด 6.16 kW (เฉลี่ย 3.83 kW) ระบบใช้เวลาทำงาน 5 h



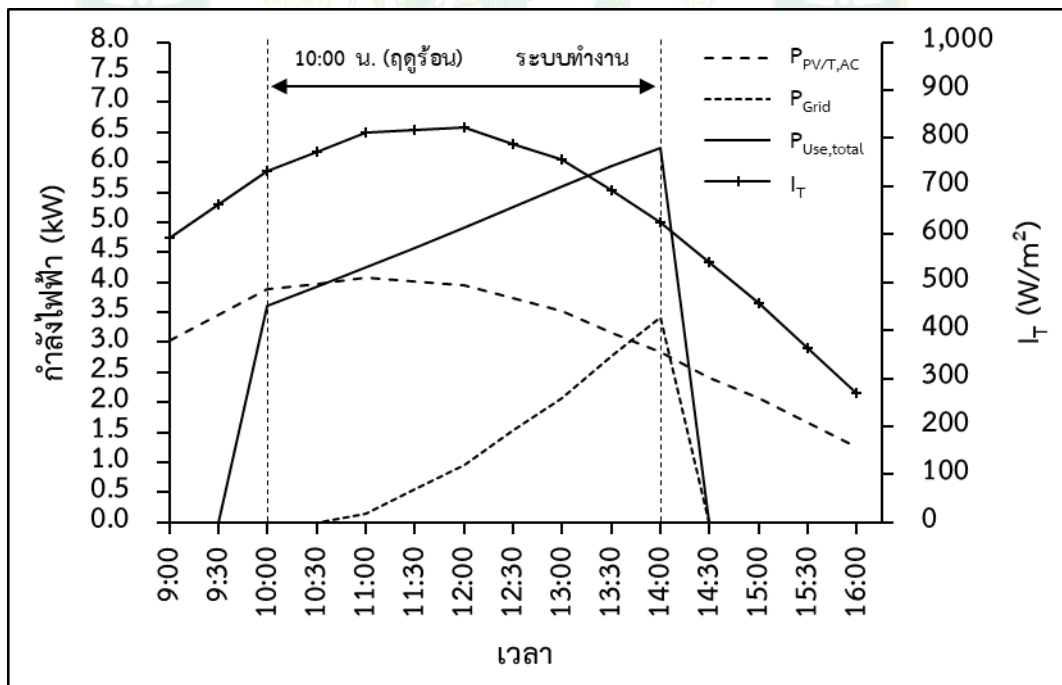
ภาพที่ 85 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของวันที่เป็นตัวแทนของฤดูร้อนและฤดูฝน



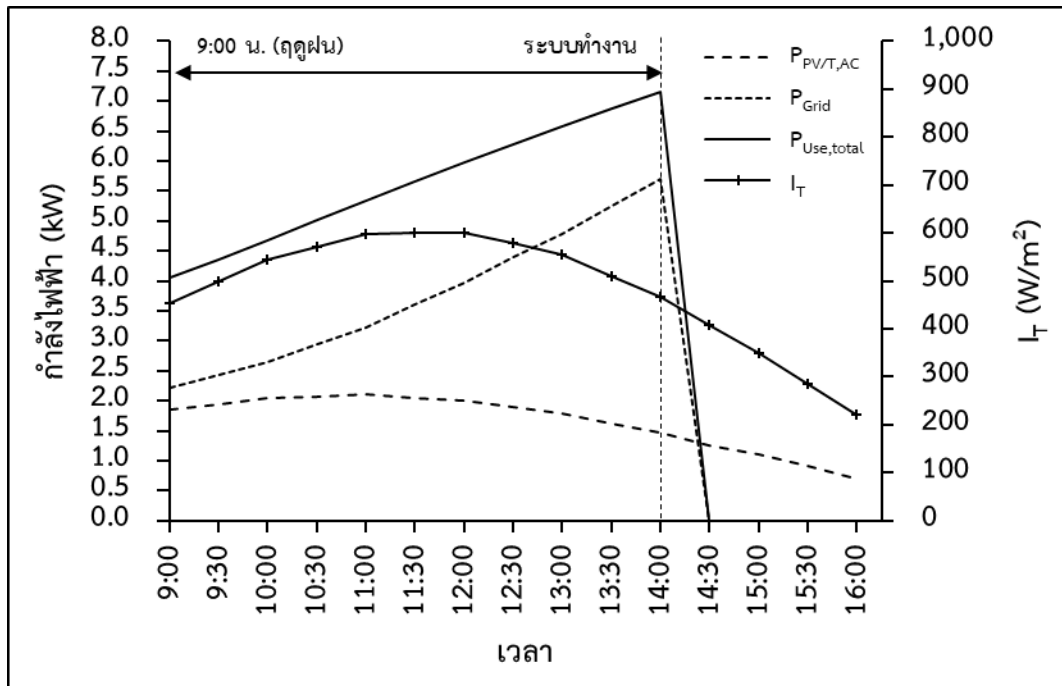
ภาพที่ 86 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในฤดูร้อน



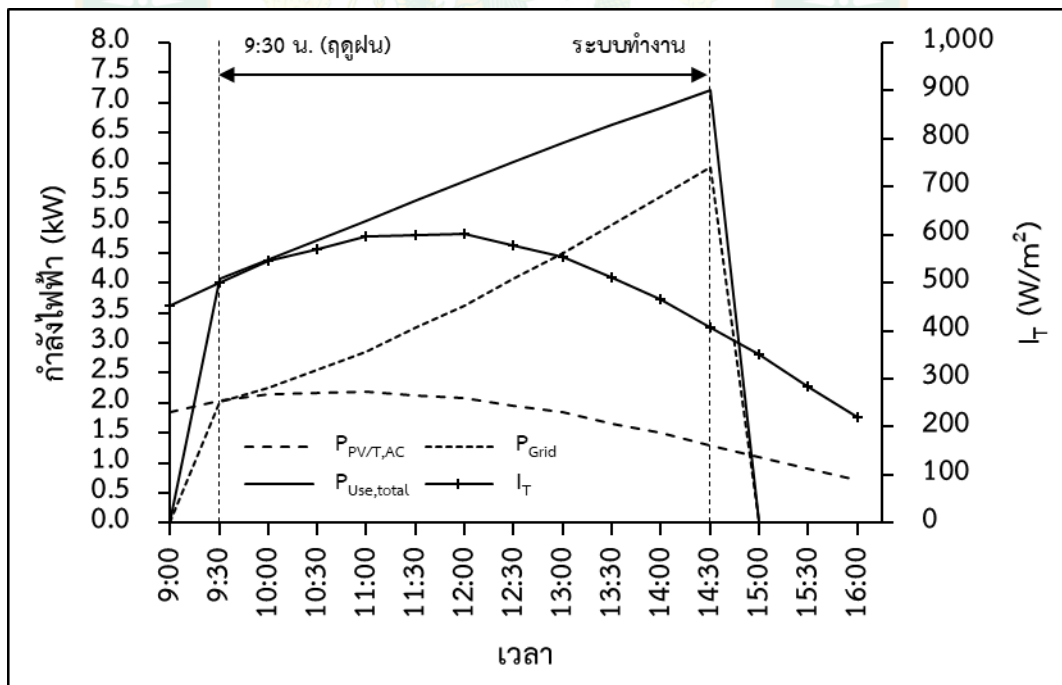
ภาพที่ 87 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. ในฤดูร้อน



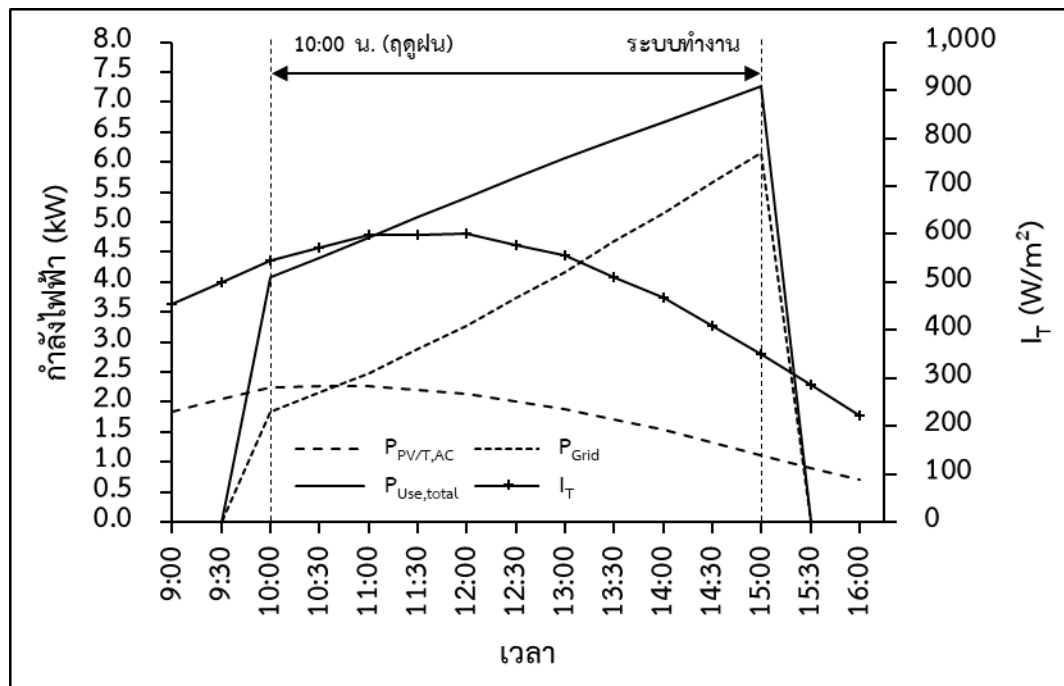
ภาพที่ 88 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในฤดูร้อน



ภาพที่ 89 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในฤดูฝน

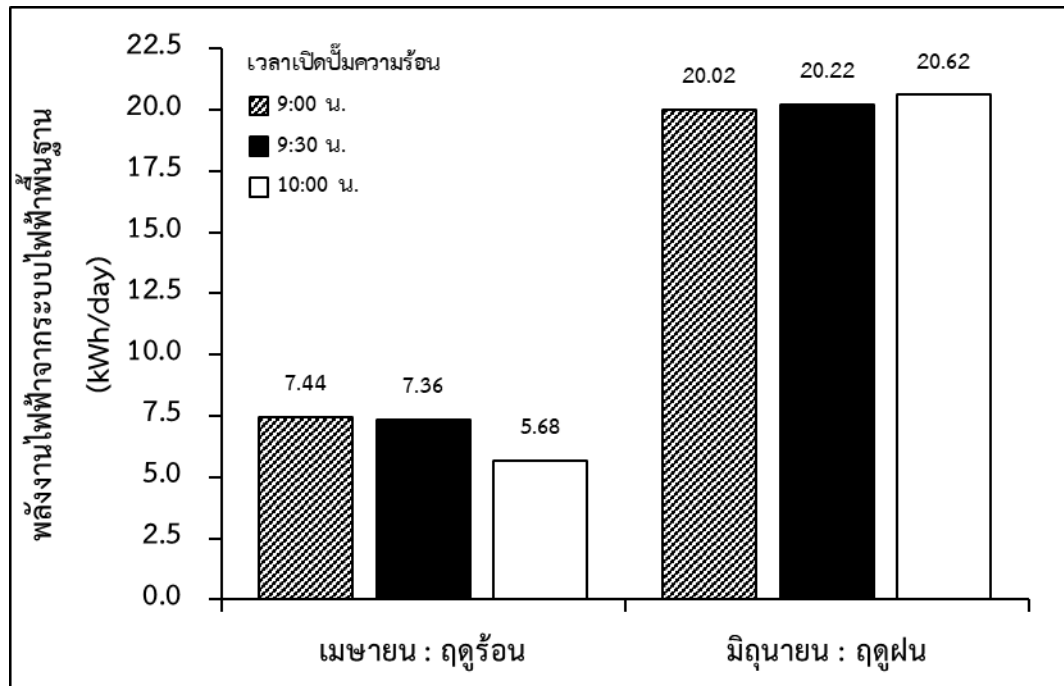


ภาพที่ 90 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. ในฤดูฝน



ภาพที่ 91 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในฤดูฝน

จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาเวลาเปิดปั๊มความร้อนที่ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุดในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน พบว่าได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานดังแสดงในภาพที่ 92 เมื่อระบบทำงานในช่วงฤดูร้อน การเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. จะทำให้ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 5.68 kWh/day เนื่องจากระบบทำงานในช่วงที่ได้รับค่ารังสีอาทิตย์มากที่สุด และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่มีค่าสูงในช่วงบ่ายจะทำให้ปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลง รองลงมา คือ 7.36 kWh/day เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. และมากที่สุด คือ 7.44 kWh/day เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ขณะที่ในฤดูฝนการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ระบบจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 20.02 kWh/day เนื่องจากในฤดูฝนอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อเทียบกับฤดูอื่น และจะเริ่มลดลงในช่วงบ่าย ดังนั้น การเปิดปั๊มความร้อนเร็วขึ้นจะทำให้ระบบได้รับผลกระทบจากการลดลงของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมน้อยที่สุด รองลงมา คือ 20.22 kWh/day เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:30 น. และมากที่สุด คือ 20.62 kWh/day เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น.

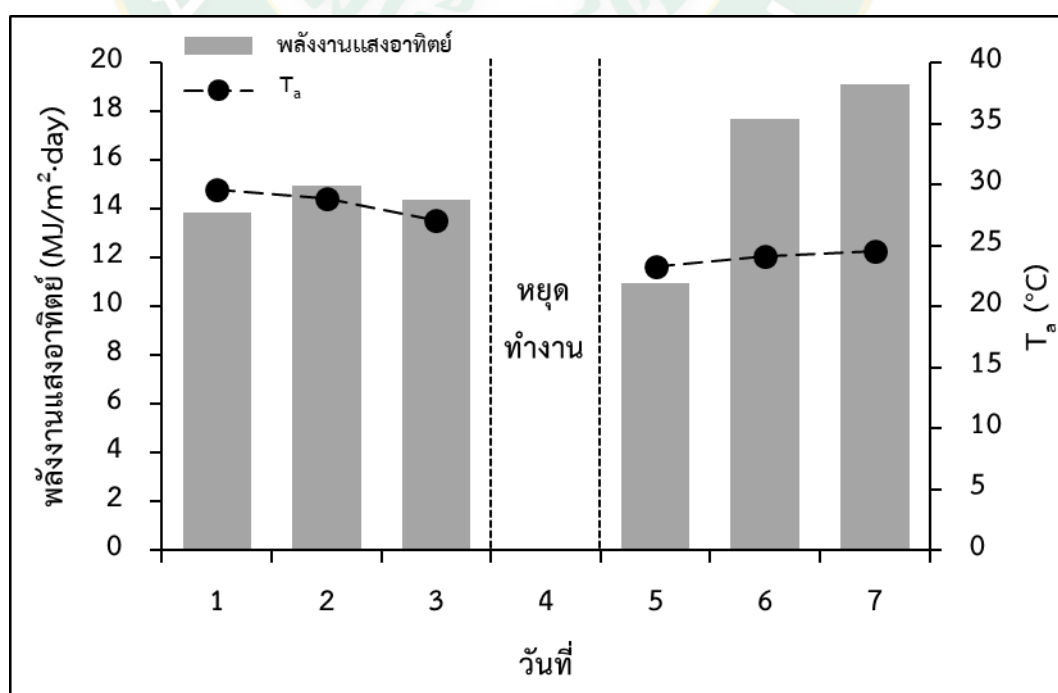


ภาพที่ 92 พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของตัวแทนฤดูร้อนและฤดูฝน
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



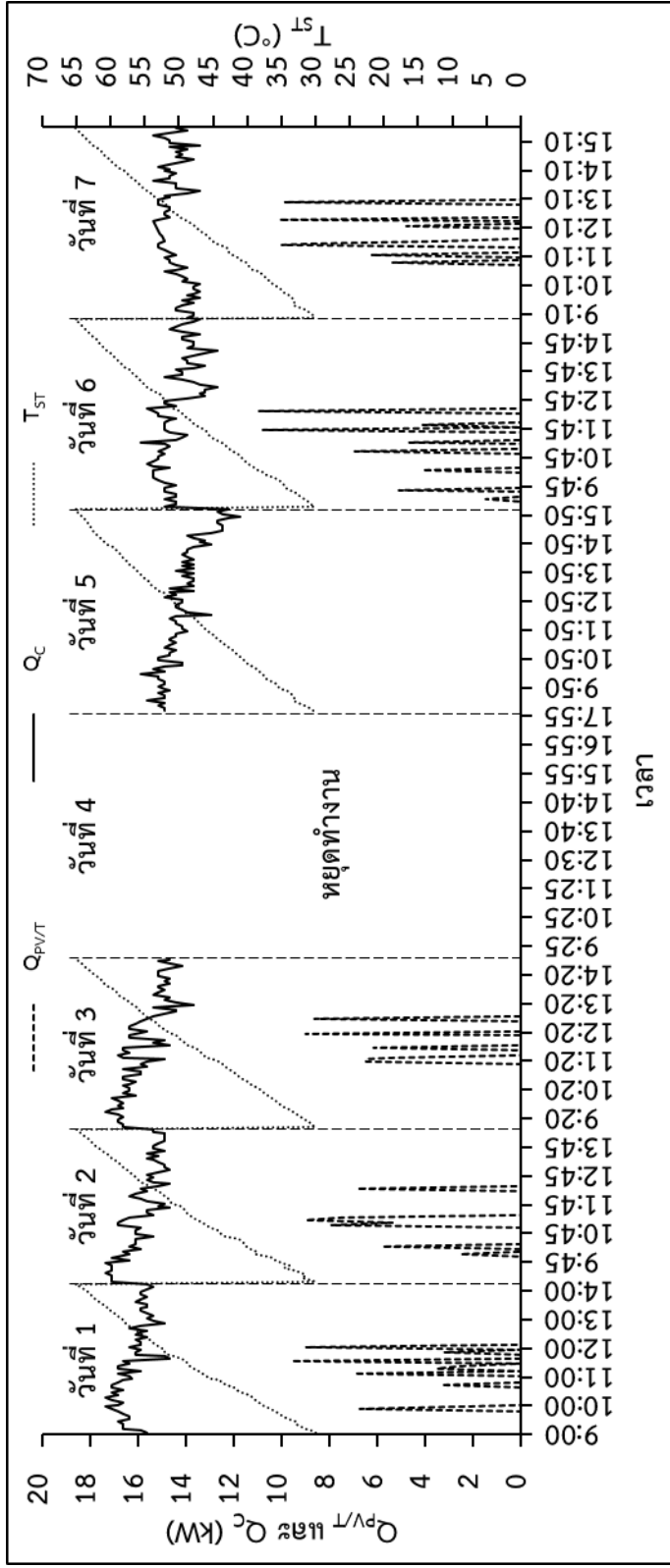
การทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

จากการทดสอบการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T และการปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อน ทำให้ทราบได้ว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ที่ 32.5 L/min และการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump จะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด จึงนำค่าดังกล่าวมาปรับใช้กับการทดสอบการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตามการใช้งานของโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว ทำการทดสอบระหว่างวันที่ 17 ถึง วันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2563 เป็นเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบ การทดสอบจะเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ผลิตน้ำร้อน 2,500 L ให้มีอุณหภูมิ 65 °C เพื่อใช้สำหรับขั้นตอนการลวกสุกร ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดการทดสอบทั้งหมด 7 วัน แสดงดังภาพที่ 93 เนื่องจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวจะหยุดทำงานทุกวันพระ จึงทำให้ช่วงวันที่ทำการทดสอบคาบเกี่ยวกับวันพระ ซึ่งตรงกับวันที่ 4 ของการทดสอบ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุด คือ วันที่ 7 (23 ธันวาคม พ.ศ. 2563) มีค่าเท่ากับ 19.10 MJ/m²-day น้อยที่สุดในวันที่ 5 (21 ธันวาคม พ.ศ. 2563) มีค่าเท่ากับ 10.96 MJ/m²-day อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย 7 วันมีค่าอยู่ระหว่าง 23-30 °C มีค่าเฉลี่ยทั้งวันมากที่สุด 29.58 °C ในวันที่ 1 (17 ธันวาคม พ.ศ. 2563) และมีค่าเฉลี่ยทั้งวันน้อยที่สุด 23.28 °C ในวันที่ 5 เนื่องจากวันที่ 5 เป็นวันที่มีเมฆตลอดทั้งวัน ส่งผลให้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในวันดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าวันอื่นที่ทำการทดสอบ

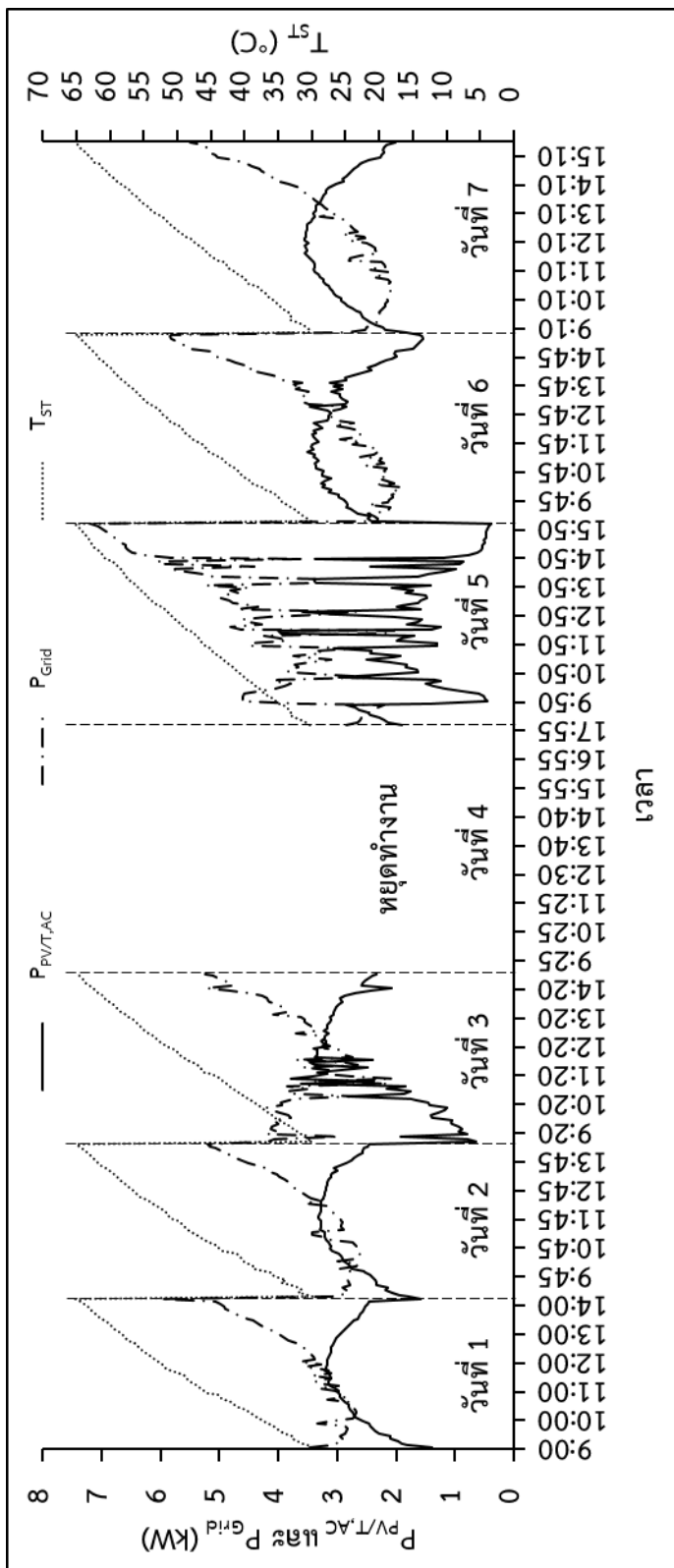


ภาพที่ 93 พลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยในแต่ละวัน

จากภาพที่ 94 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมส่งผลทำให้การทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ในแต่ละวันนั้นมีลักษณะแตกต่างกัน ในวันที่ 5 เป็นวันที่แผง Solar PV/T ไม่สามารถผลิตความร้อนได้เลย เนื่องจากสภาพอากาศในวันดังกล่าวไม่สามารถทำให้อุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T มีค่ามากกว่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ป้อนน้ำที่หมุนเวียนน้ำผ่านแผง Solar PV/T จึงไม่ทำงาน เป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากถังเก็บน้ำร้อน และสภาพอากาศดังกล่าวยังส่งผลให้ปั๊มความร้อนผลิตความร้อนได้น้อยที่สุดอีกด้วย ซึ่งปั๊มความร้อนได้รับผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำกว่าวันอื่น ๆ เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าจากภาพที่ 95 พบว่าค่าดังกล่าวได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศเช่นเดียวกัน เมื่อได้รับรังสีอาทิตย์น้อย แผง Solar PV/T จึงผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อย ทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมากขึ้น ตลอดระยะเวลา 7 วัน ความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T มีค่าเฉลี่ยเป็น 3.53% ของความร้อนที่ผลิตได้ทั้งหมด แผง Solar PV/T ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 42.33% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ และระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนเฉลี่ย 21.90 kWh/day ค่าที่ได้แตกต่างจากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ในเดือนธันวาคมเล็กน้อย เนื่องจากความแตกต่างของสภาพอากาศ โดยพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดือนธันวาคมมีค่าเท่ากับ 19.96 kWh/day ในส่วนของประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ค่า PR และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์เป็นเวลา 7 วัน แสดงดังภาพที่ 96 และภาพที่ 97 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า แผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพรวมเฉลี่ย 36.89% มีค่า PR เฉลี่ย 80.12% และมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนเฉลี่ย $2.81\text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$

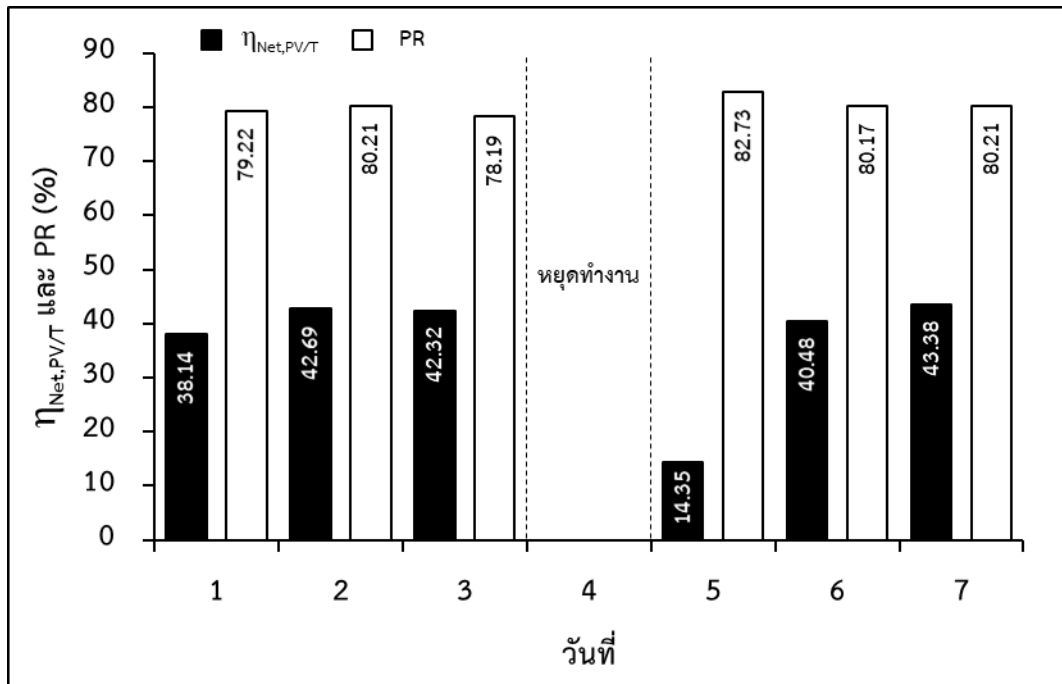


ภาพที่ 94 อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และปริมาณความร้อนตลอด 7 วัน

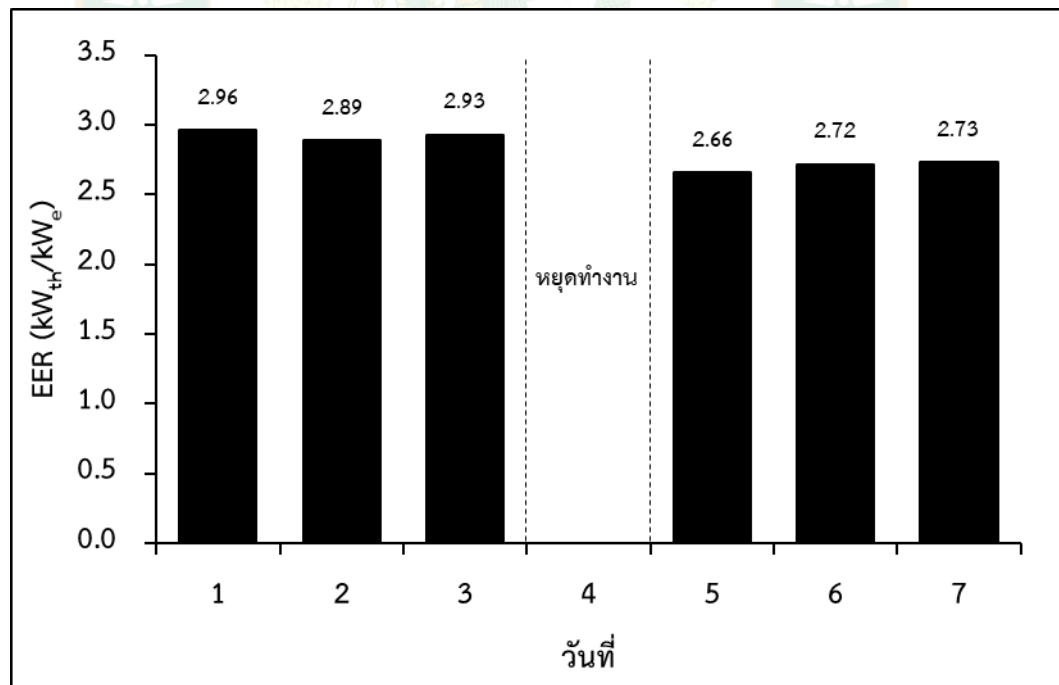


เวลา

ภาพที่ 95 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากแผง Solar PV/T และกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานตลอด 7 วัน



ภาพที่ 96 ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T และสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตลอด 7 วัน

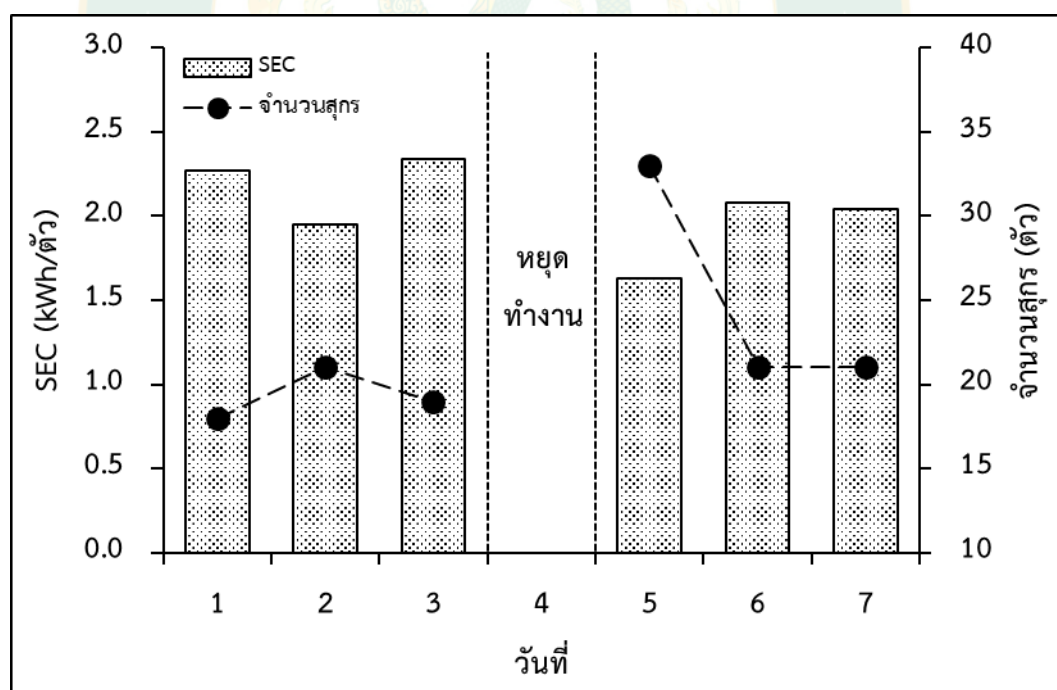


ภาพที่ 97 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนตลอด 7 วัน

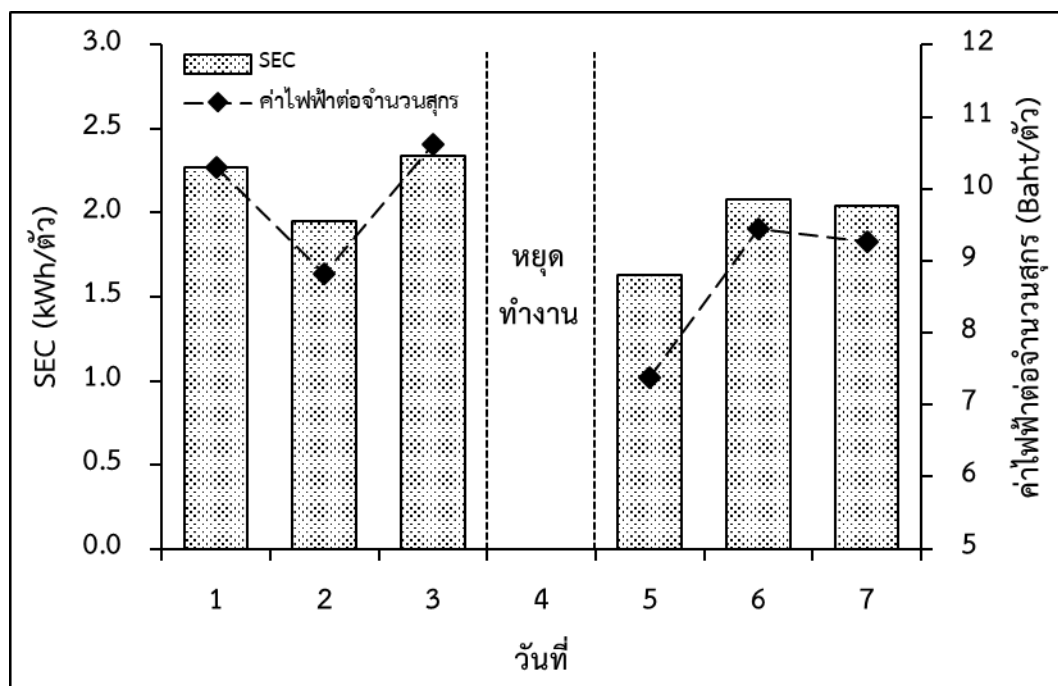
จากการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้าที่ทำงานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อน และขั้นตอนการลวกสุกร ทำให้ทราบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 120.51 kWh/day คิดเป็นค่าไฟฟ้า 545.91 Baht/day และจากการทดสอบสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวตลอด 7 วัน ในช่วงเดือนธันวาคม พบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงจากระบบเดิม โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนและลวกสุกรเฉลี่ยตลอด 7 วัน 44.45 kWh/day คิดเป็นค่าไฟฟ้า 201.37 Baht/day จะเห็นว่าการใช้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนและลวกสุกรลงได้ 76.06 kWh/day ลดลงจากการใช้ขดลวดไฟฟ้า 63.12% และคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 344.55 Baht/day แสดงดังตารางที่ 10 การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ลดลงส่งผลให้ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEC) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรนั้น มีค่าลดลงจากการใช้ขดลวดไฟฟ้าตามไปด้วย จากภาพที่ 98 พบว่าค่า SEC มีค่าอยู่ระหว่าง 1.63-2.34 kWh/ตัว สูงสุดในวันที่ 3 (19 ธันวาคม พ.ศ. 2563) ต่ำสุดในวันที่ 5 และมีค่าเฉลี่ย 2.05 kWh/ตัว ส่วนจำนวนสุกรจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.17 ตัว/day และภาพที่ 99 แสดงค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรที่เปลี่ยนแปลงตามค่า SEC โดยมีค่าสูงสุด 10.61 Baht/ตัว ในวันที่ 3 น้อยที่สุด 7.37 Baht/ตัว ในวันที่ 5 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.30 Baht/ตัว การใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ทำให้ค่า SEC และค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดไฟฟ้าที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.95 kWh/ตัว และ 26.96 Baht/ตัว ตามลำดับ

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

รายการ	ขดลวดไฟฟ้า	Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump
อัตราค่าไฟฟ้า (Baht/kWh)		4.53
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนและลวกสุกร (kWh/day)	120.51	44.45
ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนและลวกสุกร (Baht/day)	545.92	201.37
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kWh/day)	-	76.06
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (Baht/day)	-	344.55
ค่า SEC (kWh/ตัว)	5.95	2.05
ค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร (Baht/ตัว)	26.96	9.30



ภาพที่ 98 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและจำนวนสุกรจากการทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

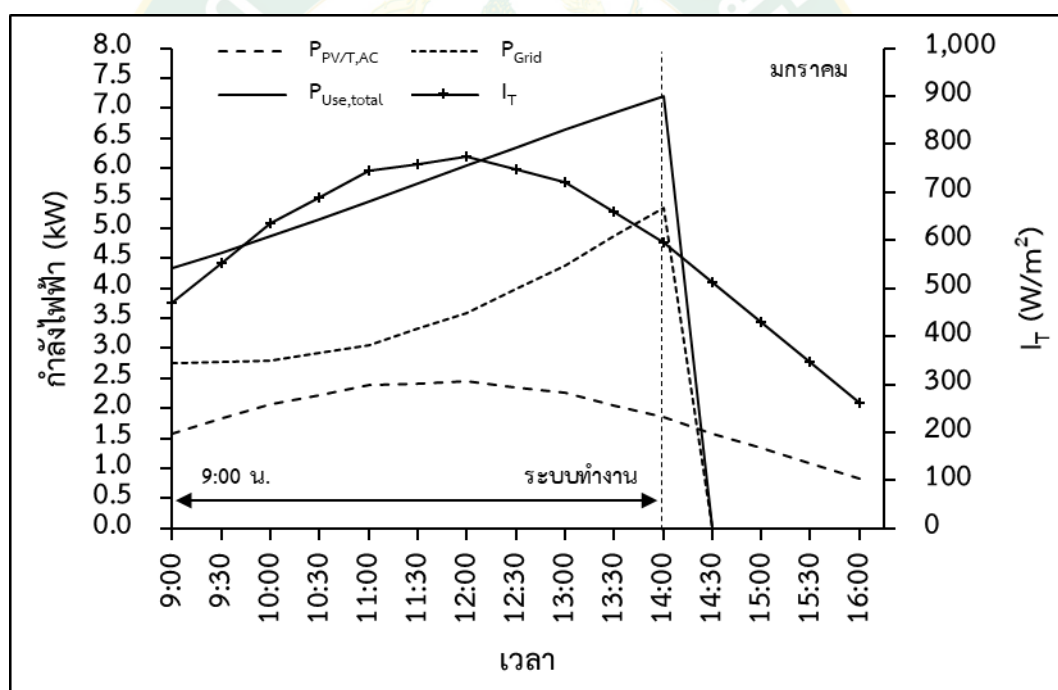


ภาพที่ 99 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกรจากการทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

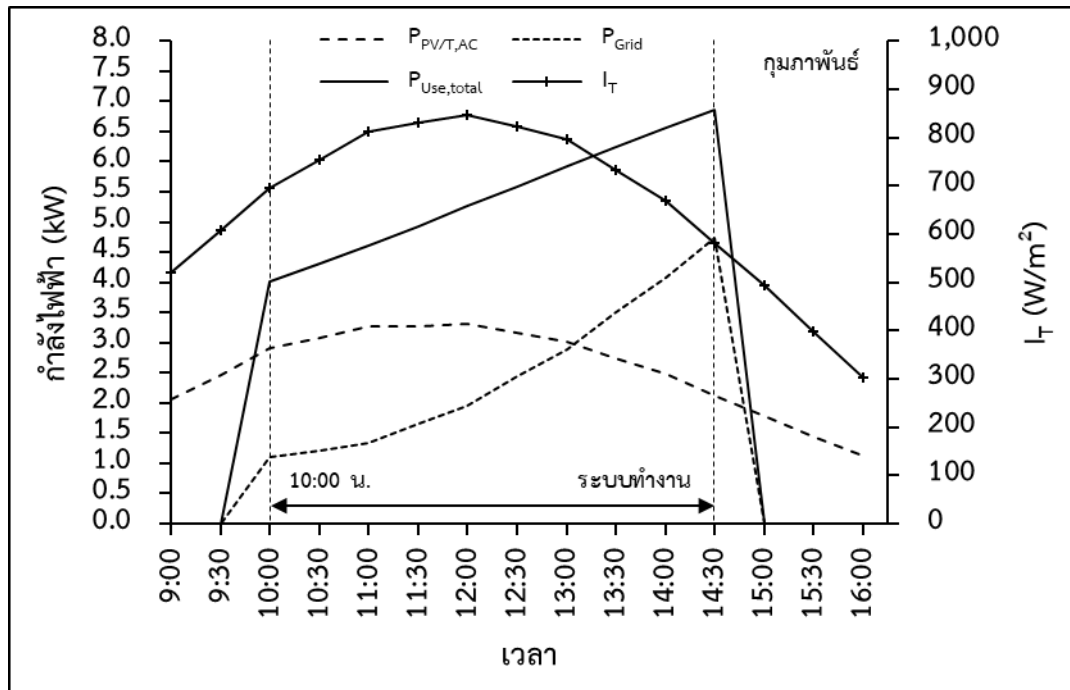
ทำการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบการทำงานของระบบและการใช้ขดลวดไฟฟ้าในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนตลอดทั้งปี ใช้เงื่อนไขการทำงานของระบบที่ได้จากการทดสอบ คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T 32.5 L/min และเปิดปั๊มความร้อนตามการทำงานในแต่ละฤดูกาล คือ ถูกร้อนเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ส่วนฤดูฝนและฤดูหนาวเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ผลการจำลองการทำงานของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตลอดทั้งปีแสดงดังภาพที่ 100 ถึง ภาพที่ 111 พลังงานไฟฟ้าในระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump และพลังงานไฟฟ้าที่ขดลวดไฟฟ้าใช้ตลอดทั้งปีแสดงดังภาพที่ 112 พิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้า พบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุด 3,303.54 kWh/month ในเดือนมกราคม ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยในเดือนดังกล่าวมีค่าต่ำที่สุด และใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด 2,571.11 kWh/month ในเดือนเมษายน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยสูงที่สุด ตลอดทั้งปีขดลวดไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 34,358.75 kWh/year คิดเป็น 155,645.16 Baht/year เมื่อพิจารณาการใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump พบว่า ระบบมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมากที่สุดในเดือนสิงหาคม 627.56 kWh/month เนื่องจากเป็นเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์น้อย และมีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำ ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุดในเดือนเมษายน

130.54 kWh/month เนื่องจากเป็นเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุดและมีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยสูงที่สุด โดยตลอดทั้งปีระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานรวม 4,861.72 kWh/year คิดเป็น 22,023.60 Baht/year

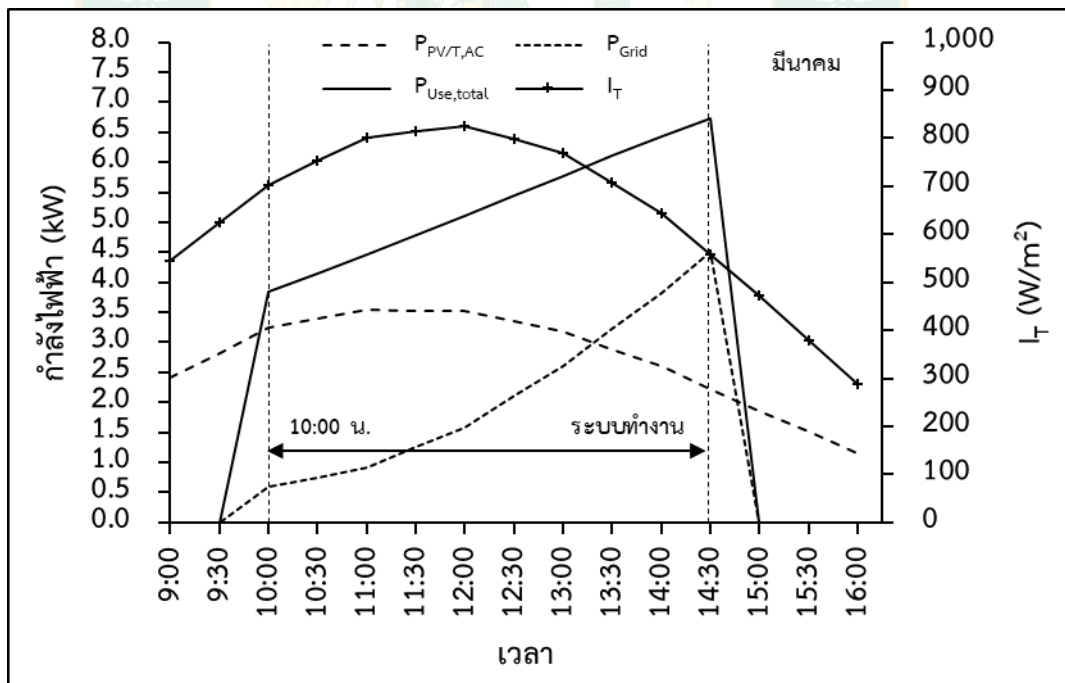
จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่า การใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ตลอดทั้งปี สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ 85.85% เมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดไฟฟ้า คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง 29,497.03 kWh/year และจากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบจากตารางที่ 11 พบว่า การใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนลงได้ 133,621.56 Baht/year ทำให้ระบบมีระยะเวลาคืนทุน 6.65 year และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 13.94% ต่อปี



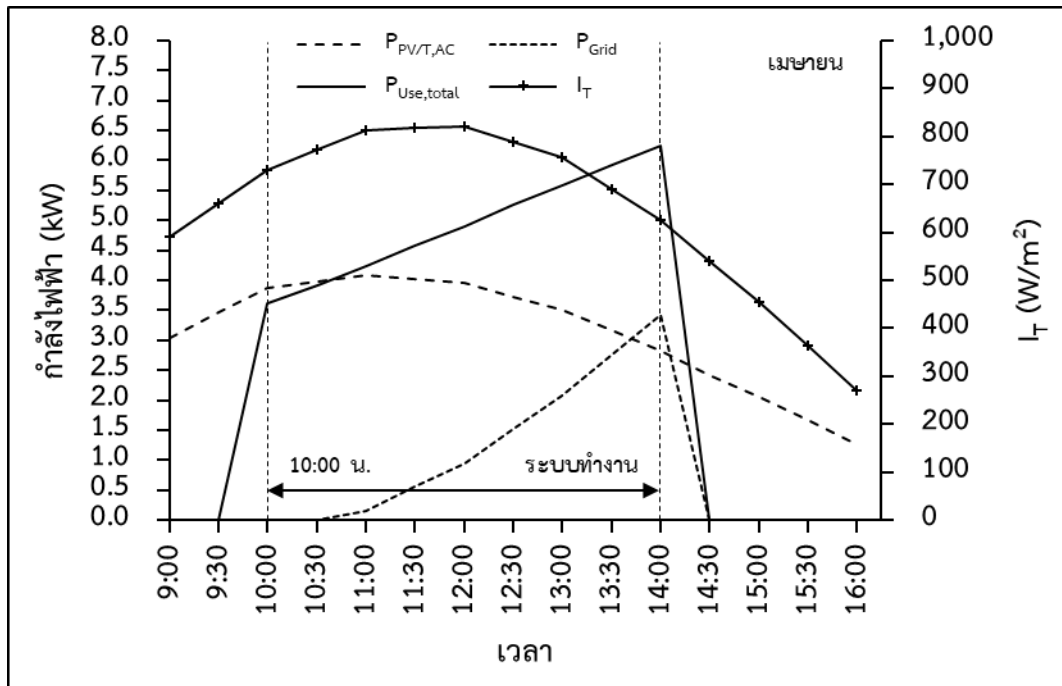
ภาพที่ 100 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนมกราคม



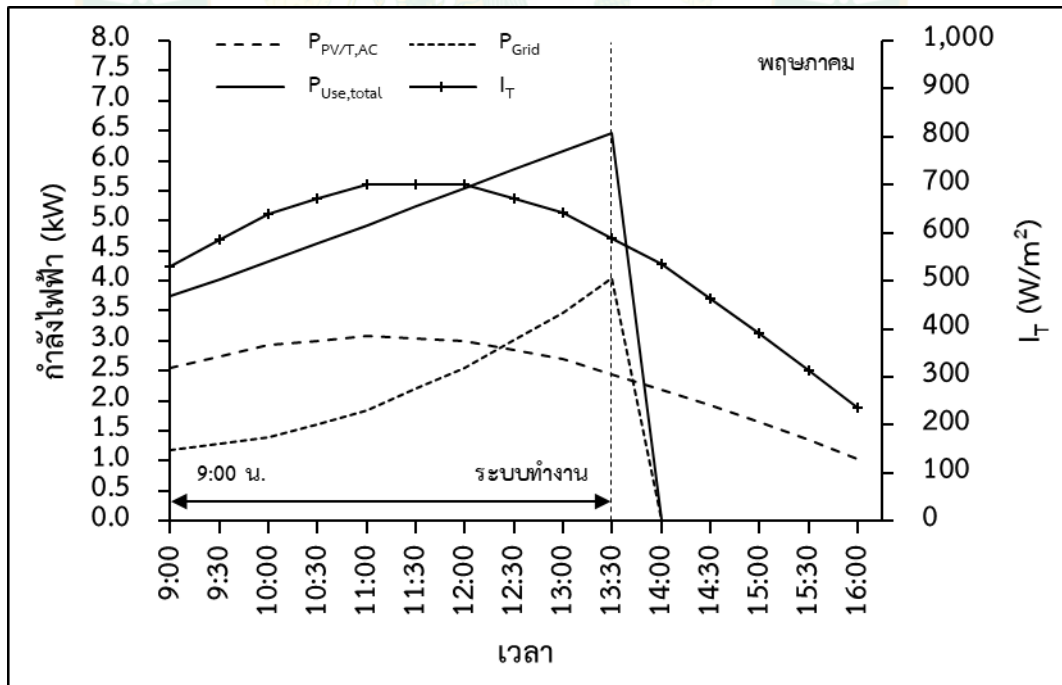
ภาพที่ 101 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในเดือนกุมภาพันธ์



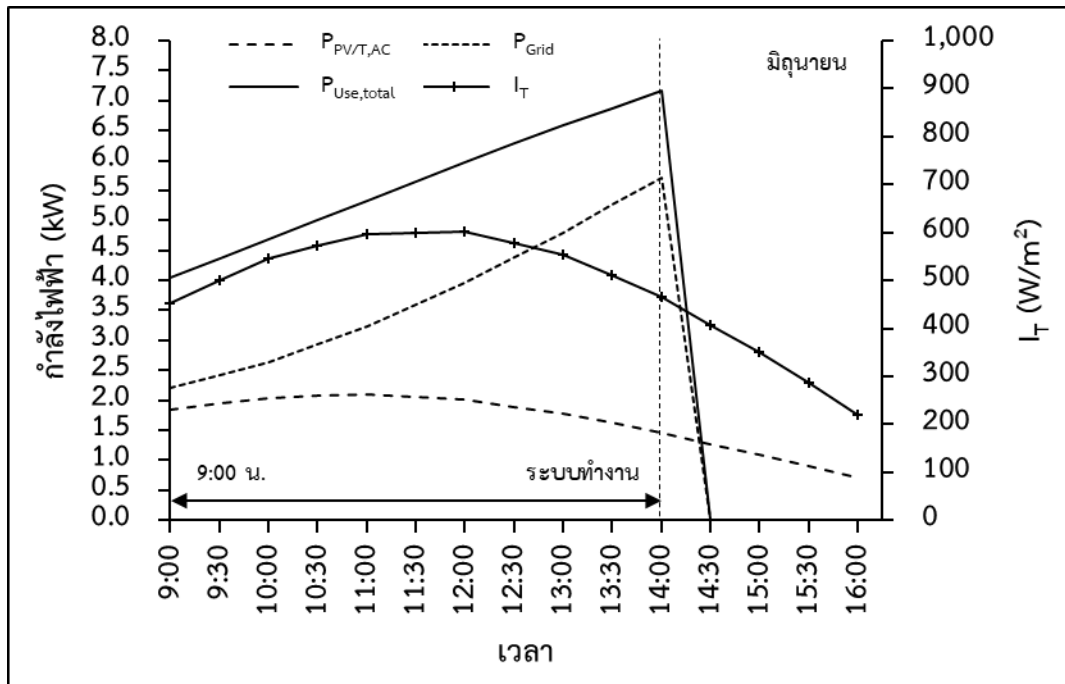
ภาพที่ 102 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในเดือนมีนาคม



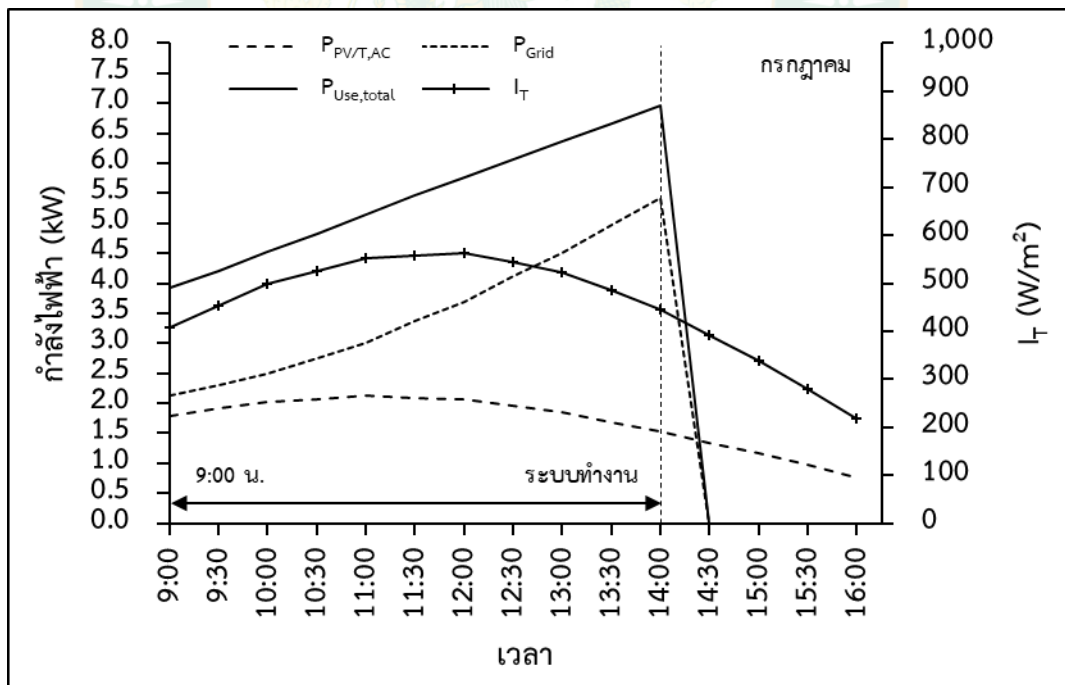
ภาพที่ 103 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในเดือนเมษายน



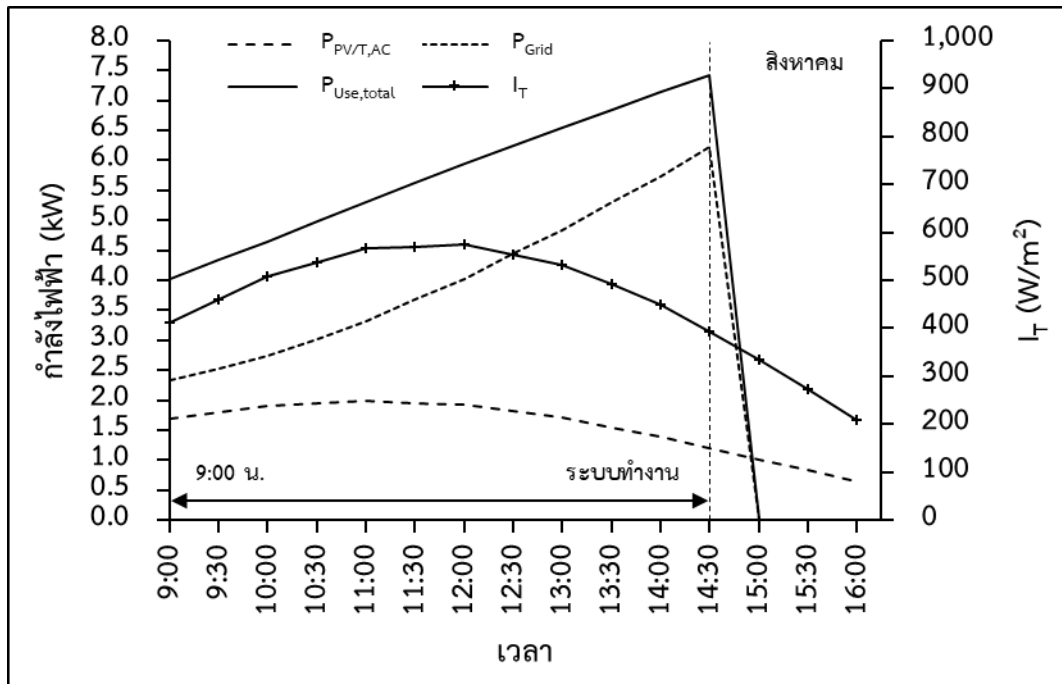
ภาพที่ 104 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนพฤษภาคม



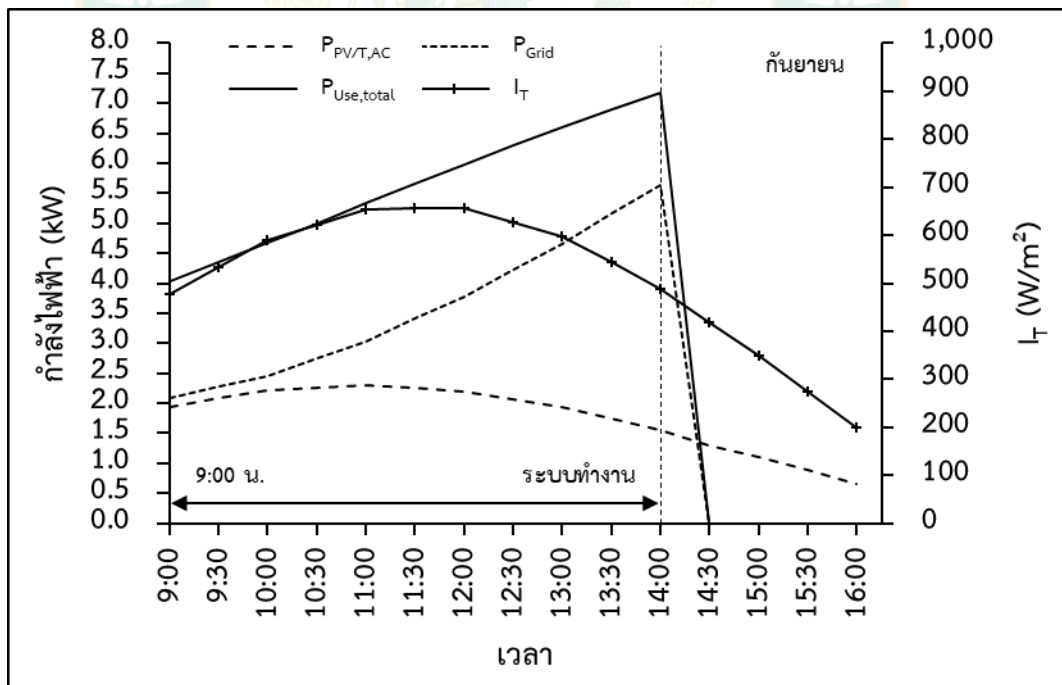
ภาพที่ 105 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนมิถุนายน



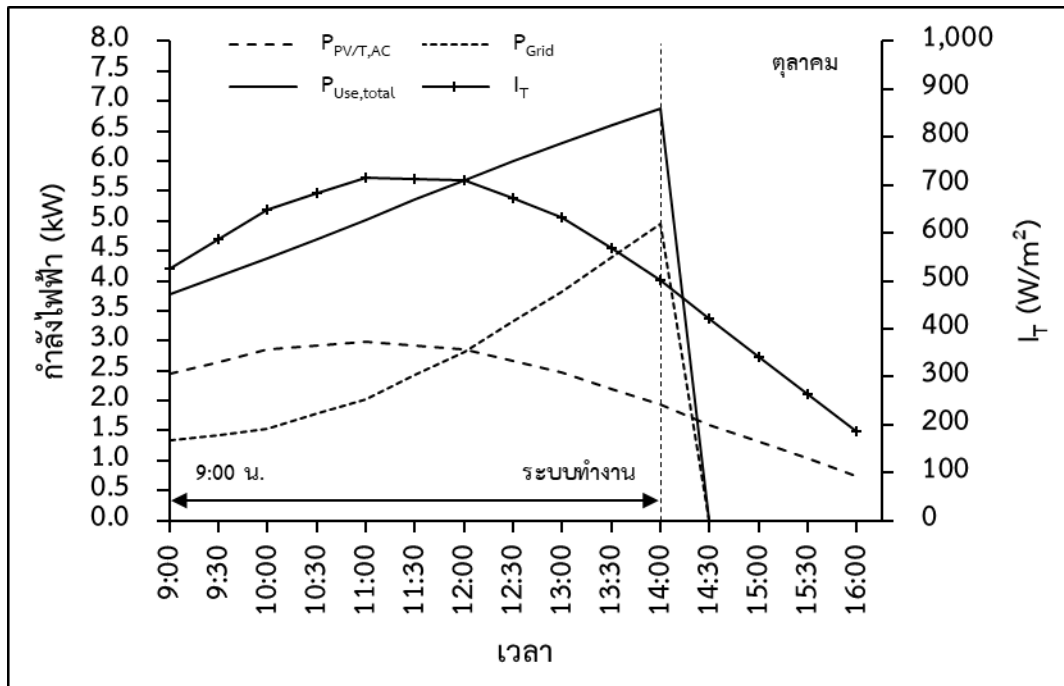
ภาพที่ 106 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนกรกฎาคม



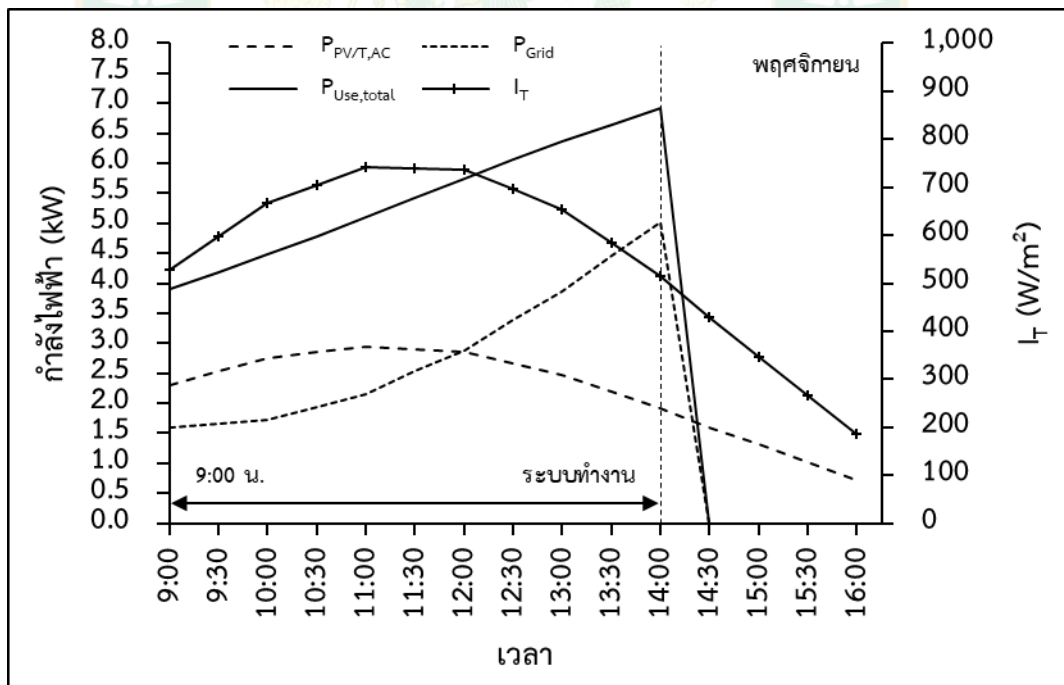
ภาพที่ 107 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนสิงหาคม



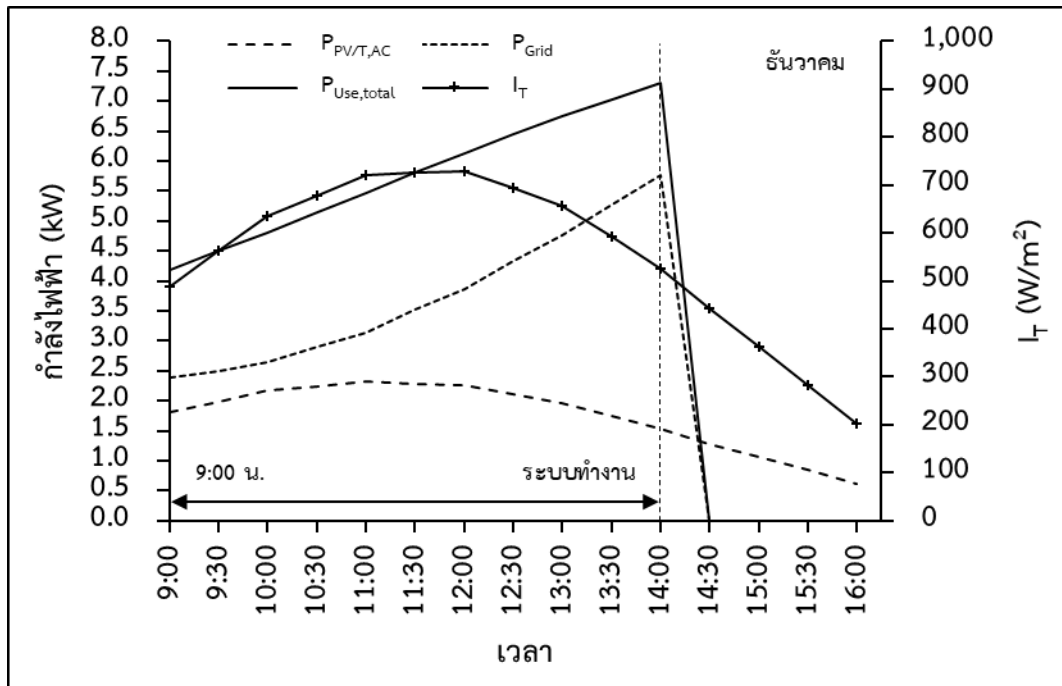
ภาพที่ 108 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนกันยายน



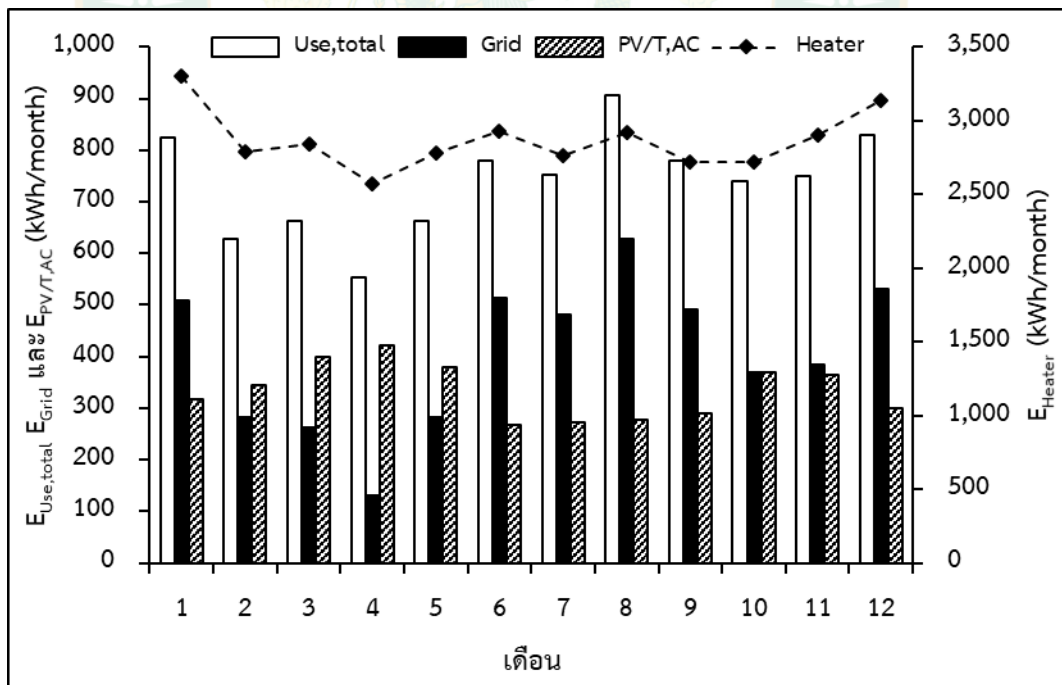
ภาพที่ 109 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนตุลาคม



ภาพที่ 110 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนพฤศจิกายน



ภาพที่ 111 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ เมื่อเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในเดือนธันวาคม



ภาพที่ 112 พลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่แผง Solar PV/T ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าที่ขดลวดไฟฟ้าใช้ตลอดทั้งปี

ตารางที่ 11 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump เปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดไฟฟ้าในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว

รายการ	ขดลวดไฟฟ้า	Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump
อัตราค่าไฟฟ้า (Baht/kWh)		4.53
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อน (kWh/year)	34,358.75	4,861.72
ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อน (Baht/year)	155,645.16	22,023.60
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kWh/year)	-	29,497.03
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (Baht/year)	-	133,621.56
มูลค่าการลงทุน (Baht)	-	888,314
ระยะเวลาคืนทุน (year)	-	6.65
IRR (% ต่อปี)	-	13.94

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทดสอบสมรรถนะแผง Solar PV/T แบบมีกระจกครอบ 2 ชนิด คือ mono-Si PV/T และ poly-Si PV/T พบว่า แผง mono-Si PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ $0.3280 F_R U_L$ เท่ากับ $7.2997 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T เฉลี่ย 54.14% ขณะที่แผง poly-Si PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ เท่ากับ $0.2748 F_R U_L$ เท่ากับ $8.4743 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ และประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T เฉลี่ย 46.80% ส่วนการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อน พบว่า ปั๊มความร้อนมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ย $2.38 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$

ส่วนที่ 2 ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกขนาดและชนิดของระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว พบว่า ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ขนาดกำลังไฟฟ้า 295 W_p /แผง จำนวน 16 แผง ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ที่ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน และใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,500 L เป็นระบบที่เหมาะสมและมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด

ส่วนที่ 3 ติดตั้งระบบแล้วทำการทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T และทดสอบปรับเวลาเริ่มทำงานของปั๊มความร้อนในระบบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน พบว่า การใช้อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ที่ 32.5 L/min และการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในช่วงฤดูหนาว จะทำให้ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 16.16 kWh/day โดยระบบใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 32.01 kWh/day แผง Solar PV/T ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 15.85 kWh/day คิดเป็น 49.52% ของพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบ ในส่วนของสมรรถนะระบบ พบว่า แผง Solar PV/T มีประสิทธิภาพรวมและค่า PR สูงสุด คือ 45.20% และ 78.58% ตามลำดับ และปั๊มความร้อนมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด $3.13 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_e$ เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการทำนายการทำงานของระบบในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน พบว่า การเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 10:00 น. ในฤดูร้อน ระบบจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 5.68 kWh/day และการเปิดปั๊มความร้อนที่เวลา 9:00 น. ในฤดูฝน ระบบจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด คือ 20.02 kWh/day

ส่วนที่ 4 ทำการศึกษาการทำงานของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์ พบว่า ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนเฉลี่ย 21.90 kWh/day ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 42.33% ของพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในระบบ เมื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEC) และค่าไฟฟ้าต่อจำนวนสุกร พบว่า มีค่าเท่ากับ 2.05 kWh/ตัว และ 9.30 Baht/ตัว ตามลำดับ ลดลงจากระบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.95 kWh/ตัว และ 26.96 Baht/ตัว ตามลำดับ

ส่วนที่ 5 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบโดยเปรียบเทียบการใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump กับการใช้งานขดลวดไฟฟ้าในขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนตลอดทั้งปี พบว่า การใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ 29,497.03 kWh/year ลดลง 85.85% เมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดไฟฟ้า คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 133,621.56 Baht/year ทำให้ระบบมีระยะเวลาคืนทุน 6.65 year และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 13.94% ต่อปี

5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

จากการศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะและแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยดังต่อไปนี้

โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวประสบปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกบ่อยครั้ง และปัญหานี้จะยิ่งรุนแรงขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูร้อน ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะส่งผลให้ปั๊มความร้อนมีกระแสไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดของเครื่อง ทำให้เครื่องหยุดทำงาน กระทบต่อการผลิตน้ำร้อน หากมีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว จะช่วยให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกปัญหาหนึ่ง คือ ปัญหาคุณภาพน้ำของตำบลเชียงดาว เมื่อนำน้ำประปาเข้าสู่ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump โดยตรง น้ำที่ได้รับความร้อนจะทำให้เกิดตะกรันขึ้นภายในระบบ เกิดความเสียหายต่อปั๊มน้ำและระบบหมุนเวียนน้ำ และยังลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของปั๊มความร้อนลงอีกด้วย ทำให้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump ไม่สามารถผลิตน้ำร้อนได้ก่อนเวลาทำงานของโรงฆ่าสัตว์ ดังนั้นการใช้งานระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump จึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบกรองน้ำเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อการทำงาน





ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวอย่างการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีรายละเอียดดังนี้

1. การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งปี

การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งปีของจังหวัดเชียงใหม่จะใช้วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนมาใช้ในการคำนวณซึ่งแสดงดังตารางที่ ก.1 ใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์จาก ฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ ระดับตำบล ปี 2560 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560b) ค่าอุณหภูมิอากาศจากหนังสือ Solar engineering of thermal processes (Duffie and Beckman, 2013) และใช้ข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจาก ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ (ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ, 2561) ค่าคำนวณจากงานวิจัยของ Chaichana et al. (Chaichana et al., 2010) ตัวอย่างการคำนวณจะใช้ข้อมูลของเดือนธันวาคม

ตารางที่ ก.1 วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน (Duffie and Beckman, 2013)

เดือน	วันที่ของปี (n)	วันที่ของเดือน
มกราคม	17	17
กุมภาพันธ์	47	16
มีนาคม	75	16
เมษายน	105	15
พฤษภาคม	135	15
มิถุนายน	162	11
กรกฎาคม	198	17
สิงหาคม	228	16
กันยายน	258	15
ตุลาคม	288	15
พฤศจิกายน	318	14
ธันวาคม	344	10

1.1 การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

- พื้นที่ที่ใช้คำนวณ จังหวัดเชียงใหม่
- เวลาที่ทำการคำนวณ (Standard time) 12:00 น. (12)
- วันที่เป็นตัวแทนของเดือนธันวาคม (n) 344
- ค่าคงที่สุริยะ (Solar constant, G_{SC}) $1,367 \text{ W/m}^2$
- ละติจูดสถานที่ที่พิจารณา (Latitude, ϕ) 18.78°
- มุมอะซิมูทพื้นดิน (Surface azimuth angle, γ) 0°
- มุมเอียงของแผง Solar PV/T เทียบกับพื้นดิน (β) 18.78°
- ค่าการสะท้อนของพื้น (ρ_g) 0.8
- เส้นเมริเดียนมาตรฐานสำหรับเขตเวลาท้องถิ่น คือ จังหวัดอุบลราชธานี (L_{st}) 105°
- ลองจิจูดของสถานที่ที่พิจารณา (L_{loc}) 98.98°

ผลการคำนวณ

หาค่า B

$$B = (n - 1) (360/365)$$

$$B = (344 - 1) (360/365)$$

$$B = 338.30^\circ$$

หาค่าสมการของเวลา (Equation of time, E)

$$E = 229.2 (0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin B)$$

$$E = 229.2 [0.000075 + 0.001868 \cos(338.30) - 0.032077 \sin(338.30) - 0.014615 \cos(2 \times (338.30)) - 0.04089 \sin(338.30)]$$

$$E = 7.14 \text{ min}$$

หาเวลาสุริยะ (Solar time)

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = (4(L_{st} - L_{loc}) + E) / 60$$

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = [4(105 - 98.98) + 7.14] / 60$$

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = 0.52$$

$$\text{Solar time} = 0.52 + \text{Standard time}$$

$$\text{Solar time} = 0.52 + 12$$

$$\text{Solar time} = 12.52 \text{ หรือ } 12:31 \text{ น.}$$

มุมชั่วโมง (Hour angle, ω)

$$\omega = \begin{cases} -15 (12 - \text{Solar time}) & \text{ก่อนเที่ยงสุริยะ} \\ +15 (\text{Solar time} - 12) & \text{หลังเที่ยงสุริยะ} \end{cases}$$

$$\omega = +15 (12.52 - 12)$$

$$\omega = 7.8^\circ$$

เดคลิเนชัน (Declination, δ)

$$\delta = 23.45 \sin[360 (284 + n/365)]$$

$$\delta = 23.45 \sin[360 (284 + 344/365)]$$

$$\delta = -23.05^\circ$$

มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (Sunset hour angle, ω_s)

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta$$

$$\cos \omega_s = -\tan(18.78) \tan(-23.05)$$

$$\cos \omega_s = 0.14$$

$$\omega_s = 81.68^\circ$$

ค่ารังสีอาทิตย์จากนอกโลกที่ตกกระทบชั้นบรรยากาศ (I_0)

$$I_0 = \frac{12 \times 3,600}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right]$$

ω_1 และ ω_2 คือ มุมชั่วโมงของเวลาที่พิจารณาและมุมชั่วโมงของเวลาที่ผ่านไป

$$I_0 = [(12 \times 3,600 / \pi) (1,367) (1 + 0.033 \cos(360 \times 334 / 365))]$$

$$\times [\cos(18.78) \cos(-23.05) (\sin(22.8) - \sin(7.8)) + (\pi(22.8 - 7.8) / 180)$$

$$\sin(18.78) \sin(-23.05)]$$

$$I_0 = 3.61 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์ a

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(81.68 - 60)$$

$$a = 0.59$$

หาค่าสัมประสิทธิ์ b

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(81.68 - 60)$$

$$b = 0.48$$

หาอัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมงต่อรังสีอาทิตย์รวมรายวัน (r_t)

$$r_t = \frac{l}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

$$r_t = (\pi/24) (0.59 + 0.48 \cos(7.8))$$

$$[(\cos(7.8) - \cos(81.68)) / (\sin(81.68) - ((\pi \times 81.68) / 180) \cos(81.68))]$$

$$r_t = 0.152$$

หาค่ารังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมง (l)

คำนวณค่ารังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมงจาก r_t จะได้ว่า

$$l = r_t \times H$$

เมื่อ H คือ ค่ารังสีอาทิตย์รวมรายวัน ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{-day}$) จากฐานข้อมูลระดับตำบล ปี 2560 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานแสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ค่ารังสีอาทิตย์รวมรายวันของวันที่เป็นตัวแทนแต่ละเดือน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560b)

เดือน	ค่ารังสีอาทิตย์รวมรายวัน (H , $\text{MJ}/\text{m}^2\text{-day}$)
มกราคม	15.92
กุมภาพันธ์	18.57
มีนาคม	19.81
เมษายน	21.44
พฤษภาคม	19.47
มิถุนายน	16.93
กรกฎาคม	15.58
สิงหาคม	15.39
กันยายน	16.66
ตุลาคม	16.66
พฤศจิกายน	15.82
ธันวาคม	14.92

$$I = 0.152 \times 14.92$$

$$I = 2.27 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$$

หาค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายชั่วโมง (k_T)

$$k_T = I / I_0$$

$$k_T = 2.27 / 3.61$$

$$k_T = 0.63$$

หาค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง (I_d)

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & (\text{เมื่อ } k_T \leq 0.22) \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & (\text{เมื่อ } 0.22 < k_T \leq 0.8) \\ 0.165 & (\text{เมื่อ } k_T > 0.8) \end{cases}$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.1604(0.63) + 4.388(0.63)^2 - 16.638(0.63)^3 + 12.336(0.63)^4$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.38$$

$$I_d = 0.38 \times 2.27$$

$$I_d = 0.86 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$$

หาค่าอัตราส่วนของรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นดิน (R_b)

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

$$\cos\theta = \cos(\phi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi - \beta) \sin\delta$$

$$\cos\theta = \cos(18.78 - 18.78) \cos(-23.05) \cos(7.8) + \sin(18.78 - 18.78) \sin(-23.05)$$

$$\cos\theta = 0.91$$

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta$$

$$\cos\theta_z = \cos(18.78) \cos(-23.05) \cos(7.8) + \sin(18.78) \sin(-23.05)$$

$$\cos\theta_z = 0.74$$

$$R_b = \frac{0.91}{0.74}$$

$$R_b = 1.24$$

หาค่ารังสีตรงรายชั่วโมง (I_b)

$$I_b = I - I_d$$

$$I_b = 2.27 - 0.86$$

$$I_b = 1.41 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$$

หาค่ารังสีอาทิตย์รวมบนระนาบเอียงรายชั่วโมง (I_T)

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I_p \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

$$I_T = (1.41 \times 1.24) + 0.86 \left(\frac{1 + \cos(18.78)}{2} \right) + (2.27 \times 0.8) \left(\frac{1 - \cos(18.78)}{2} \right)$$

$$I_T = 2.63 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$I_T = (2.63 \times 10^6) / 3,600$$

$$I_T = 729.39 \text{ W/m}^2$$

1.2 การคำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

คำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่ตลอดทั้งปีจากสมการในงานวิจัยของ Chaichana et al. (Chaichana et al., 2010) โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของวันที่เป็นตัวแทนแต่ละเดือนในตารางที่ ก.3 ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้ พิจารณาที่เวลา 12:00 น. ของเดือนธันวาคม

$$T_a = \frac{1}{2} \left[(T_{\max} + T_{\min}) + (T_{\max} - T_{\min}) \sin \left(\frac{2\pi}{24} (t - 9) \right) \right]$$

เมื่อ T_{\max} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) T_{\min} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำสุด ($^{\circ}\text{C}$) และ t คือ เวลาที่พิจารณา (h)

$$T_a = \frac{1}{2} \left[(29 + 21.6) + (29 - 21.6) \sin \left(\frac{2\pi}{24} (12 - 9) \right) \right]$$

$$T_a = 27.92 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุดของวันที่เป็นตัวแทนแต่ละเดือน (ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ, 2561)

เดือน	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	
	สูงสุด (T_{max} , °C)	ต่ำสุด (T_{min} , °C)
มกราคม	30.3	16.9
กุมภาพันธ์	34.5	17.4
มีนาคม	35.5	20.5
เมษายน	38.5	25.4
พฤษภาคม	36.5	24.5
มิถุนายน	29.5	24.0
กรกฎาคม	35.2	24.8
สิงหาคม	33.0	23.8
กันยายน	34.8	24.0
ตุลาคม	35.5	23.5
พฤศจิกายน	33.0	23.3
ธันวาคม	29.0	21.6

2. การเลือกขนาดของปั๊มความร้อน

ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน เป็นระบบที่ใช้แผง Solar PV/T ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน ดังนั้นการเลือกขนาดของปั๊มความร้อนมาใช้ในระบบจะต้องมีความสอดคล้องกับการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสอง ในการคำนวณขนาดของปั๊มความร้อนที่นำมาใช้งาน จะใช้ค่าชั่วโมงแสงอาทิตย์สูงสุด (Peak sun-hour, PSH) มาใช้เป็นเวลาผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนในการคำนวณอัตราการผลิตความร้อนของปั๊มความร้อน เพื่อผลิตน้ำร้อน 2,500 L จากอุณหภูมิ 30 °C ให้มีอุณหภูมิ 65 °C แสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{อัตราการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อน} = \frac{M_w C_{p_w} (T_{ST}^{t+\Delta t} - T_{ST}^t)}{\Delta t}$$

$$\text{อัตราการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อน} = \frac{(2,500)(4.187)(65 - 30)}{(5.23)(3,600)}$$

$$\text{อัตราการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อน} = 19.46 \text{ kW}_{th}$$

ปั๊มความร้อนที่เลือกใช้ในระบบจะเป็นปั๊มความร้อนที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกปั๊มความร้อนที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ คือ 17.8 kW_{th} มาใช้ในระบบ ซึ่งจากการคำนวณในลักษณะเดียวกัน พบว่าปั๊มความร้อนขนาด 17.8 kW_{th} ใช้เวลาในการผลิตน้ำร้อนใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ คือ 5.72 h

3. การคำนวณตัวแปรจากการใช้สมการทำนาย

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

• ช่วงเวลาที่คำนวณ	10:00 น.
• ค่ารังสีอาทิตย์ (I_T)	456.01 W/m ²
• อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a)	32.80 °C
• อุณหภูมิน้ำเข้าแผง Solar PV/T ($T_{f,i}$)	38.26 °C
• อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T (\dot{m}_f)	32.5 L/min (0.54 kg/s)
• ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{p_f})	4,187 J/kg·K
• ชนิดแผง Solar PV/T	mono-Si PV/T
• จำนวนแผง Solar PV/T	16 แผง
• $F_R (\tau\alpha)_e$	0.3280
• สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($F_R U_L$)	7.2997 W/m ² ·K
• พื้นที่รับรังสีอาทิตย์รวม ($A_{PV/T}$)	27.17 m ²

ผลการคำนวณ

อุณหภูมิแผง Solar PV/T จากสมการทำนาย

จากสมการที่ 34 จะได้ว่า

$$T_p = 0.05831 (I_T^{0.27576}) (T_a^{1.5262}) (T_{f,i}^{-0.092972})$$

$$T_p = 0.05831 (456.01^{0.27576}) (32.80^{1.5262}) (38.26^{-0.092972})$$

$$T_p = 46.28 \quad ^\circ\text{C}$$

กำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T จากสมการทำนาย

จากสมการที่ 35 จะได้ว่า

$$P_{PV/T} = 0.82707 (I_T^{0.56327}) (T_a^{-0.47834}) (T_{f,i}^{-0.47705}) (T_p^{1.3394})$$

$$P_{PV/T} = 0.82707 (456.01^{0.56327}) (32.80^{-0.47834}) (38.26^{-0.47705}) (46.28^{1.3394})$$

$$P_{PV/T} = 183.07 \quad \text{W/แผง}$$

ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง จะได้

$$P_{PV/T} = 183.07 \times 16 \quad \text{W/แผง} \times \text{แผง}$$

$$P_{PV/T} = 2,929.18 \quad \text{W}$$

อัตราการความร้อนที่แผง Solar PV/T ผลิตได้

$$Q_{PV/T} = A_{PV/T} [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad \text{m}^2 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} - \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} (^\circ\text{C}) \right]$$

$$Q_{PV/T} = (27.17) [(0.3280 \times 456.01) - 7.2997 (38.26 - 32.80)]$$

$$\text{m}^2 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} - \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} (^\circ\text{C}) \right]$$

$$Q_{PV/T} = 2,981.43 \quad \text{W}$$

อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T

ใช้สมการที่ 25 ในการคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T จะได้ว่า

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

$$T_{f,o} = 38.26 + \frac{2,981.43}{0.54 \times 4,187} \quad ^\circ\text{C} + \left[\frac{\text{W}}{\text{kg/s} \times \text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

$$T_{f,o} = 39.57 \quad ^\circ\text{C}$$

อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน

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

$$\text{EER} = -0.1001 (38.26 - 32.80) + 4.2387$$

$$\text{EER} = 3.69 \quad \text{kW}_{th}/\text{kW}_e$$

4. การคำนวณการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

- วันทำงาน 314 day/year
- อัตราค่าไฟฟ้า 4.53 Baht/kWh
- มูลค่าการลงทุน 888,314 Baht
- ระยะเวลาโครงการ 20 year

ผลการคำนวณ

กรณีใช้ขดลวดไฟฟ้า

$$\text{พลังงานไฟฟ้าต่อปี} = 34,358.75 \quad \text{kWh/year}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อปี} = 34,358.75 \times 4.53 \quad \text{kWh/year} \times \text{Baht/kWh}$$

ค่าไฟฟ้าต่อปี = 155,645.16 Baht/year

กรณีใช้ระบบ Solar PV/T Hybrid Assisted Heat Pump

พลังงานไฟฟ้าต่อปี = 4,861.72 kWh/year

ค่าไฟฟ้าต่อปี = 4,861.72 × 4.53 kWh/year × Baht/kWh

ค่าไฟฟ้าต่อปี = 22,023.60 Baht/year

ประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่อปี = 34,358.75 – 4,861.72 kWh/year

ประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่อปี = 29,497.03 kWh/year

ประหยัดค่าไฟฟ้าต่อปี = 155,645.16 – 22,023.60 Baht/year

ประหยัดค่าไฟฟ้าต่อปี = 133,621.56 Baht/year

ระยะเวลาคืนทุน = 888,314 / 133,621.56 Baht / (Baht/year)

ระยะเวลาคืนทุน = 6.65 year

คำนวณ IRR จากสมการที่ 30 จะได้

$$NPV = -133,621.56 \left[\frac{(1 + IRR)^{20} - 1}{IRR (1 + IRR)^{20}} \right] - 888,314 = 0$$

$$IRR = 13.94 \quad \% \text{ ต่อปี}$$

การคำนวณในการทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์

ตัวอย่างการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ของการทดสอบสมรรถนะของระบบในการใช้งานจริงในโรงฆ่าสัตว์มีรายละเอียดดังนี้

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

• วันที่คำนวณ	17 ธันวาคม พ.ศ. 2563
• ช่วงเวลาที่คำนวณ	12:00 น.
• ค่ารังสีอาทิตย์ (I_T)	873.50 W/m ²
• อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a)	30.90 °C
• อุณหภูมิน้ำเข้าแผง Solar PV/T ($T_{f,i}$)	48.70 °C
• อุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T ($T_{f,o}$)	56.60 °C
• อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T (\dot{m}_f)	32.5 L/min (0.54 kg/s)
• อัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊มความร้อน (\dot{m}_{HP})	30 L/min (0.50 kg/s)
• พื้นที่รับรังสีอาทิตย์รวม ($A_{PV/T}$)	27.17 m ²
• ระยะเวลาระหว่างข้อมูล	5 min

ผลการคำนวณ

อัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ผลิตได้

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

$$Q_{PV/T} = 0.54 \times 4,187 (56.60 - 48.70) \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (^\circ\text{C})$$

$$Q_{PV/T} = 8,987.16 \quad \text{W}$$

ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง Solar PV/T

$$\eta_{th,PV/T} = \frac{Q_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad \frac{\text{W}}{\text{W/m}^2 \times \text{m}^2}$$

$$\eta_{th,PV/T} = \frac{8,987.16}{873.50 \times 27.17} \quad \frac{\text{W}}{\text{W/m}^2 \times \text{m}^2}$$

$$\eta_{th,PV/T} = 37.60 \quad \%$$

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T

$$\eta_{e,PV/T} = \frac{P_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad \frac{\text{W}}{\text{W/m}^2 \times \text{m}^2}$$

$$\eta_{e,PV/T} = \frac{3,226.70}{873.50 \times 27.17} \quad \frac{W}{W/m^2 \times m^2}$$

$$\eta_{e,PV/T} = 13.50 \quad \%$$

ประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T

$$\eta_{Net,PV/T} = \frac{Q_{PV/T} + P_{PV/T}}{I_T A_{PV/T}} \quad \frac{W}{W/m^2 \times m^2}$$

$$\eta_{Net,PV/T} = \frac{8,987.16 + 3,226.70}{873.50 \times 27.17} \quad \frac{W}{W/m^2 \times m^2}$$

$$\eta_{Net,PV/T} = 51.10 \quad \%$$

ผลผลิตสุดท้ายของระบบ

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_0} \quad kWh/kW_p$$

$$Y_F = \frac{0.2634}{0.295 \times 16} \quad kWh/kW_p$$

$$Y_F = 0.0558 \quad kWh/kW_p$$

ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎี

$$Y_R = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad kWh/kW_p$$

$$Y_R = \frac{(873.50/1,000) \times (5/60)}{1} \quad \frac{(kW/m^2) \times h}{kW/m^2}$$

$$Y_R = 0.0728 \quad kWh/kW_p$$

สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad \frac{kWh/kW_p}{kWh/kW_p}$$

$$PR = \frac{0.0558}{0.0728} \quad \frac{kWh/kW_p}{kWh/kW_p}$$

$$PR = 76.67 \quad \%$$

อัตราการความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้

$$Q_c = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (^\circ\text{C})$$

$$Q_c = 0.50 \times 4.187 (48.00 - 54.70) \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (^\circ\text{C})$$

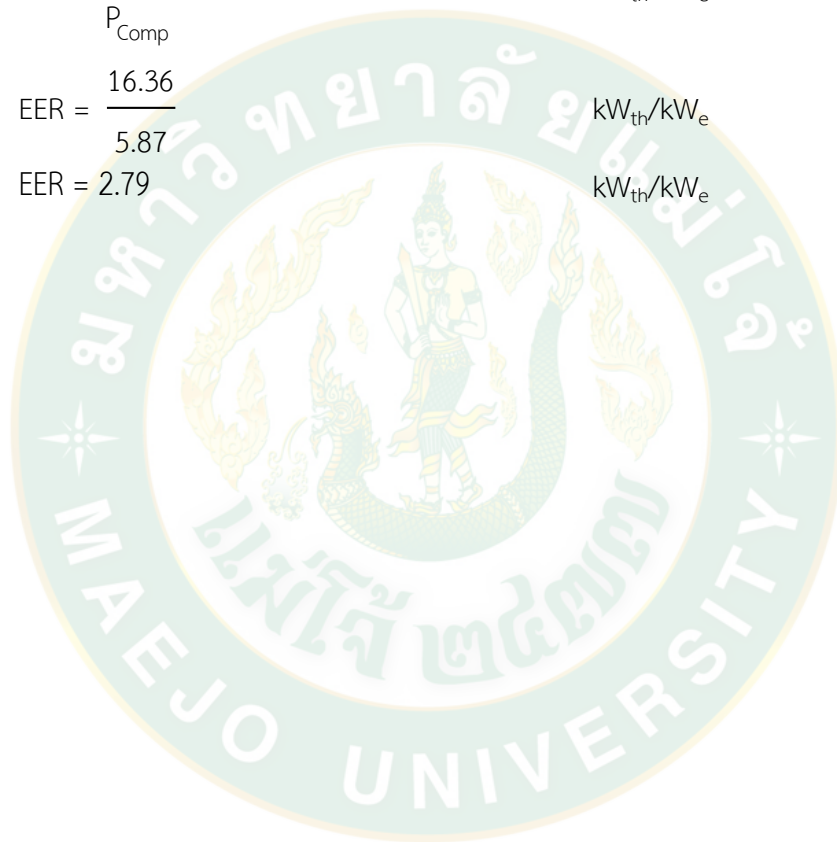
$$Q_c = 16.36 \quad \text{kW}$$

อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน

$$\text{EER} = \frac{Q_c}{P_{\text{Comp}}} \quad \text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$$

$$\text{EER} = \frac{16.36}{5.87} \quad \text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$$

$$\text{EER} = 2.79 \quad \text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_e$$





ภาคผนวก ข.
การเผยแพร่งานวิจัย

การเผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- ชื่อบทความ: The Comparison Study of Performance between Two Different Types of Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels
- ผู้แต่ง: Narupon Wanchupela and Sarawut Polvongsri
- การประชุมวิชาการ: The 5th National and The 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology
- จัดทำโดย: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
- วันที่นำเสนอผลงาน: 28-29 พฤษภาคม 2563 นำเสนอผลงานผ่านระบบการประชุมออนไลน์






The 5th National Conference The 1st International Conference

on Informatics, Agriculture, Management
Business administration, Engineering
Sciences and Technology

28 – 29 May 2020
Online Conference 

 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prince of Chumphon Campus



 <http://www.pcc.kmitl.ac.th/iambest>





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

March 30, 2020

Dear Narupon Wanchupela
Sarawut Polvongsri

We are very pleased to inform you that your manuscript, "The comparison study of performance between two different types of glazed solar photovoltaic thermal panels" has been accepted to present in the 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Sciences and Technology: IAMBEST 2020) on May 28th- 29th, 2020.

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

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

Yours sincerely,

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

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



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



CERTIFICATE OF ATTENDANCE



This is to certify that

Narupon Wanchupela and Sarawut Polvongsri

has successfully participated in a oral presentation.

Title of the Paper : The Comparison Study of Performance between Two Different Types of
Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels

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

Prof. Dr. Suchatvee Suwansawat
President

Asst. Prof. Dr. Wattanachai Pongnak
General Chair

OE-39	The Comparison Study of Performance between Two Different Types of Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels <i>Narupon Wanchupela and Sarawut Polvongsri</i>	114
OE-199	Detection of the Interaction Between Wheel and Railway of the Electrical Train Utilizing Faster R-CNN Technique <i>Suparat Pumyoy, Anakkapon Saenthon, Somyot Kiatwanidvilai and Poom Konghuayrob</i>	122
OE-201	Analysis of Force Control of Industry Robot Arm using Robot Operating System (ROS) <i>Somyot Kaitwanidvilai and Siwawong Buthgate</i>	132
OE-204	Minimize Energy of Robot Arm by Particle Swarm Optimization: A Case Study of Control Cable <i>Somyot Kaitwanidvilai, Veerasak Chanarungruengkij and Poom Konghuayrob</i>	139

Poster International Article

Group A : Agriculture

PA-43	Effect of crude extract from Lantana, <i>Lantana camara</i> L. in controlling fall armyworm, <i>Spodoptera frugiperda</i> (Lepidoptera: Noctuidae) <i>Nathapong Matintarangson, Sasamol Phasuk, Pannraphat Takolpuckdee and Poonyanuch Nilsang</i>	147
-------	---	-----

บทความภาคบรรยาย ระดับชาติ

กลุ่ม I : ด้านสารสนเทศ

OI-69	การทดสอบระบบตรวจวัดค่าความชื้นดินแสดงผลผ่านมือถือบนพื้นฐานการใช้งานเครือข่ายสัญญาณระยะไกลสำหรับพื้นที่ฟาร์มเกษตรกรรมขนาดใหญ่ <i>ศิริสิทธิ์ บุญกลาง สรณภูมิ อิมสุดใจ และ ศรัญญา ดวงสุวรรณ</i>	152
OI-72	วิธีการประเมินผลวัดความสูงของอากาศยานไร้คนขับด้วยเทคโนโลยี LiDAR สำหรับการสำรวจภาคพื้นดิน <i>สุทิตา ศรีจันทร์ทอง อู๋ทิณณีย์ ทองประดับ อรรถวุฒิ นุชสายอง และ ศรัญญา ดวงสุวรรณ</i>	156
OI-74	ระบบตรวจจับผู้สูงอายุหกล้มในที่อยู่อาศัยผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง <i>นุสบา มะตะเรส อิชยา เกตุแก้ว วันวิสา วัฒน์ และ ศรัญญา ดวงสุวรรณ</i>	160
OI-153	มาตรวัดน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ <i>ภาสกร ขวัญใจ สมาน นวนชนาย ณัฐพงศ์ รัตนเดช และ รัฐพงษ์ สุวลักษณ์</i>	164

The Comparison Study of Performance between Two Different Types of Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels

Narupon Wanchupela¹ and Sarawut Polvongsri^{*}

¹ School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

^{*}Corresponding author: Sarawut Polvongsri, e-mail address: saravooth@hotmail.com

Abstract

A solar photovoltaic thermal panel (Solar PV/T) is a combination of photovoltaic module (PV) and solar thermal collector that will produce the electricity and hot water simultaneously. The objective of this research is to compare the net efficiency and thermal performance of solar PV/T between the monocrystalline silicon (mono-Si) type and the polycrystalline silicon (poly-Si) type, both categorized as glazed type. The 295 W_p of mono-Si PV/T with 1.698 m² of area and the 270 W_p poly-Si PV/T with 1.624 m² of area were installed the water tubes behind the panels for removing heat. The thermal performance was following by ASHRAE STANDARD 93-2003. The panels was tilted at 18° facing to the south and feed the inlet water from 145 liters storage tank into the panels at the standard mass flow rate (0.02 kg/s·m²) under the inlet temperature condition of 35, 40, 45, 50, 55, 60, and 65 °C, respectively. The testing was conducted since 8:00 a.m. to 4:00 p.m. at School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand. The investigation results show that the thermal performance F_R(α)_e and F_RU_L of mono-Si PV/T were 0.328 and 7.2997 W/m²·K, respectively higher than poly-Si PV/T result which F_R(α)_e and F_RU_L were 0.275 and 8.4743 W/m²·K, respectively. Furthermore, the net efficiency of mono-Si PV/T was 54.14% greater than poly-Si PV/T that was equal to 46.80%.

Keywords: Performance, Solar photovoltaic thermal (Solar PV/T), Glazed cover, Electricity, Hot water

1. Introduction

The average daily solar radiation in Thailand is 17.6 MJ/m²·day [1] which is high and suitable for use as alternative energy. The utilization of solar energy can be divided into 2 groups; heat and electricity. Photovoltaic (PV) panel is a technology that transforms solar energy to electricity, which is widely popular and has developed various forms such as walkable photovoltaic floor tiles [2] and use phase change material to reduce panel temperature, resulting in the PV panel increasing efficiency [3]. The remaining energy received from incident solar energy is in the form of heat, which reduces the electrical efficiency of the PV panel. Due to the heat received by the PV panel, causing the cell temperature to rise. Menezes-Rodriguez et al. (2005) [4] studied the operation of solar cells at high temperatures, found that the increase in cell temperature causes the efficiency of solar to electricity conversion to decrease both theoretically and experimentally. Solar collector uses to produce hot water or hot air. Therefore, the solar collector can solve this problem by transforming the accumulation heat to hot water or hot air production. A solar Photovoltaic thermal (PV/T) panel is a combination of a PV panel and solar collector which its output is electricity and heat simultaneously, was proposed by Wolf (1976) [5]. Presently, there are a lot of researches that studied the performance of solar PV/T panels. Dupeyrat et al. [6] compared the performance of solar PV/T collector with solar thermal collector and PV panel by TRNSYS simulation. The result showed that solar PV/T

collectors had the higher energetic performance than using only PV or solar collector. Bhattarai et al. [7] study the effects of the storage capacity on the performance of different solar systems. It was found that the thermal efficiency of PV/T systems and conventional collectors increases rapidly when increasing storage capacity. Yang et al. [8] compared the PV/T-PCM and PV/T systems. The primary energy-saving efficiency for the PV/T-PCM system increased by 14%. These results indicated that phase change materials (PCMs) can efficiently decrease module temperature and heat loss to surrounding. Liang et al. [9] compare the PV module and PV/T solar collector filled with graphite. The results show that the backplane temperature of PV/T solar collector filled with graphite lower than PV module. Low backplane temperature can be enhance the electrical efficiency. Nualboonrueng et al. [10] compared the electrical production of amorphous silicon (a-Si) and multi-crystalline silicon (mc-Si) PV/T collectors. The results showed that the thermal recovery of a-Si PV/T collector was almost the same as that of mc-Si PV/T collector while the electricity generation of mc-Si PV/T was equal to 1.2 times as much as that of a-Si PV/T.

Most researches will experiment the solar PV/T performance in various procedure, but for the solar PV/T commercial panel, there is a few research that compares the performance of solar PV/T. Therefore, this research focuses to study the net efficiency and thermal performances of commercial solar P V/T the monocrystalline silicon (mono-Si) and the polycrystalline silicon (poly-Si).

2. Methods and Materials

2.1 Solar PV/T panel

Figure 1 shows the components of solar PV/T panel. It consists of clear glass as a cover which reduces heat loss by convection from the front surface. The second layer has many PV cells that can convert solar radiation to electrical energy. The third layer is a metal sheet connecting to the bottom of PV panel, which receives excess heat from PV panel and transfers to the water in absorbed copper tube in the fourth layer. And the last layer is an insulation that covers around the PV/T panel.

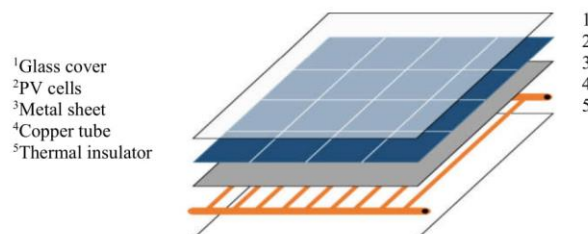


Figure 1 Components of solar PV/T panel.

2.2 Experimental setup

This research is divided into two parts: the study of thermal performance and net efficiency of mono-Si PV/T and poly-Si PV/T. The net efficiency test is the study of electricity and useful heat production of solar PV/T panels during daytime. While the thermal performance test was performed according to the ASHRAE STANDARD 93-2003.

The size of mono-Si PV/T and poly-Si PV/T had a maximum power output of 295 W_p and 270 W_p respectively. Both panels were glazed. The mono-Si PV/T had an area of 1.698 m² and the poly-Si PV/T was 1.624 m². The performance testing was conducted in outdoor testing as shown in **Figure 2** and **Figure 3** at the School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. The tilt angle of both solar PV/T panels was 18° facing to the south. The water was circulated from a 145 liters hot water storage tank to the panel. For experiment, the data will be recorded every 2 mins. Thermocouple type K (Accuracy ± 0.5 °C) was used to measure inlet water temperature, outlet water temperature, ambient temperature, panel temperature, and hot water temperature in storage tank. Solar radiation was measured by solar meter (Model; Lutron SPM-1116SD, accuracy ± 10 W/m²). The mass flow rate of water was measured by flow meter (Model; Treaton Z-3001). Power output from solar PV/T panel was measured by PV Analyzer (Model; PROVA 210, accuracy ± 1% current and ± 1% voltage).

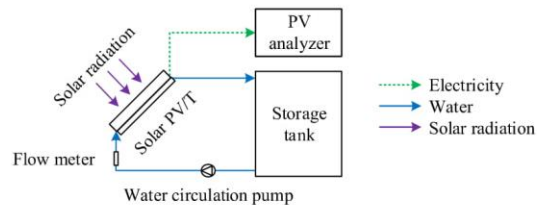


Figure 2 Schematic diagram of solar PV/T system.

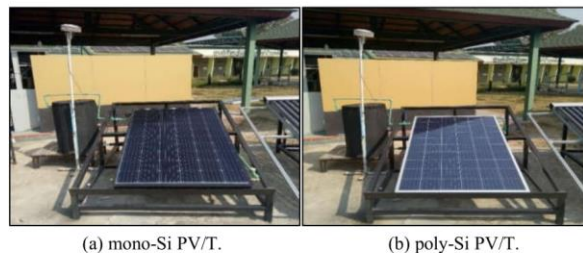


Figure 3 The experiment setting.

2.3 Thermal performance

The thermal performance testing was proceeded according to ASHRAE STANDARD 93-2003. In this test, every parameters were set in the steady state condition as following conditions.

- The solar PV/T panel was installed with a tilt angle equal to the latitudes of location establish and face solar PV/T panel to the south.
- The water flow rate must be constant mass flow rate of 0.02 kg/s·m².

- Determine the inlet water temperature through solar PV/T panel was predetermined at 35, 40, 45, 50, 55, 60, and 65 °C, respectively, within a fluctuation of ± 1 °C.
- The ambient temperature should be varied of ± 1.5 °C.
- The solar radiation during the test must be higher than 790 W/m² within a fluctuation of ± 32 W/m².
- Wind speed around the surrounding is between 2.2-4.5 m/s

The experiments were conducted in each inlet water temperature condition. If the working fluid in the solar PV/T panel does not change to other phase; then, calculation of useful heat from solar PV/T panel can be determined as following equation (1)

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

Where $Q_{PV/T}$ is useful heat from solar PV/T panel (W). \dot{m}_f is mass flow rate of water (kg/s). $C_{p_{bulk,f}}$ is specific heat capacity of water (J/kg·K). $T_{f,o}$ and $T_{f,i}$ is inlet and outlet water temperature (°C).

The useful heat from solar PV/T panel will be calculated to determine the thermal efficiency of the solar PV/T panel by the relationship between the thermal energy receiving and the energy input from solar radiation.

$$\eta_{th,PV/T} = \frac{Q_{PV/T}}{A_{PV/T} I_T} \quad (2)$$

Where $\eta_{th,PV/T}$ is thermal efficiency of solar PV/T panel (%). $A_{PV/T}$ is an area of solar PV/T panel (m²) and I_T is solar radiation (W/m²).

When considering at a steady state condition, the useful heat from solar PV/T panel can be calculated from the following equation (3).

$$Q_{PV/T} = A_{PV/T} [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (3)$$

Where F_R is heat removal factor. $(\tau\alpha)_e$ is transmittance-absorptance product. U_L is overall heat loss (W/m²·K). T_a is an ambient temperature (°C).

From Equation (3), thermal efficiency can be calculated of solar PV/T panels as following equation (4).

$$\eta_{th,PV/T} = \frac{Q_{PV/T}}{A_{PV/T} I_T} = F_R (\tau\alpha)_e - \left[F_R U_L \frac{(T_{f,i} - T_a)}{I_T} \right] \quad (4)$$

The relationship considering between $\eta_{th,PV/T}$ and $(T_{f,i} - T_a) / I_T$, discuss by the linear regression analysis where slope of linear regression is the $F_R U_L$ and the y-intercept is the $F_R (\tau\alpha)_e$.

2.4 Net efficiency

The net efficiency of solar PV/T panels testing started from 8:00 a.m. to 4:00 p.m. All of parameters are recorded during daytime for example; solar radiation, inlet water temperature, outlet water temperature, ambient temperature, panel temperature, water temperature in the storage tank, and power output from solar PV/T panel. The mass flow rate of water was fixed according to the standard value of 0.02 kg/s·m². The net efficiency of the solar PV/T panel is calculated from the following equation (5).

$$\eta_{net,PV/T} = \frac{Q_{PV/T} + P_{PV/T}}{A_{PV/T} I_T} \quad (5)$$

Where $\eta_{net,PV/T}$ is net efficiency of solar PV/T panel (%) and $P_{PV/T}$ is power output (W).

3. Result and Discussion

3.1 Thermal performance analysis

The variation of solar radiation and ambient temperature is shown in **Figure 4**. The solar radiation was higher than 790 W/m^2 and ambient temperature was slightly change in the range of $\pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ in both experiment. For the calculation of useful heat from solar PV/T panel found that at the inlet water temperature of $35\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}$, the useful heat from both solar PV/T panels were higher than 150 W . However, when the inlet water temperature increased higher than $50 \text{ }^\circ\text{C}$, the useful heat from the poly-Si PV/T decreases considerably while useful heat of mono-Si PV/T remained greater than 150 W until the water inlet temperature of $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Therefore mono-Si PV/T panel was suitable for producing hot water at high temperature and poly-Si PV/T works well at the water inlet temperature lower than $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

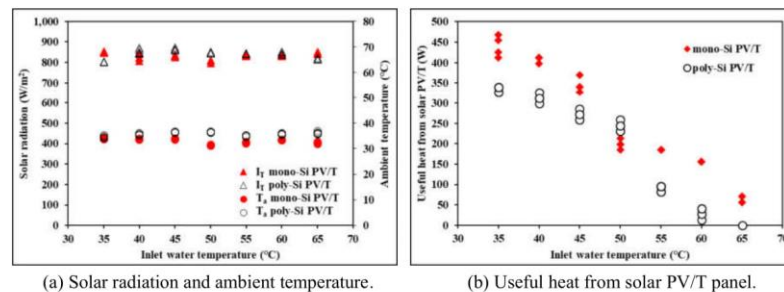


Figure 4 Weather data and useful heat from solar PV/T panel.

The thermal performance of solar PV/T panel at inlet water temperature range variation from $35\text{-}65 \text{ }^\circ\text{C}$ as shown in **Figure 5**. The results of $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ of mono-Si PV/T were 0.328 and $7.2997 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ respectively. On the other side, $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ of poly-Si PV/T were 0.2748 and $8.4743 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ respectively. The test results shows that the sunlight could pass through and be absorbed by mono-Si PV/T panel better than poly-Si PV/T panel observed from $F_R(\tau\alpha)_e$. $F_R U_L$ demonstrated the overall heat loss into the environment of poly-Si PV/T panel was higher than mono-Si PV/T panel. In conclusion, mono-Si PV/T panel was suitable for producing hot water at high temperatures.

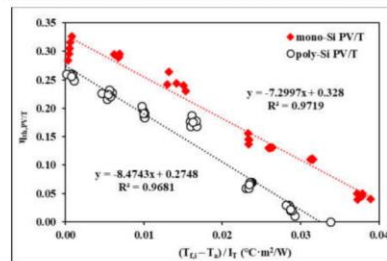


Figure 5 Thermal performance of solar PV/T.

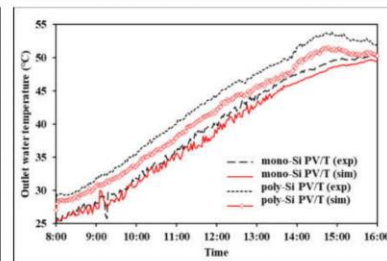


Figure 6 Outlet water temperature from both solar PV/T.

The thermal performance was used to simulate the outlet water temperature and comparing with the outlet water temperature from a daily experiment that shows in **Figure 6**. Maximum outlet water temperature of mono-Si PV/T from experiment and simulation were 50.4 °C and 49.67 °C meanwhile poly-Si PV/T were 53.84 and 51.51 °C. It was found that the simulated outlet temperature of mono-Si PV/T panel had an error was 2.15%. For poly-Si PV/T panel, the simulated outlet temperature had an error was 4.38%.

3.2 Net efficiency analysis

The total output from solar PV/T is a summation between the useful heat and power output that shows in **Figure 7**. It was found that the output from mono-Si PV/T was higher than poly-Si PV/T. Solar radiation directly affects the total output, as appeared from the trend of both values. Moreover, the total output is also influenced by the panel temperature. Solar radiation in the experiment of mono-Si PV/T was in the range of 200-850 W/m² and the experiment of poly-Si PV/T was in the range of 100-850 W/m². It was found that when the panel temperature was around 55 °C, the total output began to decrease until the end of the experiment. Maximum panel temperature of mono-Si PV/T and poly-Si PV/T were 56.0 °C and 59.62 °C respectively.

It is well known that mono-Si cell can generate more power output than poly-Si cell. Anyway, mono-Si cell can absorb and store heat higher than poly-Si but it still produced more electricity than poly-Si. The net efficiency that shows in **Figure 8**. The net efficiency of mono-Si PV/T and poly-Si PV/T were 54.14 and 46.80%, respectively. In conclusion of this research, the mono-Si PV/T panel was suitable type for both heat and electricity production.

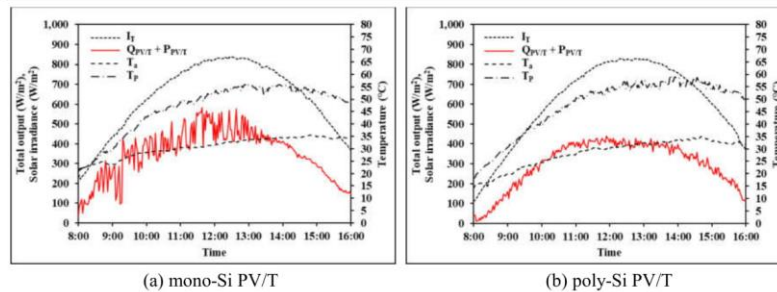


Figure 7 Total output of solar PV/T.

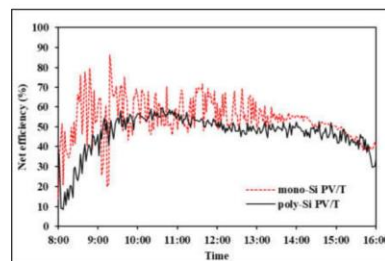


Figure 8 Net efficiency of mono-Si PV/T and poly-Si PV/T.

4. Conclusion

- Mono-Si PV/T has low heat loss when operating at high temperatures, therefore it suitable for producing hot water at higher temperatures than poly-Si PV/T. Thermal performance can be used to simulate outlet water temperature which conducted to design solar PV/T systems.
- The solar radiation and panel temperature affect net efficiency as well as the total output. The initial solar radiation increases the net efficiency, but when the panel temperature is greater than 45 °C, the net efficiency decreases until the end of the experiment.
- Mono-Si PV/T has high thermal performance but it still produces more electricity than poly-Si PV/T resulting in high net efficiency as well. Therefore, mono-Si PV/T is suitable for electricity and hot water production in the solar PV/T System.

5. Acknowledgements

The authors would like to thank School of Renewable Energy, Maejo University for supporting the study by a grant fund under The Generate and Development of Graduate Students in Renewable Energy Research Fund, in the ASEAN Countries in the graduate. We would like to thank Agricultural Research Development Agency (Public Organization) for supporting the research fund.

Nomenclature			
\dot{m}_f	Mass flow rate of water (kg/s)	F_R	Heat removal factor
I_T	Solar radiation (W/m ²)	$(\tau\alpha)_e$	Transmittance-absorptance product
$C_{p,bulk,f}$	Specific heat capacity of water (J/kg·K)	U_L	Overall heat loss (W/m ² ·K)
$T_{f,i}$	Inlet water temperature (°C)	$P_{PV/T}$	Power output of solar PV/T panel (W)
$T_{f,o}$	Outlet water temperature (°C)	$Q_{PV/T}$	Useful heat from solar PV/T panel (W)
T_a	Ambient temperature (°C)	$\eta_{th,PV/T}$	Thermal efficiency of solar PV/T panel (%)
$A_{PV/T}$	Area of solar PV/T panel (m ²)	$\eta_{net,PV/T}$	Net efficiency of solar PV/T panel (%)

6. References

- [1] Solar energy potential map for Thailand 2017: https://www.dede.go.th/download/OpenBigData/Solar_Map_1_2560.pdf (Accessed 20 Jan 2020).
- [2] Ma, T., Yang, H., Gu, W., Li, Z. and Yan, S. 2019. Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement. *Energy Convers Manage.* 183: 764-71.
- [3] Fayaz, H., Rahim, N.A., Hasanuzzaman, M., Nasrin, R. and Rivai, A. 2019. Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PV/T and PV/T-PCM. *Renewable Energy.* 143: 827-841.
- [4] Meneses-Rodríguez, D., Horley, P.P. and González-Hernández, J. 2005. Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Sol Energy.* 78: 243-250.
- [5] Wolf, M. 1976. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Convers.* 16: 79-90.
- [6] Dupeyrat, P., Ménézo, C. and Fortuin, S. 2014. Study of the thermal and electrical performances of PV/T solar hot water system. *Energy Build.* 68: 751-755.
- [7] Bhattarai, S., Kafle, G. K., Euh, S. H., Oh, J. H. and Kim, D. H. 2013. Comparative study of photovoltaic and thermal solar systems with different storage capacities: Performance evaluation and economic analysis. *Energy.* 61: 272-282.
- [8] Yang, X., Sun, L., Yuan, Y., Zhao, X. and Cao, X. 2018. Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system. *Renewable Energy.* 119: 152-159.
- [9] Liang, R., Zhang, J., Ma, L. and Li, Y. 2015. Performance evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study. *Applied Thermal Engineering.* 75: 487-492.
- [10] Nualboonrueng, T., Tuenpusa, P., Ueda, Y. and Akisawa, A. 2012. Field Experiments of PV-Thermal Collectors for Residential Application in Bangkok. *Energies.* 5: 1229-1244.

การเผยแพร่งานวิจัยในวารสารทางวิชาการ

- ชื่อบทความ: ขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ
ปั๊มความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์ กรณีศึกษา:
โรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่
- ผู้แต่ง: นฤพนธ์ วันชูเพลา และ สราวุธ พลวงษ์ศรี
- วารสาร: วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 28 เล่มที่ 1 มกราคม-
เมษายน 2564
- จัดทำโดย: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและรับพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่หอดูดาวห้วย
กาฬสินธุ์ เชียงใหม่.....
*(Size and Type Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Assisted Heat Pump in
Slaughthouses)*
อนุพงษ์ นัฐประเสริฐ และ สุวิมล อารีวงษ์

การคำนวณเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้การจ่ายเป็นแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรง.....
*(Calculation of Braking Torque Curve of Induction Machine Under DC Current Injection)
นันทิรินทร์ เปรมบุรี และ ศิวัช อารีวงษ์*

Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen-Coon Tuning Methods: Implementation to
Water Level Control Based MATLAB and Arduino.....
Thanyisa Subsoont and Pornsiri Keaysriwatch

การทดสอบใช้สารสีอินทรีย์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของยาแก้ปวดแอสไพรินชนิดบด.....
*(Utilization Tests of Dyes of Similar Size to Aspirin Molecules on a Test Bench and a
Feather Beak)*
ศุภกิจ เอื้อธรรม ประภานันต์ ศรีวัช กัญจนพรหมสุโขทัย และ สุวิมล อารีวงษ์

การประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของระบบสองขั้วที่มีขอบเขตการสั่นแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีที่กั้น
ด้านไดโอดอิสระ.....
*(Estimation of Natural Frequency of Composite Hinge with Three Edges Clamped and the
Other Edge Free)
สุพัตริย์ สอนศรีสุข อานันท์ สิทธิคำ และ ศิวัช อารีวงษ์*

Comparison of PI and PID control performances coupled with Kalman Filter for DC motor
speed control via MATLAB/Simulink.....
Siraporn Boonrasri and Pornsiri Keaysriwatch

ผลกระทบของสารเติมแต่งเหล็กกับแม่เหล็กเหนี่ยวนำของโม่หินและโม่หินที่ใช้การผสมปูนซีเมนต์.....
*(Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Limestone Powder on Threshold
Chloride Content of Concrete)
ศรีวัช อารีวงษ์สุวิมล และ ศิวัช อารีวงษ์*

อิทธิพลของกำลังรับแรงดึงและระยะห่างระหว่างชั้นของทรายเสริมกำลังต่อการสั่นและการเสียรูปของ
ทรายเป็นดินที่เสริมกำลังด้วยทรายเสริมกำลังแบบเป็นชั้น.....
*(Impacts of Varied Tensile Strengths and Vertical Spacings of Geogrids on the Compressive
Strength and Deformation of Geogrid-Reinforced Sand in Triaxial Compressor)
อริสาพร บุญประเสริฐ และ สุวิมล อารีวงษ์*

Published by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University, Thailand 50200
Tel. 0-5394-4176-7
Fax. 0-5321-7287
www.eng.cmu.ac.th



Content

การออกแบบระบบการวางแผนการผลิตสินค้าที่รองรับความยืดหยุ่นต่ออุตสาหกรรม.....
*(Design of Surveillance Planning Process for the Industrial Standard Product)
กฤษดา นันทิกุล ศรีวัช อารีวงษ์ และ นันทิรินทร์ เปรมบุรี*

แนวทางการประยุกต์ใช้ระบบการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน.....
*(Guideline for Adoption of the Sustainable Energy Management System)
วิรัช ภาทอง และ สุวิมล อารีวงษ์*

การวิเคราะห์ความทนทานในการผสมของกันชนโดยใช้เทคนิคของไหลเชิงคำนวณ.....
*(Analysis of Mixing Capability in Stirred Tank Reactor Using Computational Fluid Dynamics)
ภาณุวัฒน์ พิเศษ อนุชา นุญนาร และ สนิท คุ้มน้ำ*

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางจลนศาสตร์ และเสถียรภาพของแม่เหล็กผสมสแตนเลสภายใต้แรงกระทำที่
รวมกัน.....
*(The Analysis of Energy and Damping Properties of Semi-transparent Bulkings Integrated
Photovoltaic Window Louvers)
Phetavath Leathachong สารวัตร พงษ์สวัสดิ์ สุทธิพงษ์ อังทอง และ ศิวัช อารีวงษ์ อิมพินิจกุล*

การลดลงของปริมาณการปล่อยมลพิษในกระบวนการผลิต.....
*(Defective Reduction in Active Optical Cable Assembly Process)
อนุชาพร นันทิกุล และ จิรวัฒน์ นันทิรินทร์*

การลดความสูญเสียในการควบคุมกระบวนการผลิตของถังหมัก.....
*(Waste Reduction in Bio Ethanol Manufacturing Process)
จิรวัฒน์ นันทิรินทร์ และ จิรวัฒน์ นันทิรินทร์*

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดกากน้ำตาลจากเชื้อเพลิง.....
*(Increasing Efficiency of Sugar Cane Molasses Fermentation)
นันทิรินทร์ นันทิรินทร์ และ จิรวัฒน์ นันทิรินทร์*

การทดลองระบบของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่หอดูดาว
และไฟฟ้าผลิตพลังงานทดแทนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าไม่สะอาด.....
*(Experimental performance of hot water production by solar PVT boosted heat pump
system for electric power costs reduction in a slaughterhouse)
Soyano Chontongsoong และ สุวิมล อารีวงษ์*



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

ที่ อว ๘๓๙๓(๑๔).๑(๕)/๑๔๖

๖๕ มีนาคม ๒๕๖๔

เรื่อง ตอบรับบทความ

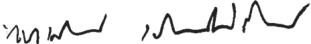
เรียน คุณณฤพณ์ วันชูเพลา และ คุณสรารุช พลวงษ์ศรี

ตามที่ ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง “ขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับปั๊มความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์” เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นั้น

บรรณาธิการได้พิจารณาแล้วและมีความเห็นว่า บทความของท่านมีความเหมาะสมที่จะลงตีพิมพ์ เผยแพร่ ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ ๒๘ เล่มที่ ๑ มกราคม – เมษายน ๒๕๖๔ ทั้งนี้ หากการพิมพ์วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นที่เรียบร้อย จะได้นำส่งวารสารดังกล่าวให้ท่าน ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ


 (ศาสตราจารย์ ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)
 บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน
 พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่เหมาะสม
 สำหรับการผลิตน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์

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

นฤพนธ์ วันชูปেলা และ สราวุธ พลวงษ์ศรี*

Narupon Wanchupela and Sarawut Polvongsri*

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

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

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

บทคัดย่อ

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

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

คำสำคัญ: แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์; ปั๊มความร้อน; สมรรถนะ; น้ำร้อน; โรงฆ่าสัตว์

น.วันชูเพลา และ ส.พลวงษ์ศรี

ABSTRACT

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

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

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

1. บทนำ

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

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเข้ามาประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตรมากขึ้น เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับแผนพัฒนา

พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP 2015) [1] พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้กับภาคการเกษตร จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับสูง ด้วยค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปี 17.6 MJ/m²·day จึงเหมาะสำหรับการผลิตพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [2] ด้วยศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยทำให้มีการศึกษาการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น สวัสดิ์ และวิจิตรรา [3] ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเอง โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ คอเรียเยาะ และคณะ [4] ออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าใช้หลักการเทอร์โมไซฟอน โดยการไหลเวียนตามธรรมชาติ วิทยา และธวรรณ [5]

เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบท่อฮีตไปป์

การผลิตความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่อาจสร้างเสถียรภาพในการใช้พลังงานได้ โดยเฉพาะในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆหรือฝนตก ดังนั้นการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตความร้อนอื่น เพื่อให้ระบบสามารถผลิตความร้อนได้อย่างต่อเนื่องและลดต้นทุนการติดตั้งเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ บั้มความร้อนเป็นอุปกรณ์ผลิตความร้อนที่มีสมรรถนะสูง จากการศึกษารายงานของ อาทิตย์ และคณะ [6] ที่ทำการออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยบั้มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-22 สำหรับบ้านพักอาศัย พบว่าเครื่องทำน้ำร้อนด้วยบั้มความร้อนสามารถประหยัดไฟฟ้าได้ประมาณ 50% ของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า บั้มความร้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่นำมาผลิตความร้อนร่วมกับเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ได้ และได้มีการศึกษารายงานการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบั้มความร้อน เช่น มารุต และคณะ [7] ได้พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะการทำงานของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้บั้มความร้อนเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริมแก่ระบบ ซึ่งมีบั้มความร้อนจะใช้ R-134a เป็นสารทำงาน สราวุธ และทงเกียรติ [8] ทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่ใช้บั้มความร้อนซึ่งใช้ R-134a เป็นสารทำงาน เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม โดยเปรียบเทียบระบบที่ใช้ของไหลที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2 ชนิดคือ น้ำและสารละลายเงินนาโน Sun et al. [9] ทำการเปรียบเทียบระบบผลิตน้ำร้อนจากบั้มความร้อนกับระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ร่วมกับบั้มความร้อนที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

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

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

จากปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเลือกขนาดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับ บั้มความร้อน (Solar photovoltaic thermal hybrid assisted heat pump) เพื่อใช้ทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบจำนวนของแผง Solar PV/T ที่มีกระแสจลน์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon PV/T, mono-Si PV/T) และชนิดซิลิคอนผลึกกรม (polycrystalline silicon PV/T, poly-Si PV/T) ที่ทำงานร่วมกับบั้มความร้อน เพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำร้อนให้แก่โรงฆ่าสัตว์และมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด

2. วิธีการศึกษา

เดิมโรงฆ่าสัตว์เทศบาลตำบลเชียงดาวมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 15 kW ในการผลิตน้ำร้อน 2,500 L ให้มีอุณหภูมิประมาณ 65°C เพื่อใช้ในขั้นตอนลวกเพื่อชูดขุนสุกร ซึ่งใช้ระยะเวลาในการผลิตน้ำร้อนประมาณ 7.5 h คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 112.50 kWh/day ผู้วิจัยมีความต้องการที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบั้มความร้อนมาใช้ทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า โดยมีการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบั้มความร้อนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T เพื่อให้ได้สมการทำนายกำลังไฟฟ้า โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผง Solar PV/T ให้มีค่า 0.02 kg/s-m²

น.วันชูเพลลา และ ส.พลวงษ์ศรี

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

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

อัตราความร้อนที่แผง Solar PV/T ได้รับ คำนวณได้จากสมการดังนี้

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

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

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

(kg/s) C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg·K) T_{f,o} และ T_{f,i} คือ อุณหภูมิของน้ำที่ออกและเข้าแผง (°C) A_{PV/T} คือ พื้นที่ของแผง (m²) I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m²) F_R(τ α)_e คือ ความสามารถในการส่องผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และ F_RU_L คือ ค่าการสูญเสียความร้อนรวมของแผง (W/m²·K)

อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผง Solar PV/T หาได้จากสมการต่อไปนี้

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

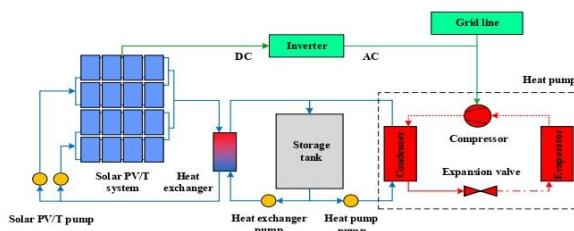
แผง Solar PV/T จะทำงานก็ต่อเมื่อค่ารังสีอาทิตย์จริงมีค่ามากกว่าค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติ ซึ่งค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติเป็นค่ารังสีอาทิตย์ที่ทำให้ความสามารถการดูดกลืนความร้อนของแผงมีค่าเท่ากับค่าการสูญเสียความร้อน คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ I_{Tc} คือ ค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติ (W/m²) น้ำร้อนที่ได้จากแผง Solar PV/T จะถ่ายเทความร้อนให้แก่ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) คำนวณได้จากสมการนี้

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

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



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

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

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

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

ถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวนกันความร้อน หากไม่คิดการสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำร้อน สามารถคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

ประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T คำนวณได้จากสมการดังนี้

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

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

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) คำนวณได้จากสมการนี้

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

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

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

ตารางที่ 1 ข้อมูลแผง Solar PV/T และปั๊มความร้อน

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

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการกำหนดตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 2 โดยกำหนดให้ปั๊มความร้อนเริ่มทำงานที่เวลา 9.00 น. และระบบจะหยุดทำงานทุกวันพระ

น.วันชูเพลา และ ส.พลวงษ์ศรี

ตารางที่ 2 ตัวแปรในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

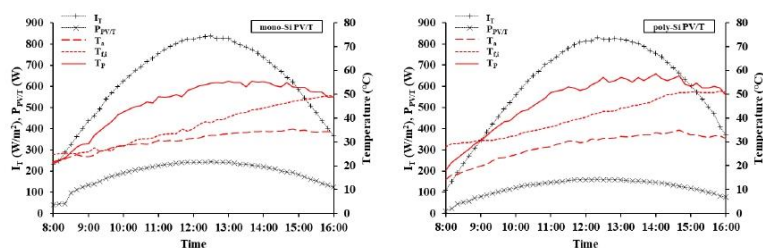
รายการ	ข้อมูล
	Mono-Si และ poly-Si
1. ชนิด solar PV/T	
2. จำนวน solar PV/T (แผง)	14-20
3. อัตราการไหลของน้ำผ่าน Solar PV/T ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)	0.02
4. สารทำงานในปั๊มความร้อน	R-134a
5. อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นในถังเก็บน้ำร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	30
6. ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (L)	2,500
7. อัตราค่าไฟฟ้า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

3. ผลการศึกษา

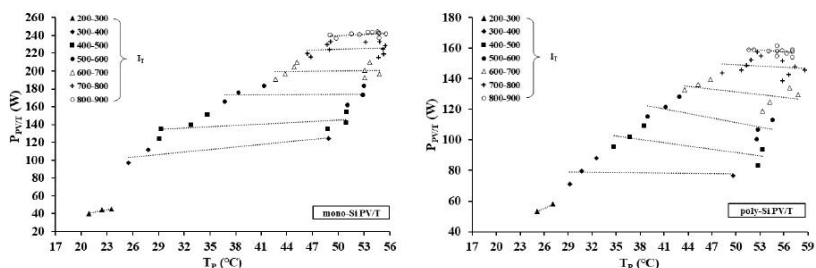
3.1 การทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T และ ปั๊มความร้อน

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

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



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



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิแผง Solar PV/T ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์

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

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

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

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

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

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

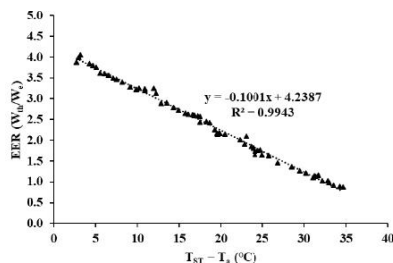
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T

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

ตารางที่ 3 (ต่อ) ค่าคงที่ของสมการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าของแผง Solar PV/T

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

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน

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

น.วันชอุฬาร และ ส.พลวงษ์ศรี

จะมีค่าลดลงเมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่ามากขึ้น เนื่องจากบีบความร้อนใช้แหล่งความร้อนจากอากาศแวดล้อมเพื่อผลิตน้ำร้อน ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เครื่องอัดไอทำงานหนัก ประกอบกับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะลดลงตามไปด้วย อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานจากสมการทำนายมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.82% สมการทำนายอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานมีรูปแบบดังนี้

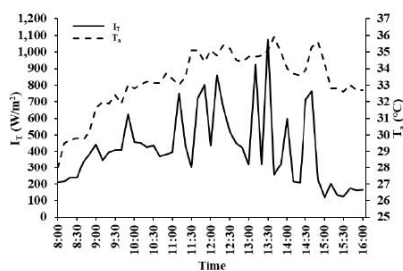
$$EER = -0.1001(T_{ST} - T_a) + 4.2387 \quad (12)$$

เมื่อ EER คือ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของบีบความร้อน (W_{tr}/W_c)

3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

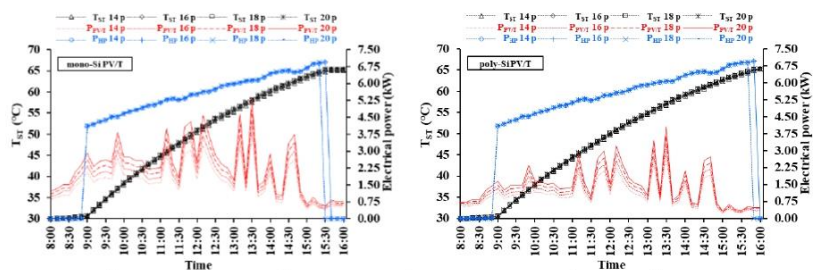
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวันเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายปีเพื่อทำนายการทำงานของระบบตลอดทั้งปี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวัน ผู้วิจัยได้ทำการเลือกข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงของวันที่อยู่ในเดือนสิงหาคม ซึ่งเป็นเดือนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุดมาทำการศึกษา ข้อมูลสภาพแวดล้อมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวันแสดงดังรูปที่ 5



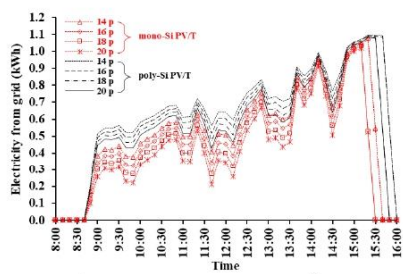
รูปที่ 5 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายวัน

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า วันที่อยู่ในเดือนสิงหาคมเป็นวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการบดบังของเมฆ ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเกิดความผันผวนตลอดทั้งวัน โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเฉลี่ย 33.31°C และค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 432.67 W/m² จากรูปที่ 6 เมื่อแผง Solar PV/T เริ่มทำงานที่เวลา 8.00 น. ความร้อนที่แผงได้รับจะทำให้อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อบีบความร้อนเริ่มทำงานที่เวลา 9.00 น. อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่าในช่วงแรก และบีบความร้อนจะหยุดทำงานเมื่อน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิ 65°C โดยระบบที่ใช้แผง Solar PV/T ทั้ง 2 ชนิด สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ที่อุณหภูมิ 65°C เวลาในการทำงานของบีบความร้อนจะสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่บีบความร้อน ซึ่งระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T เล็กน้อย แต่ใช้เวลาในการทำงานสั้นกว่า ในกรณีของระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T การใช้แผงจำนวน 14 แผง และ 16 แผง จะทำให้บีบความร้อนทำงาน 6.50 h/day และจะใช้เวลาทำงานน้อยที่สุด 6.33 h/day หากใช้แผงจำนวน 18 แผง และ 20 แผง กรณีของระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T การใช้แผงจำนวน 14 แผง และ 16 แผง บีบความร้อนจะใช้เวลาทำงานมากที่สุด 6.83 h/day และจะใช้เวลาทำงาน 6.67 h/day หากใช้แผงจำนวน 18 แผง และ 20 แผง เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่าค่าดังกล่าวจะแปรผันตรงกับจำนวนแผง Solar PV/T โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 20 แผง ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด 18.89 kWh/day ขณะที่ระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T จำนวน 14 แผง ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยที่สุด 8.48 kWh/day



รูปที่ 6 อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่มอเตอร์

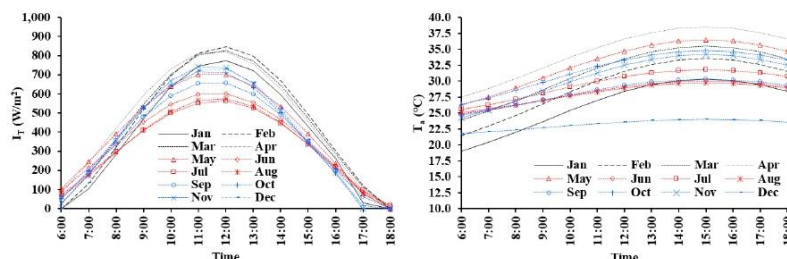
ในขณะที่ปั๊มความร้อนทำงานจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากสองแหล่ง คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง solar PV/T และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะช่วยลดการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ในช่วงที่ปั๊มความร้อนหยุดทำงาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ในส่วนอื่นภายในโรงหาล้าง ทำให้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานนอกช่วงเวลาผลิตน้ำร้อนลงได้อีกด้วย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



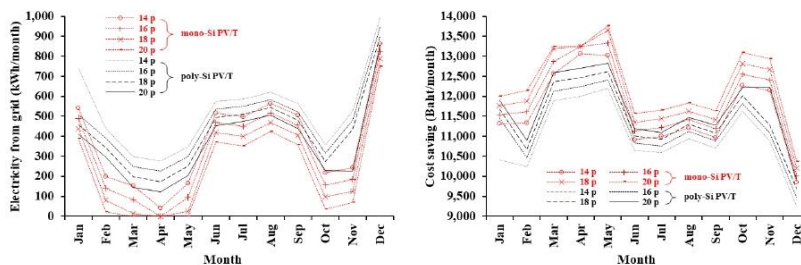
รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

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

น.วันชูเพลา และ ส.พลวงษ์ศรี



รูปที่ 8 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในแต่ละเดือน

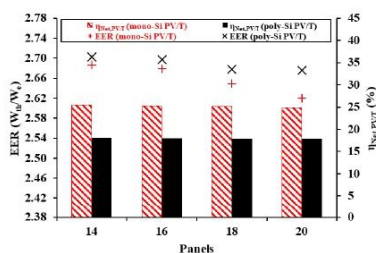


รูปที่ 9 พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานและผลประหยัดรายเดือน

อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนเฉลี่ยที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนและชนิดของแผง Solar PV/T ที่ใช้ในระบบ เมื่อใช้แผง Solar PV/T จำนวนมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนลดลงและมีผลกระทบต่อแผง mono-Si PV/T มากกว่า ซึ่งมีค่า $2.62-2.69 W_{p}/W_c$ ส่วนระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T มีค่า $2.68-2.70 W_{p}/W_c$ แสดงดังรูปที่ 10 การใช้แผง mono-Si PV/T ทำให้ระบบมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนน้อยกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T เพราะแผง mono-Si PV/T มีสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าแผง poly-Si PV/T ทำให้ปั๊มความร้อนทำงานอยู่ในช่วงผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูง ($T_{ST} - T_a$) เมื่อผลต่างอุณหภูมิดังกล่าวแตกต่างกันมาก อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานจะมีค่าลดลง

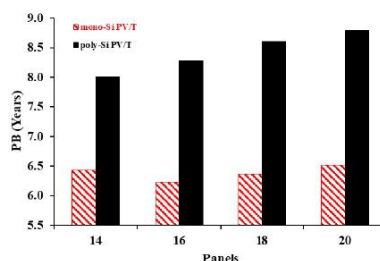
ถึงแม้ว่าแผง mono-Si PV/T จะทำให้ปั๊มความร้อนมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานลดลงเล็กน้อย แต่สามารถ

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



รูปที่ 10 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนและประสิทธิภาพสุทธิของแผง Solar PV/T

ด้วยต้นทุนค่าแผงที่ถูกกว่า ทำให้ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ขณะเดียวกัน ผลประหยัดรายปียังสะท้อนให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T ทั้งในด้านการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T นั้น มีมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 888,314.00-961,114.00 Baht และมีผลประหยัดรายปี 139,620.30-147,485.54 Baht/years แสดงดังตารางที่ 4 การเพิ่มขึ้นของจำนวนแผงถึงแม้ว่าจะทำให้ผลประหยัดรายปีเพิ่มขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นด้วยเช่นกัน ทำให้ระบบมีระยะเวลาคืนทุนนานขึ้น จากรูปที่ 11 ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง เป็นระบบที่มีระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุด 6.23 Years สามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ระหว่าง 6.23-6.52 Years แตกต่างจากระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T ที่มีระยะเวลาคืนทุนระหว่าง 8.01-8.80 Years



รูปที่ 11 ระยะเวลาคืนทุน

4. สรุปผลการทดลอง

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

ตารางที่ 4 มูลค่าการลงทุนเริ่มต้นและผลประหยัดรายปี

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

ผลการศึกษาส่วนแรกเป็นการทดสอบสมรรถนะของแผง Solar PV/T และทดสอบสมรรถนะของปั๊มความร้อนจากการทดสอบพบว่า สมการทำนายกำลังไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.92% และ 6.77% สำหรับแผง mono-Si และ poly-Si PV/T ตามลำดับ สมการทำนายอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อนมีค่า

ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.82% ในส่วนของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าระบบที่ใช้แผงทั้ง 2 ชนิดสามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามความต้องการของโรงฆ่าสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานทั้งในช่วงที่ปั๊มความร้อนทำงานและหยุดทำงานได้ การใช้แผง mono-Si PV/T ช่วยลดภาระการผลิต

น.วันชูเพลา และ ส.พลวงษ์ศรี

น้ำร้อนของบิ๊มความร้อนและสามารถลดระยะเวลาการทำงานของบิ๊มความร้อนลงได้มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แผง poly-Si PV/T แต่ขณะเดียวกันก็ทำให้อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของบิ๊มความร้อนลดลงเล็กน้อย ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อย ทำให้ผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลดังกล่าว ประกอบกับมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ทำให้ระบบที่ใช้แผง mono-Si PV/T มีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่า ซึ่งการใช้แผง mono-Si PV/T จำนวน 16 แผง ทำงานร่วมกับบิ๊มความร้อน ทำให้ระบบมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด คือ 6.23 Years ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้ 31,465.06 kWh/year และคิดเป็นจำนวนเงินที่ประหยัดได้ 142,536.72 Baht/year

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) รวมทั้งขอขอบคุณเทศบาลตำบลเชียงดาว สำหรับข้อมูลและสถานที่เพื่อสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้

6. รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ (m^2)
C	จำนวนเงิน (Baht)
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg\cdot K$)
EER	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (W_{in}/W_{out})

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

ตัวกรีก

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

ตัวห้อย

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

เอกสารอ้างอิง

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

น.วันชูเพลา และ ส.พลวงษ์ศรี

- [16] Chaichana, C., Kiatsiroat, T. and Nuntaphan, A. Comparison of Conventional Flat-Plate Solar Collector and Solar Boosted Heat Pump Using Unglazed Collector for Hot Water Production in Small Slaughterhouse. *Heat Transfer Engineering*, 2010; 31(5): 419-429.
- [17] Wanchupela, N. and Polvongsri, S. The Comparison Study of Performance between Two Different Types of Glazed Solar Photovoltaic Thermal Panels. *The 1st International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology 2020*, May 28-29, Diamond Plaza Hotel, Suratthani, Thailand, 2020.

บรรณานุกรม

- Chaichana, C., Kiatsiriroat, 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**, 31, 419-429.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. 2013. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4th ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Kazem, H. A. 2019. Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal (PV/T) system. **Case Studies in Thermal Engineering**, 13, 1-8.
- Nualboonrueng, T., Tuenpusa, P., Ueda, Y. and Akisawa, A. 2012. Field Experiments of PV-Thermal Collectors for Residential Application in Bangkok. **Energies**, 5, 1229-1244.
- Yang, X., Sun, L., Yuan, Y., Zhao, X. and Cao, X. 2018. Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system. **Renewable Energy**, 119, 152-159.
- เจียรวิชัย ฤกษ์ศิริ และ วิทยา ยงเจริญ. 2555. สมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบแบบใช้น้ำถ่ายเทความร้อนสำหรับใช้กับบ้านพักอาศัย. **วารสารวิจัยพลังงาน**, 9(2), 22-32.
- แบงค์ ศรีสุข และ วิทยา ยงเจริญ. 2556. สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดแผ่นเรียบรับความร้อน. **วารสารวิจัยพลังงาน**, 10(2), 57-70.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. **สารานุกรมพลังงานทดแทน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/altenergy-encyclopedia.pdf>
- . 2560a. **โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย ปี 2560**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/download/OpenBigData/Solar_Map_1_2560.pdf
- . 2560b. **ศักยภาพรังสีรวม ปี 2560**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47941&filename=index
- รัฐพร ไชยญาติ. 2561. การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable Energy System

Design). เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

- พงศ์ศักดิ์ พูลศรี. 2557. **การศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- มารุต บุรพา ภูัญนี วรยศ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ สุรียนต์ ชมดี. 2551. โมเดลอย่างง่ายของ การทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้ความร้อนเสริม. **วารสารคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, 1(2), 15-23.
- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ. 2561. **สถิติภูมิอากาศเชียงใหม่.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.cmmet.tmd.go.th/>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560. **สารกึ่งตัวนำ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7237-2017-06-11-14-15-33>.
- สรารัฐ พลวงษ์ศรี และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2556. การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบ ทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมโดยการใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, 6(2), 106-120.
- สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2560. **สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2561.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/ebook/agri_situation2561.pdf
- อาทิตย์ ไชยอรนนท์. 2543. **การทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายณฤพนธ์ วันชูเพลา
เกิดเมื่อ	20 พฤษภาคม 2539
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550-2556 โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ พ.ศ. 2557-2561 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพลังงานทดแทน วิทยาลัย พลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	-

