

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ร่วมกับบารวมแสงพาราโบลิก



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ร่วมกับบารวมแสงพาราโบลิก



พันธนะ ยาละศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิก

พันชนะ ยาละศรี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จพวรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก
ชื่อผู้เขียน	นายพันชนะ ยาละศรี
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิกที่มีพื้นที่รับรังสีขนาด $2.14 \times 2.4 \text{ m}^2$ ระดับความสูงจุดโฟกัส 60 cm และใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกรวมจำนวน 3 แผง เป็นเป้ารับรังสีอาทิตย์ ขนาดพื้นที่รับรังสีรวมเท่ากับ $0.335 \times 1.989 \text{ m}^2$ เชื่อมต่อกันแบบขนานทางไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูงสุดรวม 90 W_p ติดตั้งกล่องน้ำระบายความร้อนบริเวณด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และใช้ปั๊มน้ำในการหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนไปยังถังเก็บน้ำร้อนขนาด 200 L ในการทดลองได้ทำการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 50 cm 55 cm และ 60 cm ตามลำดับ และปรับอัตราการไหลน้ำระบายความร้อน 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM ตามลำดับ เพื่อหาระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์และอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิกมีค่าสูงที่สุด

จากผลการทดลองพบว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM และปริมาณของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน 200 L สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของระบบได้สูงที่สุดเท่ากับ 21.67 % ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิกและระบบระบายความร้อน ถึง 2.4 เท่า และเมื่อสิ้นสุดการทดลองระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุด $60.55 \text{ }^\circ\text{C}$ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าและความร้อนของระบบตลอดทั้งปี พบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนสุทธิเมื่อคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่า เท่ากับ 1,149.21 kWh/year หรือเท่ากับ 4,976.09 Baht/year และเมื่อวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของระบบมีระยะเวลาคืนทุนของระบบเท่ากับ 11.39 ปี

คำสำคัญ : สมรรถนะรางรวมแสงพาราโบลิก, เซลล์แสงอาทิตย์, แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน

แสงอาทิตย์



Title	PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR PHOTOVOLTAIC THERMAL HYBRID SYSTEM COMBINED WITH PARABOLIC TROUGH
Author	Mr. Punchana Yalasri
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sarawut Polvongsri

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate the performance of the solar photovoltaic thermal hybrid system combined with parabolic trough which has the area of $2.14 \times 2.4 \text{ m}^2$ and a focal length of 60 cm 3 crystalline silicon solar panels connected in parallel with the total area of $0.335 \times 1.989 \text{ m}^2$ were attached to the parabolic trough. Three solar panels can generate the total maximum power of 90 Wp The cooling water box was installed at the back side of the solar panel in order to dissipate heat and a water pump was used to circulate the cooling water to a 200 L hot water storage tank. In the experiment, the heights of the trough were adjusted be 50 cm, 55 cm and 60 cm while the flowrate of cooling water were varied from 5-15 LPM with 5 LPM interval. The optimum height and flow rate will be determined in order to obtain the system maximum efficiency.

From the experiment, it was found that the highest system efficiency of 21.67% was obtained when the trough was positioned at 55 cm and the water flowrate was adjusted to be 15 LPM. The value is 2.4 times higher than that without parabolic trough and cooling systems. the system produced hot water with a maximum temperature of $60.55 \text{ }^\circ\text{C}$. In addition, a mathematical model was created to predict the amount of electrical and thermal energy generated throughout the year. It was found that the system can generate the electricity and heat equivalent to 1,149.21 kWh/Year or equal to 4,976.09 Baht/Year. The system offered the

payback period of 11.39 years.

Keywords : Performance Palabolic trough, Solar cell, Photovoltaic/Thermal



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาชี้แนะและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์

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

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุลักษณ์ มงคล และ รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์ ที่ให้ความกรุณามาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และได้ชี้แนะวิธีการดำเนินงาน และคำแนะนำในการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

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

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนพื้นที่และอุปกรณ์ในการศึกษาสำหรับการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2560

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ นายศักดิ์สิทธิ์ ยาละศรี นางบุญน้อม ยาละศรี และนายวรุฒิ ยาละศรี สำหรับกำลังใจและคอยสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา รวมทั้ง นายภาณุวิชญ์ พุทธิรักษา นางสาวธัญลักษณ์ สันเดช Mr. Nhel Bundarith นายทรงภพ ภาสวรโรจน์กุล นางสาวปริยานุช นุ่มภา และเพื่อน พี่ น้อง ที่คอยช่วยเหลือให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน

พันชนะ ยาละศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	18
ที่มาและความสำคัญ.....	18
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	21
ขอบเขตของการวิจัย.....	21
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	22
ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์.....	22
ทฤษฎีเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
ทฤษฎีเกี่ยวกับรวบรวมแสงแบบพาราโบลิก.....	27
ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	33
ทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิก.....	39
การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น.....	42
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	51
การออกแบบสร้างรวบรวมแสงพาราโบลิก.....	52

การออกแบบและสร้างเป่ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อนเป่ารับรังสีอาทิตย์	53
การออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์	56
วิธีการดำเนินงานวิจัย	57
เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	60
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง	63
4.1 ระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกันที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและ น้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT).....	63
4.2 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT).....	79
4.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวม แสงพาราโบลิก (CPVT) กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติ (PVN).....	91
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบระบบ ผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) ตลอดทั้งปี	98
4.5 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก	105
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	107
5.1 สรุปผลการวิจัย	107
5.2 ข้อเสนอแนะ	108
บรรณานุกรม.....	109
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	113
ภาคผนวก ข การเผยแพร่ผลงานวิจัย	123
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลอง.....	132
ประวัติผู้วิจัย.....	165



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีในระดับต่างๆ.....	19
ตารางที่ 2 ระดับอุณหภูมิที่ทำได้ของแผ่นรับแสงแบบรวมแสง	34
ตารางที่ 3 ระดับอุณหภูมิที่ทำได้ของแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบและสระแสงอาทิตย์.....	34
ตารางที่ 4 รายละเอียดของรางรวมแสงพาราโบลิก	53
ตารางที่ 5 รายละเอียดของเป้ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน.....	54
ตารางที่ 5 รายละเอียดของเป้ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน (ต่อ)	55
ตารางที่ 6 รายละเอียดของระบบติดตามดวงอาทิตย์.....	56
ตารางที่ 7 รายละเอียดเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล	60
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสุทธิของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง แตกต่างกัน.....	77
ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบเอกเซอร์ยีสุทธิของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง แตกต่างกัน.....	78
ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสุทธิของระบบที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อน แตกต่างกัน.....	89
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบเอ็กเซอร์ยีสุทธิของระบบที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน	90
ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิในเชิงปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน รูปแบบปกติ (PVN)	97
ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิในเชิงคุณภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน รูปแบบปกติ (PVN)	97

ตารางที่ 14 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดจากสถิติภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ.2524-2553 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561)..... 102

ตารางที่ 15 วันที่ตัวแทนของแต่ละเดือน (Duffie and Beckman, 2013)..... 103

ตารางที่ 16 ค่ารังสีรวมรายวันในแนวระดับของจังหวัดเชียงใหม่ (RETSscreen, 2014) 103

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของสถานีเชียงใหม่ (Wongratanaphaisan et al., 2003). 103

ตารางที่ 18 เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ 105

ตารางที่ 19 เงินได้สุทธิของโครงการ..... 105



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ปี พ.ศ.2565	18
ภาพที่ 2 แสดงลักษณะกระแสต่อแรงดัน เมื่อปริมาณแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงและคุณลักษณะ กระแสต่อแรงดัน เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลง	20
ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของการสะท้อนรังสีจากผิววัตถุแบบต่างๆ	23
ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของโลก ณ ตำแหน่งต่างๆ 4 ตำแหน่ง	23
ภาพที่ 5 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมายังจุดต่างๆ ของโลก	25
ภาพที่ 6 ระบบการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	26
ภาพที่ 7 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว แบบผลึกรวม และแบบอะมอร์ฟัส	27
ภาพที่ 8 ระบบรางพาราโบลา (Parabolic Through).....	28
ภาพที่ 9 ระบบหอคอย (Power Tower)	28
ภาพที่ 10 ระบบจานพาราโบลา (Parabolic Dish).....	29
ภาพที่ 11 แผงรับแสงอาทิตย์ระบบรวมแสง	30
ภาพที่ 12 แสดงตำแหน่งจุดโฟกัสบนจานพาราโบลา.....	31
ภาพที่ 13 The focusing action of a parabola	32
ภาพที่ 14 Parabola - focal length = f.....	33
ภาพที่ 15 ลักษณะแผงรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector)	35
ภาพที่ 16 แผงรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ.....	35
ภาพที่ 17 สมดุลพลังงานตัวเก็บรังสีอาทิตย์	36
ภาพที่ 18 สมดุลพลังงานระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	37
ภาพที่ 19 สมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสง พาราโบลา	40

ภาพที่ 20 (a) Parabolic Trough Concentrator (b) ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่มีกระจก ครอบระบบ (CPV/T+TE without cover) และ (c) ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยที่มีกระจกครอบ ระบบ (CPV/T+TE wit cover).....	43
ภาพที่ 21 ผลการทดสอบรายวันโดยเฉลี่ยของพลังงานและประสิทธิภาพต่าง ๆ สำหรับ CPV / T + TE ที่มีและไม่มีกระจกครอบระบบ และโมดูล PV/free	43
ภาพที่ 22 ระบบ TCPV/T ขนาด 2 m ²	44
ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 4 ชนิดที่ติดตั้งบนระบบ TCPV/T.....	44
ภาพที่ 24 พลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ CPVS.....	45
ภาพที่ 25 ความผันแปรของพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของ CPVTS กับอัตราการไหลของน้ำ.....	45
ภาพที่ 26 ลักษณะการออกแบบระบบระบายความร้อน.....	46
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเวลาในการทดสอบ.....	46
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเวลาในการทดสอบ	47
ภาพที่ 29 ชุดต่อความร้อนที่ติดตั้งไว้ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของช่องความเข้มรังสีอาทิตย์กับอุณหภูมิแผง PV และอุณหภูมิแผง HPPV.....	48
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ของช่วงรังสีอาทิตย์กับประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ PV และ HPPV	48
ภาพที่ 32 งานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลิกและอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	49
ภาพที่ 33 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งงานพาราโบลิกชนิดปรับ องศาตามดวงอาทิตย์และไม่ปรับตามดวงอาทิตย์.....	49
ภาพที่ 34 โครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	50
ภาพที่ 35 อุณหภูมิแผงทดสอบและแผงควบคุม	50
ภาพที่ 36 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงทดสอบและแผงควบคุม	50
ภาพที่ 37 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	51
ภาพที่ 38 ลักษณะร่างรวมแสงพาราโบลิกที่ออกแบบสำหรับการทดลอง	52
ภาพที่ 39 ร่างรวมแสงพาราโบลิกที่สร้างขึ้นจริง.....	52

ภาพที่ 40 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเป็นเป้ารับรังสีอาทิตย์.....	53
ภาพที่ 41 ขนาดของกล่องน้ำระบายความร้อน.....	55
ภาพที่ 42 กล่องน้ำระบายความร้อนที่สร้างขึ้นจริง.....	55
ภาพที่ 43 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 1 แกน.....	56
ภาพที่ 44 จุดติดตั้งเครื่องมือวัดในการทดลองของระบบ CPVT	57
ภาพที่ 45 จุดติดตั้งเครื่องมือวัดในการทดลองของระบบ PVN	58
ภาพที่ 46 ลักษณะการปรับระดับเป้ารับรังสีอาทิตย์.....	59
ภาพที่ 47 การสะท้อนรังสีตรงของรางรวมแสงพาราโบลิกที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีแตกต่างกัน....	64
ภาพที่ 48 ลักษณะรังสีอาทิตย์และภาพถ่ายทางความร้อนที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	65
ภาพที่ 49 รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางพาราโบลิกตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป้ารับรังสีที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	66
ภาพที่ 50 ผลต่างอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนขาเข้าและขาออกจากเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	67
ภาพที่ 51 อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	68
ภาพที่ 52 ประสิทธิภาพทางความร้อนตลอดวันทำการทดลองของระบบที่ติดตั้งระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน.....	69
ภาพที่ 53 อัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับภายในถังเก็บน้ำร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน.....	71
ภาพที่ 54 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	72
ภาพที่ 55 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	72
ภาพที่ 56 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	73
ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	74

ภาพที่ 58 ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ติดตั้งเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	75
ภาพที่ 59 ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ได้รับตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	76
ภาพที่ 60 รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางพาราโบลิกตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป่ารับรังสีที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	80
ภาพที่ 61 ประสิทธิภาพทางความร้อนตลอดวันทำการทดลองของระบบที่อัตราการไหลน้ำของระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	82
ภาพที่ 62 อัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับภายในถังเก็บน้ำร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบตลอดวันทำการทดลองที่อัตราการไหลน้ำของระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	83
ภาพที่ 63 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของระบบที่ติดตั้งเป่ารับรังสีที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	85
ภาพที่ 64 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบที่ติดตั้งเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	85
ภาพที่ 65 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบที่อัตราการไหลน้ำของระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	86
ภาพที่ 66 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองของระบบที่อัตราการไหลน้ำของระบายความร้อนแตกต่างกัน.....	87
ภาพที่ 67 ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ได้รับตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน.....	88
ภาพที่ 68 รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางพาราโบลิกและพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติตลอดวันทำการทดลอง.....	91
ภาพที่ 69 อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ CPVT และระบบ PVN.....	92
ภาพที่ 70 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของระบบ CPVT และระบบ PVN.....	93
ภาพที่ 71 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ CPVT และระบบ PVN.....	93
ภาพที่ 72 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ CPVT และระบบ PVN.....	94
ภาพที่ 73 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดตลอดวันทำการทดลองของระบบ CPVT และ ระบบ PVN 95	

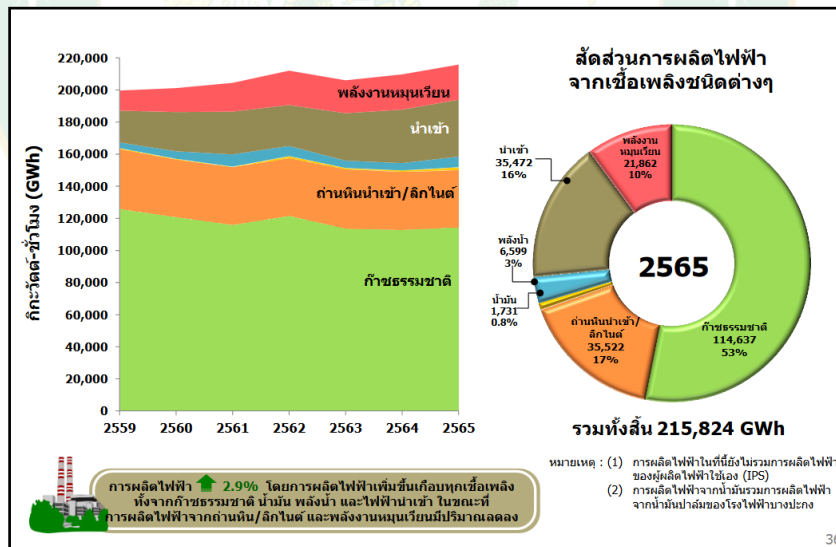
ภาพที่ 74 ลักษณะกระแสไฟฟ้าลัดวงจรตลอดวันทำการทดลองของระบบ CPVT และ ระบบ PVN 95	
ภาพที่ 75 กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองของระบบ CPVT และระบบ PVN	96
ภาพที่ 76 ขั้นตอนการทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน.....	98
ภาพที่ 77 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างที่ได้จากการทำนายกับการทดลอง	99
ภาพที่ 78 ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	100
ภาพที่ 79 การเปรียบเทียบผลจากการทำนายกับผลจากการทดลอง (a) อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (b) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์	101
ภาพที่ 80 พลังงานที่ระบบได้รับจากรังสีอาทิตย์ การใช้พลังงานของปั๊มหมุนเวียนน้ำและระบบติดตามดวงอาทิตย์	104
ภาพที่ 81 พลังงานสุทธิที่ได้รับจากระบบในรอบปี.....	104
ภาพที่ 82 Cash flow Diagram ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิก	106

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก และถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ไม่สามารถขาดได้ พลังงานมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น พลังงานแสง พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานจากเชื้อเพลิงธรรมชาติ เป็นต้น ในปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงจากธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้มากกว่าพลังงานชนิดอื่นๆ และมีปริมาณสำรองที่กำลังลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่น ก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน ดังแสดงในภาพที่ 1 (กระทรวงพลังงาน, 2565) จึงส่งผลให้นักวิจัยในหลายๆประเทศได้มีการศึกษาค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของการใช้พลังงานของประชากรภายในประเทศและเพื่อลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ประเทศไทยก็ให้ความสำคัญต่อการศึกษาค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทนมานานหลายปี แหล่งพลังงานทดแทนหนึ่งที่กำลังศึกษาค้นคว้ากันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ พลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 1 สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ปี พ.ศ. 2565

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกคิดเป็นพลังงานที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์ คือ 99.8% และ 0.02% เป็นพลังงานที่ได้รับมาจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ สำหรับประเทศไทยมีลักษณะภูมิศาสตร์ที่ตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 5-21 องศาเหนือ และเส้นลองจิจูดที่ 97-106 องศาตะวันออก ซึ่งอยู่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตร จึงทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอด

ทั้งปีซึ่งความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ $18.0 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ หรือ $5.0 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$ จัดอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหลายๆ ประเทศ แสดงดังตารางที่ 1

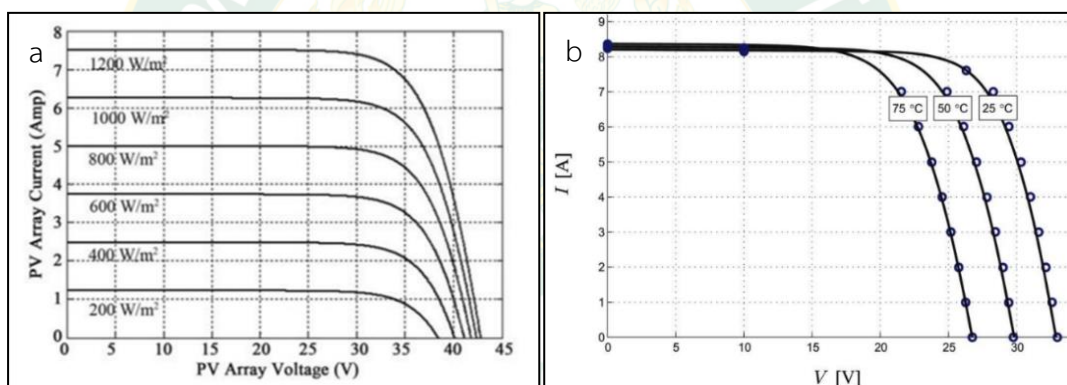
ตารางที่ 1 ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีในระดับต่างๆ

ช่วงความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$)	ร้อยละของพื้นที่เมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ (%)
15-16	0.4
16-17	13.2
17-18	39.8
18-19	35.6
19-20	11.0

ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่บริสุทธิ์ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน และเทคโนโลยีที่นิยมนำมาใช้ในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ คือ เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงตกกระทบบนพื้นผิวด้านหน้าได้โดยตรง ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (alternative energy) ที่ได้มีการค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 และในปี ค.ศ. 1954 โดยแชปปิน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% ในปัจจุบันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงกว่า 17% และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปยาวนานกว่า 25 ปี แต่ปัญหาในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันคือต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มรังสีอาทิตย์ เงา ฝุ่นละออง และอุณหภูมิในการทำงาน ซึ่งความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดแสดงดังภาพที่ 2a จึงส่งผลให้ผู้วิจัย

สนใจที่จะศึกษาแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบรวบรวมแสงแบบพาราโบลิก แต่เนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนจากรวมแสงพาราโบลิกที่เพิ่มสูงขึ้น ยังส่งผลให้รังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นตามมาด้วย ซึ่งรังสีอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นบริเวณพื้นผิวรับแสงและสะสมอยู่ในโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ซึ่งสัมพันธ์ทางอุณหภูมิของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง 0.5 % ต่อ องศาเซลเซียส และสัมพันธ์ทางอุณหภูมิของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนฟิล์มบางมีค่าลดลง 0.27% ต่อ องศาเซลเซียส (หมายความว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์แสงอาทิตย์สูงขึ้นเป็น 26 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจะลดลง 0.5% และชนิดฟิล์มบางจะลดลง 0.27% แสดงดังภาพที่ 2b ภาพ a b



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะกระแสต่อแรงดัน เมื่อปริมาณแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงและคุณลักษณะกระแสต่อแรงดัน เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลง

อีกทั้งปัจจุบันยังมีความต้องการใช้น้ำร้อนเพื่อใช้ในอุปโภคบริโภค ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค อุปกรณ์ทางการแพทย์ภายในสถานพยาบาล และใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะทำการศึกษาผลของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิกประกอบกับติดตั้งระบบระบายความร้อนบริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดอุณหภูมิที่สะสมภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์และดึงพลังงานความร้อนออกมาในรูปแบบของน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนรางรวมแสงแบบพาราโบลิก
2. เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนรางรวมแสงแบบพาราโบลิก

ขอบเขตของการวิจัย

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานวิจัยเป็นชนิดซิลิกอนผลึกรวม (Polycrystalline) ยี่ห้อ AMATA Solar รุ่น TPS107S-30W-POLY จำนวน 3 แผง กำลังไฟฟ้ารวมสูงสุด 90 Wp ขนาดความกว้างรวม 0.335 m และความยาวรวม 1.989 m
2. ใช้สแตนเลสเงาแบบแผ่นเป็นวัสดุสะท้อนรังสีของรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก ขนาดพื้นที่รับรังสีกว้าง 2.14.m และยาว 2.4 m
3. ติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำบริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์และทำการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 3 อัตราการไหลที่ 5 LPM, 10 LPM และ 15 LPM
4. ปริมาณของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน 200 L
5. วิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ พร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนที่ติดตั้งบนรางรวมแสงแบบพาราโบลิก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนที่ติดตั้งบนรางรวมแสงพาราโบลิก
2. ได้ทราบถึงความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนที่ติดตั้งบนรางรวมแสงพาราโบลิก
3. ได้ทราบถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนที่ติดตั้งบนรางรวมแสงพาราโบลิก

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

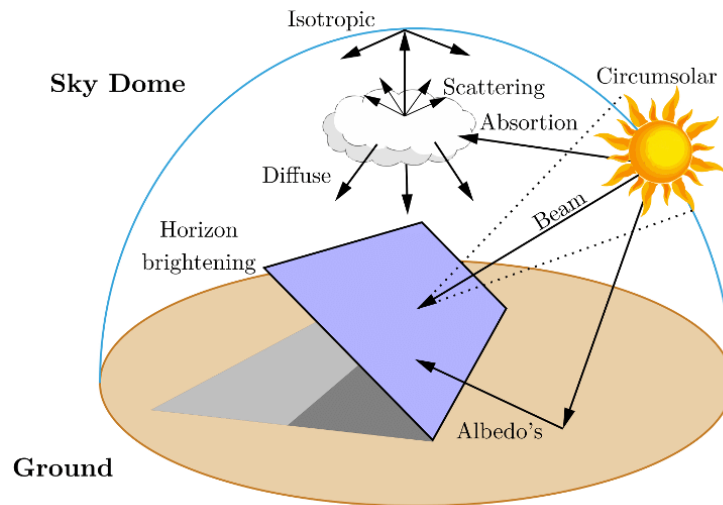
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบารวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก รวมถึงการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบ ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้มีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกเรียกว่า ค่าคงที่สุริยะ ซึ่งเป็นค่าอัตราการตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางตั้งฉากกับดวงอาทิตย์และจะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละเดือน โดยแปรผันไปตามช่วงความยาวคลื่นของรังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าเฉลี่ยอยู่ใน ช่วง $1,350 - 1,440 \text{ W/m}^2$ เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ของโลกจะถูกดูดซับ (Absorbed) และทำให้กระจัดกระจาย (Scattered) อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลกดังแสดงในภาพที่ 3 การดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสีโดยชั้นบรรยากาศของโลกจะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา รังสีต่าง ๆ ที่แผ่มาชั้นบรรยากาศโลกมีดังนี้ รังสีช่วงคลื่นสั้น รังสีช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ (Visible) และ รังสีช่วงคลื่นยาว ประเภทของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผิวโลกสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

ประเภทของรังสีที่กระทบบนผิวโลก

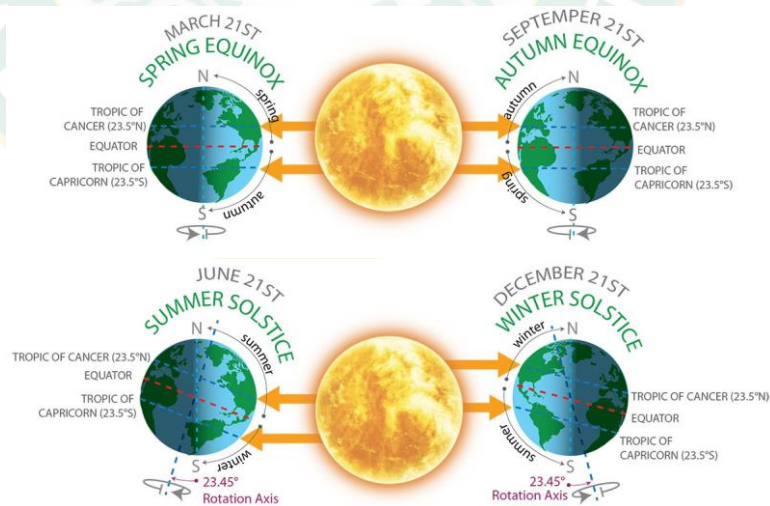
1. รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกกระทบบนพื้นผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาหนึ่งเวลาใด ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์
2. รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) รวมไปถึง รังสีสะท้อน (Reflected Radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลกและวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายมาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า
3. รังสีรวม (Total or Global Radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง รังสีรวมประกอบไปด้วยรังสีตรงจากดวงอาทิตย์รังสีกระจายจากท้องฟ้าและวัตถุต่าง ๆ บนผิวโลก



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของการสะท้อนรังสีจากผิววัตถุแบบต่างๆ

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า

เนื่องจากตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนท้องฟ้าในแต่ละวันของแต่ละตำแหน่งบนโลกจะเปลี่ยนไปตลอดปี ในขณะที่โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์นั้น แกนหมุนโลกทำมุมเอียง 23.45 องศา กับวงโคจรตลอดเวลา ทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ขึ้นบรรยากาศโลกเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของโลก ณ ตำแหน่งต่างๆ 4 ตำแหน่ง

จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่ามี 4 วันที่ดวงอาทิตย์โคจรผ่าน 4 จุดบนท้องฟ้า (ผู้สังเกตอยู่บนโลก) โดยที่สองจุดแรกเป็นจุดที่การเอียงของแกนหมุนของโลกมีผลต่อแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมาก

ที่สุด คือจุด โขลสตีซ (Solstice) ตรงกับวันที่ 21 มิถุนายนโดยประมาณของทุกๆปี ซึ่งซีกโลกทางด้านเหนือจะหันเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด เรียกว่า ซัมเมอร์โซลสตีซ (Summer Solstice) โดยที่แกนเหนือได้ ทำมุมกับแนวตั้งฉากกับแนวโคจรเป็นมุม 23.5 องศา และอีกจุดหนึ่งคือ จุดวินเทอร์โซลสตีซ (Winter Solstice) เป็นจุดที่โลกหันขั้วโลกเหนือออกจากดวงอาทิตย์มากที่สุดตรงกับวันที่ 21 ธันวาคมโดยประมาณ ส่วนอีกสองจุดเป็นตำแหน่งบนวงโคจรซึ่งการเอียงของแกนหมุนของโลกไม่มีผลต่อแสงอาทิตย์ คือ ตำแหน่ง อีควินอกซ์ (Equinox) ซึ่งตรงกับวันที่ 21 มีนาคมโดยประมาณ เรียกว่า สปริง (Spring) หรือเวอร์นอล อีควินอกซ์ (Vernal Equinox) และอีกตำแหน่งหนึ่งเรียกว่า ฟอล (Fall) หรือ ออร์ทูนอล อีควินอกซ์ (Autumnal Equinox) ในวันอีควินอกซ์กลางวันกับกลางคืนจะยาวนานเท่ากันคือ 12 ชั่วโมง

ทิศทางของรังสีตรง

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบการหมุนของโลกที่เวลาใดๆ กับรังสีตรงหรือตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ สามารถอธิบายได้โดยใช้มุมต่างๆ ดังนี้

1. ละติจูด (Latitude) คือ มุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือกำหนดให้มามีค่าเป็น “+” และเมื่อวัดไปทางทิศใต้ให้มามีค่าเป็น “-” ละติจูดจะมีค่าระหว่าง - 90 องศา ถึง 90 องศา
2. มุมเอียง (Slope) คือ มุมระหว่างพื้นผิวกับระนาบรับแสงกับแนวระดับ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 180 องศา
3. มุมชั่วโมง (Hour Angle) คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมริเดียนท้องถิ่นไปทางตะวันออกหรือตะวันตก มีค่าเป็น “-” ก่อนเวลาสุริยะ และมีค่าเป็น “+” หลังเที่ยงสุริยะ โดยมุมมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 15 องศาต่อหนึ่งชั่วโมง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\omega = 15(12 - st)$$

สมการที่ 1

เมื่อ st คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่นเทียบกับเวลาเที่ยงสุริยะ (Solar Noon) ในพื้นที่ทดสอบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$st = Standardtime + E - 4(Long_{st} - Long_{loc})$$

สมการที่ 2

4. มุมเดคลิเนชัน (Declination Angle) คือ มุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตร กำหนดให้มามีค่าเป็น “+” เมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็น “-” เมื่อวัดไปทางทิศ

ได้ มุมเดคลิเนชันมีค่าเปลี่ยนแปลงไปทุกวันระหว่าง -23.45 ถึง 23.45 องศา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad \text{สมการที่ 3}$$

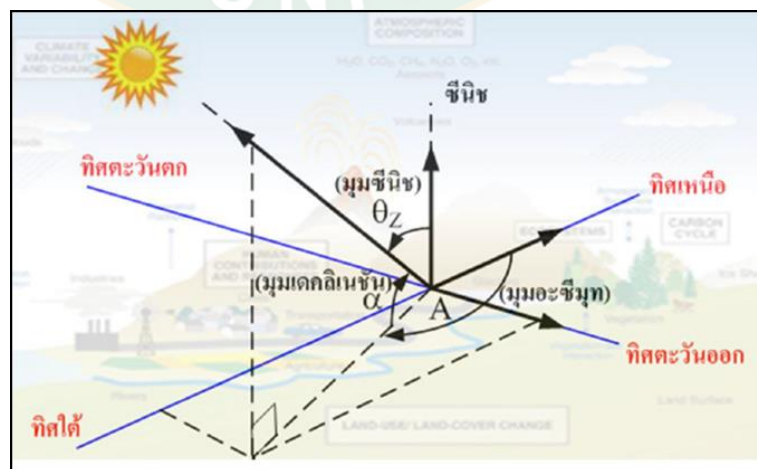
5. มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar Altitude Angle) คือ มุมระหว่างพื้นราบกับแนวลำแสงอาทิตย์ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ 4

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad \text{สมการที่ 4}$$

6. มุมอะซิมุมพื้นดิน (Surface Azimuth angle) คือ มุมระหว่างทิศใต้กับทิศการการหันหน้าของแผงรับแสง มีค่าอยู่ในช่วง -180 ถึง 180 องศา โดยเป็น 0 องศา เมื่อหันไปทางทิศใต้ และเป็น “+” เมื่อหันไปทางทิศตะวันตกและเป็น “-” เมื่อหันไปทางทิศตะวันออก

7. มุมอะซิมุมดวงอาทิตย์ (Solar Azimuth angle) คือ มุมระหว่างระนาบแนวตั้งของดวงอาทิตย์และระนาบของเมอริเดียนท้องถิ่น โดยกำหนดให้วัดจากทิศใต้ของระนาบแนวตั้งดวงอาทิตย์ไปทางตะวันตกมีค่าเป็นบวก วัดไปทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นลบและมีค่าเป็นศูนย์เมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมอะซิมุมดวงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง -180 ถึง 180 องศา สามารถคำนวณได้จากสมการ 5

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad \text{สมการที่ 5}$$

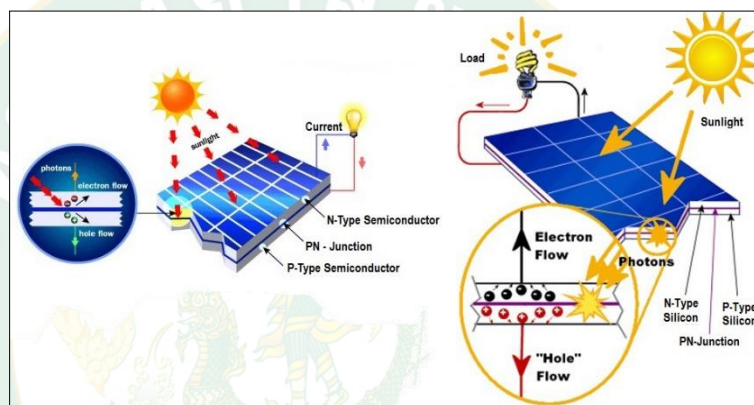


ภาพที่ 5 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมายังจุดต่างๆ ของโลก

ทฤษฎีเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานโฟตอนเป็นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ แต่สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานในแถบช่องว่างจะไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ สำหรับค่าความยาวคลื่นสูงสุดของโฟตอน ที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนได้



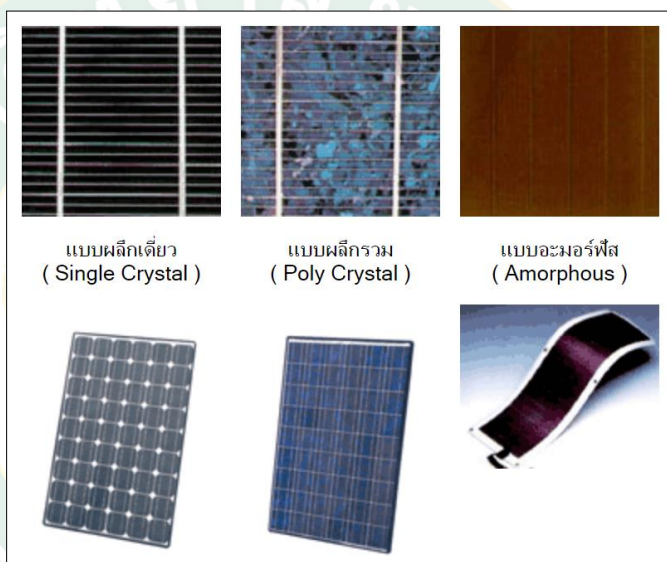
ภาพที่ 6 ระบบการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับโฟตอนที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ค่าพลังงานของโฟตอนที่มีค่าอยู่ในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกับค่าแถบช่องว่าง (band gap) จะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด พลังงานบางส่วนจะเกิดการสูญเสีย อันเนื่องมาจากการสะท้อนของผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Reflect) และการส่องผ่าน (Transition) ผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ โฟตอนที่ค่าพลังงานเท่ากับค่าพลังงานเท่ากับค่าพลังงานในแถบช่องว่างเท่านั้นจึงจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งจะเป็โฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นต่ำ และค่าพลังงานสูง พลังงานส่วนเกินจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของความร้อนที่เพิ่มขึ้นในตัวเซลล์แสงอาทิตย์

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามวัสดุที่นำมาใช้ผลิตได้เป็น 3 ชนิด แสดงดังภาพที่ 7 ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว แบบผลึกรวม และแบบอะมอร์ฟัส

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) นานักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10%
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์, แคดเมียม เทลเลอไรด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียม อาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25%



ภาพที่ 7 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว แบบผลึกรวม และแบบอะมอร์ฟัส

ทฤษฎีเกี่ยวกับรวบรวมแสงแบบพาราโบลิก

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากมีการนำมาใช้ในรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่แล้ว ยังมีการคิดค้นเทคโนโลยีนำความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Thermal Process) มาผลิตไฟฟ้าด้วย ซึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายแว่นขยาย โดยใช้อุปกรณ์รับแสง เช่น กระจกหรือวัสดุสะท้อนแสงและหมุนตามดวงอาทิตย์ เพื่อรวบรวมความร้อนจากแสงอาทิตย์มาไว้ที่จุดเดียวกัน หรือที่เรียกว่า ระบบความร้อนรวมศูนย์ ทำให้เกิดความร้อนสูงส่งผ่านไปยังตัวกลาง เช่น น้ำหรือน้ำมัน แล้วนำน้ำหรือน้ำมันที่ร้อนไปหมุนกังหันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ตามกระบวนการ รวบรวมความร้อนให้กับตัวกลาง ก่อนนำไปหมุนกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้า (สีขำนาญ et al., 2559) ได้แก่

1. ระบบรางพาราโบล่า (Parabolic Through) ประกอบด้วยรางยาวโค้งมิติเดียวเป็นตัวรับแสงติดตั้งอยู่บนระบบหมุนตามดวงอาทิตย์แกนเดียว ทำหน้าที่รวมแสงอาทิตย์ให้สะท้อนไปยังท่อที่ขนานกับแนวราง เพื่อถ่ายเทความร้อนให้ของเหลว (น้ำหรือน้ำมัน) ที่ไหลผ่านท่อ ทำให้ของเหลวนั้นกลายเป็นไอและไปขับเคลื่อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หากในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ การผลิตไอน้ำจะใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติเข้ามาช่วยเสริม



ภาพที่ 8 ระบบรางพาราโบล่า (Parabolic Through)

2. ระบบหอคอย (Power Tower) ประกอบด้วยตัวรับความร้อนที่ติดตั้งอยู่บนหอคอย ที่ล้อมรอบด้วยแผงกระจกขนาดใหญ่จำนวนมาก เรียกว่า “เฮลิโอสเตท” ซึ่งจะหมุนตามดวงอาทิตย์และสะท้อนแสงไปยังตัวรับความร้อน เพื่อให้ของเหลวที่อยู่ภายในได้รับความร้อนจนระเหยเป็นไอและไปขับเคลื่อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งระบบนี้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยและกำลังจะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น โรงไฟฟ้า Gemasolar ในเมือง Seville ทางตอนใต้ของประเทศสเปน เป็นต้น



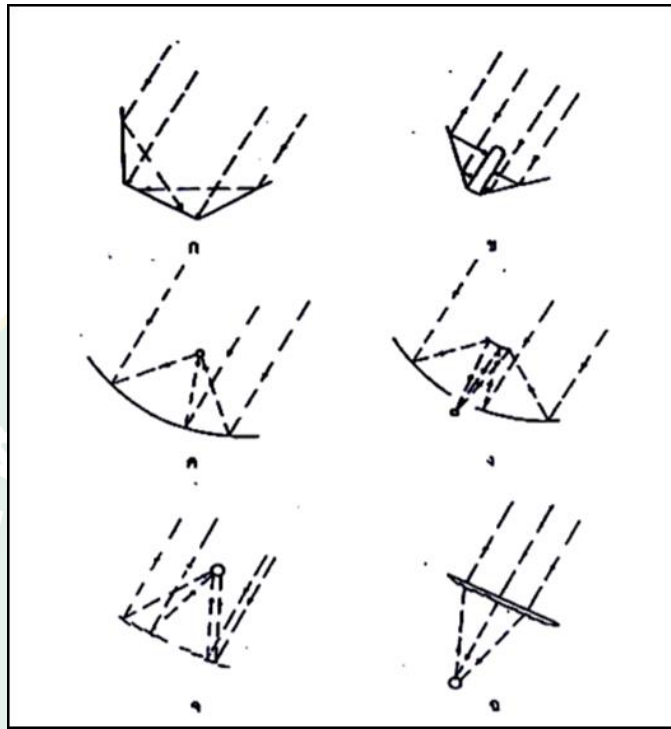
ภาพที่ 9 ระบบหอคอย (Power Tower)

3. ระบบงานพาราโบลา (Parabolic Dish) จะทำงานร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ระบบผลิตไฟฟ้าแบบนี้จะใช้หลักการแปลงพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ให้เป็นความร้อน แล้วแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกลเพื่อนำไปผลิตไฟฟ้า โดยระบบประกอบด้วยจานรวมแสงแบบพาราโบลา และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยตัวรวมแสงแบบงานพาราโบลามีผิวสะท้อนเป็นผิวต่อเนื่องหรือประกอบด้วยแผ่นสะท้อนแสงหลายชิ้น ซึ่งประกอบกันเป็นผิวโค้งพาราโบลาและมีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวางอยู่ที่จุดโฟกัสของจานพาราโบลาโดยงานดังกล่าวต้องมีระบบขับเคลื่อนแบบ 2 แกน ตามดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวันโดยทั่วไประบบงานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 1 ชุด จะมีกำลังการผลิต 25-40 kW แต่ละชุดสามารถทำงานโดยอิสระ ถ้าต้องการกำลังไฟฟ้ามากก็ติดตั้งจำนวนหลายชุดคล้ายกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์



ภาพที่ 10 ระบบงานพาราโบลา (Parabolic Dish)

ลักษณะทั่วไปของแผงรับแสงอาทิตย์ระบบรวมแสงประกอบด้วย 6 ลักษณะแสดงดังภาพที่ 11

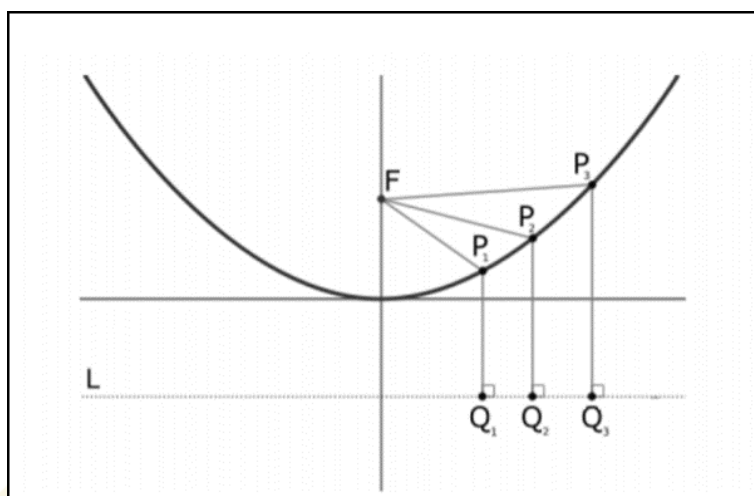


ภาพที่ 11 แผงรับแสงอาทิตย์ระบบรวมแสง

โดยที่

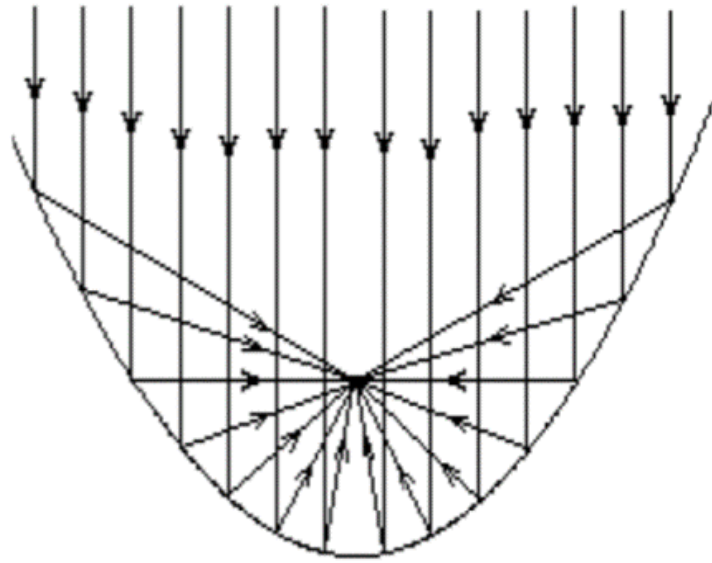
- ก. ผิวรับแสงแบบราบ, ผิวสะท้อนแสงแบบราบ
- ข. ผิวรับแสงรูปทรงกระบอก, ผิวสะท้อนรูปโคน
- ค. ตัวรวมแสงแบบพาราโบลา
- ง. ตัวรวมแสงแบบพาราโบลา
- จ. ตัวสะท้อนแสงแบบเฟรสเนล
- ฉ. ตัวหักเหแบบเฟรสเนล

พาราโบลาเป็นภาคตัดกรวยชนิดหนึ่ง มีนิยามว่าเซตของจุดบนเส้นโค้งมีระยะห่างจากจุดคงที่จุดหนึ่งและเส้นตรงเส้นหนึ่งด้วยระยะทางที่เท่ากัน เราเรียกจุดคงที่จุดนั้นว่า "จุดโฟกัส" และ เส้นตรงเส้นนั้นว่า "เส้นไดเรกทริกซ์" ทุก ๆ จุดที่อยู่บนกราฟพาราโบลา จะห่างจากจุดโฟกัสและเส้นไดเรกทริกซ์ ด้วยระยะห่างที่เท่ากันเสมอ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงตำแหน่งจุดโฟกัสบนจานพาราโบลา

จากภาพที่ 12 จุด P_1, P_2, P_3 เป็นจุดบนพาราโบลาจุด F เป็นจุดโฟกัสของพาราโบลาและเส้นตรง L เป็นเส้นไดเรกทริกซ์ของพาราโบลา ถ้าวัดระยะจากจุด P_1 ไปยังจุด F จะต้องเท่ากับกับระยะจากจุด P_1 ไปยังจุด Q_1 ซึ่งเป็นจุดบนเส้นไดเรกทริกซ์ ถ้าวัดระยะจากจุด P_2 ไปยังจุด F จะต้องเท่ากับกับระยะจากจุด P_2 ไปยังจุด Q_2 ซึ่งเป็นจุดบนเส้นไดเรกทริกซ์ และถ้าวัดระยะจากจุด P_3 ไปยังจุด F จะต้องเท่ากับกับระยะจากจุด P_3 ไปยังจุด Q_3 ซึ่งเป็นจุดบนเส้นไดเรกทริกซ์ ตัวสะท้อนรังสีรูปพาราโบลา (Parabola) หรือพาราโบลอยด์ (Paraboloids) สามารถพบเห็นได้จากการประยุกต์ใช้ในกล้องโทรทรรศน์ ไฟหน้าของรถยนต์และจานดาวเทียม ตัวรับรังสีรูปพาราโบลามีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีขนานที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวตัวรับรังสีให้รวมกันที่จุดโฟกัส หรือกรณีตรงกันข้ามที่ตำแหน่งกำเนิดรังสี ณ จุดโฟกัสจะทำให้เกิดการสะท้อนของรังสีออกในลักษณะขนานภาพที่ 13 แสดงให้เห็นว่ารังสีขนานที่เดินทางจากทางด้านซ้ายตกกระทบกับตัวรับรังสีแล้วจะไปรวมกันที่จุดโฟกัสเพียงจุดเดียว รังสีที่สะท้อนไปรวมกัน ณ ตำแหน่งโฟกัสนี้ความเข้มของรังสีจะมีค่ามากที่สุด



ภาพที่ 13 The focusing action of a parabola

จากภาพที่ 13 คือตัวอย่างของพาราโบลาสะท้อนรังสีซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีผิวหน้าสัมผัสราบเรียบ แต่สามารถประยุกต์ใช้ให้ผิวหน้าดังกล่าวมีความแบนราบหรือโค้งเว้าได้มากกว่านี้ ภายใต้เงื่อนไขของสมการพาราโบลาคือ

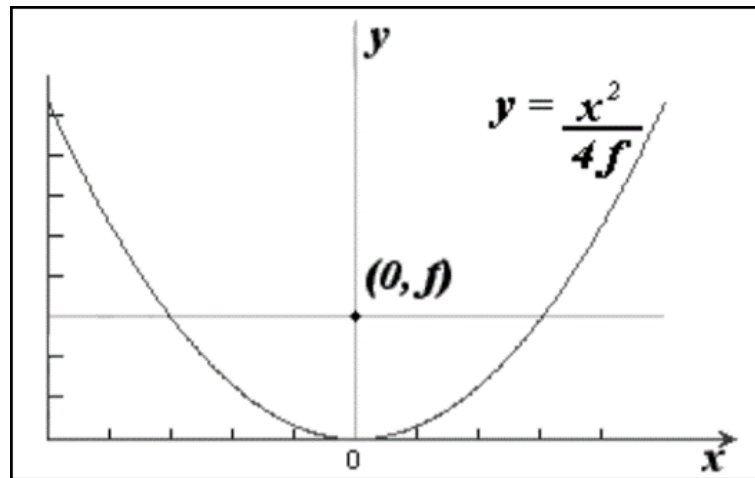
$$y = ax^2$$

สมการที่ 6

เมื่อ a คือ เป็นค่าคงที่
 F คือ ความยาวโฟกัสของพาราโบลา

$$a = \frac{1}{4f}$$

สมการที่ 7



ภาพที่ 14 Parabola - focal length = f

เมื่อโฟกัสที่พิกัด $(0, f)$ สมการพาราโบลาเท่ากับ

$$y = \frac{x^2}{4f}$$

สมการที่ 8

จากสมการที่ 11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดให้ค่า x เป็นค่าคงที่แล้วค่า y มีค่ามาก ความยาวโฟกัส f จะมีค่าน้อย ในทางกลับกันถ้าต้องการให้ความยาวโฟกัส f มีค่ามากค่า y จะต้องมีค่าน้อย การสร้างจานพาราโบลาที่พบเห็นทั่วไปมีด้วยกันหลายแบบ เช่น ขึ้นรูปเป็นจานพาราโบลาแบบจานเดี่ยวคล้ายกับกระทะ แบบแยกเป็นส่วน ๆ คล้ายจานดาวเทียม

ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ชนิดของแผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันมีการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีเทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อน 3 แบบดังนี้

แผงรับแสงแบบรวมแสง (Focusing Solar Collector) เป็นแบบที่สามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงซึ่งจำแนกได้ตามชนิดของการรวมแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การรวมแสงเป็นจุด (point-focus solar collector) ได้แก่ระบบรวมแสงเข้าหอรับแสง (central receivers tower) และจานรวมแสงเป็นจุด (parabolic dishes) การรวมแสงเป็นเส้น (line-focus solar collector) ได้แก่เลนส์สะท้อนรวมแสง (Fresnel reflector) และจานรวมแสงเป็นเส้น (parabolic troughs)

เทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนโดยใช้แผ่นรับแสงดังกล่าวข้างต้นนี้ จะมีการทำงานของอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ ซึ่งจะมีผลทำให้แผ่นรับแสงสามารถรับแสงอาทิตย์ได้เต็มที่ตลอดเวลาช่วงกลางวันทำให้มีอุณหภูมิสูงมากดังแสดงในตารางที่ 2

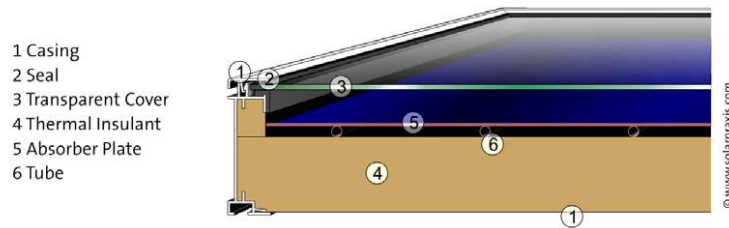
ตารางที่ 2 ระดับอุณหภูมิที่ทำได้ของแผ่นรับแสงแบบรวมแสง

ชนิดตัวรับรังสีอาทิตย์	ระดับอุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณ (°C)
หอรับแสง (central receiver tower)	1000
จานรวมแสงเป็นจุด (parabolic dish)	1500
เลนส์สะท้อนรวมแสง (Fresnel reflector)	250
จานรวมแสงเป็นเส้น (parabolic troughs)	300

แผงรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) เป็นแบบที่สามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำ แผ่นรับแสงแบบนี้จะไม่มีอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (non-tracking solar collector) ได้แก่ แผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิดใส (single glazed) และแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด (un glazed) เป็นต้น แสดงในตารางที่ 3

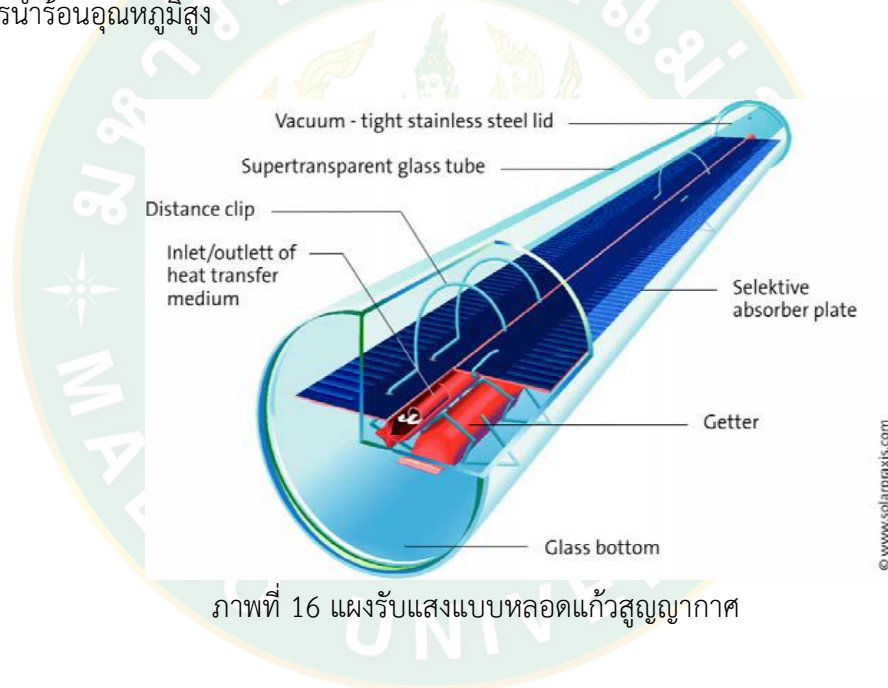
ตารางที่ 3 ระดับอุณหภูมิที่ทำได้ของแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบและสระแสงอาทิตย์

ชนิดตัวรับรังสีอาทิตย์	ระดับอุณหภูมิสูงสุดโดย ประมาณ (°C)
แผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิดใส(single glazed)	40-90
แผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด (un glazed)	<40
สระแสงอาทิตย์ชนิดตื้น (shallow solar pond)	40-60
สระแสงอาทิตย์ชนิดลึก (deep salt gradient solar pond)	40-90
ท่อสุญญากาศ (evacuated tubular collector)	100-200



ภาพที่ 15 ลักษณะแผงรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector)

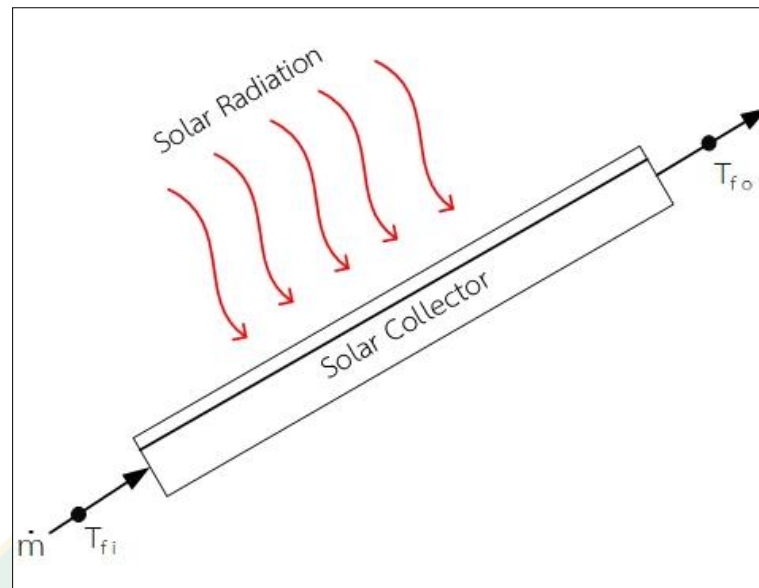
แผงรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนอีกรูปแบบหนึ่ง มีลักษณะเป็นหลอดแก้วสองชั้นระหว่างชั้นเป็นสุญญากาศ ภายในเคลือบด้วยสารดูดกลืนรังสี มีประสิทธิภาพสูงเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการน้ำร้อนอุณหภูมิสูง



ภาพที่ 16 แผงรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ

สมดุลพลังงานตัวเก็บรังสีอาทิตย์

สมรรถนะของแผงรับรังสีอาทิตย์สามารถอธิบายโดยใช้หลักการสมดุลพลังงาน เมื่อพิจารณาที่สถานะของระบบคงที่ (Steady state) แสดงดังภาพที่ 17 จะสามารถหาพลังงานที่แผงรับรังสีอาทิตย์ได้รับดังนี้



ภาพที่ 17 สมดุลพลังงานตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากภาพที่ 17 สมดุลพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาได้จาก
พลังงานเข้า = พลังงานออก + พลังงานที่แผ่รังสีอาทิตย์ได้รับ

$$Q_{\text{coll}} = A_c [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)]$$

สมการที่ 9

กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะ หรืออยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) ค่าพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13

$$Q_{\text{coll}} = \dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})$$

สมการที่ 10

ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำและนำไปใช้ประโยชน์ได้จะสามารถหาความร้อนที่แผ่รังสีอาทิตย์ได้จากสมการที่ 14

$$Q_{\text{coll}} = \dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi}) = A_c [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)]$$

สมการที่ 11

สำหรับการหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์ (Solar collector efficiency:) ซึ่ง
เป็นดัชนีที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้ว

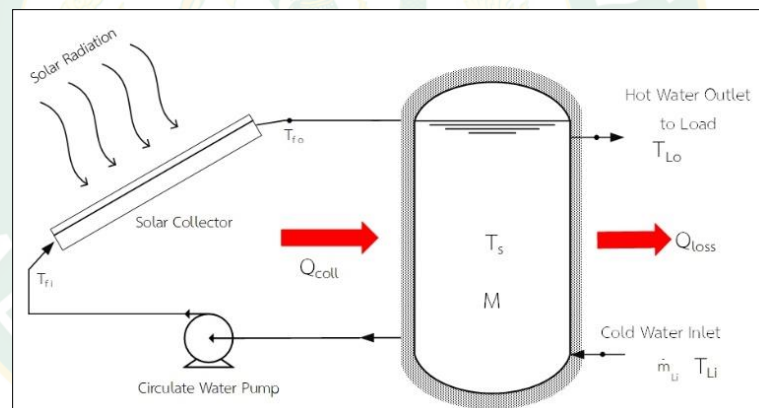
เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{coll}}}{I_T A_C} \quad \text{สมการที่ 12}$$

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{I_T A_C} = F_R (\tau \alpha)_e - \frac{F U_L (T_{fi} - T_a)}{I_T} \quad \text{สมการที่ 13}$$

สมดุลพลังงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

สมดุลพลังงานของระบบทำน้ำร้อนเพื่อหาอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน สามารถอธิบายโดยใช้หลักการสมดุลพลังงาน และหาอัตราพลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีอาทิตย์ได้รับ



ภาพที่ 18 สมดุลพลังงานระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 18 สมดุลพลังงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จาก

$$Q_{\text{coll}} = Q_{\text{load}} + Q_{\text{loss}} + Q_s \quad \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อพิจารณาสถานะที่ไม่มี การนำน้ำในถังเก็บน้ำร้อนไปใช้งาน และไม่มีการสูญเสียความร้อนจากถัง (ถังหุ้มฉนวนอย่างดี) จากสมการที่ 10 สามารถลดรูปสมการได้ดังสมการที่ 15 และสมการที่ 16

$$Q_{\text{coll}} = Q_s \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$A_c [F_R (\tau \alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] = (MC_p) \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 16}$$

สมรรถนะของระบบทำน้ำร้อน สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้นปริมาณความร้อนในแต่ละเวลาที่ถังเก็บน้ำร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 20

$$Q_s = (MC_p) \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 17}$$

เมื่อ Q_s คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อน (W)
 $(MC_p)s$ คือ ผลคูณมวลและความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J)
 Δt คือ ระยะเวลาที่อุณหภูมิของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง (s)
 $T_s^{t+\Delta}$ คือ อุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s คือ อุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)

โดยทั่วไปจะทำการทดสอบระบบตลอดทั้งวัน ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$\eta_{\text{daily}} = \frac{Q_s}{\sum_{i=1}^n I_T A_c \Delta t} \quad \text{สมการที่ 18}$$

การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอยีของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เอ็กซ์เซอยี (Exergy) คือ งานที่ใช้ประโยชน์สูงสุดที่สามารถได้รับจากระบบในสภาพแวดล้อมที่กำหนด สามารถวิเคราะห์ได้โดยกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งตรงกันข้ามกับการวิเคราะห์พลังงาน การวิเคราะห์เอ็กซ์เซอยีจะคำนึงถึงคุณภาพของพลังงาน พลังงานทำได้รับจากระบบ PVT แบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน ในด้านคุณภาพพลังงาน พลังงานไฟฟ้าจะเทียบเท่ากับงานที่ได้รับจากระบบโดยตรง ในขณะที่พลังงานความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ โดยการคำนวณมีขั้นตอนและสมการดังต่อไปนี้ (Amin and Mohammad, 2019)

เอ็กซ์เซอียี่ที่ป้อนให้กับระบบจากรังสีอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$\dot{E}_{x_{sun}} = \dot{E}_{sun} \left(1 - \frac{4T_{amb}}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right)^4 \right) \quad \text{สมการที่ 19}$$

เอ็กซ์เซอียี่ที่ได้รับจากระบบในรูปแบบไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการ 20

$$\dot{E}_{el} = V_m \times I_m \quad \text{สมการที่ 20}$$

เอ็กซ์เซอียี่ที่ได้รับจากระบบในรูปแบบความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ 21-23

$$\dot{E}_{x_{th}} = \dot{E}_{th} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}} \right) \quad \text{สมการที่ 21}$$

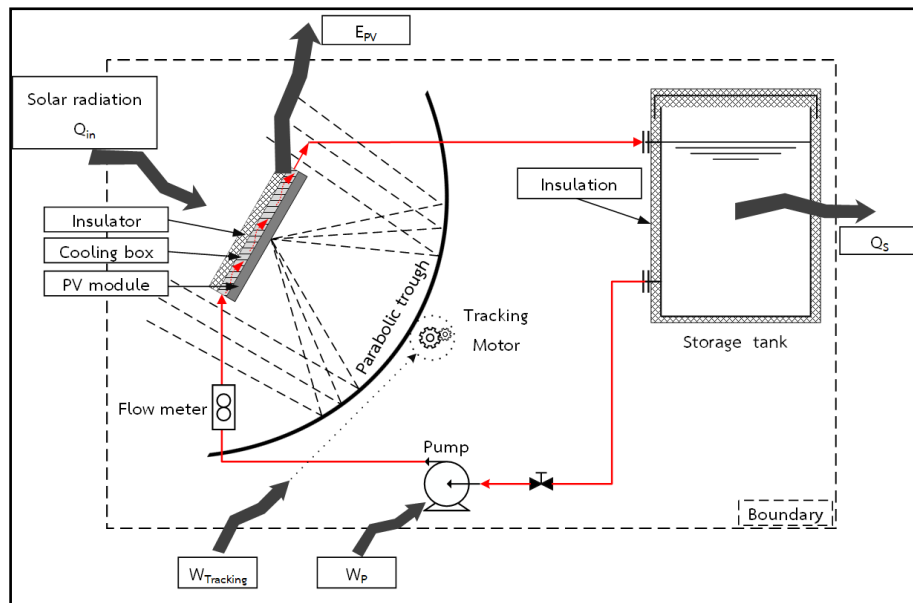
$$\dot{E}_{x_{th}} = \dot{m} \left[\left(h_{out} - h_{in} \right) - T_{amb} \left(s_{out} - s_{in} \right) \right] \quad \text{สมการที่ 22}$$

$$\dot{E}_{x_{th}} = \dot{m} C_p \left[\left(T_{out} - T_{in} \right) - T_{amb} \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \right]$$

$$\dot{E}_{x_{Os}} = \frac{MC_p \left[\left(T_s^{t+\Delta t} - T_s \right) - T_{amb} \ln \left(\frac{T_s^{t+\Delta t}}{T_s} \right) \right] \Delta t}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 23}$$

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการนำระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผสมผสานกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถผลิตน้ำร้อนจากความร้อนที่สะสมในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้และนำระบบดังกล่าวมาติดตั้งร่วมกับรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิกจึงจำเป็นต้องมีการรวมทฤษฎีหรือสมการในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อที่จะนำข้อมูลไปเปรียบเทียบและนำเสนอที่เหมาะสม ซึ่งทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 19 สมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของพื้นที่รับแสงที่ใช้ในสมการจากเดิมที่เป็นพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเป็นพื้นที่รับรังสีของรางรวมแสงพาราโบลิก โดยการประเมินสมรรถนะของระบบทางด้านไฟฟ้า ความร้อนและสมรรถนะรวมของระบบ

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) แบ่งได้ดังนี้

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22 (Mohsenzadeh et al., 2017)

$$\eta_{el} = \frac{P_{mPV}}{A_a \times G_{tot}} \quad \text{สมการที่ 24}$$

- เมื่อ P_{mPV} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
 A_a คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของรางรวมแสงพาราโบลิก (m^2)
 G_{tot} คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (W/m^2)

ประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 23 (Mohsenzadeh et al., 2017)

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_a \times G_{tot}}$$

สมการที่ 25

เมื่อ	m	คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
	C_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg °C)
	T_o	คือ อุณหภูมิของน้ำขาออกเป่ารับรังสีอาทิตย์ (°C)
	T_i	คือ อุณหภูมิของน้ำขาเข้าเป่ารับรังสีอาทิตย์ (°C)
	A_a	คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของรางรวมแสงพาราโบลิก (m ²)
	G_{tot}	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (W/m ²)

ประสิทธิภาพการรวมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 26 (Mohsenzadeh et al., 2017)

$$\eta_{tot} = \eta_{el} + \eta_{th}$$

สมการที่ 26

พลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก

เนื่องจากในแต่ละวันการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์ การพิจารณาในรูปแบบพลังงานสุทธิของระบบมีความเหมาะสมที่สุดอีกทั้งยังสามารถนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานจากแหล่งอื่น ๆ ได้โดยง่ายโดยจากภาพที่ 19 แสดงถึงสมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก ซึ่งในส่วนพลังงานที่ป้อนเข้าให้กับระบบจะประกอบไปด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบไปยังพื้นที่รับแสงของรางรวมแสงพาราโบลิก (Q_{in}) พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบหนึ่งแกน ($W_{Tracking}$) และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับปั๊มน้ำที่ทำหน้าที่ในการหมุนเวียนน้ำจากถังเก็บน้ำเพื่อระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W_p) และในส่วนพลังงานที่ได้รับจากระบบจะประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (E_{PV}) และพลังงานความร้อนที่ได้รับจากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สะสมภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบน้ำร้อนที่เก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนและหมุนเวียนในระบบ (Q_S)

โดยการวิเคราะห์พลังงานสุทธิของระบบที่ผลิตได้ในหนึ่งวันทำการทดลอง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25

$$E_{Net} = E_{PV} - W_{Pump} - W_{Tracking} + Q_S$$

สมการที่ 27

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก คำนวณได้จากสมการที่ 26

$$\eta_{\text{System}} = \frac{E_{\text{Net}}}{E_{\text{Sun}}}$$

สมการที่ 28

เมื่อ	E_{PV}	คือ พลังงานที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (J)
	W_{Pump}	คือ พลังงานที่ป้อนให้กับปั๊มหมุนเวียนน้ำ (J)
	W_{Tracking}	คือ พลังงานที่ป้อนให้กับระบบติดตามดวงอาทิตย์ (J)
	Q_s	คือ ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมโดยน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (J)
	E_{Sun}	คือ พลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ (J)

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

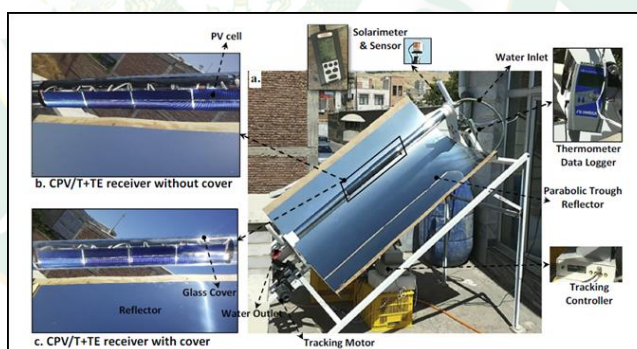
การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของระบบถูกนำมาใช้วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับงานวิจัย เพื่อเป็นการตัดสินใจในการลงทุนในระบบ หรือหาระยะเวลาคืนทุนของระบบว่ามีความคุ้มค่า หรือระยะเวลาคืนทุนยาวนานเพียงใด เพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้ที่สนใจได้ใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจลงทุนในระบบ ซึ่งการคำนวณในรูปแบบนี้สามารถคำนวณได้ง่ายจากสมการที่ 29

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ (บาท)}}{\text{เงินกำไรสุทธิ (บาทต่อปี)}}$$

สมการที่ 29

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Mohsenzadeh et al., 2017) ทำการศึกษาและทดลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ติดตั้งบนรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ซึ่งการดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 1. ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่มีกระจกใสครอบระบบ (CPV/T +TE with cover) 2. ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ไม่มีกระจกใสครอบระบบ (CPV/T +TE with out cover) และ 3. ระบบที่ติดตั้งเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์และไม่ได้ติดตั้งร่วมกับรางรวมแสงอาทิตย์พาราโบลา (PV/free Module) ดังแสดงในภาพที่ 20 ทำการทดลองภายใต้สภาพภูมิอากาศของเมืองมาราเกช ประเทศโมร็อกโค ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพรวมเฉลี่ยต่อวันของระบบ CPV/T+TE ที่มีและไม่มีกระจกครอบระบบ เท่ากับ 50.99% และ 47.30% ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในระบบ CPV/T+TE ที่มีและไม่มีกระจกครอบระบบ เท่ากับ 4.83% และ 4.94% ซึ่งต่ำกว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบปกติ PV/free ดังแสดงในภาพที่ 21

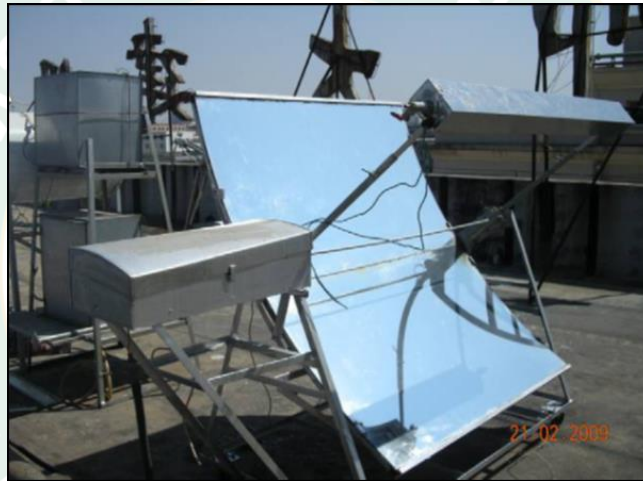


ภาพที่ 20 (a) Parabolic Trough Concentrator (b) ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่มีกระจกครอบระบบ (CPV/T+TE without cover) และ (c) ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยที่มีกระจกครอบระบบ (CPV/T+TE with cover)

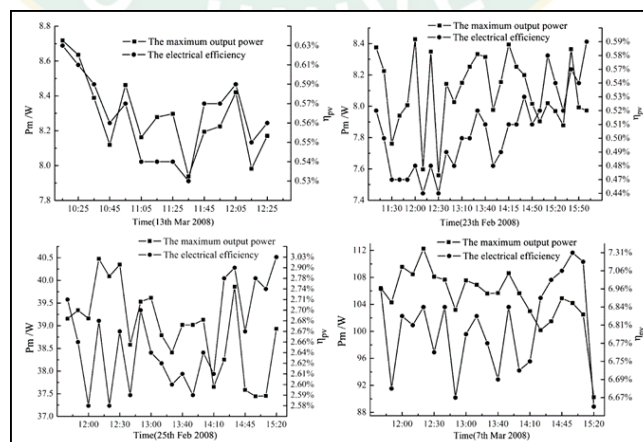
System	P_{elw} (W)	P_{eth} (W)	P_{elw} (W)	P_{th} (W)	η_{elw} (%)	η_{eth} (%)	η_{elw} (%)	η_{th} (%)	η_{tot} (%)
PV/free	4.67	0	4.67	0	11.37	0	11.37	0	11.37
CPV/T+TE without cover	18.76	0.37	19.13	171.41	4.82	0.12	4.94	42.36	47.30
CPV/T+TE with cover	18.33	0.51	18.84	186.91	4.67	0.16	4.83	46.16	50.99

ภาพที่ 21 ผลการทดสอบรายวันโดยเฉลี่ยของพลังงานและประสิทธิภาพต่าง ๆ สำหรับ CPV / T + TE ที่มีและไม่มีกระจกครอบระบบ และโมดูล PV/free

(Li et al., 2011) ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และความร้อนที่มีบนารวมแสงพาราโบลิก ขนาดของพื้นที่รับแสงของพาราโบลิกขนาด 2 m² ที่มีอัตราส่วนการรวมแสงเท่ากับ 16.92 พื้นที่ของกระจกสะท้อนแสง คือ 1.44 x 1.45 m² และค่าการสะท้อนแสงของวัสดุสะท้อน คือ 0.69 แสดงดังภาพที่ 22 โดยทำการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์ 4 ประเภท ประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแกเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide, GaAs) และ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซูเปอร์เซลล์ (Super cell) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด GaAs ดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ประสิทธิภาพที่สูงกว่าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด GaAs ได้รับอิทธิพลมาจากความต้านทานแบบอนุกรมที่ต่ำกว่า แสดงดังภาพที่ 23

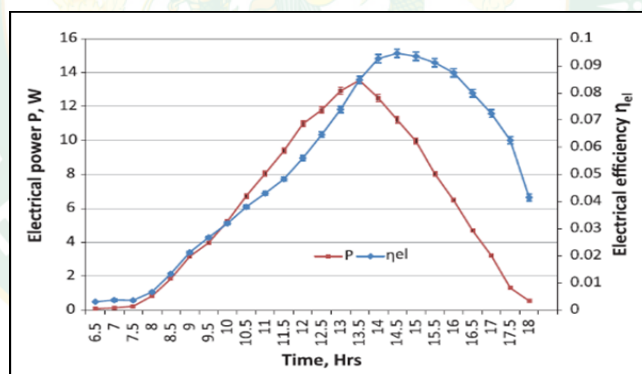


ภาพที่ 22 ระบบ TCPV/T ขนาด 2 m²

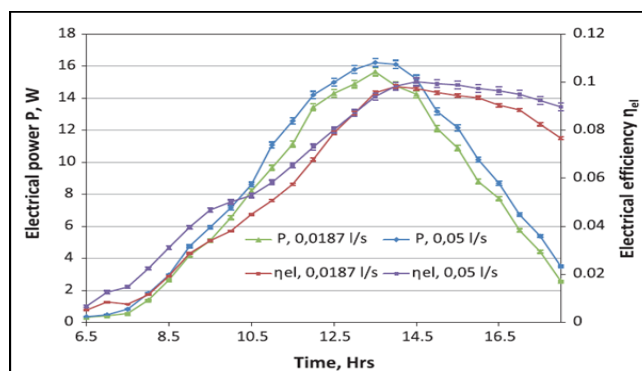


ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 4 ชนิดที่ติดตั้งบนระบบ TCPV/T

(Chaabane et al., 2013) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งร่วมกับ รางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่มีระบบระบายความร้อน (Concentrating photovoltaic/thermal system ; CPVTS) กับระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ระบายความร้อนให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ (Concentrating photovoltaic system; CPVS) และได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในระบบระบายความร้อนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ 2 อัตราการไหล คือ 0.0187 L/s และ 0.05 L/s โดยวัสดุสะท้อนแสงอาทิตย์ของรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาทำจากสแตนเลส มีขนาดความยาว 3.64 m และกว้าง 2 m ในการทดลองใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) และขนาดของอุปกรณ์ระบายความร้อนมีขนาดความยาว 1.825 m ความกว้าง 0.275 m และความลึก 0.05 m ทำการทดลองภายในสภาพภูมิอากาศของเมืองโทเซอร์ ประเทศตูนิเซีย ผลการทดลองสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/s เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 0.0187 L/s และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบ CPVTS อยู่ที่ 9.8% และ 10.02% แสดงดังภาพที่ 24 สำหรับอัตราการไหลของมวลน้ำ ที่ 0.0187 L/s และ 0.05 L/s ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบระบายความร้อน CPVS อยู่ที่ 9.4% แสดงดังภาพที่ 25

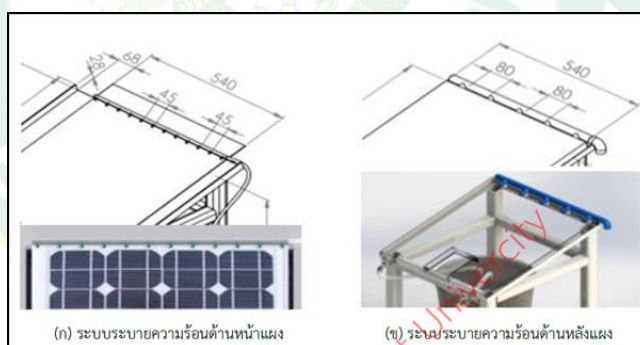


ภาพที่ 24 พลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ CPVS

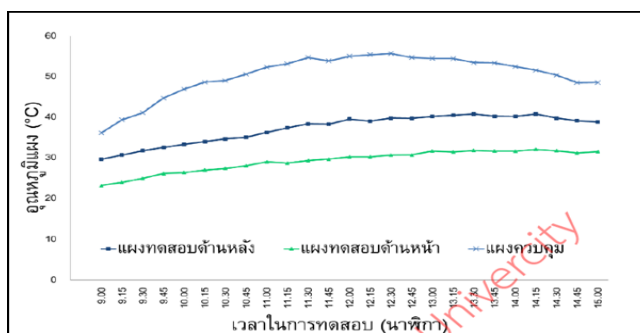


ภาพที่ 25 ความผันแปรของพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของ CPVTS กับอัตราการไหลของน้ำ

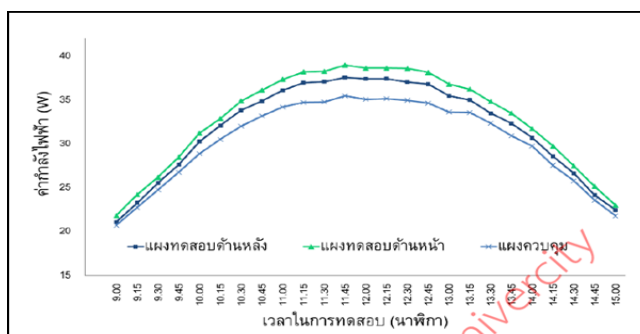
(บุญศรี และคณะ, 2560) ได้ทำการศึกษาเทคนิคการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1. ระบบระบายความร้อนด้านหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยสายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ที่มีการติดตั้งหัวฉีดน้ำรัศมี 180 องศา จำนวน 12 หัวฉีด โดยแต่ละหัวฉีดติดตั้งห่างกัน 45 mm และ 2. ระบบระบายความร้อนด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยกล่องอะคริลิกขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับพื้นที่บริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมีความลึก 30 mm บริเวณด้านบนของกล่องระบายความร้อนติดตั้งท่อน้ำเข้า 5 จุด แต่ละจุดห่างกัน 80 mm แสดงดังภาพที่ 26 ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงควบคุม และแผงทดสอบที่ระบายความร้อนบริเวณด้านหน้าแผง และแผงที่ทดสอบระบายความร้อนที่ด้านหลังแผง เมื่อเปรียบเทียบกับแผงควบคุมสามารถลดอุณหภูมิในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เฉลี่ย 42% และ 26% ตามลำดับ และแผงที่ทดสอบที่ระบายความร้อนด้านหน้าแผงและด้านหลังแผงสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นทันทีเมื่อเทียบกับแผงควบคุม ซึ่งแผงของชุดควบคุมมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 19.54 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแผงทดสอบระบายความร้อนทั้ง 2 แผง ส่วนแผงทดสอบที่ระบายความร้อนด้านหน้าแผง และด้านหลังแผงมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 21.3 V และ 22.5 V ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 27 และภาพที่ 28



ภาพที่ 26 ลักษณะการออกแบบระบบระบายความร้อน



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเวลาในการทดสอบ

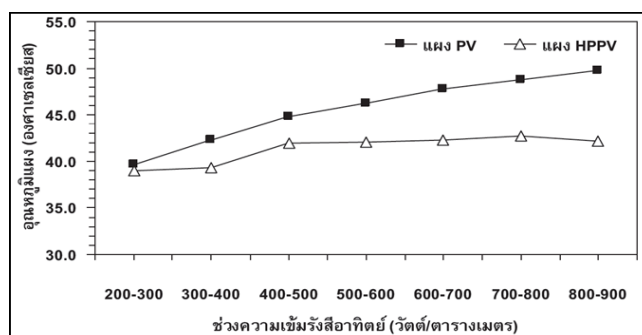


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเวลาในการทดสอบ

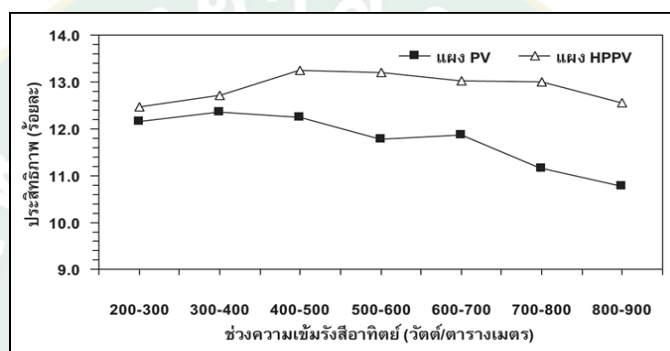
(สีชำนาญ และคณะ, 2559) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนแบบตาข่ายทองแดง โดยแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ 1. ชุดการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (Photovoltaic; PV) และ 2. การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนติดตั้งวัสดุพรุนแบบตาข่ายทองแดงและมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ส่วนควบแน่น (Heat pipe Photovoltaic system; HPPV) โดยท่อความร้อนทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 10 mm ภายในติดตั้งวัสดุพรุนแบบตาข่ายที่ทำจากลวดตาข่ายทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดเท่ากับ 0.1 mm ความถี่ของตาข่าย 100 ตา และบรรจุสารทำความเย็น R-134a ที่อัตราการเติมสารทำงานเท่ากับ 40% ของปริมาตรส่วนทำระเหย ติดตั้งท่อความร้อนบริเวณด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 ท่อ ที่ระยะห่างเท่า ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 29 ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนที่ 0.5 L/min ทำการทดสอบในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึง มิถุนายน พ.ศ.2557 ภายใต้สภาวะภูมิอากาศของจังหวัดมหาสารคาม ผลการทดสอบพบอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองมีอุณหภูมิต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน แสดงดังภาพที่ 30 และพบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ HPPV มีค่าประสิทธิภาพมากกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติ PV ตลอดทุกช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 29 ชุดท่อความร้อนที่ติดตั้งไว้ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของช่องความเข้มข้นรังสีอาทิตย์กับอุณหภูมิแผง PV และอุณหภูมิแผง HPPV



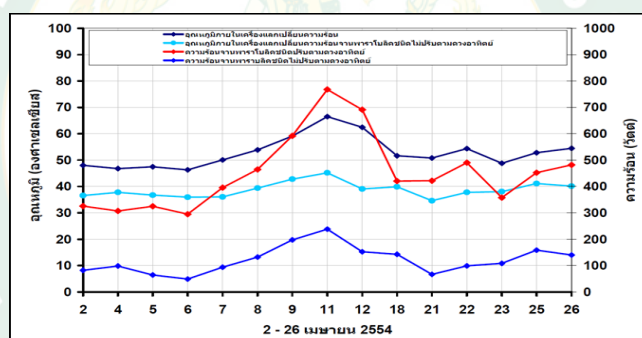
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ของช่วงรังสีอาทิตย์กับประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ PV และ HPPV

(ตันดี และคณะ, 2555) ทำการศึกษาและออกแบบงานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลิกแบบปรับองศาตามดวงอาทิตย์ และไม่ปรับองศาตามดวงอาทิตย์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับความร้อนของงานทั้งสองแบบ โดยทำการสร้างงานรับพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบที่มีขนาดเท่ากัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.227 m ความสูงของงานเท่ากับ 0.332 m ระยะโฟกัสเท่ากับ 1.006 m ดังแสดงในภาพที่ 32 โดยใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นชนิดเปลือกและท่อ ทำมาจากท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 mm มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 0.346 m² โดยการทดลองทำการติดตั้งงานรับพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชุดในพื้นที่เดียวกัน ชุดทดลองที่รับค่าได้ปรับได้ปรับไปที่ทางทิศตะวันออกโดยให้ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์และทำการปรับ 15 องศาทุก ๆ หนึ่งชั่วโมงและชุดที่ไม่ได้ทำการปรับองศาตามดวงอาทิตย์ทำการติดตั้งในทิศทางเหนือใต้ 15 องศา โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำที่ 0.35 L/min ผลการทดสอบพบว่า งานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลิกชนิดปรับองศาตามดวงอาทิตย์ได้ผลต่างอุณหภูมิน้ำที่สูงกว่าชนิดไม่ปรับองศาตามดวงอาทิตย์ โดยผลต่างที่ได้นำมาคำนวณหาค่าความร้อนพบว่า ค่าความร้อนของงานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลิกแบบปรับองศาตามดวงอาทิตย์ มี

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 452.64 W ค่าความร้อนของงานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลิกชนิดไม่ปรับตามดวงอาทิตย์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 121.7 W ดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 32 งานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลิกและอุปกรณ์ในการทดสอบ



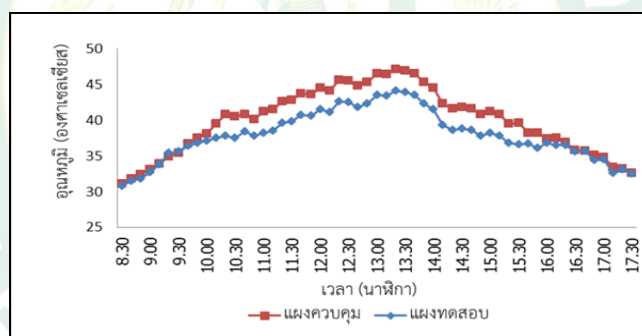
ภาพที่ 33 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งงานพาราโบลิกชนิดปรับองศาตามดวงอาทิตย์และไม่ปรับตามดวงอาทิตย์

(ตีผาง และสุพรรณ, 2561) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการปรับมุมแผงติดตามดวงอาทิตย์เป็นช่วงเวลาร่วมกับการระบายความร้อนแผงด้วยการสเปรย์น้ำ งานวิจัยได้ออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบอัตโนมัติแบบ 1 แกนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO UNO ในการประมวลผล ซึ่งจะเคลื่อนที่ในแนวตะวันออกไปตะวันตกติดตั้งกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 80 W จำนวน 3 แผง วางแบบบานเกล็ดโดยออกแบบให้ทั้ง 3 แผง เคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้ด้วยอุปกรณ์ต้นกำลังเพียงชุดเดียว แสดงดังภาพที่ 34 โดยออกแบบให้มีการปรับมุมติดตามดวงอาทิตย์ทุก 1 ชั่วโมง และออกแบบให้มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ฉีดไปที่แผงทุกๆ 30 นาที จากผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างแผงที่ติดตั้งบนระบบติดตามดวงอาทิตย์ร่วมกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำกับแผงที่ติดตั้งอยู่กับที่ เอียงทำมุมกับแนวระดับ 16° และไม่มีการ

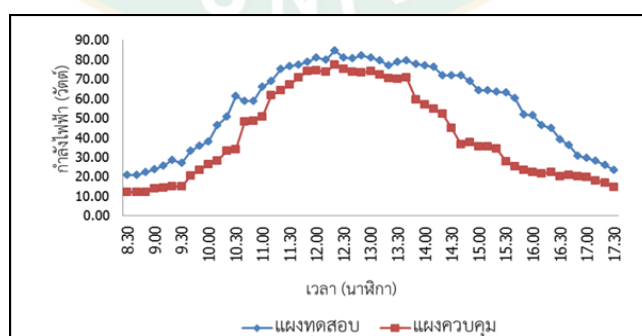
ระบบระบายความร้อนพบว่าแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ร่วมกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำมี อุณหภูมิแผงลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 2.9 °C และได้กำลังไฟฟ้าจากแผงมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ติดตั้งอยู่กับที่และไม่มีระบบระบายความร้อนประมาณ 16.9 W หรือประมาณ 28.36% ผลการ ทดลองแสดงดังภาพที่ 35 และภาพที่ 36



ภาพที่ 34 โครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ



ภาพที่ 35 อุณหภูมิแผงทดสอบและแผงควบคุม

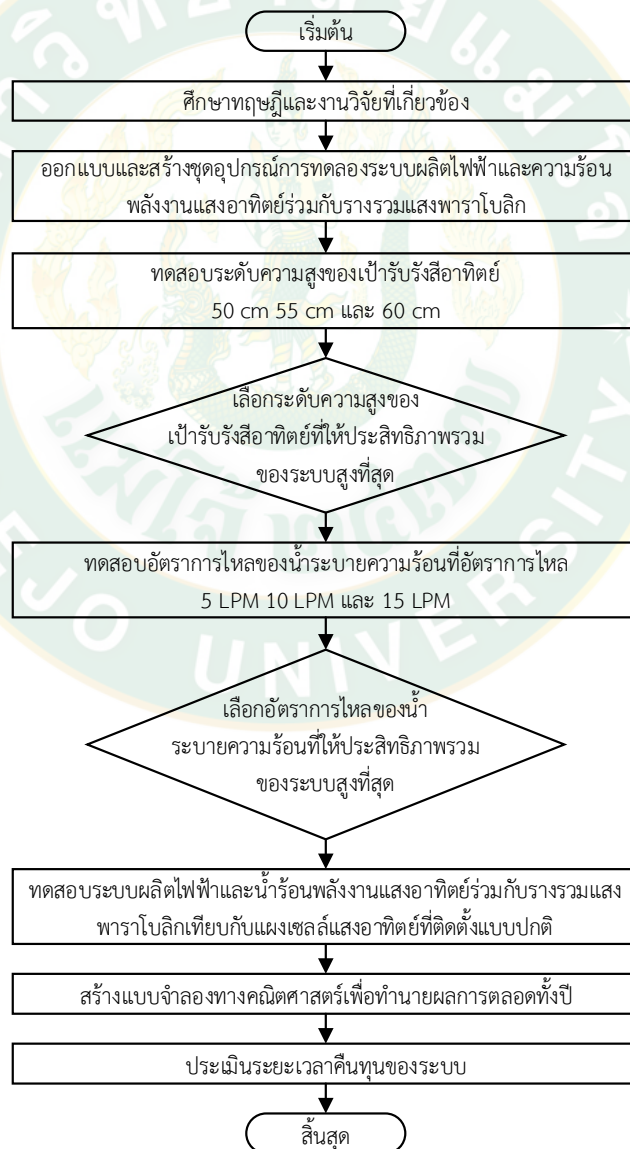


ภาพที่ 36 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงทดสอบและแผงควบคุม

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

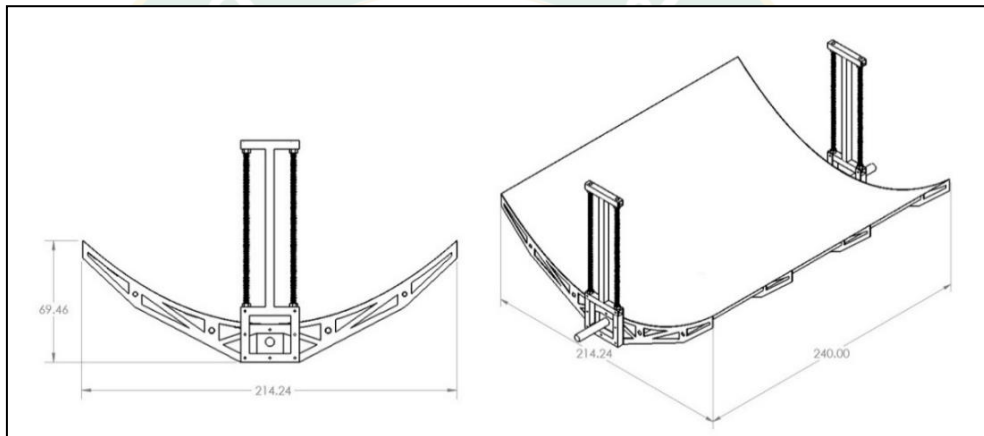
ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้รางรวมแสงแบบพาราโบลาและขณะเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของรังสีอาทิตย์ จะส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่ำลงไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลาที่มีการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบสร้างรางรวมแสงพาราโบลา

ในขั้นตอนแรกทำการออกแบบรางรวมแสงพาราโบลาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์โดยหลักการในการออกแบบเริ่มจากการกำหนดจุดโฟกัสของรางรวมแสงพาราโบลาเท่ากับ 60 cm และทำการลากเส้นโค้งของผิวรับรังสีของพาราโบลาภายใต้การกำหนดส่วนโค้งของพาราโบลาให้พอดีกับแผ่นสแตนเลสที่มีจำหน่ายภายในท้องตลาดขนาดความกว้างต่อ 1 แผ่นเท่ากับ 120 cm โดยใช้จำนวน 2 แผ่น เมื่อทำการโค้งแล้วจะได้ความกว้างด้านรับรังสีของรางพาราโบลาเท่ากับ 214.24 cm ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบและสร้างแสดงดังภาพที่ 38 และภาพที่ 39 และรายละเอียดของระบบแสดงในตารางที่ 4



ภาพที่ 38 ลักษณะรางรวมแสงพาราโบลาที่ออกแบบสำหรับการทดลอง



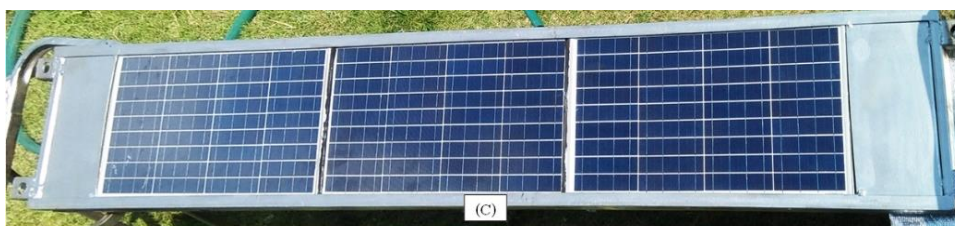
ภาพที่ 39 รางรวมแสงพาราโบลาที่สร้างขึ้นจริง

ตารางที่ 4 รายละเอียดของรวบรวมแสงพาราโบลิก

รวบรวมแสงพาราโบลิก	รายละเอียด
- วัสดุสะท้อนรังสี	Glossy stainless steel
- ขนาดแผ่นสแตนเลส (Width, Length), m	1.2, 2.4
- จำนวนแผ่นสแตนเลส	2
- ความกว้างช่องรับรังสี (Width, W), m	2.1424
- ความยาวช่องรับรังสี (Length, L), m	2.40
- ความสูง (Height, H), m	4.791
- พื้นที่ช่องรับรังสี (Aperture, Aa), m ²	5.1418
- อัตราส่วนการรวมรังสี (Concentration Ratio, CR)	7.75

การออกแบบและสร้างเป่ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อนเป่ารับรังสีอาทิตย์

เนื่องจากระบบการรวมแสงอาทิตย์โดยใช้รวบรวมแสงแบบพาราโบลิก จำเป็นจะต้องใช้เป่ารับรังสีที่มีขนาดด้านกว้างของเป่ารับรังสีแคบ ๆ โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะใช้เป่ารับรังสีแบบท่อในการผลิตน้ำร้อนเพื่อให้การสูญเสียจากการเกิดเงาบนพื้นที่สะท้อนรังสีของรวบรวมแสงพาราโบลิกน้อยที่สุด และเมื่อเป่ารับรังสีมีขนาดเล็กก็จะส่งผลให้ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนไปยังเป่ารับรังสีมีค่าสูง หมายความว่าอัตราการรวมรังสี Concentrating Ratio (CR) จะมีค่าสูงขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นเป่ารับรังสีอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิก โดยขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กนั้นค่อนข้างหาได้ยากตามท้องตลาดในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด ซึ่งมีขนาดขนาดความกว้าง 33.5 cm ด้านยาว 66.5 cm จำนวน 3 แผงมาใช้ในงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเป็นเป่ารับรังสีอาทิตย์

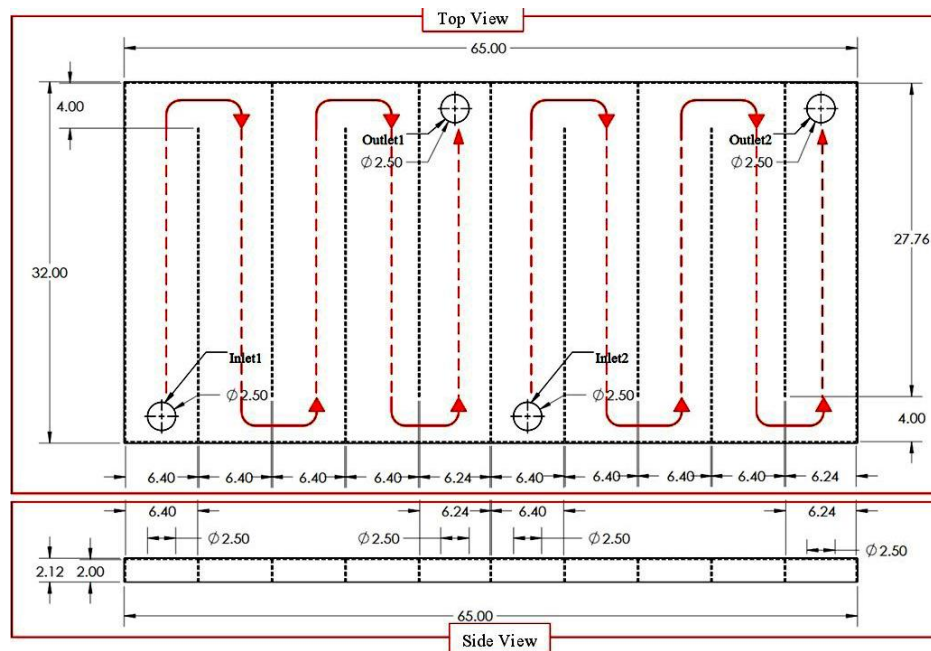
โดยทำการติดตั้งกล่องน้ำระบายความร้อน ภาพที่ 42 บริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้ง 3 แผงเพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนและลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งรายละเอียดหรือคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบระบายความร้อนแสดงตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายละเอียดของเป่ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน

เป่ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน	รายละเอียด
1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Specification at STC)	ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline)
- แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}), V	21.6
- กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}), A	2.03
- แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m), V	17.6
- กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_m), A	1.7
- กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m), W	30
- ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Width, Length, Height), m	0.335, 0.663, 0.03
- จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (N)	3 Panel
- พื้นที่รับรังสีของเป่ารับรังสี (Receiver area, A_r), m^2	0.6663
2. กล่องน้ำระบายความร้อนต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ชุด	
- ขนาดกล่องน้ำระบายความร้อน (Wide, Length, High), m	0.32, 0.65, 0.021
- ขนาดช่องน้ำระบายความร้อน (Wide, Length, High), m	0.32, 0.064, 0.02
- จำนวนช่องน้ำระบายความร้อน (N)	10
3. ป้อนหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน	
- ยี่ห้อปั๊มน้ำ	Wizz
- อัตราการไหลสูงสุด (LPM)	90
- ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการสูงสุด (W)	370
4. ถังเก็บน้ำร้อน	
- วัสดุ	พลาสติก
- ขนาดความจุ (L)	200

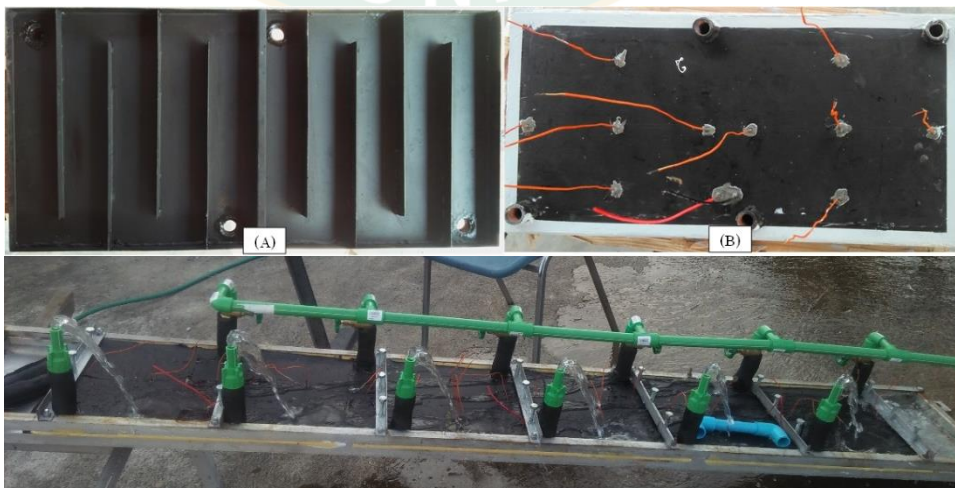
ตารางที่ 6 รายละเอียดของเป่ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน (ต่อ)

เป่ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน	รายละเอียด
5.ฉนวนกันความร้อน	
- ยี่ห้อ	Aeroflex
- ขนาดความหนา (mm)	15
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K -Value), W/m.K	0.03



Unit : (Cm)

ภาพที่ 41 ขนาดของกล่องน้ำระบายความร้อน



ภาพที่ 42 กล่องน้ำระบายความร้อนที่สร้างขึ้นจริง

การออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์

เนื่องจากรวบรวมแสงพาราโบลิกจำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อให้ด้านรับรังสีของพาราโบลิกตั้งฉากกับแนวรังสีตรงที่มาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งทุกๆ 1 ชั่วโมง จะมีการเปลี่ยนแปลงมุมของดวงอาทิตย์จากด้านทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกทุกๆ 15 องศา โดยในการออกแบบผู้วิจัยได้กำหนดคำสั่งในการควบคุมระยะเวลาในการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ ทุกๆ 4 นาที จะทำการหมุนแกนของพาราโบลิกไปทางทิศตะวันตก 1 องศาตลอดระยะเวลาทำการทดลอง โดยอุปกรณ์ที่ใช้งานแสดงดังภาพที่ 43 และรายละเอียดของระบบติดตามดวงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 43 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 1 แกน

ตารางที่ 7 รายละเอียดของระบบติดตามดวงอาทิตย์

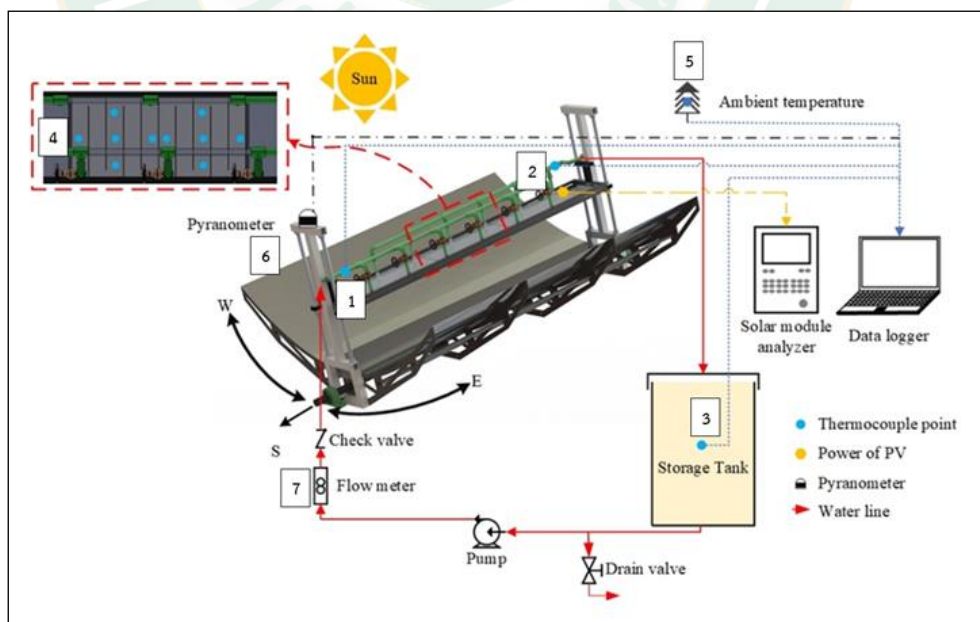
เข้ารับรังสีอาทิตย์และระบบระบายความร้อน	รายละเอียด
1. มอเตอร์	
- ชนิดของมอเตอร์	DC
- แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (V)	12
- กำลังไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด (W)	250
- ความเร็วรอบการหมุน (RPM)	300
2. เกียร์ Gear Box	
- ประเภทของเกียร์	Warm gear
- อัตราการทดรอบ	10:1
3. ชุดคำสั่งควบคุม Controller	
- Arduino	Uno R3
- Real Time Clock Module	DS1302

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยโดยในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การศึกษาระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน การศึกษาอัตราการการไหลของน้ำระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน และการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิกกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติ ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิกและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบปกติเป็นระบบเทียบบริเวณพื้นที่ทดลอง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อยู่ เลขที่ 63 หมู่ที่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งพิกัดของพื้นที่ คือ $18^{\circ}55'30.71''\text{N}$, $99^{\circ}01'28.81''\text{W}$ สูงจากระดับน้ำทะเล 341 เมตร โดยติดตั้งระบบทำมุมกับแนวระนาบ 18 องศา โดยหันพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของระบบไปทางทิศใต้

ขั้นตอนที่ 2 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและเครื่องมือบันทึกข้อมูล โดยจุดตรวจวัดของระบบ CPVT และจุดตรวจวัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PVN แสดงดังภาพที่ 44 และ 45 ตามลำดับ



ภาพที่ 44 จุดติดตั้งเครื่องมือวัดในการทดลองของระบบ CPVT

เมื่อจุดที่ 1 คือ อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเป้ารับรังสีอาทิตย์ (T_i)

- 2 คือ อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาออกจากเป่ารับรังสีอาทิตย์ (T_o)
- 3 คือ อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน (T_S)
- 4 คือ อุณหภูมิบริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{CPVT})
- 5 คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายในพื้นที่ทดลอง (T_a)
- 6 คือ ค่ารังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีรวมพาราโบลิก ($I_{T,CPVT}$)
- 7 คือ อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน (LPM)

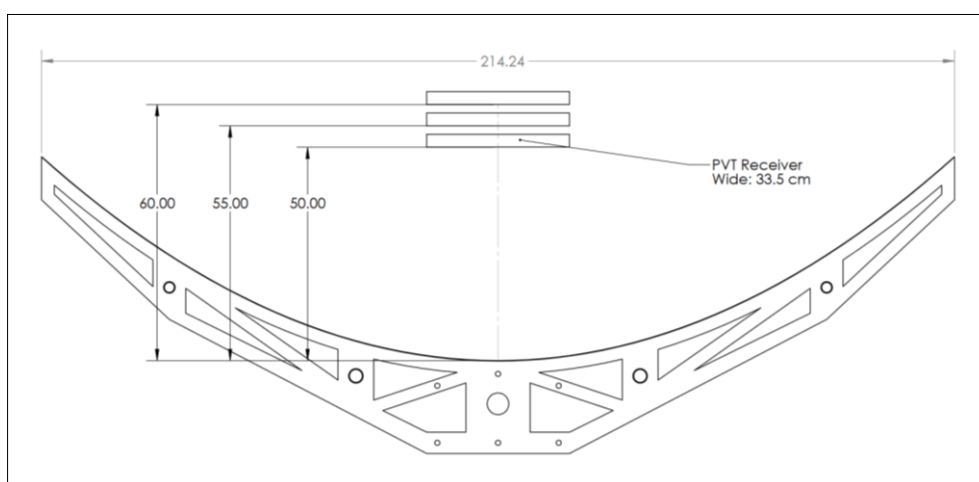


ภาพที่ 45 จุดติดตั้งเครื่องมือวัดในการทดลองของระบบ PVN

เมื่อจุดที่

- 1 คือ ค่ารังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ($I_{T,PVN}$)
- 2 คือ อุณหภูมิบริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{PVN})

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบระดับความสูงของเป่ารับรังสีที่แตกต่างกัน 3 ระดับ โดยการกำหนดระดับเป่ารับรังสีที่ระดับความสูงแตกต่างกันคือ 50 cm 55 cm และ 60 cm โดยรายละเอียดการปรับระดับความสูงของเป่ารับรังสีแสดงดังภาพที่ 46 ซึ่งในการทดสอบในขั้นตอนที่ 3 จะทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนไว้ที่ 10 LPM และปริมาณน้ำภายในถังระบายความร้อนเท่ากับ 200 L และมีการปรับด้านรับรังสีของรางพาราโบลิกให้ติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ 4 นาทีจากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตกภายใต้มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์



ภาพที่ 46 ลักษณะการปรับระดับเป่ารับรังสีอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 4 จากขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพรวมของระบบได้สูงที่สุดภายใต้การวิเคราะห์ในรูปแบบพลังงานสุทธิของระบบ จึงนำระดับความสูงของเป่ารับรังสีดังกล่าวมาทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM

ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบและเก็บข้อมูลในช่วงเวลาประมาณ 9:00 น. – 16:00 น. ภายใต้สภาวะแวดล้อมของจังหวัดเชียงใหม่ โดยตั้งเวลาเครื่องบันทึกข้อมูลให้ทำการบันทึกข้อมูลอัตโนมัติทุกๆ 1 นาที

ขั้นตอนที่ 6 การวิเคราะห์ข้อมูล โดยทำการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบการทดสอบ คือ 1.การทดสอบระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน และ 2.การทดสอบอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน มาวิเคราะห์หาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) จากสมการที่ 24 และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติ (PVN)

2. วิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งร่วมกับบรรจรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) จากสมการที่ 25
3. วิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบรรจรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) จากสมการที่ 26 และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบตลอดวันทำการทดลองภายใต้รูปแบบพลังงานสุทธิของระบบ จากสมการที่ 28
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ความร้อนและประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบรรจรวมแสงพาราโบลิกที่ทำการติดตั้งระดับความสูงของเป้ารับรังสีแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55 cm และ 60 cm
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ความร้อนและประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบรรจรวมแสงพาราโบลิกที่ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน 3 คือ 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับบรรจรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) และแบบไม่ใช้บรรจรวมแสงพาราโบลิกหรือแบบติดตั้งแบบปกติ (PVN)
7. วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบจากสมการที่ 29

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลสำหรับเก็บข้อมูลจากการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อาทิเช่น เครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าและขาออกกล่องระบายความร้อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำที่เก็บในถังน้ำร้อน อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 8 รายละเอียดเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือวัด	ภาพประกอบ	รายละเอียด
เครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar Radiation sensor)		Apogee รุ่น: SP-110 คุณสมบัติ: - Output responsivity : 0.2 mV / W/m ² Sensitivity - Calibrated to exactly 5.00 W/m ² /mV

ตารางที่ 7 รายละเอียดเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล (ต่อ)

เครื่องมือวัด	ภาพประกอบ	รายละเอียด
เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow Meter)		Treatton รุ่น: Z-3004 คุณสมบัติ: - ช่วงอัตราการไหลที่วัดได้ 4 - 60 LPM - Working Pressure: 6 Bar - Working Temperature 4 -80 °C
เครื่องมือวิเคราะห์พลังงาน แสงอาทิตย์ (Datalogger Solar Analyzer)		PROVA รุ่น: 200A คุณสมบัติ: - แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) - กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_m) - แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) - กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) - แสดงกราฟ I-V curve - แสดงประสิทธิภาพของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ (η_{PV}) - สามารถบันทึกข้อมูลการวัดได้
เครื่องมือบันทึกข้อมูล (Data Logger)		Adam รุ่น: 5000L/TCP คุณสมบัติ: - แบบ 21 Input thermocouple - 4 I/O slots
เครื่องมือวัดแรงดันและ กระแสไฟฟ้า (Digital Clamp Meter)		UNI -T รุ่น: UT203 คุณสมบัติ: - แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและสลับ (DC/AC Volt) - กระแสไฟฟ้ากระแสตรงและสลับ

ตารางที่ 7 รายละเอียดเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล (ต่อ)

เครื่องมือวัด	ภาพประกอบ	รายละเอียด
เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermometer)		Lutron รุ่น: TM-1947SD คุณสมบัติ: - แบบจำนวน 4 ช่อง - ใช้ได้กับสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด (J, K, E, T, R,S,Pt100) - สามารถบันทึกข้อมูลการวัดได้
สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)		ชนิด: Type K คุณสมบัติ: - ขนาดสาย: 4/0.32mm x 2 - สามารถวัดอุณหภูมิได้: -20 – 90 °C
เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermometer)		FLIR รุ่น: TG165/TG167 คุณสมบัติ: - ช่วงวัดอุณหภูมิ: -25 -380 °C - Resolution: 0.1 °C

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

4.1 ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) ที่ติดตั้งระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน

4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

4.3 ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติ (PVN)

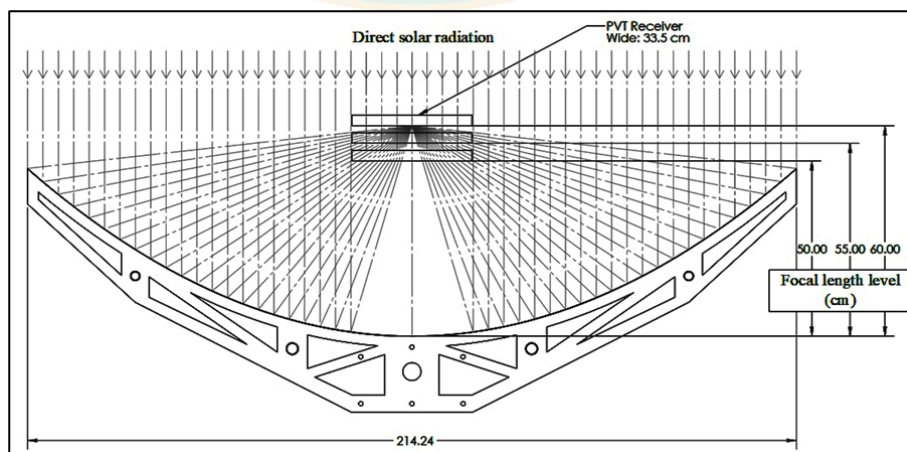
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี

4.5 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบ

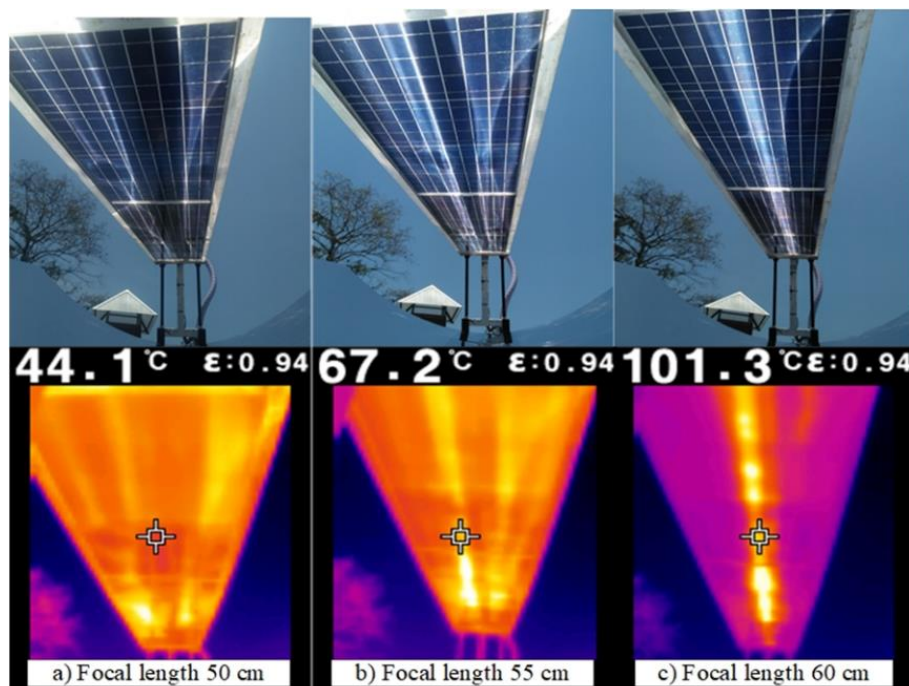
4.1 ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกันที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT)

เนื่องจากการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิกที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเป้ารับรังสีอาทิตย์ จัดเป็นเป้ารับรังสีที่จัดอยู่ในประเภทแบบแผ่นเรียบ (Flat receiver) ซึ่งลักษณะการรวมรังสีอาทิตย์ของรางพาราโบลิกที่ระดับความสูงเดียวกันกับจุดโฟกัสของรางรวมแสงพาราโบลิก จะมีลักษณะรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนไปยังเป้ารับรังสีอาทิตย์เป็นแนวเส้นลำแสงขนาดเล็ก ส่งผลให้รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบไปยังเป้ารับรังสีถูกระจุกเฉพาะพื้นที่ตรงกลางของเป้ารับรังสีอาทิตย์ จึงส่งผลให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาในเงื่อนไขการทดลองที่หนึ่งเกี่ยวกับการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ในระดับความสูงการติดตั้งที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55cm และ 60 cm ภายใต้การควบคุมปริมาณของน้ำระบายความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน 200 L และควบคุมอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่เข้าสู่เป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 10 LPM ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นและเลือกผลการศึกษาที่ระดับเป้ารับรังสีที่ให้ค่าประสิทธิภาพรวมของระบบสูงที่สุดเพื่อศึกษาในเงื่อนไขถัดไป ซึ่งผลการศึกษา ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกันแสดงในหัวข้อดังต่อไปนี้

จากการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ลักษณะการตกกระทบของรังสีอาทิตย์บริเวณเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน ผลการศึกษาในภาพที่ 48 แสดงถึงภาพถ่ายทางความร้อนและลักษณะแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำหน้าทีเป็นเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งบนรางรวมแสงพาราโบลาที่ระดับความสูงแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55 cm และ 60 cm ณ เวลาเที่ยงสุริยะของพื้นที่การทดลอง จะสังเกตเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ ที่ 60 cm บริเวณพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีรังสีอาทิตย์ตกกระทบมากที่สุด คิดเป็น 91.04 % ของพื้นที่ทั้งหมดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 60 cm เป็นระดับความสูงเดียวกันกับจุดโฟกัสของรางรวมแสงพาราโบลาจึงส่งผลให้เกิดลักษณะการกระจุกของแสงอาทิตย์เฉพาะบริเวณพื้นที่ตรงกลางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รองลงมาคือที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm และ 55 cm พื้นที่ที่ไม่มีรังสีอาทิตย์ตกกระทบเท่ากับ 46.28% และ 37.31% ตามลำดับ โดยที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีที่ 50 cm และ 55 cm บริเวณพื้นที่ตรงกลางเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีรังสีอาทิตย์ตกกระทบเกิดจากการบดบังของเป้ารับรังสีที่ตกกระทบลงบนพื้นที่สะท้อนรังสีของพาราโบลาส่งผลให้พื้นที่สะท้อนรังสีอาทิตย์บริเวณดังกล่าวเกิดเงาและไม่สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังเป้ารับรังสีอาทิตย์ได้ และเมื่อพิจารณาการสูญเสียพลังงานแสงอาทิตย์จากการลดระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์จากภาพที่ 47 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm เกิดการสูญเสียพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุดโดยคิดเป็น 18% ของพื้นที่สะท้อนรังสีอาทิตย์ทั้งหมดของรางรวมแสงพาราโบลา รองลงมาคือที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm เกิดการสูญเสียพลังงานแสงอาทิตย์คิดเป็น 8% ของพื้นที่สะท้อนรังสีอาทิตย์ทั้งหมดของรางรวมแสงพาราโบลา และที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 60 cm ไม่เกิดการสูญเสียพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากที่ระดับดังกล่าวเป็นระดับเดียวกันกับจุดโฟกัสของรางรวมแสงพาราโบลาจึงส่งผลให้แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่รับแสงของรางพาราโบลาถูกสะท้อนไปยังเป้ารับรังสีอาทิตย์ทั้งหมด

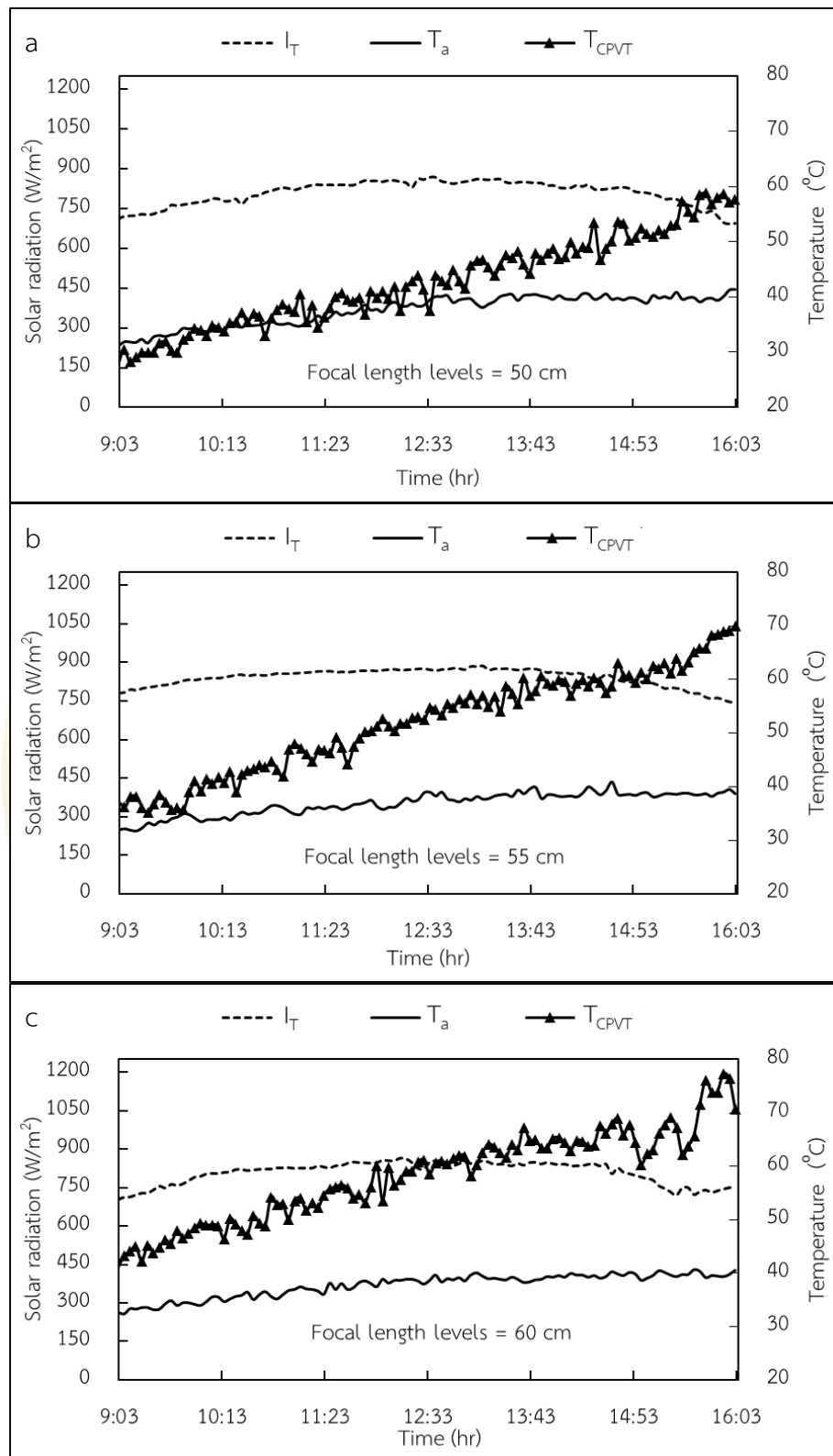


ภาพที่ 47 การสะท้อนรังสีตรงของรางรวมแสงพาราโบลาที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีแตกต่างกัน



ภาพที่ 48 ลักษณะรังสีอาทิตย์และภาพถ่ายทางความร้อนที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ระดับความสูงแตกต่างกัน

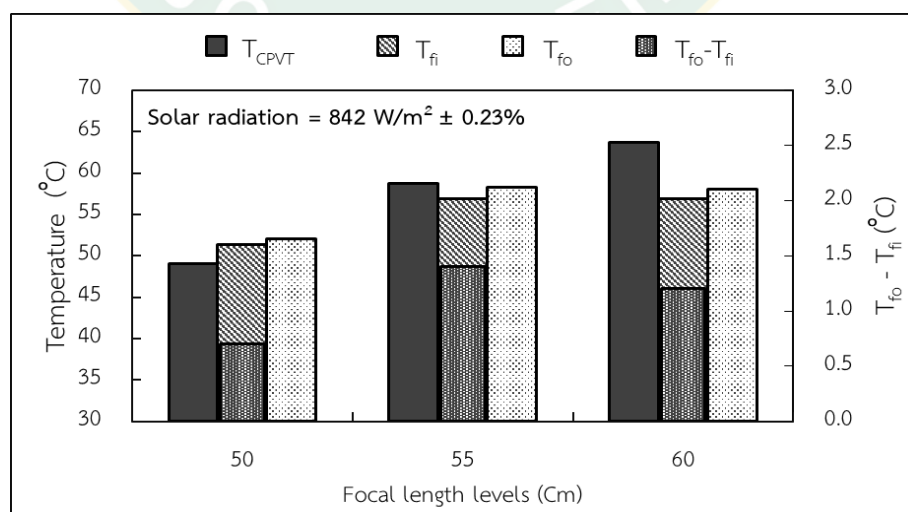
ภาพที่ 49 แสดงผลการทดลองการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ในแต่ละวันทำการทดลองตั้งแต่เวลา 9:00 น.- 16:00 น. พบว่ามีค่ารังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง 690 W/m^2 – 890 W/m^2 และมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $30 \text{ }^\circ\text{C}$ – $41 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยผลรวมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางรวมแสงพาราโบลาที่มีการปรับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ 50 cm 55 cm และ 60 cm มีค่าเท่ากับ 105.899 MJ/Day 110.257 MJ/Day และ 105.777 MJ/Day ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง 60 cm มีอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่าง $41 \text{ }^\circ\text{C}$ - $78 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งสูงกว่าที่ระดับอื่นๆ เนื่องจากที่ระดับดังกล่าวเป็นระดับเดียวกันกับจุดโฟกัสของรางรวมแสงพาราโบลา และรองลงมาคือระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm และ 50 cm มีอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่าง $35 \text{ }^\circ\text{C}$ - $70 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $27 \text{ }^\circ\text{C}$ – $59 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ เนื่องจากการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ป้อนให้กับเป้ารับรังสีอาทิตย์มีลักษณะแตกต่างกัน จึงจะส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่ได้รับจากระบบแตกต่างกันตามไปด้วย



ภาพที่ 49 รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางพาราโบลิกตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้ง
 เข้ารับรังสีที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

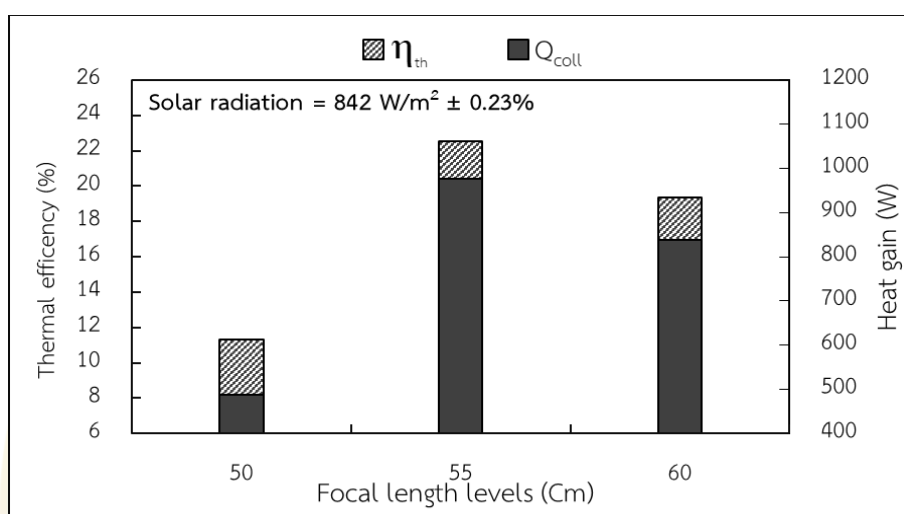
4.1.1 สมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) ที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน

เนื่องจากระบบเป็นระบบที่สามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและความร้อน โดยระบบมีการติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับเป้ารับรังสีอาทิตย์ ดังนั้นพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้มีเพียงแค่พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีอีกหนึ่งพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปแบบของน้ำร้อนที่ได้รับจากการระบายความร้อนให้กับเป้ารับรังสีอาทิตย์และถูกเก็บไว้ภายในถังเก็บน้ำร้อน โดยเมื่อวิเคราะห์ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกจากเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ทำการติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm 55 cm และ 60 cm ภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกันที่ 842 W/m^2 และควบคุมอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 10 LPM โดยมีปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน 200 L จากภาพที่ 50 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm ให้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและออกที่สูงที่สุด เท่ากับ $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ รองลงมาคือที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีที่ 60 cm และ 50 cm ผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm สามารถให้ผลต่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าและออกจากเป้ารับรังสีอาทิตย์ได้สูงที่สุด เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 48 จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ดังกล่าวมีการกระจายตัวของรังสีอาทิตย์มากที่สุดคิดเป็น 62.68 % ของพื้นที่ทั้งหมด นั่นหมายความว่าพื้นที่ที่ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ก็เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ดังกล่าวสามารถให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย



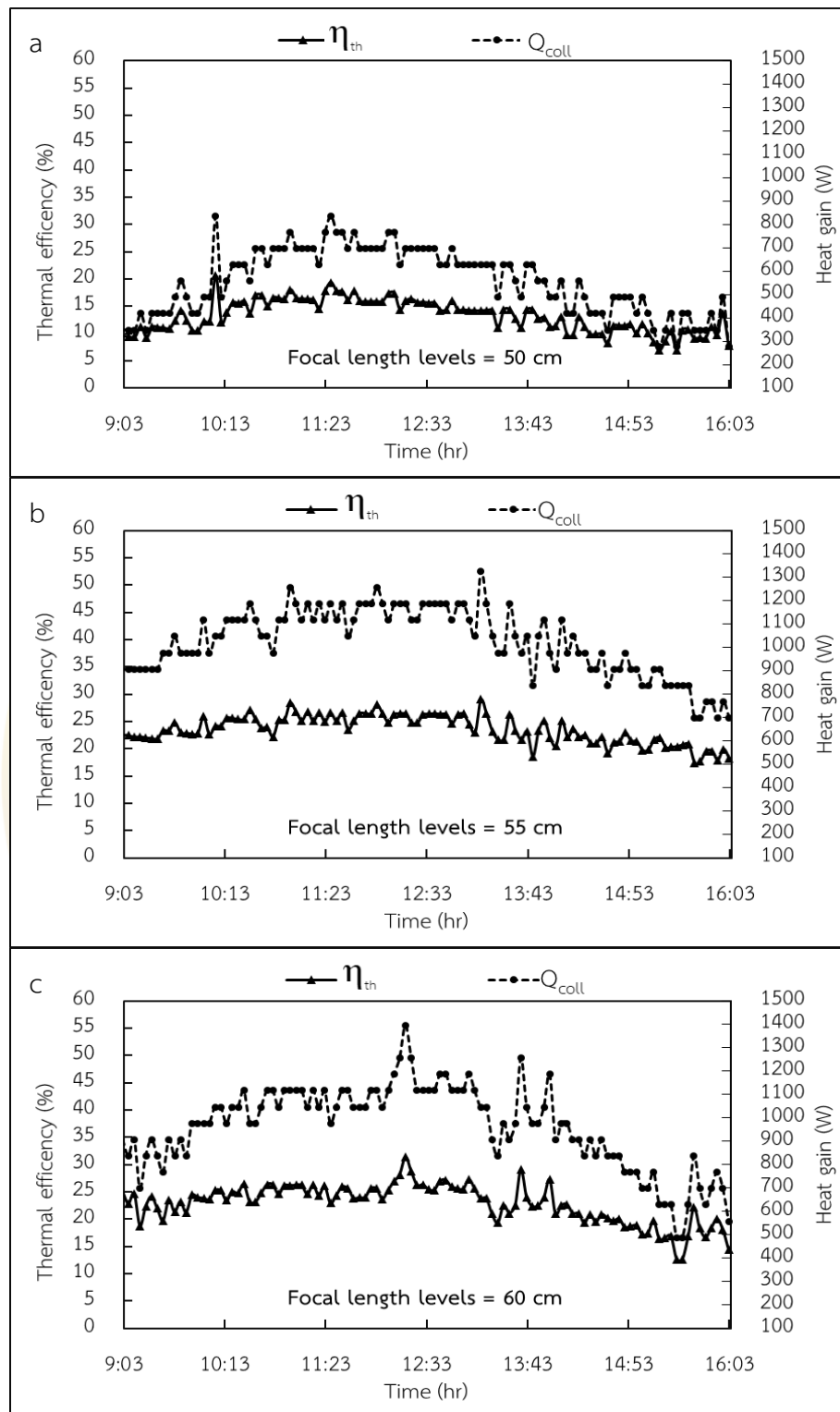
ภาพที่ 50 ผลต่างอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนขาเข้าและขาออกจากเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

จากภาพที่ 51 พบว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm สามารถให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนได้สูงที่สุด เท่ากับ 976.97 W และ 27.29 % ตามลำดับ รองลงมาคือที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 60 cm และ 50 cm ที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 837.4 W และ 488.48 W คิดเป็นประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ 19.36 % และ 11.30 % ตามลำดับ



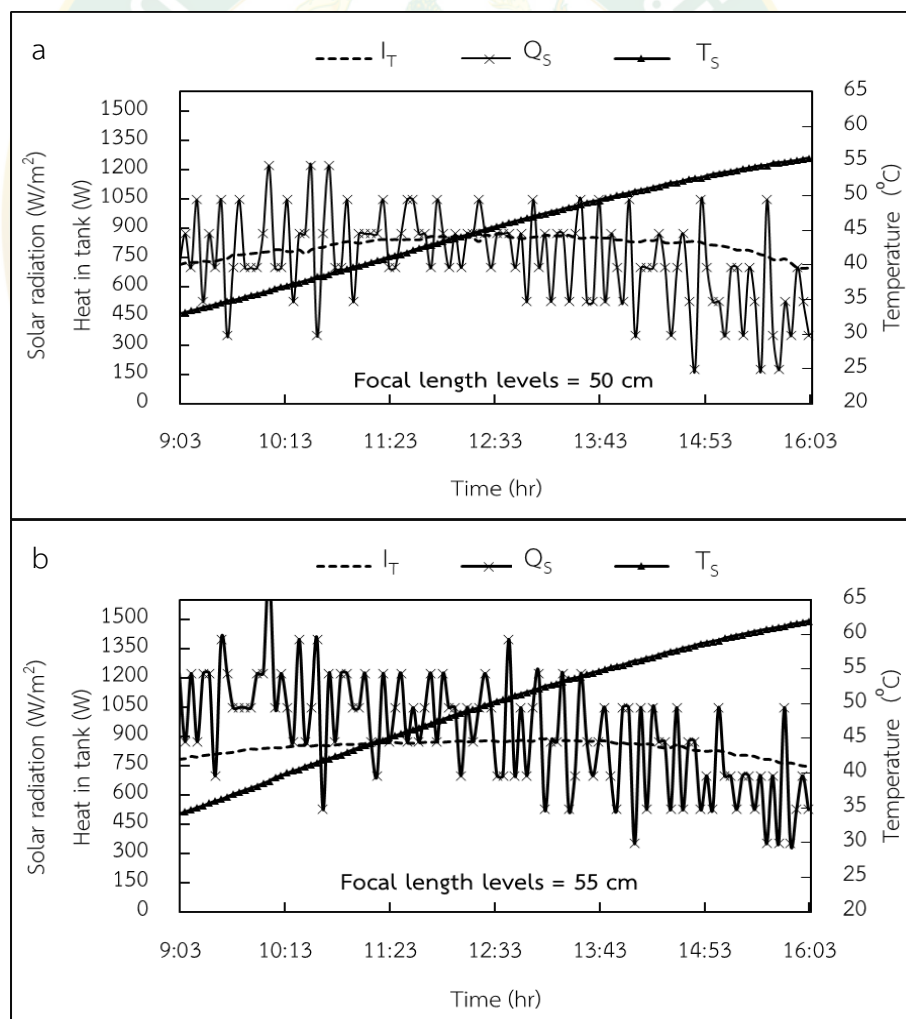
ภาพที่ 51 อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

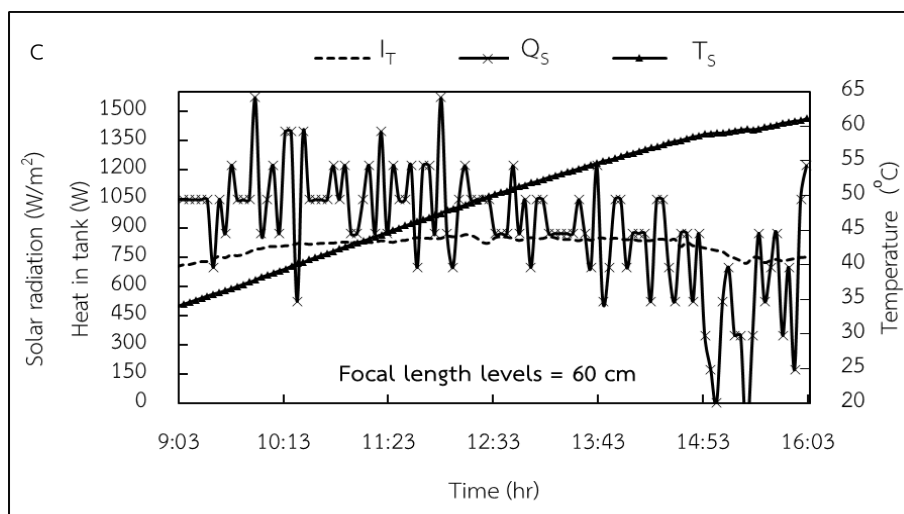
โดยอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนตลอดวันทำการทดลองจากระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำระบายความที่ 10 LPM แสดงดังภาพที่ 52 จากภาพจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนเกือบคงที่ตลอดทั้งวัน เนื่องจากระบบมีการปรับพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของรางรวมแสงพาราโบลาติดตามดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยตลอดทั้งวันทำการทดลองของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 50 cm 55 cm และ 60 cm เท่ากับ 550.02 W 1,016.30 W และ 954.12W ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 15.99 % 28.45 % และ 27.81 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยตลอดทั้งวันทำการทดลองของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับ 55 cm ได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับระดับความสูงของเป้ารับรังสีที่ 50 cm และ 60 cm โดยที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm สามารถให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด



ภาพที่ 52 ประสิทธิภาพทางความร้อนตลอดวันทำการทดลองของระบบที่ติดตั้งระดับความสูงของเป้า
รับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน

ปริมาณความร้อนที่ดูดซับจากพลังงานแสงอาทิตย์และถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนปริมาณน้ำ 200L ที่เกิดขึ้นของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกันตลอดทั้งวันทำการทดลอง โดยเมื่อเวลา 16:00 น. สิ้นสุดการทดลองในแต่ละวัน จากภาพที่ 53 พบว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนได้สูงที่สุดเท่ากับ 61.85°C และมีปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 23.363 MJ/Day รองลงมาคือที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 60 cm สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนได้เท่ากับ 61.15°C ปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 23.029 MJ/Day และสุดท้ายคือที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนได้เท่ากับ 55.40°C และมีปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 18.883 MJ/Day

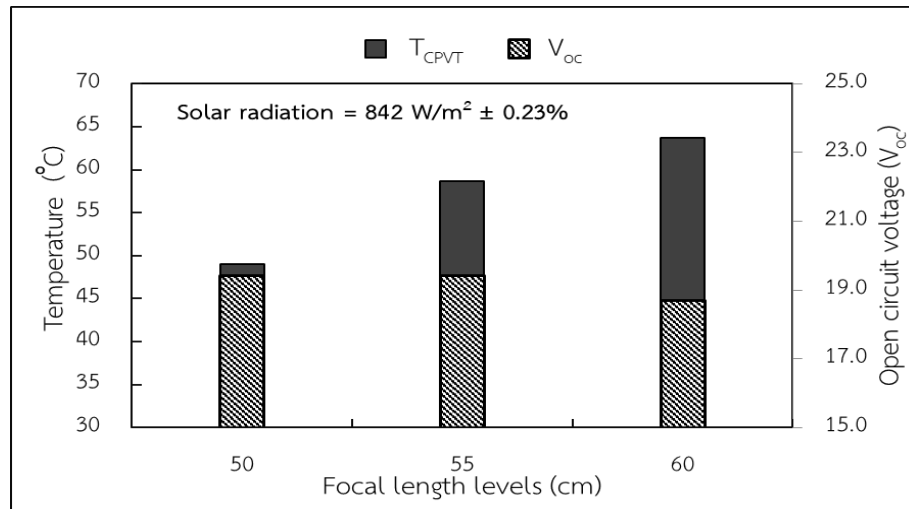




ภาพที่ 53 อัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับภายในถังเก็บน้ำร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน

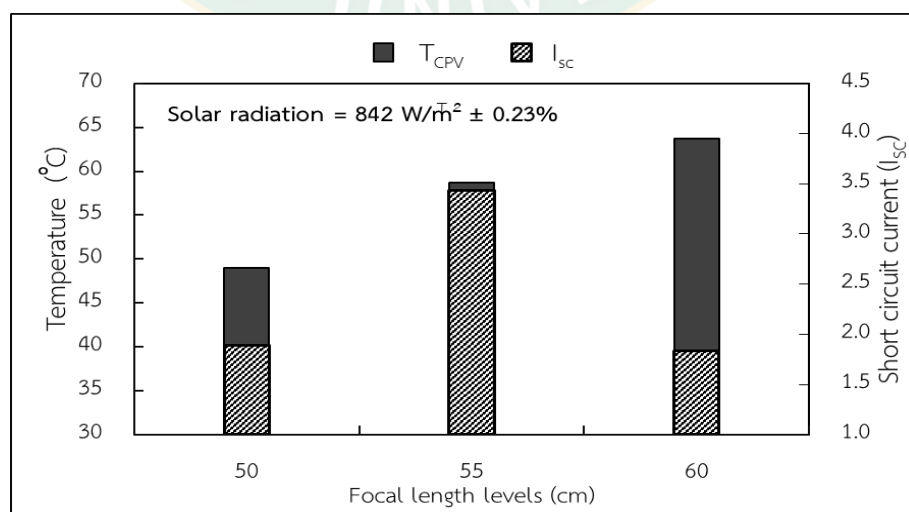
4.1.2 สมรรถนะทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ รังรวมแสงพาราโบลา (CPVT) ที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน

ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิเฉลี่ยของเป้ารับรังสีที่ติดตั้งที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55 cm และ 60 cm ภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกันที่ 842 W/m^2 จากภาพที่ 54 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 60 cm ที่เป็นระดับความสูงเดียวกันกับจุดโฟกัสของรังรวมแสงพาราโบลา มีอุณหภูมิเฉลี่ยของเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าที่ระดับอื่นๆ เท่ากับ $63.7 \text{ }^\circ\text{C}$ รองลงมาคือที่ระดับความสูง 55 cm และ 50 cm มีอุณหภูมิเฉลี่ยของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ $58.7 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $49 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่ได้รับจากระบบแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีที่ 60 cm สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดได้น้อยกว่าระดับอื่นๆ คือ 18.7 V เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้สูญเสียมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และแน่นอนว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm ที่มีอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าที่ระดับเป้ารับรังสีอื่นๆ สามารถให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดได้สูงที่สุดเท่ากับ 19.42 V และที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีที่ 55 cm สามารถให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดได้เท่ากับ 19.41 V



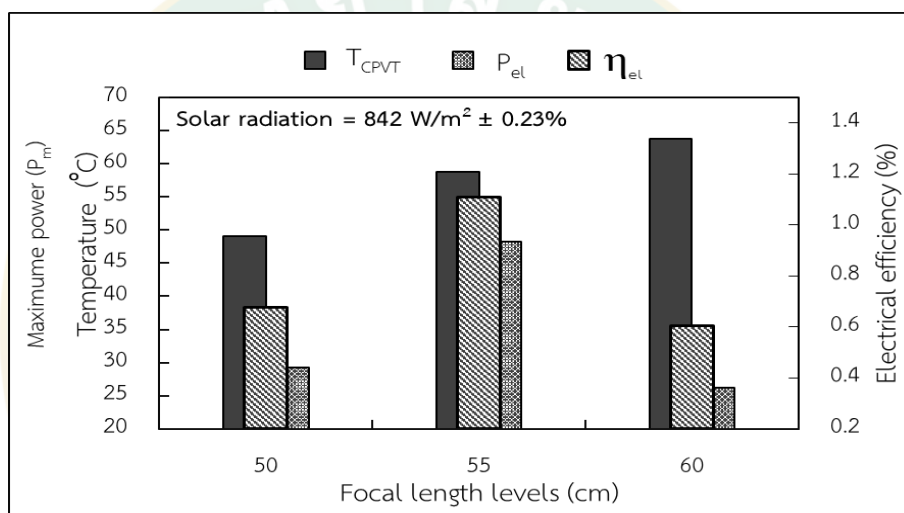
ภาพที่ 54 แรงดันไฟฟ้าวงจรมืดของระบบที่ติดตั้งเพื่ารับรังสีที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

และเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ระบบสามารถผลิตได้ที่ระดับความสูงเพื่ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน จากภาพที่ 55 จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงของเพื่ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm สามารถให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้สูงที่สุด เท่ากับ 3.43 A รองลงมาคือที่ระดับความสูงเพื่ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm และ 60 cm มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 1.88 A และ 1.83 A ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 47 และภาพที่ 48 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงของเพื่ารับรังสีที่ระดับความสูง 55 cm มีการกระจายของแสงอาทิตย์ที่สะท้อนมาจากพาราโบลิกที่ตกกระทบเพื่ารับรังสีอาทิตย์มากกว่าที่ระดับความสูงเพื่ารับรังสี 50 cm และ 60 cm จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการกระจายตัวของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้นจะส่งผลให้ได้รับกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



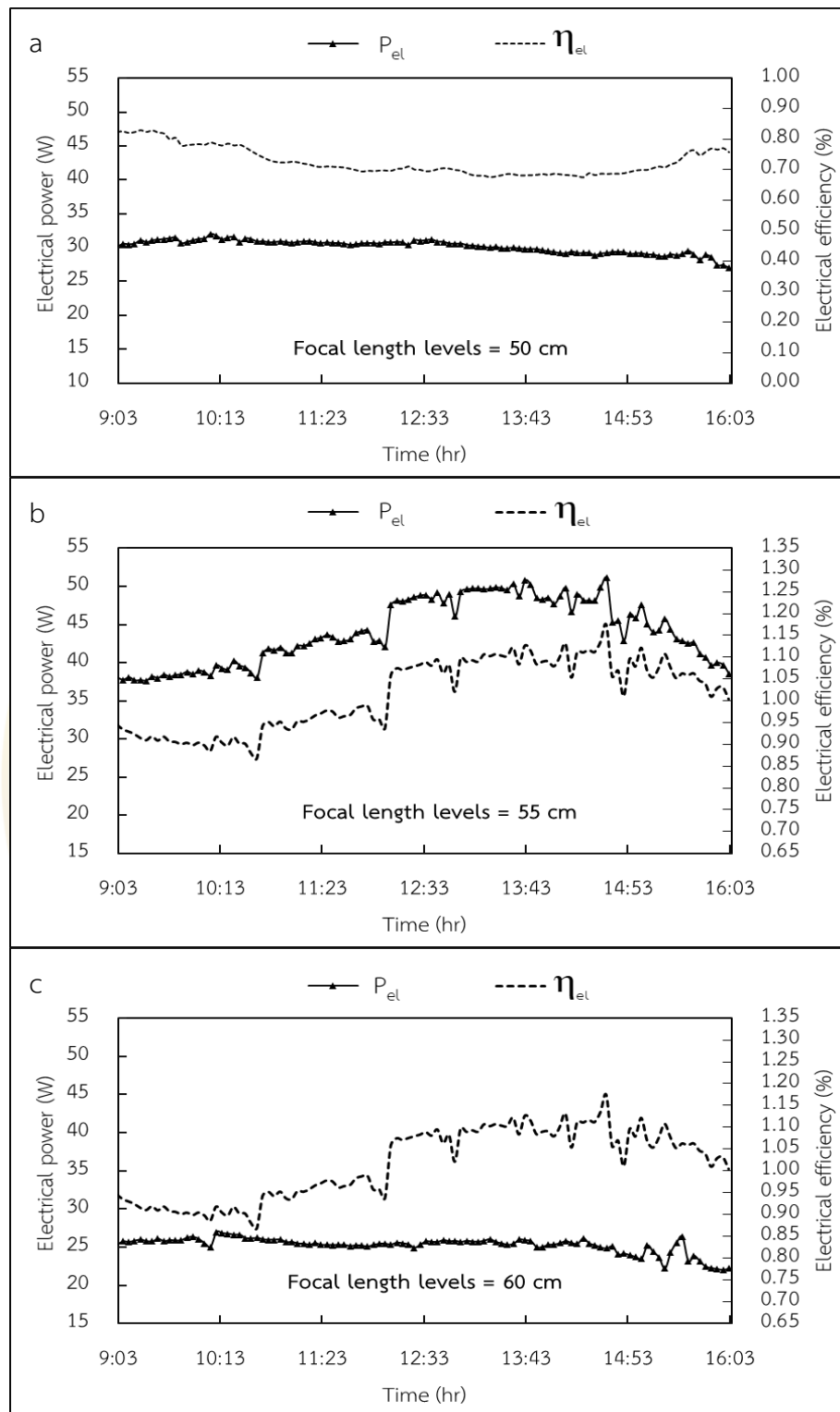
ภาพที่ 55 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบที่ติดตั้งเพื่ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้รับจากระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55 cm และ 60 cm ภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของ รังรวมแสงพาราโบลิก เท่ากับ 842 W/m^2 จากภาพที่ 56 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบที่ ติดตั้งระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 50 cm 55 cm และ 60 cm มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 29.21 W 48.20 W และ 26.17 W ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการ ปรับระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง 55 cm เมื่อเทียบกับระดับความสูง 60 cm สามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 22.03 W หรือ คิดเป็นร้อยละของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นถึง 54.3 %



ภาพที่ 56 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับ ความสูงแตกต่างกัน

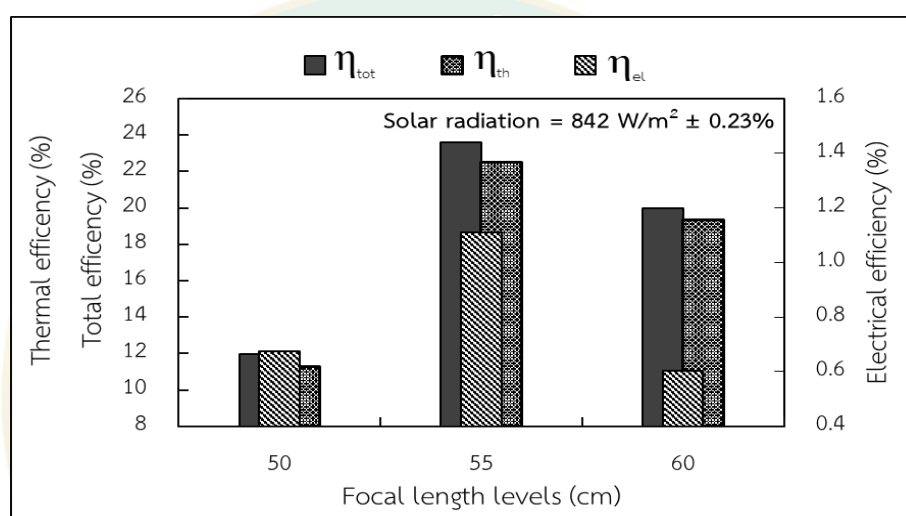
กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ได้รับจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมกับรังรวมแสงพาราโบลิกที่ระดับความสูงแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55 cm และ 60 cm ตลอดวันทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 57 จากภาพจะว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดทั้งวันทำ การทดลองที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ระดับ เท่ากับ 30.05 W 43.79 W และ 25.20 W และมีปริมาณพลังงานไฟฟ้าสะสมตลอดวันทำการทดลองเท่ากับ 0.767 MJ/Day 1.120 MJ/Day และ 0.644 MJ/Day ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันทำการ ทดลองเท่ากับ 0.88% 1.23 % และ 0.74 % ที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ 50 cm 55 cm และ 60 cm ตามลำดับ



ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองของระบบที่ติดตั้งเป้า
รับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

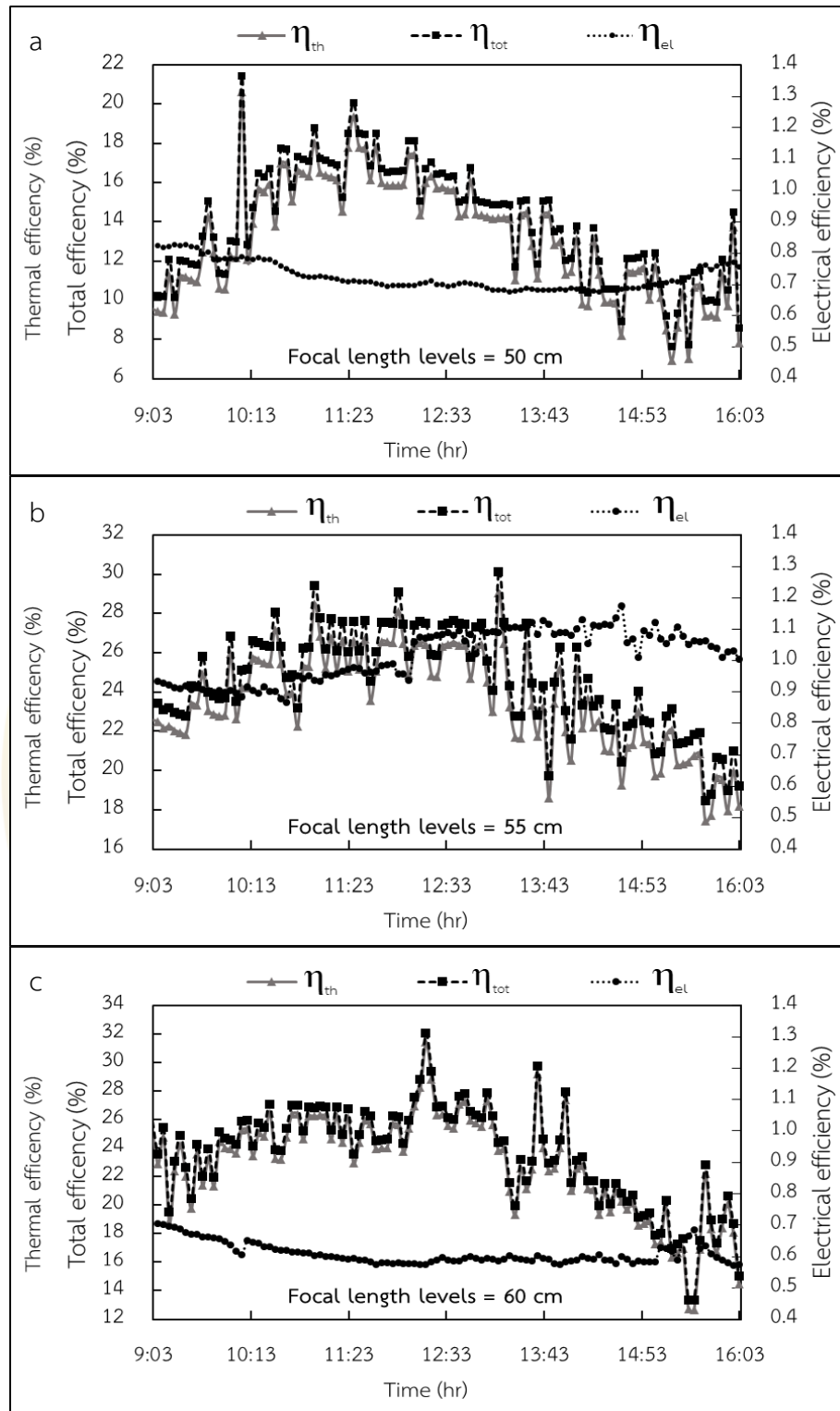
4.1.3 สมรรถนะรวมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) ที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน

เนื่องจากระบบสามารถผลิตทั้งไฟฟ้าและมีการดึงเอาความร้อนที่สะสมภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาใช้ประโยชน์ในรูปของน้ำร้อน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมทั้งทางด้านไฟฟ้าและความร้อนของระบบเพื่อให้ได้ทราบถึงสมรรถนะรวมของระบบที่มีการติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50 cm 55 cm และ 60 cm



ภาพที่ 58 ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบจากสมการที่ 26 ในภาพที่ 58 แสดงประสิทธิภาพรวมของระบบที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีแตกต่างกัน ภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางรวมแสงพาราโบลาใกล้เคียงกันที่ 842 W/m^2 โดยค่าประสิทธิภาพรวมที่ได้รับจากระบบที่มีการติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง 50 cm 55 cm และ 60 cm เท่ากับ 14.52 % 28.64 % และ 24.19 % ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของระบบได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับที่ระดับเป้ารับรังสี 50 cm และ 60 cm คิดเป็นค่าความต่างทางประสิทธิภาพเท่ากับ 14.12 % และ 4.45 % ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพรวมของระบบเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 59 จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm สามารถให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเฉลี่ยตลอดวันได้สูงที่สุดเท่ากับ 29.68 % รองลงมาคือที่ระดับเป้ารับรังสีอาทิตย์ 60 cm และ 50 cm เท่ากับ 28.55 % และ 16.87 % ตามลำดับ



ภาพที่ 59 ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ได้รับตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามท้ายที่สุดแล้วในการพิจารณาการเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิค เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการเปรียบเทียบผลการทดลอง รูปแบบในการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบพลังงานสุทธิต่ที่ได้รับจากระบบถือได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากในพื้นที่การทดลองมีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งคือ ประสิทธิภาพในเชิงปริมาณของพลังงานที่ได้รับจากระบบ และรูปแบบที่สองคือประสิทธิภาพในเชิงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับจากระบบ โดยประสิทธิภาพในเชิงปริมาณในรูปแบบที่หนึ่งนั้นจะทำการวิเคราะห์ภายใต้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของระบบเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และในรูปแบบที่สองเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเชิงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองภายใต้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในรูปแบบเอ็กเซอร์ยี โดยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบในเชิงปริมาณพลังงานสุทธิตลอดวันทำการทดลอง

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสุทธิของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

รายละเอียด	ระดับความสูงเป้ารับรังสี (cm)		
	50	55	60
E_{PV} (MJ/day)	0.767	1.120	0.644
Q_s (MJ/day)	18.883	23.363	23.029
T_s ($^{\circ}$ C)	55.40	61.85	61.15
$W_{TRACKING}$	0.21455	0.22084	0.22713
E_{Net} (MJ/day)	19.435	24.262	23.446
E_{Sun} (MJ/day)	105.899	110.257	105.777
η_{sys} (%)	18.353	22.005	22.165

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 8 พบว่า ประสิทธิภาพรวมเชิงปริมาณของพลังงานสุทธิตลอดทั้งวันของระบบที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 50 cm 55 cm และ 60 cm มีค่าเท่ากับ 18.353 % 22.005 % และ 22.165 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 60 cm สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบในเชิงปริมาณของพลังงานสุทธิของระบบได้สูงที่สุด แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตลอดวันทำ

การทดลอง จากสมการที่ 19-23 ในตารางที่ 9 พบว่า ประสิทธิภาพรวมเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตลอดทั้งวันของระบบที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตั้งสูงสุด เท่ากับ 1.685 % รองลงมาคือที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 60 cm และ 50 cm มีประสิทธิภาพของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิ เท่ากับ 1.174 % และ 0.975 % ตามลำดับ

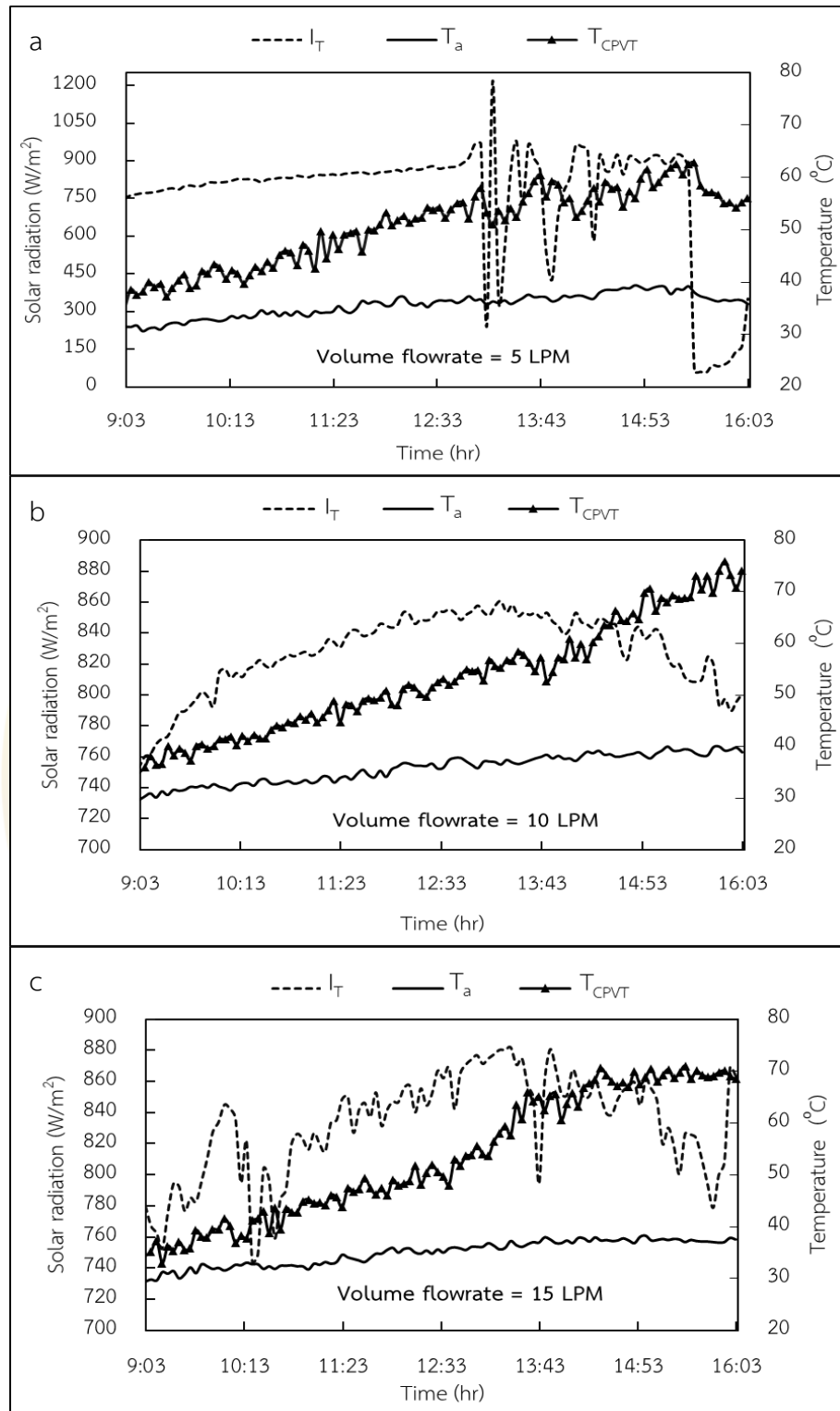
ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบเอกเซอร์ยีสุทธิของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

รายละเอียด	ระดับความสูงเป้ารับรังสี (cm)		
	50	55	60
$\dot{E}x_{el}$ (MJ/day)	0.767	1.120	0.644
$\dot{E}x_{qs}$ (MJ/day)	0.406	0.825	0.736
T_s (°C)	55.40	61.85	61.15
$W_{TRACKING}$ (MJ/day)	0.21455	0.22084	0.22713
$\dot{E}x_{net}$ (MJ/day)	0.958	1.725	1.153
$\dot{E}x_{sun}$ (MJ/day)	98.294	102.358	98.179
$\dot{E}x_{sys}$ (%)	0.975	1.685	1.174

จากผลการทดลองในเงื่อนไขแรกแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบตลอดวันทำการทดลองภายใต้รูปแบบของการวิเคราะห์คุณภาพพลังงานสุทธิของระบบสูงกว่าที่ระดับเป้ารับรังสีอื่นๆ จึงได้นำเงื่อนไขของการปรับระดับความสูงเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm เป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษาเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่แตกต่างกัน 3 อัตราการไหลต่อไป

4.2 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบระบบผลิตไฟฟ้า และน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT)

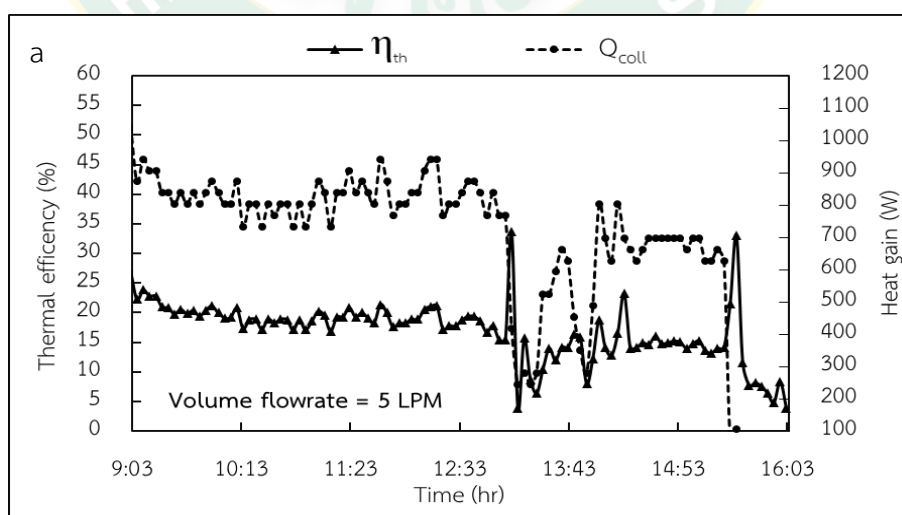
จากการทดลองในเงื่อนไขที่หนึ่งเป็นการทดลองการปรับระดับความสูงเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ จากผลการทดลองพบว่าที่ระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับ 55 cm สามารถให้สมรรถนะรวมของระบบตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ภายใต้คุณภาพของพลังงานได้สูงที่สุด โดยในส่วนของทดลองในเงื่อนไขที่สองจะเป็นการนำระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ดังกล่าวมาทำการศึกษาสมรรถนะที่ได้รับจากระบบที่ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล คือ 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM โดยในการทดลองใช้ปริมาณน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนปริมาณ 200 L ทำการทดลองในช่วงเดือนเมษายน ระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 9:00 น. - 16:00 น. โดยทำการหันด้านรับรังสีอาทิตย์ของรางพาราโบลิกไปทางทิศใต้และแกนของของรางพาราโบลิกทำมุมกับพื้นระนาบ 18.9 องศาตามละติจูดของพื้นที่การทดลอง และมีการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำการปรับพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของรางพาราโบลิกจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ทุกๆ 4 นาที จากผลการทดลองในภาพที่ 60 พบว่าช่วงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของทุกอัตราการไหลในวันทำการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง $50 \text{ W/m}^2 - 1,220 \text{ W/m}^2$ และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อมเท่ากับ $29^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ โดยมีผลรวมพลังงานแสงอาทิตย์รายวันที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของรางพาราโบลิกที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM มีค่าเท่ากับ 99.87 MJ/day 108.35 MJ/day และ 108.93 MJ/day ตามลำดับ ซึ่งผลจากการปรับอัตราการไหลในแต่ละอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นเป่ารับรังสีได้แตกต่างกัน โดยที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 15 LPM สามารถลดอุณหภูมิได้มากที่สุด รองลงมาคือที่อัตราการไหล 10 LPM และ 5 LPM ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของความสามารถในการระบายความร้อนที่แตกต่างกันข้างต้น จะส่งผลให้ศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนของระบบแตกต่างกันไปด้วย

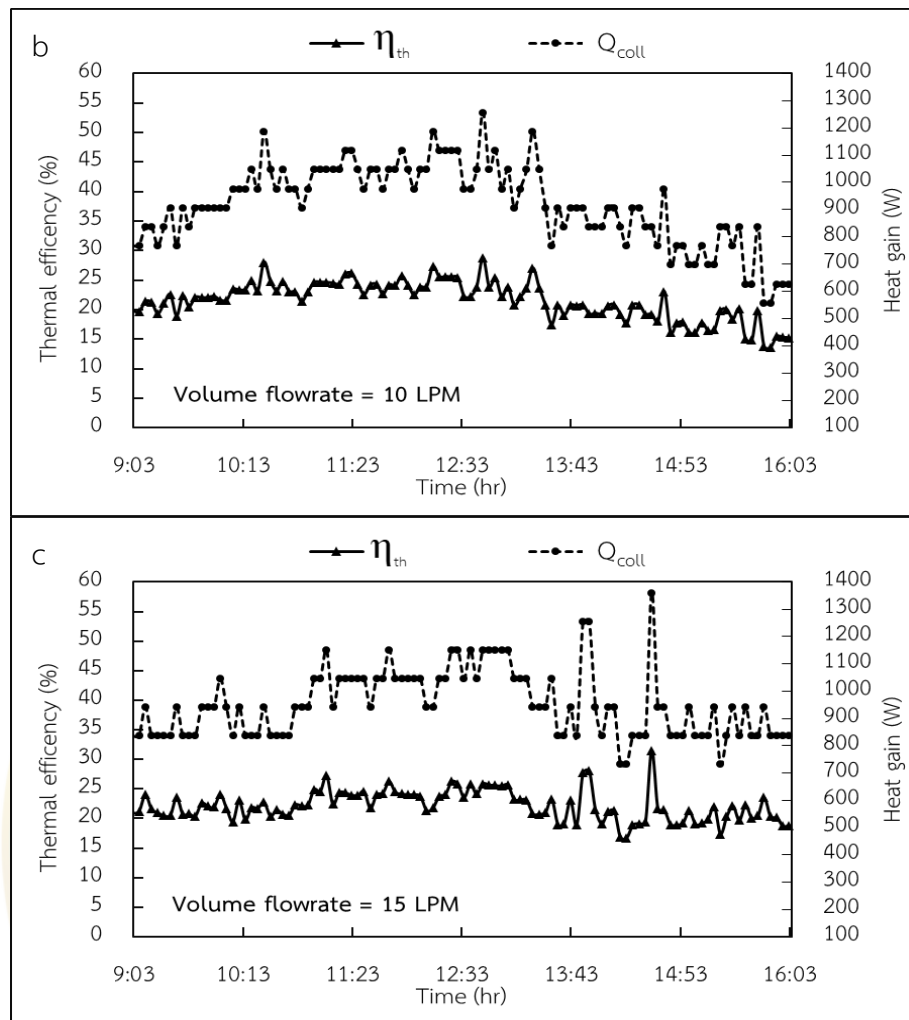


ภาพที่ 60 รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางพาราโบลิกตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้ง
 ใ้รับรังสีที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

4.2.1. สมรรถนะทางความร้อนของระบบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

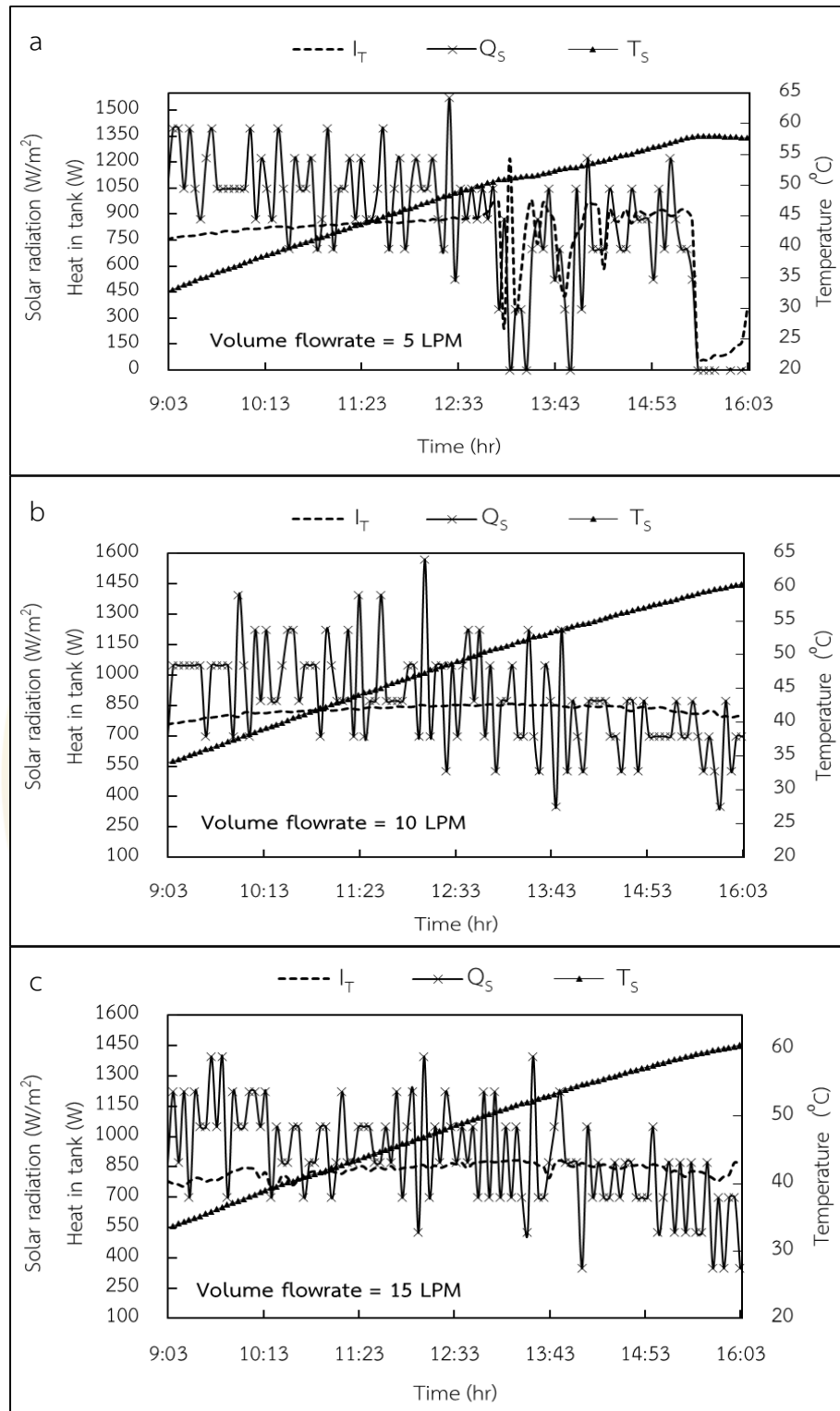
เนื่องจากระบบมีการนำน้ำมาใช้ในการระบายความร้อนหรือลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นเป้ารับรังสีอาทิตย์ของระบบซึ่งหลังจากน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิสูง จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นซึ่งน้ำร้อนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นในการพิจารณาพลังงานที่ได้รับจากระบบจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์พลังงานความร้อนที่ได้รับในรูปแบบน้ำร้อนตามไปด้วย อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนตลอดวันทำการทดลองจากอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน ภายใต้ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์เดียวกันที่ 55 cm แสดงดังภาพที่ 61 จะเห็นได้ว่าอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองของระบบที่ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล คือ 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM เท่ากับ 675.45 W (ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 16.99 %) 918.38 W (ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 21.53%) และ 950.96 W (ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 22.19 %) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 15 LPM สามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองได้สูงที่สุด





ภาพที่ 61 ประสิทธิภาพทางความร้อนตลอดวันทำการทดลองของระบบที่อัตราการไหลน้ำของระบบ ความร้อนแตกต่างกัน

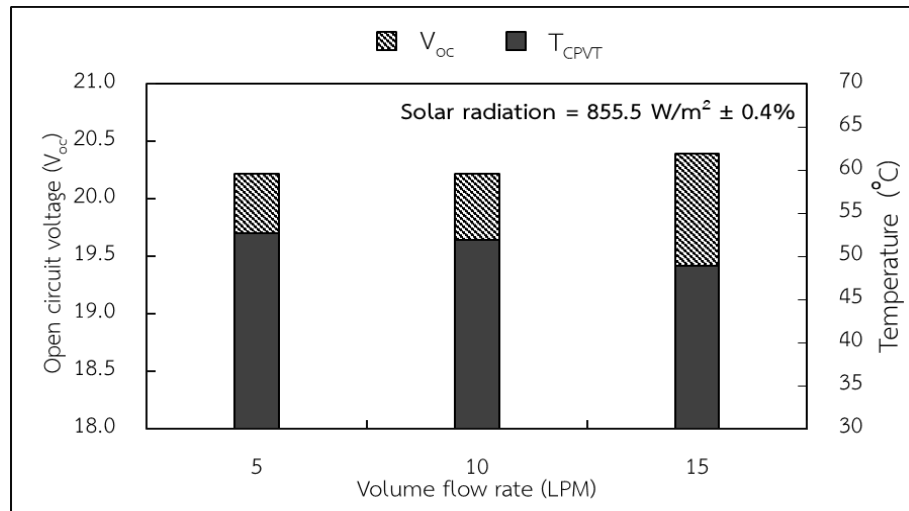
จากผลการทดลองในภาพที่ 62 พบว่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่มีปริมาณน้ำร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน 200 L เมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันทำการทดลอง ณ เวลา 16:00 น. ที่อัตราการไหลของน้ำระบบความร้อน 15 LPM สามารถผลิตน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 65.55 °C (คิดเป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้รับสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 22.778 MJ/Day) รองลงมาที่อัตราการไหล 10 LPM สามารถผลิตน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้อุณหภูมิเท่ากับ 60.50 °C (คิดเป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้รับสะสมในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 22.359 MJ/Day) และสุดท้ายที่อัตราการไหล 5 LPM สามารถผลิตน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้อุณหภูมิเท่ากับ 57.50 °C (คิดเป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้รับสะสมในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 21.102 MJ/Day)



ภาพที่ 62 อัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับภายในถังเก็บน้ำร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบตลอดวันทำการทดลองที่อัตราการไหลน้ำของระบบความร้อนแตกต่างกัน

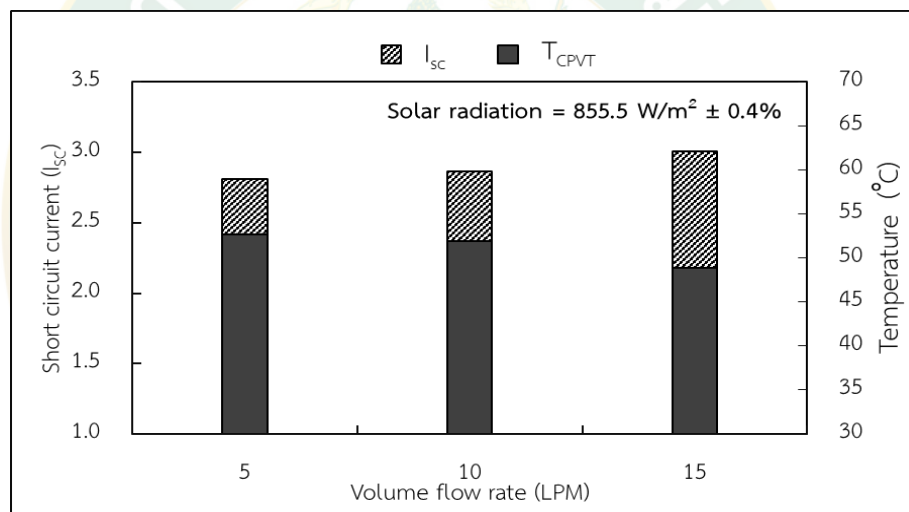
4.2.2 สมรรถนะทางไฟฟ้าของระบบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

ศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลาที่มีการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่แตกต่างกัน 3 อัตราการไหล คือ 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM ภาพที่ 63 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรทางไฟฟ้าที่ได้รับจากระบบภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกันที่ 855 W/m^2 จากภาพแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละอัตราการไหลมีค่าแตกต่างกัน โดยที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM มีอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำที่สุด เท่ากับ $48.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ รองลงมาคือที่อัตราการไหล 10 LPM และ 5 LPM มีอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เท่ากับ $51.94 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $52.64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดที่ได้รับจากระบบ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 15 LPM สามารถระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบได้มากที่สุด สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดได้สูงที่สุด เท่ากับ 20.39 V รองลงมาคือที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อน 10 LPM และ 5 LPM มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด เท่ากับ 20.22 V และ 20.22 V ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ระบบสามารถผลิตได้ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน ดังภาพที่ 64 จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 15 LPM สามารถให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้สูงที่สุด เท่ากับ 3.004 A รองลงมาคือที่อัตราการไหล 10 LPM และ 5 LPM มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เท่ากับ 2.862 A และ 2.813 A ตามลำดับ โดยกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ได้รับจากระบบภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM เท่ากับ 42.13 W (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 0.957%) 42.1 W (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 0.960%) และ 43.43 W (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 0.985%) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 65



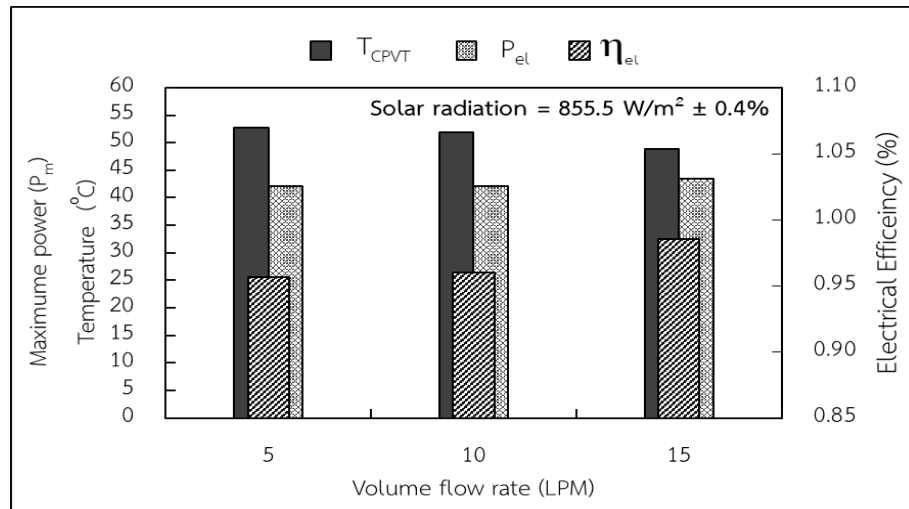
ภาพที่ 63 แรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อน

แตกต่างกัน



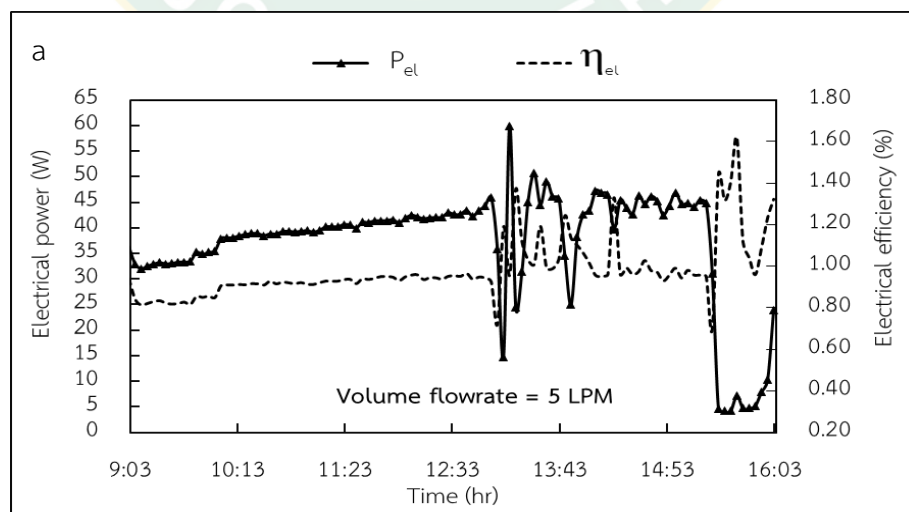
ภาพที่ 64 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหลน้ำระบายความ

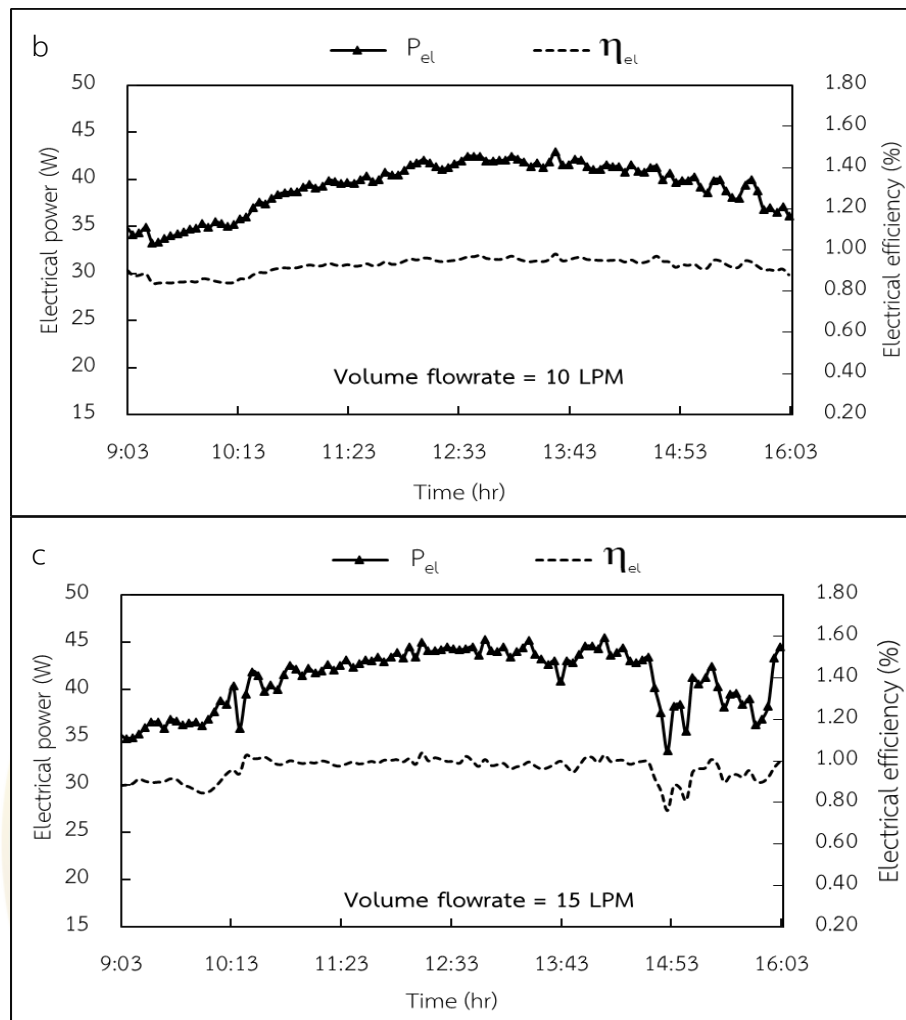
ร้อนแตกต่างกัน



ภาพที่ 65 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบที่อัตราการไหลน้ำของระบบความร้อนแตกต่างกัน

กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนรางพาราโบลาที่อัตราการไหลของน้ำระบบความร้อนแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล จากภาพที่ 66 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองที่ผลิตได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหล 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM เท่ากับ 37.07 W (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 0.98 %) 39.23 W (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 0.92 %) และ 41.20 W (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 0.96 %) และมีปริมาณพลังงานไฟฟ้าสะสมตลอดวันทำการทดลองเท่ากับ 0.943 MJ/Day 0.998 MJ/Day และ 1.048 MJ/Day ตามลำดับ

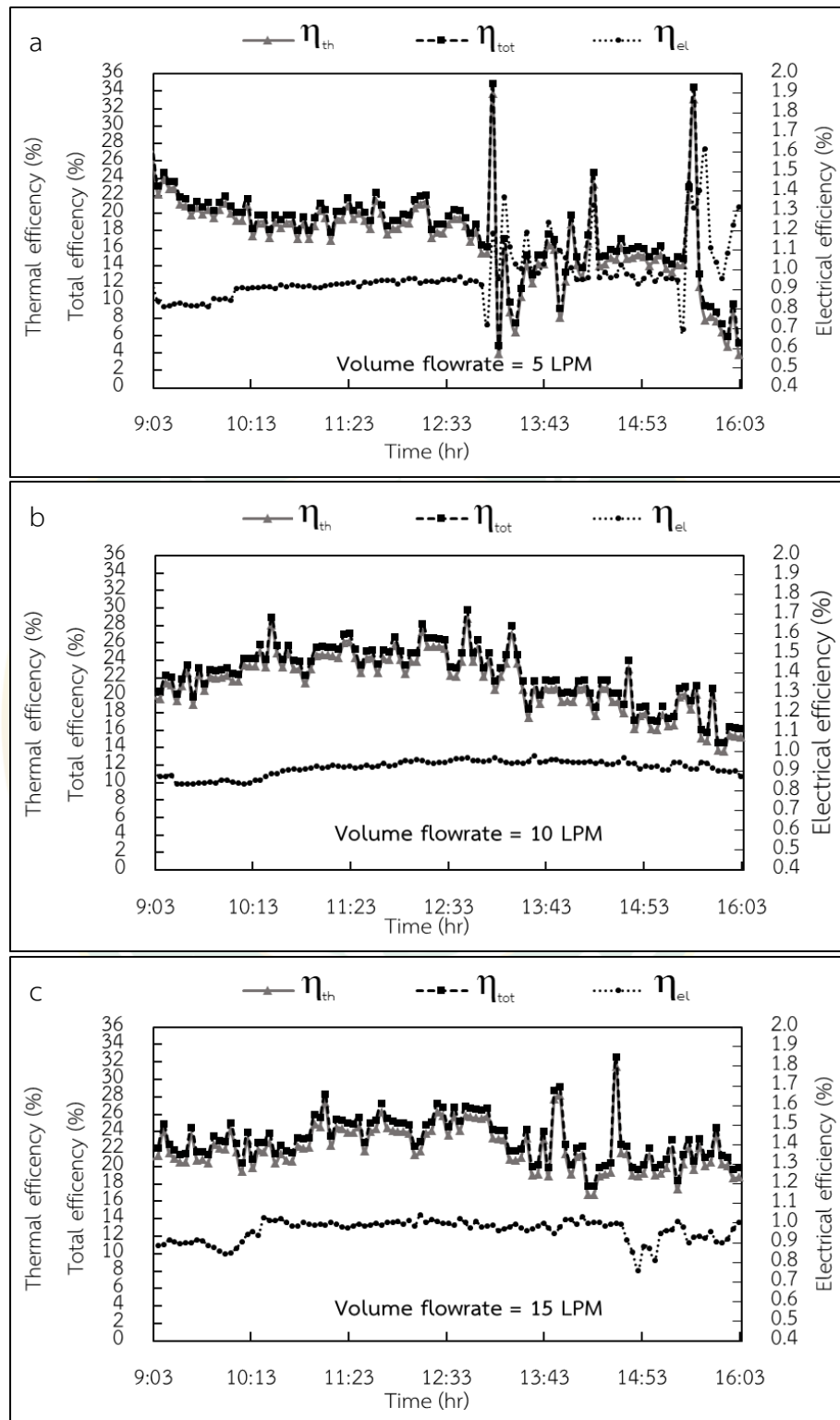




ภาพที่ 66 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองของระบบที่อัตราการไหลของน้ำของระบบระบายความร้อนแตกต่างกัน

4.2.3 สมรรถนะรวมของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบจากสมการที่ 26 ในภาพที่ 67 แสดงประสิทธิภาพรวมของระบบที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน โดยค่าประสิทธิภาพรวมเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองที่ได้รับจากระบบที่มีการปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM เท่ากับ 17.97 % 22.45 % และ 23.15 % ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของระบบได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 5 LPM และ 10 LPM คิดเป็นค่าความต่างทางประสิทธิภาพเท่ากับ 5.18 % และ 0.7 % ตามลำดับ



ภาพที่ 67 ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ได้รับตลอดวันทำการทดลองที่ติดตั้งเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามท้ายที่สุดแล้วในการพิจารณาการเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิก เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการเปรียบเทียบผลการทดลอง รูปแบบในการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบพลังงานสุทธิต่ที่ได้รับจากระบบถือได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากในพื้นที่การทดลองมีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งคือ ประสิทธิภาพในเชิงปริมาณของพลังงานที่ได้รับจากระบบ และรูปแบบที่สองคือประสิทธิภาพในเชิงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับจากระบบ โดยประสิทธิภาพในเชิงปริมาณในรูปแบบที่หนึ่งนั้นจะทำการวิเคราะห์ภายใต้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของระบบเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และในรูปแบบที่สองเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเชิงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองภายใต้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในรูปแบบเอ็กเซอร์ยี โดยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบในเชิงปริมาณพลังงานสุทธิตลอดวันทำการทดลอง

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสุทธิของระบบที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

รายละเอียด	อัตราการไหล (LPM)		
	5	10	15
E_{PV} (MJ/day)	0.943	0.998	1.048
Q_S (MJ/day)	21.102	22.359	22.777
T_S ($^{\circ}C$)	57.70	60.50	60.55
$W_{TRACKING}$	0.22084	0.22084	0.22084
E_{Net} (MJ/day)	21.824	23.136	23.604
E_{Sun} (MJ/day)	99.877	108.354	108.930
η_{sys} (%)	21.850	21.352	21.669

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 10 พบว่า ประสิทธิภาพรวมเชิงปริมาณของพลังงานสุทธิตลอดทั้งวันของระบบที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 5 LPM 10 LPM และ 15 LPM มีค่าเท่ากับ 21.85 % 21.35 % และ 21.66 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 5 LPM สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบในเชิงปริมาณของพลังงานสุทธิของระบบได้สูงที่สุด แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตลอดวันทำ

การทดลอง จากสมการที่ 19-23 ในตารางที่ 11 พบว่า ประสิทธิภาพรวมเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตลอดทั้งวันของระบบที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิได้สูงที่สุด เท่ากับ 1.679 % รองลงมาคือที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 10 LPM และ 15 LPM มีประสิทธิภาพของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิ เท่ากับ 1.593 % และ 1.478 % ตามลำดับ

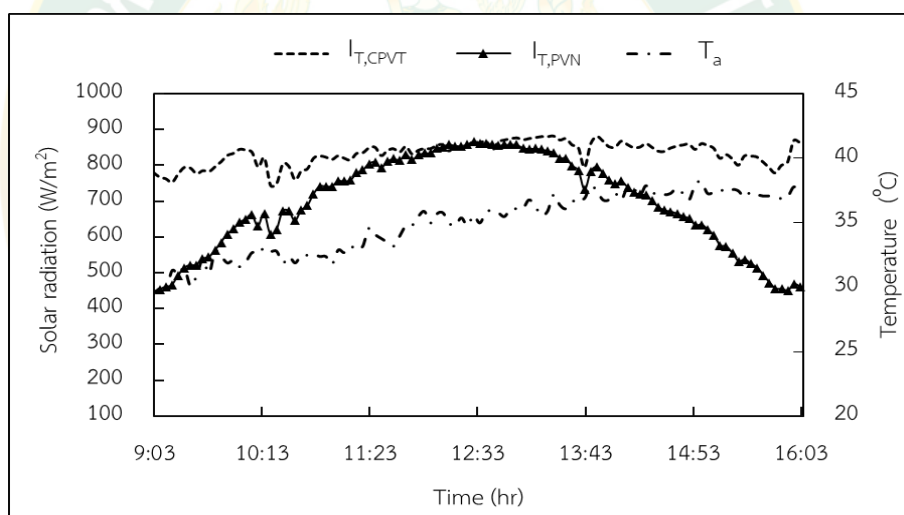
ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบเอ็กเซอร์ยีสุทธิของระบบที่อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน

รายละเอียด	อัตราการไหล (LPM)		
	5	10	15
\dot{Ex}_{el} (MJ/day)	0.943	0.998	1.048
\dot{Ex}_{Q_s} (MJ/day)	0.648	0.826	0.871
T_s (°C)	57.70	60.50	60.55
$W_{TRACKING}$ (MJ/day)	0.221	0.221	0.221
\dot{Ex}_{net} (MJ/day)	1.371	1.603	1.699
\dot{Ex}_{sun} (MJ/day)	92.751	100.620	101.174
\dot{Ex}_{sys} (%)	1.478	1.593	1.679

จากผลการทดลองในเงื่อนไขที่สอง แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบตลอดวันทำการทดลองภายใต้รูปแบบของการวิเคราะห์คุณภาพพลังงานสุทธิของระบบสูงกว่าที่ระดับเป่ารับรังสีอื่นๆ จึงได้นำเงื่อนไขจากการทดลองในเงื่อนไขที่หนึ่ง และเงื่อนไขที่สอง ที่ระดับความสูงเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm และ อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ 15 LPM เป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษาเงื่อนไขการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติ (PVN) ต่อไป

4.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติ (PVN)

การเปรียบเทียบผลการทดลองของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลา (CPVT) กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติ (PVN) ในการทดลองทั้งสองระบบทำการติดตั้งโดยหันด้านรับรังสีอาทิตย์ของระบบไปทางทิศใต้ และทำมุมกับแนวระนาบที่ 18.9 องศา ภายใต้สภาวะแวดล้อมและเวลาในการทดลองเดียวกัน โดยระบบ (CPVT) มีการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบที่อัตราการไหล 15 LPM ที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ที่ 55 cm ใช้ปริมาณน้ำระบายความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนปริมาณ 200 L และระบบมีการติดตามดวงอาทิตย์โดยการปรับด้านรับรังสีอาทิตย์ของระบบจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ทุกๆ 4 นาที ต่อ 1 องศา

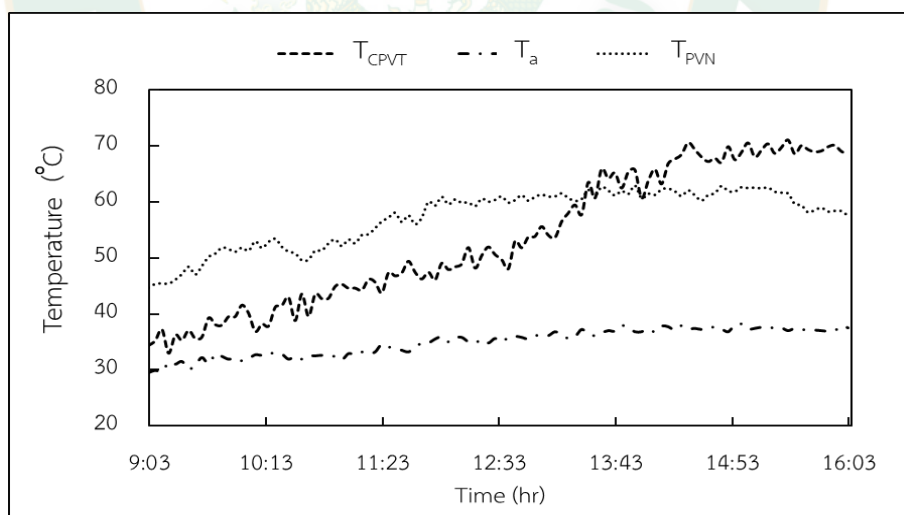


ภาพที่ 68 รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของรางพาราโบลาและพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในรูปแบบปกติตลอดวันทำการทดลอง

จากภาพที่ 68 แสดงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่รับรังสีของระบบ CPVT และ PVN จากผลการเปรียบเทียบในภาพจะเห็นว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของระบบ CPVT ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เกือบเป็นเส้นตรงเนื่องจากระบบมีการปรับมุมด้านรับรังสีอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกอย่างต่อเนื่อง โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ณ เวลา 9:00 น. เริ่มต้นการทดลอง เท่ากับ 780 W/m² ช่วงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดวันทำการทดลองอยู่ระหว่าง 744 W/m² – 882 W/m² คิดเป็นค่าพลังงานแสงอาทิตย์สะสมตลอดวันทำการทดลองเท่ากับ 108.93 MJ/Day เมื่อพิจารณาค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของระบบ PVN ที่เป็นการติดตั้งในรูปแบบปกติที่ไม่มีระบบรางรวม

แสงพาราโบลิกและระบบติดตามดวงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่า ณ เวลา 9:00 น. เวลาเริ่มต้นการทดลอง มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ เท่ากับ 447 W/m^2 ช่วงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดวันทำการทดลองอยู่ระหว่าง $447 \text{ W/m}^2 - 867 \text{ W/m}^2$ คิดเป็นค่าพลังงานแสงอาทิตย์สะสมตลอดวันทำการทดลองเท่ากับ 11.75 MJ/Day จากผลทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบ CPVT ที่มีรางรวมแสงพาราโบลิกและกลไกในการปรับด้านรับรังสีของระบบสามารถให้พลังงานแสงอาทิตย์สะสมภายในวันทำการทดลองสูงกว่าระบบ PVN มากถึง 9 เท่า

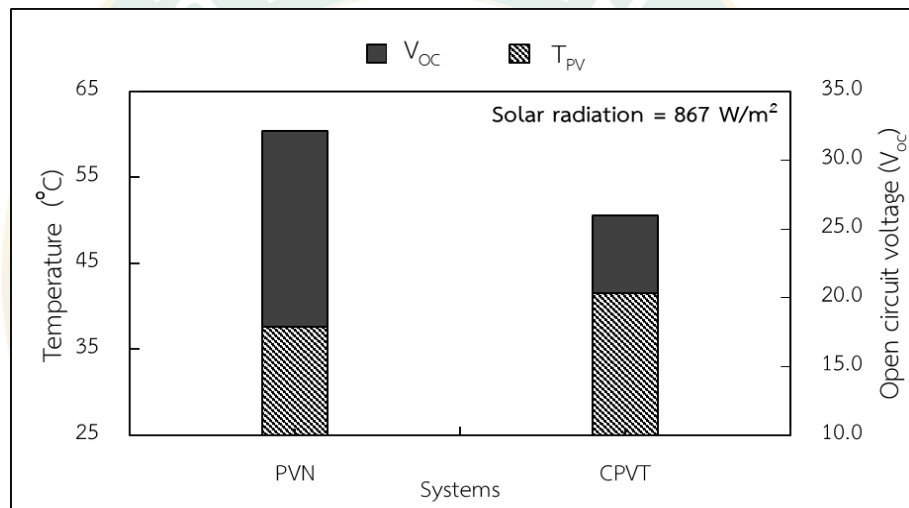
ภาพที่ 69 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้งสองระบบ จากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาตั้งแต่ 9:00 – 13:30 น. อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบ CPVT มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบ PVN เนื่องจากระบบ CPVT มีระบบระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเมื่อเวลาเริ่มต้นการทดลองพบว่าอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ CPVT มีอุณหภูมิต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ PVN ถึง $10.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ CPVT เท่ากับ $34.36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และในระบบ PVN เท่ากับ $44.67 \text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยหลังจากเวลา 13:30 – 16:00 น. อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ CPVT จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ PVN เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนมีการสะสมความร้อนจึงส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนสูงขึ้น



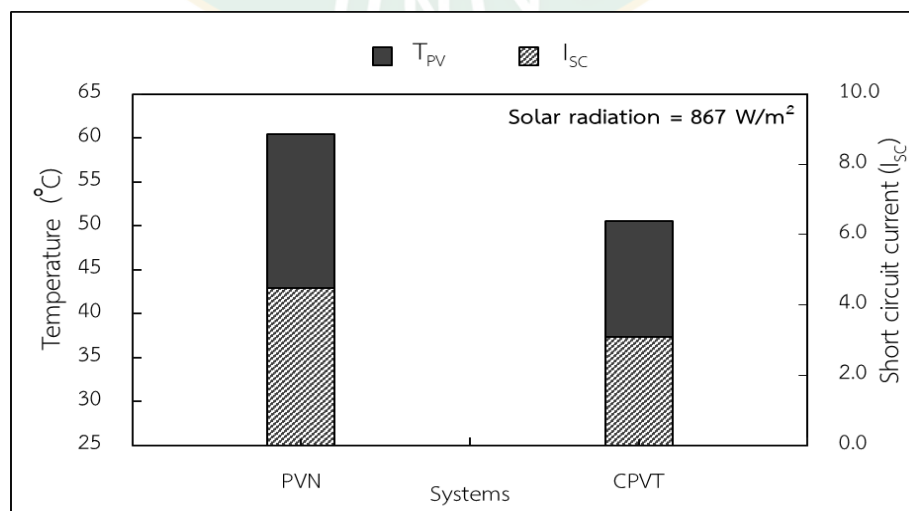
ภาพที่ 69 อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ CPVT และระบบ PVN

ภาพที่ 70 แสดงถึงแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด (V_{oc}) ที่ได้รับจากระบบ CPVT และระบบ PVN ภายใต้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เดียวกันที่ 867 W/m^2 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดของระบบ CPVT มีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดของระบบ PVN ถึง 11.92 % (ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดของระบบ CPVT และระบบ PVN เท่ากับ 20.3 V และ 17.88 V ตามลำดับ) เนื่องจากเมื่อพิจารณา

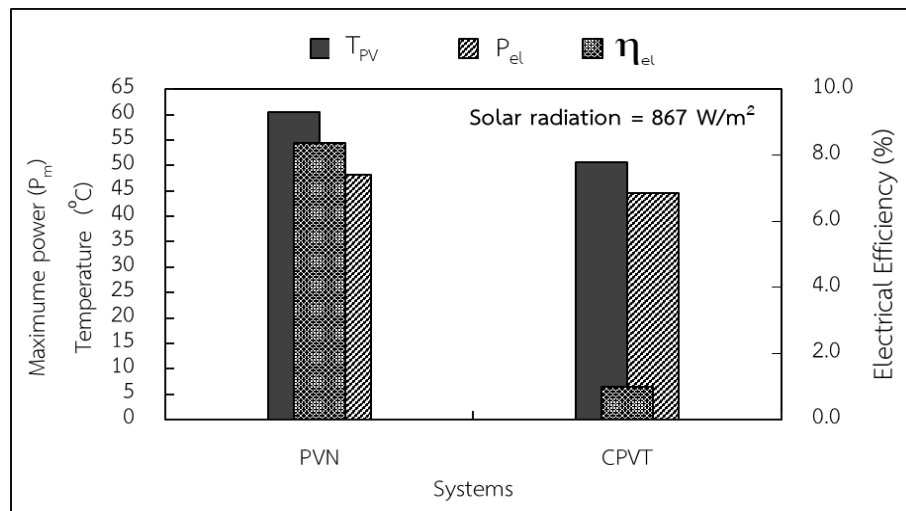
อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละระบบแล้วแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบ CPVT มีอุณหภูมิต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ PVN ถึง $9.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}) ที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองระบบ จากภาพที่ 71 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ CPVT มีค่าน้อยกว่าระบบ PVN 1.412 A เมื่อวิเคราะห์ลักษณะการตกกระทบของรังสีอาทิตย์บริเวณเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นเป้ารับรังสีอาทิตย์ มีลักษณะการตกกระทบของรังสีอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ และมีพื้นที่ที่ไม่มีรังสีอาทิตย์ตกกระทบถึง 37.31% จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้รับมีค่าต่ำกว่าที่ได้รับจากระบบ PVN เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และลักษณะการตกกระทบของรังสีอาทิตย์



ภาพที่ 70 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของระบบ CPVT และระบบ PVN

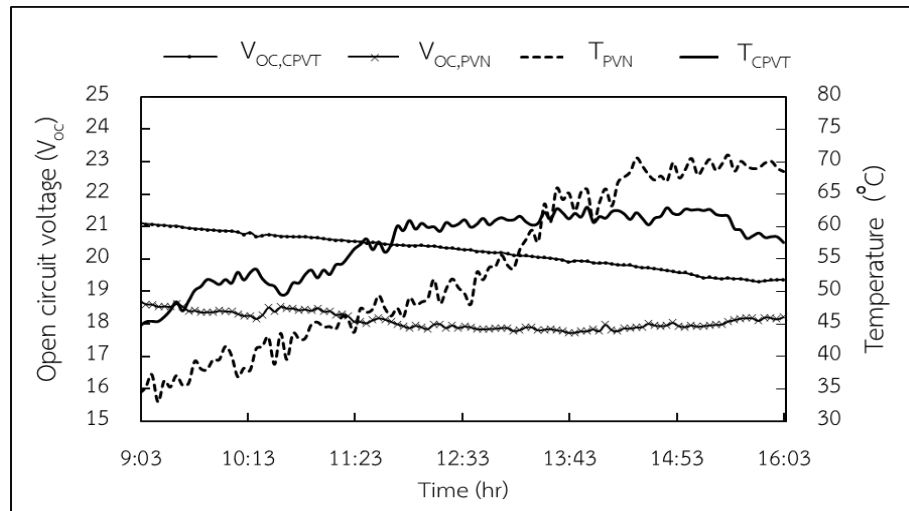


ภาพที่ 71 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ CPVT และระบบ PVN

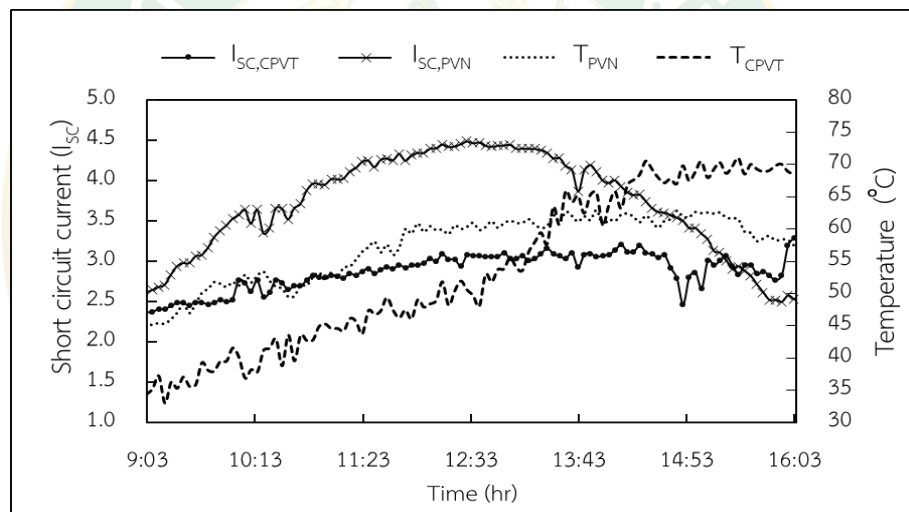


ภาพที่ 72 กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ CPVT และระบบ PVN

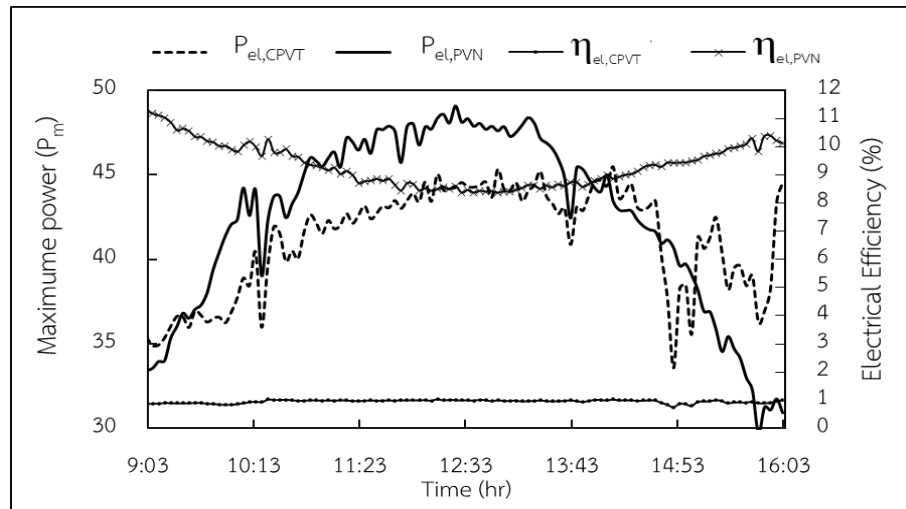
จากภาพที่ 73 แสดงให้เห็นว่าลักษณะแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของระบบ CPVT มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่ได้รับจากระบบ PVN ตลอดวันทำการทดลอง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่ได้รับจากระบบ CPVT เฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองเท่ากับ 20.23 V คิดเป็นร้อยละที่เพิ่มขึ้นจากระบบ PVN เท่ากับ 10.52 % (แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลองตลอดวันทำการทดลองของระบบ PVN เท่ากับ 18.10 V) และค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของระบบ CPVT มีแนวโน้มลดต่ำลงเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนภายในถึงเก็บน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรตลอดวันทำการทดลองที่ได้รับจากระบบ CPVT และ PVN ในภาพที่ 74 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ PVN มีค่าสูงกว่าที่ได้รับจากระบบ CPVT เกือบตลอดทั้งวันทำการทดลอง โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ยตลอดทั้งวันของระบบ PVN มีค่าสูงกว่าที่ได้รับจากระบบ CPVT สูงกว่าถึง 22.58 % (กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ยตลอดวันทำการทดลอง ระบบ PVN และ CPVT เท่ากับ 3.72 A และ 2.88 A ตามลำดับ)



ภาพที่ 73 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิดตลอดวันทำการทดลองของระบบ CPVT และ ระบบ PVN



ภาพที่ 74 ลักษณะกระแสไฟฟ้าลัดวงจรตลอดวันทำการทดลองของระบบ CPVT และ ระบบ PVN



ภาพที่ 75 กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าตลอดวันทำการทดลองของระบบ CPVT และระบบ PVN

อย่างไรก็ตามท้ายที่สุดแล้วในการพิจารณาการเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการเปรียบเทียบผลการทดลอง รูปแบบในการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบพลังงานสุทธิที่ได้รับจากระบบถือได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากในพื้นที่การทดลองมีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งคือ ประสิทธิภาพในเชิงปริมาณของพลังงานที่ได้รับจากระบบ และรูปแบบที่สองคือประสิทธิภาพในเชิงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับจากระบบ โดยประสิทธิภาพในเชิงปริมาณในรูปแบบที่หนึ่งนั้นจะทำการวิเคราะห์ภายใต้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของระบบเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และในรูปแบบที่สองเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเชิงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองภายใต้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในรูปแบบเอ็กเซอร์ยี โดยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบในเชิงปริมาณพลังงานสุทธิตลอดวันทำการทดลอง เมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 12 พบว่า ประสิทธิภาพรวมเชิงปริมาณของพลังงานสุทธิตลอดทั้งวันของระบบ (PVN) และ ระบบ (CPVT) มีค่าเท่ากับ 9.20 % และ 21.67 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบ (CPVT) สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบในเชิงปริมาณของพลังงานสุทธิของระบบได้สูงกว่าระบบ (PVN) ถึง 2.4 เท่า เนื่องจากระบบ CPVT สามารถผลิตพลังงานความร้อนในรูปแบบน้ำร้อน อีกทั้งระบบ CPVT ยังมีระบบรวมรังสีอาทิตย์และระบบปรับพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์อยู่ตลอดเวลา แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตลอดวันทำการทดลอง จากสมการที่ 19-23 ในตารางที่ 13 พบว่า ประสิทธิภาพรวมเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิตลอดทั้งวันของระบบ (PVN) สามารถให้ประสิทธิภาพ

ของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิได้สูงที่สุด เท่ากับ 9.91 % โดยระบบ (CPVT) มีประสิทธิภาพของระบบในเชิงคุณภาพของพลังงานสุทธิ เท่ากับ 1.68 %

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิในเชิงปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบปกติ (PVN)

รายละเอียด	ระบบ	
	PVN	CPVT
E_{PV} (MJ/day)	1.081	1.048
Q_S (MJ/day)	-	22.777
T_S ($^{\circ}\text{C}$)	-	60.55
W_{TRACKING} (MJ/day)	-	0.22084
E_{Net} (MJ/day)	1.081	23.604
E_{Sun} (MJ/day)	11.745	108.930
η_{sys} (%)	9.201	21.669

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิในเชิงคุณภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรวบรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบปกติ (PVN)

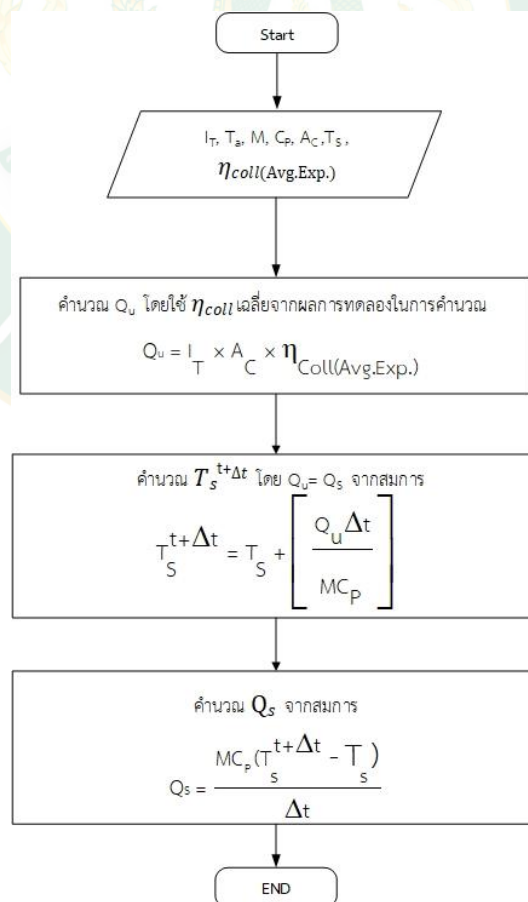
รายละเอียด	ระบบ	
	PVN	CPVT
$\dot{E}x_{el}$ (MJ/day)	1.081	1.048
$\dot{E}x_{Q_S}$ (MJ/day)	-	0.871
T_S ($^{\circ}\text{C}$)	-	60.55
W_{TRACKING} (MJ/day)	-	0.220
$\dot{E}x_{net}$ (MJ/day)	1.081	1.699
$\dot{E}x_{sun}$ (MJ/day)	10.908	101.173
$\dot{E}x_{\text{sys}}$ (%)	9.906	1.679

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก (CPVT) ตลอดทั้งปี

จากผลการทดลองการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์และอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ป้อนให้กับระบบที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบได้สูงที่สุดสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงที่ระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm และที่อัตราการไหล 15 LPM เป็นเงื่อนไขที่จะใช้สำหรับการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี โดยการทำนายแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

4.4.1.การทำนายความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน

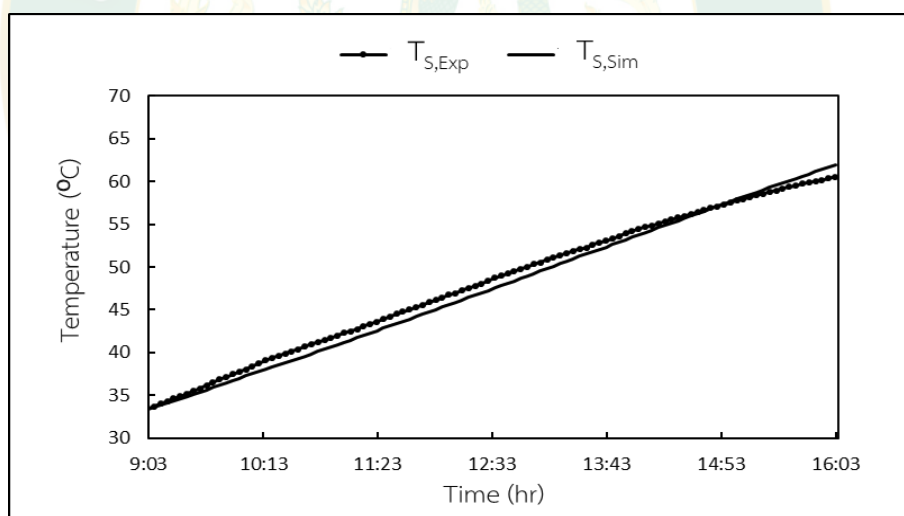
ในส่วนของการทำนายความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน เนื่องจากระบบเป็นการติดตั้งแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนร่วมกับรางรวมแสงแบบพาราโบลิก ในการทดลองจึงไม่สามารถที่จะทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบเฉลี่ยตลอดทั้งวันทำการทดลองมาใช้ในการทำนายความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนของระบบ โดยขั้นตอนการทำนายแสดงดังภาพที่ 76



ภาพที่ 76 ขั้นตอนการทำนายอุณหภูมิถังเก็บน้ำและความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน

เพื่อเปรียบเทียบผลจากการทำนายกับผลที่ได้จากการทดลองในวันที่ 12 พฤษภาคม 2562 โดยกำหนดเงื่อนไขอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองได้แก่ รังสีอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกเฉียงใต้ไปยังทิศตะวันตก $I_{T,TRACKING}$ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม T_a อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเริ่มต้น T_5 เท่ากับ 33.10°C ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 22.19% และปริมาณน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 200 L

จากการทำนายอุณหภูมิน้ำและความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนตามขั้นตอนในภาพที่ 76 เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทำนายกับผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนระหว่างผลจากการทำนายกับผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย 1.7% แสดงดังภาพที่ 77 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนเมื่อสิ้นสุดเวลาการทดลองพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย 6.20% จากการพิจารณาผลการทำนายกับผลการทดลองอุณหภูมิน้ำและความร้อนพบว่ามีร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการทำนายผลการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นมีความเหมาะสมและสามารถใช้สำหรับการทำนายการผลิตไฟฟ้าของระบบในส่วนต่อไป



ภาพที่ 77 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างที่ได้จากการทำนายกับการทดลอง

4.4.2.การทำนายการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน

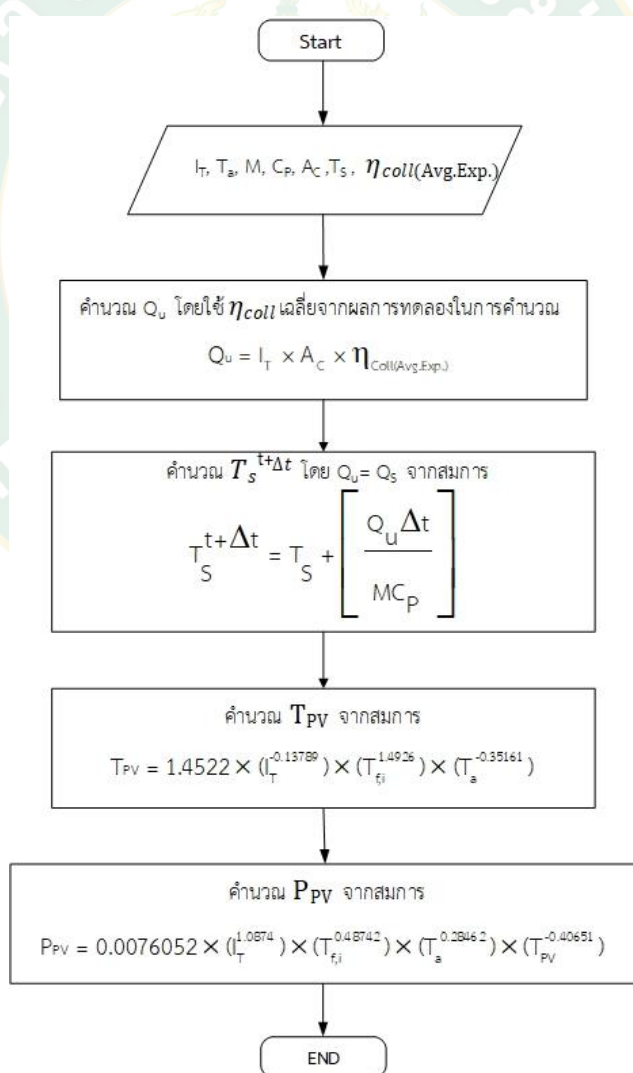
เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการทำนายผลการผลิตไฟฟ้าของระบบจึงจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะใช้สมการที่ 30 ในการทำนายอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีความสัมพันธ์

ระหว่าง รังสีอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก $I_{T,TRACKING}$ อุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน T_S และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม T_a

$$T_{CPVT} = 1.45220 \times (I_{T,TRACKING}^{-0.13789}) \times (T_S^{1.49260}) \times (T_a^{-0.35161}) \quad \text{สมการที่ 30}$$

การทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบมีความสัมพันธ์ระหว่าง รังสีอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ($I_{T,TRACKING}$) อุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน (T_S) และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{PV}) ดังสมการที่ 31

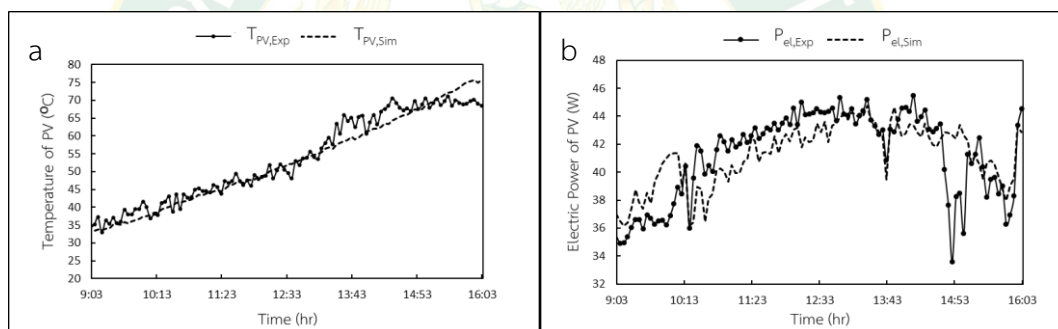
$$P_{CPVT} = 0.0076052 \times (I_{T,TRACKING}^{1.08740}) \times (T_S^{0.48742}) \times (T_a^{0.28462}) \times (T_{CPVT}^{-0.40651}) \quad \text{สมการที่ 31}$$



ภาพที่ 78 ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากขั้นตอนการทำนายการผลิตไฟฟ้าของระบบดังภาพที่ 78 เพื่อเปรียบเทียบผลจากการทำนายกับผลที่ได้จากการทดลองในวันที่ 12 พฤษภาคม 2562 โดยกำหนดเงื่อนไขอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองได้แก่ รังสีอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก $I_{T,TRACKING}$ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม T_a อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเริ่มต้น T_5 เท่ากับ 33.10°C ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 22.19% และปริมาณน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 200 L

พบว่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างผลที่ได้จากการทำนายเทียบกับการทดลองมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 4.03% และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ผลที่ได้จากการทำนายเมื่อเทียบกับผลจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 4.26% แสดงดังภาพที่ 79a และ 79b ตามลำดับ



ภาพที่ 79 การเปรียบเทียบผลจากการทำนายกับผลจากการทดลอง (a) อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (b) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

การทำนายการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนข้างต้น มีความเหมาะสมสำหรับการทำนายผลตลอดทั้งปี โดยกำหนดรายละเอียดและกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องเริ่มต้นสำหรับการทำนายกำลังไฟฟ้าสุทธิและความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนของระบบดังนี้

1. อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM
2. ปริมาณน้ำระบายความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน 200 L
3. ค่าความจุความร้อนของน้ำ C_p 4,187 J/kg·°C
4. อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเริ่มต้น T_5 30 °C
5. ช่วงเวลาในการทำงานของระบบ 09.00-16.00 น.

6. ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย $\eta_{coll(Avg.Exp.)}$ 0.22 %

7. การประมาณค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ช่วงเวลาต่างๆ ในหนึ่งปี โดยค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในหนึ่งวันโดยใช้สมการที่ 32 (Chaichana et al., 2010) โดยใช้ข้อมูลสถิติภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ. 2524 – 2553 จากอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด ในแต่ละเดือน ของพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่มีค่าแสดงดังตารางที่ 14

$$T_{amb} = \frac{1}{2} \left[(T_{max} + T_{min}) + (T_{max} - T_{min}) \sin \left(\frac{2\pi}{24} (t-9) \right) \right] \quad \text{สมการที่ 32}$$

ตารางที่ 15 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดจากสถิติภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ.2524-2553 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561)

เดือน	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)		
	ค่าเฉลี่ยสูงสุด	ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
มกราคม	29.8	14.9	21.5
กุมภาพันธ์	32.7	16.2	23.9
มีนาคม	35.2	19.5	27.1
เมษายน	36.5	22.9	29.3
พฤษภาคม	34.2	23.8	28.2
มิถุนายน	32.7	24.0	27.6
กรกฎาคม	31.8	23.9	27.2
สิงหาคม	31.5	23.7	26.8
กันยายน	31.7	23.2	26.7
ตุลาคม	31.4	22.2	26.1
พฤศจิกายน	30.1	19.2	24.0
ธันวาคม	28.6	15.7	21.4

8. การทำนายผลการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนในการทำงานของระบบตลอดทั้งปี โดยกำหนดตัวแปรสำหรับการคำนวณดังต่อไปนี้

1. พิกัดทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ติดตั้งระบบ ละติจูดที่ (ϕ) 18.9252 องศา

และลองจิจูดที่ (λ) 99.024634 องศา

- 2.มุมเอียงของของพื้นที่รับรังสีของระบบกับแนวระนาบ (β) 18.9 องศา
- 3.ค่าคงที่สุริยะที่ใช้ในการคำนวณ (G_{sc}) 1,367 W/m²
- 4.ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จากสิ่งแวดล้อมสำหรับพื้นคอนกรีต 0.8
- 4.วันที่ตัวแทนในแต่ละเดือน (n) แสดงดังตารางที่ 15
- 5.ค่ารังสีรวมรายวันในแนวระดับของจังหวัดเชียงใหม่ (H) แสดงดังตารางที่ 16
- 6.ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของสถานีจังหวัดเชียงใหม่ แสดงดังตารางที่ 17
- 6.มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ ในการคำนวณกำหนดให้เป็น 0 องศา เนื่องจากระบบมีการปรับพื้นที่รับรังสีอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกทุกๆ 4 นาที

ตารางที่ 16 วันที่ตัวแทนของแต่ละเดือน (Duffie and Beckman, 2013)

เดือน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
n	17	47	75	105	135	162
เดือน	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
n	198	228	258	288	318	344

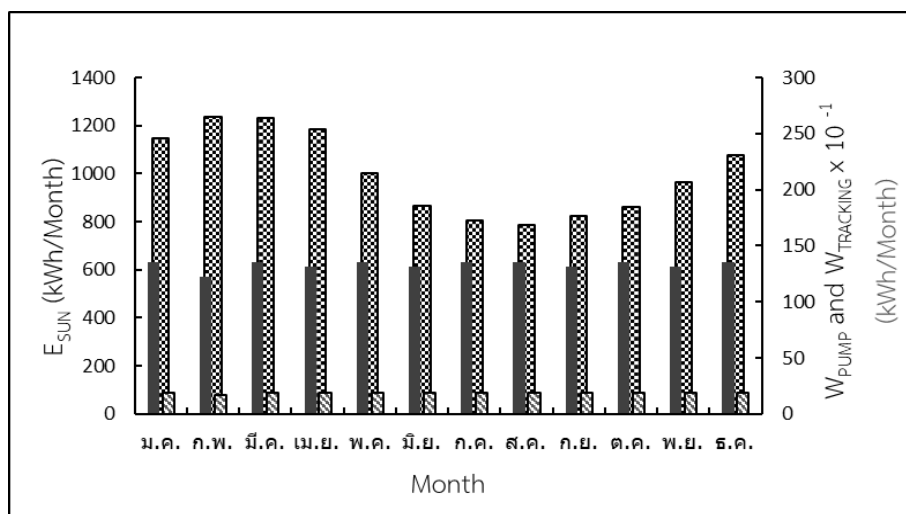
ตารางที่ 17 ค่ารังสีรวมรายวันในแนวระดับของจังหวัดเชียงใหม่ (RETScreen, 2014)

เดือน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
H (MJ/m ² d)	17.82	20.34	21.71	22.36	19.69	16.88
เดือน	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
H (MJ/m ² d)	15.66	15.23	15.77	15.73	15.84	16.45

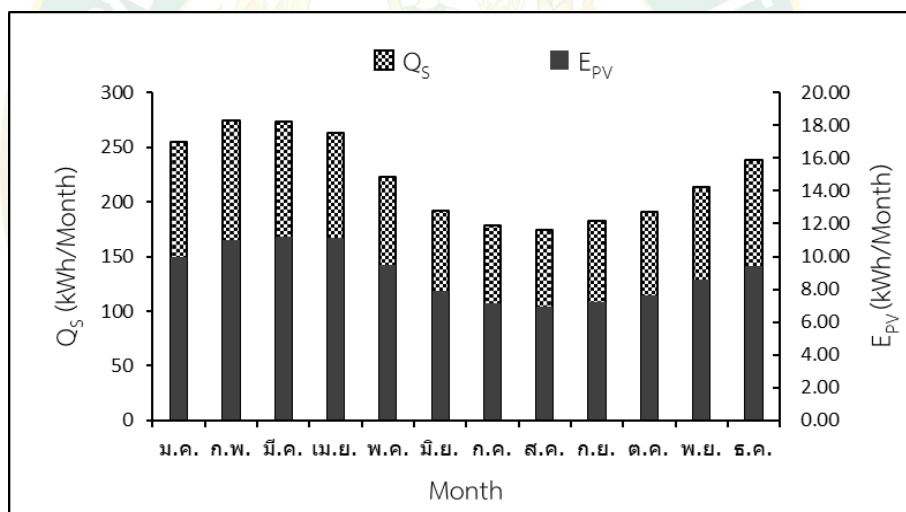
ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของสถานีเชียงใหม่ (Wongratanaphaisan et al., 2003)

สถานี	a1	a2	b1	b2
เชียงใหม่	0.514	0.228	0.512	0.033

จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่อทำการทำนายพลังงานสุทธิของระบบรายเดือนตลอดทั้งปีพบว่า พลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ระบบได้รับอยู่ระหว่าง 780-1,300 kWh/Month โดยพลังงานที่ป้อนให้กับปั๊มหมุนเวียนน้ำและระบบติดตามดวงอาทิตย์จะมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละเดือนระหว่าง 120-136 kWh/Month และ 1.70-1.90 kWh/Month ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 80



ภาพที่ 80 พลังงานที่ระบบได้รับจากรังสีอาทิตย์ การใช้พลังงานของปั๊มหมุนเวียนน้ำและระบบติดตามดวงอาทิตย์



ภาพที่ 81 พลังงานสุทธิที่ได้รับจากระบบในรอบปี

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และปริมาณความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อน พบว่าพลังงานสุทธิจากการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 6-12 kWh/Month หรือ 107.66 kWh/Year ปริมาณความร้อนสะสมโดยน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนในรายเดือนประมาณ 170-280 kWh/Month หรือความร้อนที่ได้จากน้ำที่เก็บในถังเก็บน้ำร้อนประมาณ 2,660.6 kWh/Year แสดงดังภาพที่ 81 เมื่อหักลบกับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับปั๊มหมุนเวียนน้ำและระบบติดตามดวงอาทิตย์คิดเป็นพลังงานสุทธิในหนึ่งปีที่ได้รับจากระบบประมาณ 1,149.21 kWh/Year

4.5 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก

การหาระยะเวลาคืนทุนเบื้องต้นของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิก จากเงินลงทุนเริ่มต้นสุทธิของระบบ แสดงดังตารางที่ 18 รายได้ส่วนพลังงานไฟฟ้าสุทธิและความร้อนที่สะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้รับจากระบบเทียบกับการผลิตน้ำร้อนโดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 19 โดยกำหนดให้อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.33 Baht/kWh

ตารางที่ 19 เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ

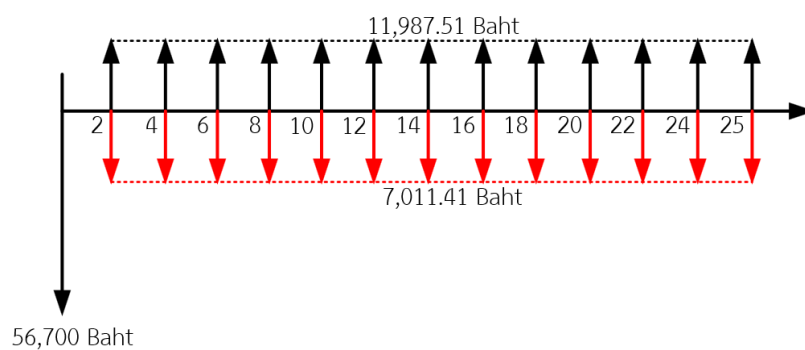
รายละเอียด	จำนวนเงิน (Baht)
เงินลงทุน	
รางรวมแสงพาราโบลิกพร้อมโครงสร้าง	40,000
ชุดระบบติดตามดวงอาทิตย์	5,000
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ขนาด 30 Wp/Panel จำนวน 3 แผง	2,700
ชุดกล่องน้ำระบายความร้อน ท่อน้ำร้อน และถังเก็บน้ำร้อน	6,500
ปั๊มน้ำหมุนเวียนภายในระบบ	2,500
เงินลงทุนสุทธิ	56,700

ตารางที่ 20 เงินได้สุทธิของโครงการ

รายละเอียด	จำนวนเงิน (Baht/Year)
เงินได้	
รายได้จากส่วนผลิตไฟฟ้าสุทธิของระบบ 107.65 kWh/Year	466.16
รายได้จากความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนของระบบเทียบเท่า การใช้พลังงานไฟฟ้าโดยฮีทเตอร์ไฟฟ้า 2660.66 kWh/Year	11,521.35
ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ	-7,011.41
เงินได้สุทธิ	4,976.09

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับโรงรวมแสง พาราโบลิก โดยใช้สมการที่ 29 มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11.39 ปี สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ระยะเวลาคืนทุน (Year)} &= \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ (Bath)}}{\text{เงินได้สุทธิ (Bath/Year)}} \\
 &= \frac{56,700}{4,976.09} \quad (\text{Bath}) \\
 &= 11.39 \quad (\text{Years})
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 82 Cash flow Diagram ของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับโรงรวมแสง พาราโบลิก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงแบบพาราโบลิค สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การวิจัยในส่วนที่ 1 การศึกษาปรับระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งบนรางรวมแสงพาราโบลิค ที่ 50 cm, 55 cm และ 60 cm โดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 10 LPM และปริมาณน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนจำนวน 200 L พบว่าที่ระดับความสูงของเป่ารับรังสี 55 cm สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงคุณภาพของพลังงานหรือเอ็กเซอร์ยีรวมของระบบได้สูงที่สุดเท่ากับ 1.685 % เนื่องจากที่ระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ดังกล่าว มีการกระจายตัวของรังสีอาทิตย์บริเวณเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด

การวิจัยในส่วนที่ 2 การศึกษาปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 3 อัตราการไหลคือ 5 LPM, 10 LPM และ 15 LPM โดยกำหนดระดับความสูงของเป่ารับรังสีอาทิตย์ 55 cm และปริมาณน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนจำนวน 200 L พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 15 LPM สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงคุณภาพของพลังงานหรือเอ็กเซอร์ยีรวมของระบบได้สูงที่สุดเท่ากับ 1.679 % เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการขนถ่ายความร้อนและระบายความร้อนได้ดีขึ้น

การวิจัยในส่วนที่ 3 การเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งในรูปแบบปกติกับระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิค พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิคสามารถให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาณของพลังงานรวมสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิคและระบบระบายความร้อน ถึง 2.4 เท่า

ระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิคประมาณ 11.39 ปี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรางรวมแสงแบบพาราโบลิคสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P_{\text{CPVT}} = 0.0076052 \times \left(I_{\text{T, TRACKING}}^{1.08740} \right) \times \left(T_s^{0.48742} \right) \times \left(T_a^{0.28462} \right) \times \left(T_{\text{CPVT}}^{-0.40651} \right)$$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากลักษณะการรวมแสงของรางรวมแสงพาราโบลิกเป็นแนวลำแสงขนาดเล็กควรศึกษาเพิ่มเติมในการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นเป้ารับรังสีให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้เห็นความแตกต่างของการผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งร่วมกับรางรวมแสงพาราโบลิกกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งร่วมกับรางพาราโบลิก

2. ศึกษาเพิ่มเติมในการปรับระดับความสูงของเป้ารับรังสีอาทิตย์ระหว่างระดับความสูง 55 – 60 cm เพื่อศึกษาลักษณะของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเป้ารับรังสีอาทิตย์

3. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำของไหลที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่สูงกว่าน้ำมาใช้ในการระบายความร้อนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์



บรรณานุกรม

- Amin, F. & Mohammad, S. (2019). Exergy in Photovoltaic/Thermal Nanofluid-Based Collector Systems. In A. Muhammad (Ed.), **Exergy and Its Application** (pp. Ch. 3). Rijeka: IntechOpen.
- Chaabane, M., Charfi, W., Mhiri, H. & Bournot, P. 2013. Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems. **Solar Energy**, 98(315-321).
- Chaichana, C., Kiatsirirot, T. & 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. & Beckman, W. A. 2013. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Canada: Wiley & Sons, Inc.
- Li, M., Ji, X., Li, G., Wei, S., Li, Y. & Shi, F. 2011. Performance study of solar cell arrays based on a Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal system. **Applied Energy**, 88(9), 3218-3227.
- Mohsenzadeh, M., Shafii, M. B. & Jafari mosleh, H. 2017. A novel concentrating photovoltaic/thermal solar system combined with thermoelectric module in an integrated design. **Renewable Energy**, 113(822-834).
- RETScreen. 2014. **Solar radiation**. [Online]. Available <http://eoswab.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.
- Wongratanaphaisan, T., Kiatsirirot, T. & Vorayos, N. 2003. Solar ethanol distillation. **Conference of Research Result Seminar on Renewable Energy**.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2561. สถิติอุณหภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ.2524-2553. [Online]. Available <http://climate.tmd.go.th/statistic/stat30y>.
- กระทรวงพลังงาน, ส. 2565. ภาพรวมพลังงานปี 2565. [Online]. Available https://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Energy_Statistics/00All.pdf.
- ตีผาง, อนุชา และสุพรรณ, พรหมชัย. 2561. การเพิ่มประสิทธิภาพแผงโซลาร์เซลล์โดยวิธีปรับมุมแผงติดตามดวงอาทิตย์เป็นช่วงเวลาร่วมกับการระบายความร้อนแผงด้วยน้ำ. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัย

ระดับชาติราชธานีวิชาการ ครั้งที่ 3.

ตันดี, สุระ, ชามงคลประดิษฐ์, ศุภฤกษ์, สารบรรณ, พงษ์สิริ และทัพพะมาตย์, วิษณุ. 2555. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับความร้อนของจานรับพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลาชนิดปรับองศาตามดวงอาทิตย์และไม่ปรับตามดวงอาทิตย์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26.

บุญศรี, สมชาติ, แสงสุวรรณ, สุพิชัย และหิวดิ, อธิพล. 2560. การศึกษาเทคนิคการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่แตกต่างกัน. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร: กำแพงเพชร391-399.

สีขำนาญ, สุรเชษฐ, ชมภูคำ, อีร์พัฒน์ และฤทธิเดช, สัมพันธ์. 2559. การเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดง. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 911-22.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณสมรรถนะของระบบ CPVT จากข้อมูลผลการทดลอง

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

- วันที่คำนวณ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2563
- ช่วงเวลาที่คำนวณ 12.03 น.
- ค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) 846.84 W/m²
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (I_T) 35.0 °C
- อุณหภูมิน้ำเข้าแผง CPVT ($T_{f,i}$) 46.2 °C
- อุณหภูมิน้ำออกจากแผง CPVT ($T_{f,o}$) 47.2 °C
- อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง CPVT (\dot{m}) 15 L/min (0.25 kg/s)
- พื้นที่รับรังสีอาทิตย์รวมของรางพาราโบลา (A_a) 5.14176 m²
- ระยะเวลาระหว่างข้อมูล 4 min

ผลการคำนวณ

อัตราความร้อนที่แผง CPVT ผลิตได้

$$Q_{\text{coll}} = \dot{m} C_P (T_{f,o} - T_{f,i})$$

$$Q_{\text{coll}} = 0.25 \times 4,187 (47.2 - 46.2) \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{coll}} = 1,046.75 \text{ W}$$

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ CPVT

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{coll}}}{I_T A_a} \quad \frac{\text{W}}{\text{W/m}^2 \times \text{m}^2}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{1,046.75}{846.84 \times 5.14176} \quad \frac{\text{W}}{\text{W/m}^2 \times \text{m}^2}$$

$$\eta_{\text{th}} = 24.04 \%$$

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ CPVT

$$\eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{mPV}}}{A_a \times G_{\text{tot}}}$$

$$\eta_{el} = \frac{43.40}{846.84 \times 5.14176} \quad \frac{W}{W/m^2 \times m^2}$$

$$\eta_{el} = 0.9967 \%$$

ประสิทธิภาพรวมของระบบ CPVT

$$\eta_{tot} = \frac{Q_{coll} + P_{el}}{I_T A_a} \quad \frac{W}{W/m^2 \times m^2}$$

$$\eta_{tot} = \frac{1,046.75 + 43.40}{846.84 \times 5.14176}$$

$$\eta_{tot} = 25.036 \%$$

การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่ติดตามดวงอาทิตย์แบบ 1 แกนตลอดทั้งปี

การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จะใช้วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนมาใช้ในการคำนวณจากตารางที่ 15 ใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์จากตารางที่ 16 โดยใช้สมการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากหนังสือ Solar Engineering of Thermal Process (Duffie and Beckman, 2013)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

- พื้นที่ที่ใช้คำนวณ จังหวัดเชียงใหม่
- เวลาที่ทำการคำนวณ (Standard time) 09.00 น.
- วันที่เป็นตัวแทนของเดือนพฤษภาคม (n) 135
- ค่าคงที่สุริยะ (Solar constant, G_{SC}) 1,367 W/m²
- ละติจูดสถานที่ที่พิจารณา (Latitude, ϕ) 18.9252°
- มุมอะซิมูทพื้นดิน (Surface azimuth angle, λ) 0°
- มุมเอียงของรางพาราโบลิก เทียบกับพื้นดิน (β) 18.90°
- เส้นเมริเดียนมาตรฐานสำหรับเขตเวลาท้องถิ่น คือ จังหวัดอุบลราชธานี (L_{st}) 105°
- ลองจิจูดของสถานที่ที่พิจารณา (L_{loc}) 99.0246°

ผลการคำนวณ

หาค่า B

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

$$B = (135 - 1) (360/365)$$

$$B = 132.1644^\circ$$

หาค่าสมการของเวลา (Equation of time, EOT)

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

$$E = 229.2 (0.000075 + 0.001868 \cos(132.1644) - 0.032077 \sin(132.1644) - 0.014615 \cos(2 \times (132.1644)) - 0.04089 \sin(2 \times (132.1644)))$$

$$E = 3.937$$

หาค่า Time Correction Factor, TC

$$TC = ((-4) \times (105 - 99.0246)) + 3.937$$

$$= -23.90 + 3.937$$

$$= -19.9646 \text{ or } -19 \text{ min } 57 \text{ sec}$$

หาเวลาสุริยะ (Solar time)

$$\text{Solar time} = 09.00 + (-19 \text{ min } 57 \text{ sec})$$

$$\text{Solar time} = 08.40 \text{ น.}$$

หามุมชั่วโมง (Hour angle, ω)

$$\omega = \begin{cases} -15 \times (12.00 - \text{Solar time}) & \text{ก่อนเที่ยงสุริยะ} \\ +15 \times (\text{Solar time} - 12.00) & \text{หลังเที่ยงสุริยะ} \end{cases}$$

$$\omega = -15 \times (12.00 - 08.40)$$

$$\omega = -54.0^\circ$$

หามุมเดคลิเนชัน (Declination, δ)

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right]$$

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \frac{284 + 135}{365} \right]$$

$$\delta = 18.7919^\circ$$

มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (Sunset hour angle, ω_s)

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

$$\cos \omega_s = -\tan(18.9252) \tan(18.7919)$$

$$\cos \omega_s = -0.116667$$

$$\omega_s = 96.699^\circ$$

หาค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลกในแต่ละวัน (H_0)

$$H_0 = \frac{24 \times 3,600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right]$$

$$\times \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right]$$

$$H_0 = 1,367 \times \left[24 \times 3,600 / \pi \right] \left[1 + 0.033 \times \cos \left(360 \times 135 / 365 \right) \right]$$

$$\times \left[\cos(18.9252) \cos(18.7919) \sin(96.699) + \left(2 \times \pi \times 96.699 / 360 \right) \right]$$

$$H_0 = 39.1622 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{d}$$

หาค่ารังสีอาทิตย์กระจายรายวัน (H_d)

$$H_d / H_0 = -4.6408 + 26.5495(H / H_0) - 28.3422(H / H_0)^2$$

$$- 31.4546(H / H_0)^3 + 46.4421(H / H_0)^4$$

$$H_d / 39.1622 = -4.6408 + 26.5495(19.69 / 39.1622) - 28.3422(19.69 / 39.1622)^2$$

$$- 31.4546(19.69 / 39.1622)^3 + 46.4421(19.69 / 39.1622)^4$$

$$H_d = 20.096 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{d}$$

หาค่ารังสีตรงรายวัน (H_b)

$$H_b = H - H_d$$

$$H_b = 19.69 - 20.096$$

$$H_b = -0.406 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{d}$$

หาค่าคงที่ a และ b ของสถานีเชียงใหม่ โดยใช้ค่า a และ b จากตารางที่ 17

$$a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$a = 0.514 + [0.228 \times \sin(96.699 - 60)]$$

$$a = 0.65$$

$$b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b = 0.512 + [0.033 \times \sin(96.699 - 60)]$$

$$b = 0.531$$

คำนวณหาค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) โดยกำหนดมุมชั่วโมง เป็น 0 เนื่องจากระบบมีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก

$$\frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[a + b \cos(\omega)] [\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{\left[\sin(\omega_s) - \frac{2\pi\omega \cos(\omega_s)}{360} \right]}$$

$$\frac{I}{19.69} = \frac{\pi}{24} \times \frac{\left[0.65 + 0.531 \times \cos(0) \right] \left[\cos(0) - \cos(96.699) \right]}{\left[\sin(96.699) - \frac{2\pi \times (96.699) \times \cos(96.699)}{360} \right]}$$

$$I = 2.858 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

คำนวณหาค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง (I_d) โดยกำหนดมุมชั่วโมง เป็น 0 เนื่องจากระบบมีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \times \frac{\left[\cos(\omega) - \cos(\omega_s) \right]}{\left[\sin(\omega_s) - \frac{2\pi \omega \cos(\omega_s)}{360} \right]}$$

$$\frac{I_d}{20.096} = \frac{\pi}{24} \times \frac{\left[\cos(0) - \cos(96.699) \right]}{\left[\sin(96.699) - \frac{2\pi \times (96.699) \times \cos(96.699)}{360} \right]}$$

$$I_d = 2.468 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

คำนวณหาค่ารังสีตรงรายชั่วโมง (I_b)

$$I_b = I - I_d$$

$$I_b = 2.858 - 2.468$$

$$I_b = 0.39 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

คำนวณหาค่า (R_b) โดยกำหนดมุมชั่วโมง เป็น 0 เนื่องจากระบบมีการติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก

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

$$\begin{aligned}\cos(\theta) &= \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(\beta) - \sin(\delta)\cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma) \\ &\quad + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega) \\ &\quad + \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega) \\ \cos(\theta) &= \sin(18.791)\sin(18.9252)\cos(18.9) \\ &\quad - \sin(18.791)\cos(18.9252)\sin(18.9)\cos(0) \\ &\quad + \cos(18.791)\cos(18.9252)\cos(18.9)\cos(0) \\ &\quad + \cos(18.791)\sin(18.9252)\sin(18.9)\cos(0)\cos(0) \\ &\quad + \cos(18.791)\sin(18.9)\sin(0)\sin(0)\end{aligned}$$

$$\cos(\theta) = 0.95$$

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

$$\cos(\theta_z) = \sin(18.721)\sin(18.9252) + \cos(18.721)\cos(18.9252)\cos(0)$$

$$\cos(\theta_z) = 1$$

$$R_b = \frac{0.95}{1}$$

$$R_b = 0.95$$

หาค่ารังสีอาทิตย์รวมบนระนาบเอียงรายชั่วโมง (I_T)

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

$$\begin{aligned}I_T &= \left[0.39 \times 0.95 \right] + \left[2.468 \left(\frac{1 + \cos(18.9)}{2} \right) \right] \\ &\quad + \left[0.8 \times (0.39 + 2.468) \left(\frac{1 - \cos(18.9)}{2} \right) \right]\end{aligned}$$

$$I_T = 2.832 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

$$I_T = 2.832 \times 10^6 / 3,600$$

$$I_T = 786.917 \text{ W} / \text{m}^2$$

2. การคำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

การคำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งปีของจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้สมการคำนวณจากงานวิจัยของ (Chaichana et al., 2010) และข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุดของวันที่เป็นตัวแทนแต่ละเดือน จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ ตารางที่ 14 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561) โดยตัวอย่างการคำนวณพิจารณาที่เวลา 9.00 น. ของเดือนพฤษภาคม

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

โดย T_{max} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุด T_{min} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำสุด และ t คือ เวลาที่พิจารณา (h)

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

$$T_{amb} = 27.92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3. การคำนวณตัวแปรจากสมการใช้สมการทำนาย

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

- วันที่คำนวณ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2563
- ช่วงเวลาที่คำนวณ 12.03 น.
- ค่ารังสีอาทิตย์ (I_T) 846.84 W/m²
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) 35.0 °C
- อุณหภูมิน้ำออกจากแผง CPVT ($T_{f,o}$) 47.2 °C
- อุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อน CPVT (T_s) 46.4 °C
- อัตราการไหลของน้ำผ่านแผง CPVT (\dot{m}) 15 L/min (0.25 kg/s)
- พื้นที่รับรังสีอาทิตย์รวมของรางพาราโบลิก (A_a) 5.14176 m²
- ระยะเวลาระหว่างข้อมูล 4 min

ผลการคำนวณ

อุณหภูมิแผง CPVT จากสมการทำนาย (T_{CPVT})

$$T_{CPVT} = 1.45220 \times (I_{T,TRACKING})^{-0.13789} \times (T_s)^{1.49260} \times (T_a)^{-0.35161}$$

$$T_{\text{CPVT}} = 1.45220 \times (846.84^{-0.13789}) \times (46.4^{1.49260}) \times (35.0^{-0.35161})$$

$$T_{\text{CPVT}} = 50.124 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

กำลังไฟฟ้าของแผง CPVT จากสมการทำนาย (P_{el})

$$P_{\text{el}} = 0.0076052 \times (I_{\text{T,TRACKING}}^{1.08740}) \times (T_{\text{s}}^{0.48742}) \times (T_{\text{a}}^{0.28462}) \times (T_{\text{CPVT}}^{-0.40651})$$

$$P_{\text{el}} = 0.0076052 \times (846.84^{1.08740}) \times (46.4^{0.48742}) \\ \times (35.0^{0.28462}) \times (50.124^{-0.40651})$$

$$P_{\text{el}} = 42.22 \text{ W}$$

อัตราการความร้อนที่แผง CPVT ผลิตได้ (Q_{coll})

$$Q_{\text{Coll}} = (I_{\text{T,TRACKING}}) \times (A_{\text{a}}) \times (\eta_{\text{th(Avg.Exp.)}})$$

$$Q_{\text{Coll}} = (846.84) \times (5.14176) \times (0.22193)$$

$$Q_{\text{Coll}} = 966.33 \text{ W}$$

อุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บน้ำร้อนของระบบ CPVT

$$T_{\text{s}}^{t+\Delta t} = T_{\text{s}} + \left[\frac{Q_{\text{CPVT}} \Delta t}{MC_{\text{p}}} \right]$$

$$T_{\text{s}}^{t+\Delta t} = 46.40 + \left[\frac{966.33 \times 240}{200 \times 4,187} \right]$$

$$T_{\text{s}}^{t+\Delta t} = 46.68 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ภาคผนวก ข
การเผยแพร่ผลงานวิจัย

การเผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

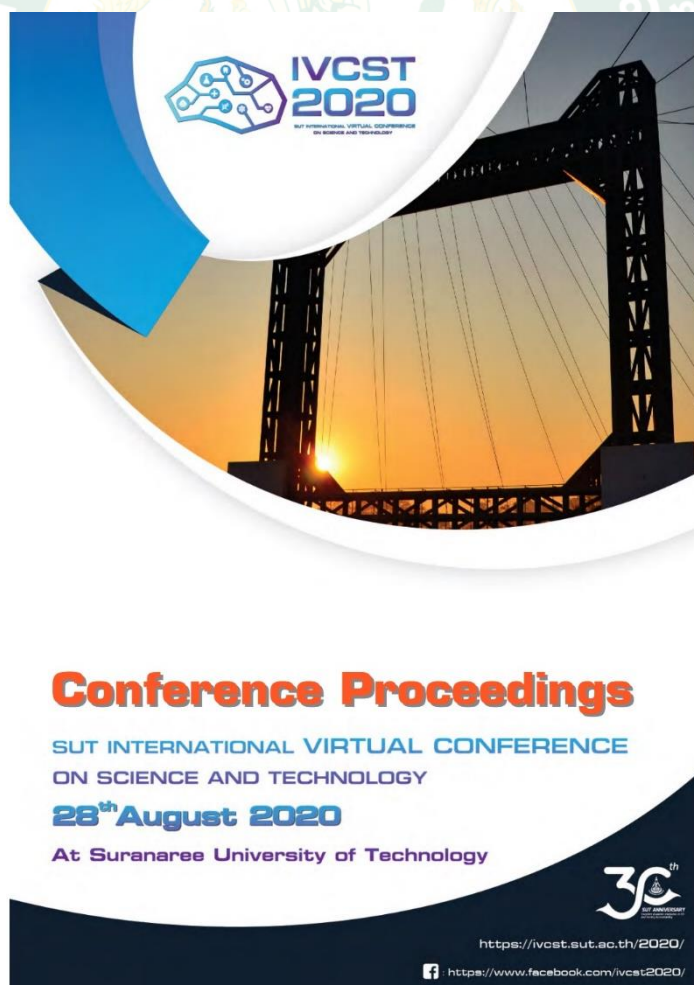
ชื่อบทความ: The Effect of Receiver Focal Length on Performance of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid system Combined with Parabolic Trough

ผู้แต่ง: Panchana Yalasri and Sarawut Polvongsri

งานประชุมวิชาการ: SUT International virtual conference on science and technology 2020

ผู้จัดงานประชุมวิชาการ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

วันที่นำเสนอผลงาน: 28 สิงหาคม 2563 นำเสนอผลงานผ่านระบบการประชุมออนไลน์



EAT0047

The Effect of Receiver Focal Length on Performance of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid system Combined with Parabolic Trough

Punchana Yalasri and Sarawut Polvongsri*

School of Renewable Energy, Maejo University, Chaing Mai, Thailand, 50290

* Corresponding Author: saravooth@hotmail.com

Abstract. This research aims to study the effect of the focal length levels of the system receiver about 50, 55, and 60 cm on the performance of the solar photovoltaic thermal hybrid system combined with the parabolic trough. The aperture area of the parabolic trough was 4.242 m² that made from a glossy stainless-steel sheet as a reflector, and its intensity concentration ratio (CR) was 6.4. The receiver was built from three polycrystalline silicon solar cell panels with a total area of 0.663 m² and the maximum power was 90 Wp integrated with coolant water behind the panels. The coolant box was built as the baffle channels with a 6.4 cm gap and the coolant water was circulated by an electrical pump with a mass flow rate of 0.1667 kg/s through 200 liters of the water storage tank. To face the sun during the day, solar tracking was used to track the system in the east-west direction. The experiment was tested on the variation of solar radiation, ambient temperature, and initial water temperature. The result showed that the 55 cm of the receiver focal length could produce the highest electrical efficiency of 1.23% and followed by 50 cm and 60 cm with 0.88%, and 0.74%, respectively. Moreover, the 55 cm of the receiver focal length could produce the thermal efficiency higher than the focal length of 60 cm and 50 cm which were about 28.45%, 27.81%, and 15.99 %, respectively.

Keywords: Parabolic trough, Solar photovoltaic thermal, Performance, Focal length.

1. Introduction

Thailand is located near the equator so almost all areas of Thailand receive high solar intensity throughout the year by an average of 18.2 MJ/m² [1]. It means that Thailand has a high potential for solar energy applications therefore, Thailand has widely promoted many projects and developments regarding solar energy. The use of solar energy can transform in various types, normally can be divided into 3 types such as conversion solar energy directly into heat energy, conversion of solar energy into electricity by solar cells, and conversion of both the heat energy and electricity. In addition, there is one method that is currently developed by using parabolic troughs and cooling system for solar panels to increase the intensity of the solar radiation on solar panels and reduce the heat to accumulate inside the solar cell. When

the solar intensity hits on the solar cell, more heat accumulates inside the solar cell that causes the voltage system to drop.

The related research about the parabolic solar systems and the solar cell cooling systems has reasonable publishing. Milad Mohsenzadeh et al. [2] studies the solar electricity and thermal power generation systems combine with electric power generation systems using thermoelectric modules installed on solar collectors. The average electrical efficiency and thermal efficiency of the day are 4.83% and 46.16% respectively. Ming Li, Xu Ji et al. [3] studied the electrical and thermal efficiency testing of the solar photovoltaic and thermal power generation systems installed on the parabolic trough. The experiment was conducted on four different types of solar cells, consisting of single crystalline silicon solar cells, combined crystalline silicon solar cells (Polycrystalline Silicon Solar Cell), gallium arsenide (GaAs) solar cells, and super solar cells. The results showed that the highest GaAs solar cell efficiency was 9.88%. Silicon cell efficiency is 51%. Monia Chaabane et al. [4] studied the efficiency of the solar cell that installed together with a parabolic solar collector with a CPVTS cooling system. This system does not have a cooling system for CPVS solar cells at the rate of the cooling water flow for the CPVTS system is 0.0187 L/s and 0.05 L/s. The results show that the efficiencies of CPVTS solar cells were 9.8% and 10.02% for the water mass flow rate of 0.0187 L/s, and 0.05 L/s, respectively, while the efficiency of solar cells without cooling system CPVS was equal to 9.4%. Sura Tundee et al. [5] designed the solar flattened Parabolic with a tracking system, and without tracking for the heat efficiency of both dishes comparing. The results showed that the heat receiving efficiency of the parabolic solar dish which adjusted the degree of the sun was 57.04%, while the heat efficiency of the solar angle was 12.77%.

From the above-mentioned research, it can be seen that electricity and hot water production from a solar panel with parabolic radiators is a possibility of performance increasing, but most researches focused on the solar cell type studying and the hot water flow rate uses. Therefore, this study proposes to study the parabolic concentrating PV/T system and discuss the focal length levels of the receiver that is installed combined with the parabolic solar collector effects on the electricity and thermal production performance.

2. Materials and methods

2.1. Parabolic concentrating PV/T system

Parabolic Concentrating PV/T system had been designed and built as shown in Figure 1.



Figure 1. The configuration and characteristics of parabolic concentrating PV/T system.

The parabolic curve was designed by a computer program and formed the configuration by a plasma cutting. For the solar reflector used a stainless steel sheet with two sheets of glossy surface to reflect the sun's rays to the receiver that is made from the three solar panels with a total area of 0.6633 m². Behind the receiver, the water box was installed for cooling. Cooling water was circulated by an electric pump from a water tank to the water box. For receiving direct radiation all time, solar concentrators are required tracking. The system tracking set following the solar altitude angle by adjusting the pushrod in the single-axis east-west tracking mode. The details of the experiment set are shown in Figure 1.

2.2. Experimental procedure

The experiment was conducted at School of Renewable Energy, Maejo University Chiang Mai, Thailand (Latitude 18°55'30.8"N, Longitude 99°01'28.7"E). The parabolic concentrating PV/T system was aligned in the North-South axis with solar tracking in the East-West direction. The aperture area of the concentrator tracked the sun by the tracking systems that was controlled by the timer microprocessor/position-based mode of sun tracking. Considering every 4 minutes per 1 degree rotation from E to W, the delay time of the tracking motor would be set every 4 minutes and the motor would be started to operate for 25 seconds and rotated the aperture of the concentrator to the correct position. For the case study were analysed in three different cases. In the first case study, adjusted the receiver level in the same position of the parabolic focal length level of 60 cm. The second and third cases study adjusted the receiver level less than the parabolic focal length levels of 55 and 50 cm, respectively as shown in Figure 2. For the cooling water, the flow rate was controlled to be stable at 0.1667 kg/s.

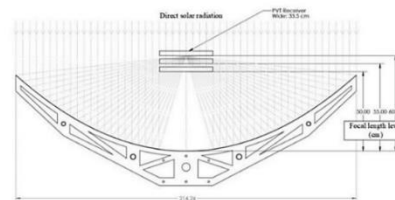


Figure 2. The adjustment characteristics of the receiver focal length levels.

2.3. Measuring and data collection

The appropriate instruments were used for measuring and recording the related parameters as shown in Figure 3. The total incident solar radiation on the aperture area of the parabolic reflector was measured by pyranometer (Model: Apogee SP-110-L-10, Accuracy $\pm 5\%$) and recorded with Adam multi-channels data logger. The pyranometer was installed on the top of the aperture area parabolic reflector in the parallel. The solar module analyzer (Model: Prova 210, Accuracy $\pm 1\%$) was used for electrical power measurement of the solar PV array. The multi-channels data logger (Model: Lutron TM-1947SD, Accuracy $\pm (0.4\% + 0.5^\circ\text{C})$) was used with a K-type sensor for temperature measuring of the inlet and outlet temperature of working fluid, the storage tank temperature, and the ambient temperature. The experiment duration was collected from 9:00 AM to 4:00 PM, and recorded data every 4 minutes for the system performance analysis.



Figure 3. Measurement diagram.

2.4. Analysis

The electricity efficiency can be calculated from the PVT is equal to the following Equation (1)[2].

$$\eta_{\text{el,pv}} = \frac{P_M}{G_{\text{tot}} A_a} = \frac{V_{\text{MPP}} I_{\text{MPP}}}{G_{\text{tot}} A_a} \quad (1)$$

Where V_{MPP} , I_{MPP} are the voltage, current from the solar PV module when operates at the maximum point. And G_{tot} is the total solar radiation, A_a is the aperture area of the parabolic reflector. During the experiment, the maximum output power conditions are verified by auto-adjusting the load resistance, so the solar cell voltage multiplies the current to be maximized value.

The thermal efficiency of system can be calculated as Equation (2)[2].

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_m}{G_{\text{tot}} A_a} = \frac{\dot{m} c_p (T_{\text{f,out}} - T_{\text{f,in}})}{G_{\text{tot}} A_a} \quad (2)$$

Where \dot{m} , $T_{\text{f,in}}$, $T_{\text{f,out}}$ are the flow rate of coolant, the inlet temperature of receiver and the outlet temperature, respectively.

The total efficiency (η_{tot}) of the system can be calculated as Equation (3)[2].

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_M + Q_m}{G_{\text{tot}} A_a} \quad (3)$$

3. Results and Discussion

3.1. The variation of incident solar radiation

The total solar radiation on the concentrator aperture area in the case of three receiver focal length levels, 50, 55, and 60 cm on a typical day is shown in Figure 4. When the sun moves across the meridian of the observer is the local solar noon. It usually does not coincide with the 12:00 PM of local time. On each of the experimental days, the local solar noon occurred at 12:22 PM of summer.

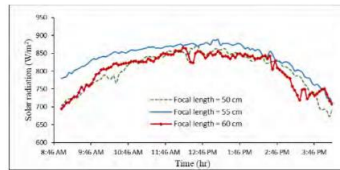


Figure 4. Total solar radiation on the concentrator aperture area of various receiver focal length levels.

Figure 5 shows the incident solar radiation and thermal characteristics on the receiver of the parabolic concentrating PV/T system at three different focal length levels of 50, 55, and 60 cm at local solar noon. The observation shows that at the focal length level of 60 cm, the receiver area that was not exposed to solar radiation representing a percentage of the total area equal to 91.04%, followed by the level at 50 and 55 cm is equal to 46.28% and 37.31% respectively. Due to the focal length level of 60 cm is the focal point of the parabolic trough, thus the concentration of solar radiation causes only in the middle of the solar panel. For the focal length level of the receiver 50 and 55 cm, in the middle of reflector area is not exposed to solar radiation due to the receiver shadow therefore there was not to reflect the sun's rays to the receiver area. The receiver temperatures were 44.1, 67.2, and 101.3 °C of the focal length level about 50, 55, and 60 cm, respectively.

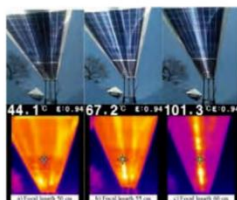


Figure 5. The incident solar radiation and thermal characteristics on the receiver of various receiver focal length levels.

3.2. Electrical performance

The electrical powers from the parabolic concentrating PV/T system at three different focal length levels of the receiver are shown in Figure 7(a). The average electrical power throughout the day produced from a system of 50, 55, 60 cm focal lengths were equal to 30.05 W, 43.79W, and 25.20 W, respectively. It demonstrated that the focal length of 55 cm could be produced the maximum electric power due to the difference in the focal length of the receiver. Therefore, the characteristics of the rays reflected from the parabolic trough to the receiver had been concentrated and distributed differently according to the focal length of the receiver as shown in Figure 2 and Figure 5. When comparing between the area of radiation and the total area of the solar panel at the focal length of 55 cm, the area with the highest solar radiation was equal to 62.68% compared to the total area of the solar panel, resulting in the solar cells to produce higher power.

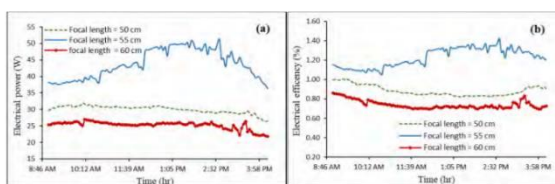


Figure 6. The variation (a) electrical power, (b) electrical efficiency of parabolic concentrating PV/T system at various focal length levels.

The electrical performance analysis in Equation 1 and Figure 7(b) shows the electrical efficiency parabolic concentrating PV/T system during the day. The system with a focal length of 55 cm, could give an average electrical efficiency by about 1.23% followed by the focal length levels of 50, 60 cm, respectively.

Table 2 shows that the electrical and thermal parameters of three different focal length levels at similar solar radiation. It was shown that the short circuit current of the solar panels was obtained 3.431 at the focal length level of the receiver 55 cm, which was higher than 1.8 times and 1.86 times of 50 and 60 cm, respectively. In addition, the electric short circuit at the focal length level of 60 cm is minimum by about 1.832 A. Due to the elevation of the receiver such as the focal point of the parabolic trough resulting in the solar concentration hit only in the middle of the solar cell. The percentage of the area that got the solar radiation comparing with the total area of the solar panels was 8.95%, resulting in power generation was less than the focal length levels of 50 and 55 cm. And the open-circuit voltage of the receiver that was installed at the focal length of 60 cm was 18.70 V because at this level there was a characteristic of solar concentration only in the middle of the solar cell so the solar cells had been received

higher temperature than other case studies as shown in Figure 5. The efficiency of the solar cells would be decreased about by 0.5 % /°C [6]. At the focal length level of 55 cm could provide the highest efficiency of electrical and thermal efficiency was equal to 1.35% and 27.29%, respectively.

Table 1. The electrical and thermal outputs of the PV array at various focal length levels.

Focal length (cm)	I_T (W/m^2)	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	P_m (W)	P_{th} (W)	η_{el} (%)	η_{th} (%)	η_{tot} (%)
50	840.518	19.42	1.888	29.21	488.48	0.82	13.70	14.52
55	843.920	19.41	3.431	48.20	976.97	1.35	27.29	28.64
60	841.410	18.70	1.832	26.17	837.40	0.73	23.46	24.19

3.3. Thermal performance

Figure 9(a) presents the variations of thermal powers from parabolic concentrating PV/T system that used a cooling water with a mass flow rate of 0.1667 kg/s, during the daytime. The accumulated heat in solar cells would be absorbed continuously by a cooling water with almost constant behavior due to the solar tracking. The average daily thermal power of the system with three focal length levels of solar radiation, 50, 55, and 60 cm was 550.02 W, 1016.30 W, and 954.12 W, respectively. It seemed that the average daily thermal power of the receiver focal length at 55 cm would be a maximum when compared the receiver focal length level at 50 and 60 cm because the exposed area of the incident solar radiation was the most equal to 62.68% of the total area of the solar cell. In addition, the sunlight was reflected on the parabolic and distributed well, therefore more heat exchange areas would be increased and cooling water can absorb more heat.

The thermal efficiency variations of the systems at three different focal length levels 50, 55, and 60 cm were considered following as equation (2). The inlet water temperature of the experiment started from 33 °C, versus time in one day of measurement are shown in Figure 9(b). Due to the characteristic of the exposed area of the parabolic reflector as shown in Figure 2 and Figure 5, showed that at the focal length receiver of the solar radiation of 50 and 55 cm, there had a partial loss of solar energy to the lower receiver level lower than the focus point while the focal length of 60 cm, could receive about 100%. The average thermal efficiency of the system during the daytime of the focal length of 55 and 60 cm could provide the average thermal efficiency is a similarity which was equal to 28.45% and 27.81%

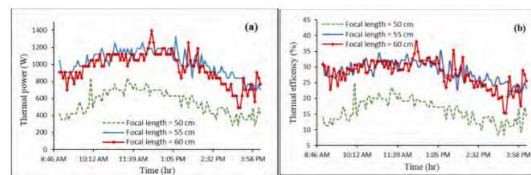


Figure 7. The variation (a) thermal power, (b) thermal efficiency of parabolic concentrating PV/T system at various focal length levels.

3.3. Total performance

The total efficiency is determined from equation (3) and the average daily efficiency of the focal length levels 50, 55, and 60 cm are summarized in Table 3. The averages daily total efficiency of the system throughout operation time show that the focal length at 55 cm could give the highest overall system performance with a total efficiency of 29.68%, followed by the focal length levels of 60 and 50 cm which was equal to 28.55% and 16.87%, respectively.

Table 2. The average daily performance results of parabolic concentrating PV/T system at various focal length levels.

Focal length (cm)	P_{el} (W)	P_{th} (W)	η_{el} (%)	η_{th} (%)	η_{tot} (%)
50	30.055	550.020	0.88	15.99	16.87
55	43.797	1016.300	1.23	28.45	29.68
60	25.205	954.128	0.74	27.81	28.55

4. Conclusions

This research proposes to study the performance of solar photovoltaic thermal hybrid system combined with a parabolic trough which has a receiver installed at different focal lengths of 50, 55, and 60 cm, respectively. The polycrystalline silicon solar panel was made as a receiver. Also, the cooling system was installed behind the solar panels which a mass flow rate was equal to 0.1667kg/s. Furthermore, the solar tracker was equipped for a receiver tracking from the East to the West. From the experiment, it can be concluded that installation a focal length level of the receiver of 55 cm was able to provide the highest average daily thermal efficiency about 28.45% followed by the focal length levels of 60 and 50 cm with average daily thermal efficiency was 27.81% and 15.99%, respectively. And when considering the electrical efficiency of solar cells at the receiver at a focal length of 55 cm, the average daily electrical efficiency of the solar cells was as high as 1.23% followed by the focal length 50 cm and 60 cm. Finally, the total efficiency of the system can be concluded that the average daily total efficiency of 555 cm was the highest efficiency of about 29.68%, followed by the 60 cm and 50 cm focal length which was equal to 28.55% and 16.87%, respectively.

5. Acknowledgments

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 the staff of Smart Energy and Environmental Research Unit (SEEU) for supporting many suggestions, knowledge, and instruments.

6. References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency 2017 "Guide to Development and Investment in Renewable Energy Production Set 2 Solar Energy." Retrieved from http://www.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf.
- [2] Milad M., Shafii M.B., Jafari H. and mosleh 2017. Renewable Energy 113:822-834.
- [3] Ming L., Xu J., Guoliang L., Shengxian W., YingFeng L. and Feng S. 2011. Applied Energy 88(9):3218-3227.
- [4] Monia C., Wael C., Hatem M. and Philippe B. 2013. Solar Energy98:315-321.
- [5] Sura T., Suparerck C. and Pongsiri S. 2012. The 26th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.
- [6] The Electricity Generating Authority of Thailand. "Photovoltaic power generation system." Retrieved from http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell_pg5.htm.



Certificates of Participation

This is to certify that

Punchana Yalasri
from Maejo University

has participated and presented a paper titled

The effect of receiver focal length on the performance of solar photovoltaic thermal hybrid system combined with parabolic trough

at SUT International Virtual Conference on Science and Technology (SUT-IVCST 202)

hosted by Suranaree University of Technology, Thailand

28th August , 2020.

W. Pairsuwan

Assoc. Prof. Dr. Weerapong Pairsuwan
Honorary Chair
Rector of Suranaree University of Technology

Kant Chaiyot

Assoc. Prof. Ft. Lt. Dr. Kontorn Chamniprasart
Conference Chair
Vice Rector for Academic Affairs and Internationalization

At Suranaree University of Technology



ภาคผนวก ค
ข้อมูลผลการทดลอง

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองที่ระดับความสูงเป่ารังสี 50 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
8:59	704.05	30.80	31.98	33.10	33.70	32.80	20.37	1.49	29.72
9:03	711.19	31.00	27.78	33.30	33.80	32.95	20.50	1.63	30.13
9:07	720.33	31.80	30.56	33.50	34.00	33.15	20.61	1.75	30.53
9:11	722.71	31.80	28.25	33.80	34.30	33.40	20.61	1.86	30.46
9:15	723.33	31.70	29.12	34.00	34.60	33.60	20.66	1.96	30.59
9:19	729.09	32.30	29.94	34.30	34.80	33.90	20.59	1.90	31.05
9:23	726.59	31.60	29.95	34.40	35.00	34.05	20.43	1.69	30.74
9:27	729.60	32.70	29.96	34.60	35.20	34.30	20.57	1.79	31.06
9:31	737.80	33.00	31.63	34.80	35.40	34.50	20.57	1.85	31.13
9:35	743.17	32.80	31.99	35.10	35.70	34.80	20.60	1.98	31.24
9:39	763.26	33.10	30.24	35.30	36.00	34.90	20.59	2.01	31.35
9:43	761.28	33.30	29.93	35.50	36.30	35.10	20.41	1.77	31.46
9:47	764.81	34.30	32.36	35.80	36.50	35.40	20.49	1.89	30.63
9:51	768.35	34.20	32.96	35.90	36.50	35.60	20.40	1.75	30.83
9:55	771.89	34.30	34.36	36.10	36.70	35.80	20.42	1.71	31.04
9:59	775.42	33.90	33.94	36.30	37.00	36.00	20.48	1.87	31.24
10:03	778.96	33.70	33.06	36.60	37.30	36.25	20.52	1.88	31.29
10:07	788.44	33.80	34.93	36.80	38.00	36.60	20.54	1.93	31.97
10:11	787.23	34.20	34.44	37.20	37.90	36.80	20.51	1.89	31.70
10:15	778.81	34.00	33.79	37.40	38.20	37.00	20.46	1.88	31.20
10:19	779.21	34.80	35.39	37.60	38.50	37.30	20.46	1.89	31.46
10:23	786.90	34.70	35.49	37.80	38.70	37.45	20.44	1.90	31.52
10:27	766.90	34.50	37.23	38.00	38.90	37.70	20.43	1.86	30.80
10:31	788.77	34.90	35.51	38.30	39.10	37.95	20.44	1.87	31.33
10:35	798.16	34.80	36.98	38.50	39.50	38.30	20.42	1.88	31.21
10:39	800.35	34.90	36.61	38.70	39.70	38.40	20.39	1.85	30.86

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองที่ระดับความสูงเป่ารังสี 50 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	812.01	35.20	33.00	39.00	39.90	38.65	20.38	1.86	30.91
10:47	817.27	35.70	36.19	39.30	40.30	39.00	20.35	1.86	30.75
10:51	824.48	35.10	37.71	39.40	40.40	39.20	20.36	1.85	30.79
10:55	829.91	35.00	38.65	39.70	40.70	39.40	20.34	1.86	30.88
10:59	826.83	35.20	37.90	39.90	41.00	39.70	20.33	1.86	30.77
11:03	821.24	34.80	37.38	40.20	41.20	39.85	20.30	1.85	30.68
11:07	827.56	34.70	40.60	40.40	41.40	40.10	20.30	1.86	30.82
11:11	833.47	35.30	35.49	40.70	41.70	40.35	20.26	1.87	30.86
11:15	839.47	35.60	38.52	40.90	41.90	40.60	20.28	1.87	30.96
11:19	841.00	36.60	34.58	41.20	42.10	40.85	20.24	1.87	30.75
11:23	839.79	35.90	36.33	41.40	42.50	41.15	20.23	1.86	30.65
11:27	840.36	36.30	38.09	41.50	42.70	41.35	20.22	1.86	30.73
11:31	839.30	37.30	40.10	41.80	42.90	41.55	20.20	1.87	30.65
11:35	840.68	36.70	40.65	42.10	43.20	41.80	20.19	1.86	30.66
11:39	840.03	37.10	39.49	42.40	43.40	42.10	20.17	1.86	30.56
11:43	839.14	37.00	39.24	42.60	43.70	42.40	20.15	1.85	30.36
11:47	848.05	37.70	39.86	42.90	43.90	42.65	20.14	1.86	30.49
11:51	856.88	38.60	36.90	43.20	44.20	42.90	20.11	1.87	30.60
11:55	854.85	37.60	41.01	43.40	44.40	43.10	20.12	1.88	30.65
11:59	855.58	37.80	39.90	43.70	44.70	43.40	20.09	1.87	30.62
12:03	852.10	37.30	41.07	43.90	44.90	43.65	20.08	1.87	30.58
12:07	857.44	38.60	39.69	44.10	45.20	43.85	20.05	1.88	30.77
12:11	857.28	39.10	41.97	44.30	45.40	44.10	20.04	1.89	30.73
12:15	852.10	38.50	37.62	44.60	45.50	44.30	20.01	1.89	30.83
12:19	848.21	38.30	41.89	44.80	45.80	44.55	20.01	1.90	30.73
12:23	830.39	38.80	42.90	45.00	46.00	44.80	19.98	1.87	30.36
12:27	862.38	38.30	43.87	45.30	46.30	45.10	19.98	1.91	31.09

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองที่ระดับความสูงเป่ารังสี 50 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
12:31	860.52	38.50	41.48	45.50	46.50	45.35	19.95	1.91	30.98
12:35	869.19	39.50	37.48	45.80	46.80	45.55	19.93	1.92	31.07
12:39	869.03	40.10	43.92	46.00	47.00	45.80	19.93	1.93	31.15
12:43	854.04	40.10	42.84	46.20	47.10	46.05	19.90	1.92	30.85
12:47	849.59	40.30	42.33	46.40	47.30	46.30	19.88	1.92	30.82
12:51	844.65	39.00	44.94	46.60	47.60	46.50	19.88	1.90	30.58
12:55	848.54	39.50	42.89	47.00	47.90	46.75	19.86	1.91	30.53
12:59	852.67	39.70	41.57	47.10	48.00	46.90	19.84	1.92	30.58
13:03	855.91	39.70	45.73	47.40	48.30	47.20	19.83	1.91	30.33
13:07	862.22	38.70	46.55	47.60	48.50	47.40	19.83	1.91	30.28
13:11	861.17	38.10	46.83	47.70	48.60	47.65	19.85	1.91	30.17
13:15	859.31	38.70	45.50	48.00	48.90	47.80	19.80	1.90	30.09
13:19	861.49	39.20	43.95	48.30	49.20	48.05	19.78	1.90	29.95
13:23	862.06	40.10	45.84	48.60	49.30	48.30	19.75	1.90	30.10
13:27	850.07	40.40	47.57	48.60	49.50	48.45	19.72	1.89	29.84
13:31	846.67	40.50	47.11	48.90	49.80	48.70	19.70	1.89	29.90
13:35	849.75	39.40	48.33	49.20	50.00	49.00	19.71	1.89	29.96
13:39	851.61	40.30	45.89	49.50	50.20	49.15	19.67	1.90	29.85
13:43	849.43	40.40	44.33	49.50	50.40	49.30	19.64	1.90	29.80
13:47	847.65	40.50	47.98	49.80	50.70	49.60	19.62	1.89	29.76
13:51	847.32	40.20	46.74	50.00	50.80	49.75	19.59	1.90	29.79
13:55	837.76	40.00	48.00	50.20	51.00	50.00	19.57	1.89	29.57
13:59	838.25	39.60	48.81	50.40	51.10	50.20	19.55	1.89	29.47
14:03	829.91	40.30	47.01	50.50	51.20	50.35	19.51	1.89	29.34
14:07	827.72	39.70	47.23	50.80	51.60	50.65	19.50	1.89	29.17
14:11	829.10	39.60	50.02	51.00	51.60	50.75	19.49	1.88	29.14

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองที่ระดับความสูงเป่ารังสี 50 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
14:15	838.49	39.60	47.97	51.20	51.80	50.95	19.46	1.89	29.41
14:19	834.53	40.60	49.20	51.30	52.10	51.15	19.43	1.89	29.18
14:23	840.52	40.60	49.02	51.40	52.10	51.35	19.42	1.89	29.21
14:27	823.92	39.60	53.43	51.80	52.40	51.60	19.40	1.90	29.21
14:31	822.22	39.90	46.71	51.90	52.50	51.80	19.33	1.87	28.87
14:35	824.32	40.60	48.78	52.10	52.70	51.90	19.29	1.90	29.14
14:39	826.83	39.60	50.16	52.30	52.80	52.10	19.28	1.92	29.19
14:43	829.91	39.80	53.59	52.40	53.10	52.35	19.26	1.94	29.35
14:47	831.12	39.50	53.25	52.60	53.30	52.50	19.27	1.95	29.37
14:51	826.83	39.90	50.34	52.70	53.40	52.55	19.20	1.95	29.30
14:55	814.20	39.80	50.85	52.90	53.60	52.85	19.18	1.94	29.04
14:59	812.17	39.30	52.44	53.20	53.80	53.05	19.18	1.95	29.15
15:03	810.07	38.90	51.44	53.20	53.90	53.20	19.18	1.95	29.16
15:07	804.48	40.30	50.98	53.40	54.00	53.35	19.08	1.95	28.96
15:11	797.84	39.80	52.10	53.60	54.10	53.45	19.07	1.95	28.97
15:15	786.50	40.10	51.49	53.90	54.30	53.65	19.00	1.93	28.75
15:19	787.23	39.80	52.97	54.00	54.50	53.85	19.00	1.92	28.68
15:23	785.53	40.90	53.11	54.10	54.70	53.95	18.91	1.96	29.00
15:27	774.92	39.60	57.44	54.30	54.70	54.15	18.92	1.94	28.86
15:31	762.93	39.90	55.56	54.40	55.00	54.30	18.89	1.96	29.04
15:35	756.94	39.90	54.51	54.40	55.00	54.35	18.90	1.99	29.51
15:39	738.15	39.10	58.50	54.70	55.20	54.65	18.90	1.98	28.98
15:43	734.10	39.70	58.84	54.80	55.30	54.75	18.88	1.89	28.21
15:47	741.23	39.80	56.91	54.90	55.40	54.80	18.86	1.95	28.91
15:51	721.22	39.40	58.05	55.00	55.60	54.95	18.87	1.91	28.53
15:55	697.17	40.10	58.70	55.10	55.60	55.05	18.79	1.86	27.44

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองที่ระดับความสูงเป่ารับรังสี 50 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
15:59	692.39	41.30	57.19	55.40	56.10	55.25	18.75	1.86	27.42
16:03	694.09	41.40	57.74	55.60	56.00	55.40	18.74	1.82	27.03



ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
8:59	779.21	31.70	35.69	34.10	35.60	33.90	20.7	2.522	38.21
9:03	782.29	32.00	37.21	34.40	35.70	34.10	20.68	2.50	38.02
9:07	784.96	32.20	36.27	34.70	36.00	34.45	20.67	2.51	37.73
9:11	796.06	31.90	38.24	35.00	36.30	34.70	20.67	2.57	38.05
9:15	792.82	31.80	38.14	35.30	36.60	35.05	20.64	2.59	37.66
9:19	800.67	32.40	36.11	35.60	36.90	35.30	20.62	2.63	37.67
9:23	804.32	33.30	35.13	35.90	37.20	35.65	20.61	2.62	37.63
9:27	807.56	32.90	36.70	36.30	37.60	36.00	20.60	2.66	38.14
9:31	812.17	33.60	38.50	36.50	37.90	36.20	20.58	2.64	37.97
9:35	813.71	33.40	37.15	36.90	38.30	36.60	20.57	2.69	38.41
9:39	817.60	34.10	35.81	37.20	38.70	36.95	20.54	2.66	38.13
9:43	823.92	34.40	36.02	37.50	38.90	37.25	20.52	2.68	38.38
9:47	830.39	35.00	35.77	37.80	39.20	37.55	20.50	2.69	38.45
9:51	834.53	34.80	38.98	38.10	39.50	37.85	20.46	2.71	38.79
9:55	832.66	34.10	41.04	38.40	39.80	38.15	20.45	2.68	38.46
9:59	837.12	33.50	39.27	38.60	40.20	38.50	20.43	2.70	38.92
10:03	839.14	33.90	41.45	39.10	40.50	38.85	20.40	2.62	38.73
10:07	841.00	33.90	40.56	39.50	41.00	39.35	20.37	2.59	38.26
10:11	839.79	33.90	41.72	39.80	41.30	39.65	20.39	2.77	39.63
10:15	844.24	34.30	40.78	40.00	41.60	40.00	20.36	2.72	39.26
10:19	848.05	33.80	42.87	40.30	41.90	40.30	20.34	2.62	39.12
10:23	852.67	34.70	39.06	40.70	42.30	40.55	20.32	2.75	40.22
10:27	853.31	35.30	42.28	41.10	42.70	40.95	20.29	2.68	39.58
10:31	849.02	34.90	43.08	41.20	42.90	41.20	20.27	2.61	39.37
10:35	853.31	35.10	43.37	41.60	43.20	41.50	20.24	2.55	38.61
10:39	852.26	35.10	43.99	42.00	43.50	41.90	20.23	2.49	38.03

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	850.56	35.80	43.71	42.20	43.70	42.05	20.25	2.80	41.24
10:47	854.53	36.50	44.72	42.60	44.00	42.40	20.23	2.82	41.81
10:51	858.66	36.50	43.25	42.80	44.40	42.65	20.21	2.84	41.58
10:55	857.93	36.10	41.97	43.10	44.70	43.00	20.18	2.82	42.01
10:59	857.77	35.40	47.01	43.40	45.20	43.35	20.16	2.74	41.32
11:03	858.98	34.90	48.01	43.70	45.40	43.65	20.15	2.74	41.30
11:07	860.85	34.90	47.22	44.00	45.60	43.95	20.15	2.80	42.21
11:11	862.22	36.10	46.17	44.30	46.00	44.30	20.13	2.80	42.20
11:15	864.09	35.90	44.72	44.60	46.20	44.55	20.12	2.82	42.54
11:19	866.84	36.20	46.96	44.80	46.50	44.75	20.10	2.90	43.08
11:23	866.52	35.90	46.76	45.20	46.80	45.10	20.08	2.90	43.28
11:27	867.65	36.30	46.27	45.40	47.10	45.35	20.07	2.95	43.63
11:31	863.76	36.30	49.22	45.70	47.30	45.65	20.05	2.91	43.33
11:35	864.57	35.80	47.28	46.00	47.70	46.00	20.03	2.91	42.76
11:39	863.44	36.10	44.28	46.40	47.90	46.25	20.01	2.91	42.84
11:43	865.79	36.70	47.59	46.60	48.20	46.55	20.00	2.94	43.06
11:47	868.70	36.80	49.08	46.80	48.50	46.80	20.00	2.95	43.89
11:51	869.03	37.10	50.23	47.10	48.80	47.10	19.99	2.96	44.12
11:55	869.75	37.50	50.37	47.40	49.10	47.45	19.98	2.98	44.22
11:59	868.54	36.30	51.34	47.60	49.40	47.70	19.99	2.88	42.74
12:03	871.29	35.80	52.65	47.90	49.60	48.05	20.02	2.87	42.92
12:07	873.64	36.20	51.36	48.30	49.90	48.35	20.00	2.83	42.12
12:11	875.02	36.20	50.38	48.50	50.20	48.65	20.03	3.13	47.63
12:15	870.56	37.00	51.85	48.80	50.50	48.85	20.01	3.21	48.11
12:19	872.99	37.90	51.79	49.10	50.80	49.15	20.00	3.22	48.07
12:23	873.97	37.30	52.85	49.40	51.00	49.40	19.98	3.23	48.32

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	850.56	35.80	43.71	42.20	43.70	42.05	20.25	2.80	41.24
10:47	854.53	36.50	44.72	42.60	44.00	42.40	20.23	2.82	41.81
10:51	858.66	36.50	43.25	42.80	44.40	42.65	20.21	2.84	41.58
10:55	857.93	36.10	41.97	43.10	44.70	43.00	20.18	2.82	42.01
10:59	857.77	35.40	47.01	43.40	45.20	43.35	20.16	2.74	41.32
11:03	858.98	34.90	48.01	43.70	45.40	43.65	20.15	2.74	41.30
11:07	860.85	34.90	47.22	44.00	45.60	43.95	20.15	2.80	42.21
11:11	862.22	36.10	46.17	44.30	46.00	44.30	20.13	2.80	42.20
11:15	864.09	35.90	44.72	44.60	46.20	44.55	20.12	2.82	42.54
11:19	866.84	36.20	46.96	44.80	46.50	44.75	20.10	2.90	43.08
11:23	866.52	35.90	46.76	45.20	46.80	45.10	20.08	2.90	43.28
11:27	867.65	36.30	46.27	45.40	47.10	45.35	20.07	2.95	43.63
11:31	863.76	36.30	49.22	45.70	47.30	45.65	20.05	2.91	43.33
11:35	864.57	35.80	47.28	46.00	47.70	46.00	20.03	2.91	42.76
11:39	863.44	36.10	44.28	46.40	47.90	46.25	20.01	2.91	42.84
11:43	865.79	36.70	47.59	46.60	48.20	46.55	20.00	2.94	43.06
11:47	868.70	36.80	49.08	46.80	48.50	46.80	20.00	2.95	43.89
11:51	869.03	37.10	50.23	47.10	48.80	47.10	19.99	2.96	44.12
11:55	869.75	37.50	50.37	47.40	49.10	47.45	19.98	2.98	44.22
11:59	868.54	36.30	51.34	47.60	49.40	47.70	19.99	2.88	42.74
12:03	871.29	35.80	52.65	47.90	49.60	48.05	20.02	2.87	42.92
12:07	873.64	36.20	51.36	48.30	49.90	48.35	20.00	2.83	42.12
12:11	875.02	36.20	50.38	48.50	50.20	48.65	20.03	3.13	47.63
12:15	870.56	37.00	51.85	48.80	50.50	48.85	20.01	3.21	48.11
12:19	872.99	37.90	51.79	49.10	50.80	49.15	20.00	3.22	48.07
12:23	873.97	37.30	52.85	49.40	51.00	49.40	19.98	3.23	48.32

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
12:27	876.23	37.60	52.98	49.70	51.30	49.70	19.97	3.24	48.63
12:31	876.88	38.90	52.55	50.00	51.70	50.05	19.97	3.29	48.83
12:35	873.16	39.00	54.86	50.30	52.00	50.35	19.95	3.32	48.89
12:39	869.51	38.30	54.36	50.50	52.20	50.55	19.90	3.34	48.33
12:43	874.13	39.00	53.31	50.70	52.40	50.75	19.88	3.37	49.22
12:47	874.69	37.70	55.56	51.10	52.80	51.15	19.87	3.25	47.82
12:51	879.15	37.50	54.72	51.30	52.90	51.35	19.88	3.29	48.94
12:55	877.45	37.20	56.37	51.50	53.20	51.65	19.83	3.23	46.07
12:59	873.80	37.80	55.64	51.80	53.50	51.85	19.81	3.29	49.34
13:03	886.28	37.50	57.24	52.10	53.70	52.15	19.78	3.30	49.65
13:07	885.06	38.20	55.43	52.50	54.00	52.50	19.76	3.31	49.74
13:11	888.14	37.70	57.01	52.50	54.40	52.65	19.75	3.34	49.76
13:15	872.43	37.80	54.95	52.80	54.50	52.90	19.72	3.38	49.65
13:19	876.88	38.30	56.82	53.20	54.70	53.15	19.70	3.35	49.72
13:23	876.56	38.50	54.07	53.50	54.90	53.50	19.67	3.38	49.91
13:27	877.45	38.60	58.77	53.60	55.00	53.65	19.68	3.37	49.80
13:31	874.53	38.20	57.44	53.70	55.40	53.85	19.66	3.46	49.59
13:35	872.10	39.40	55.45	54.20	55.70	54.20	19.64	3.51	50.33
13:39	874.13	38.70	60.34	54.40	55.80	54.45	19.63	3.42	48.71
13:43	877.45	39.60	57.11	54.60	56.10	54.65	19.61	3.49	50.82
13:47	875.75	39.90	57.84	54.90	56.10	54.90	19.59	3.41	50.22
13:51	869.75	37.80	60.62	55.00	56.50	55.20	19.59	3.33	48.49
13:55	862.22	38.50	59.30	55.30	56.90	55.40	19.57	3.34	48.32
13:59	865.62	38.50	58.87	55.50	56.90	55.55	19.54	3.44	48.55
14:03	859.63	38.20	60.06	55.80	57.10	55.85	19.54	3.36	47.71
14:07	862.22	38.20	59.71	56.00	57.60	56.15	19.53	3.36	48.79

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
14:11	856.72	38.30	57.10	56.20	57.60	56.25	19.49	3.40	49.83
14:15	860.52	38.10	59.22	56.40	57.90	56.55	19.49	3.31	46.62
14:19	856.23	38.80	59.91	56.60	58.00	56.70	19.45	3.43	48.96
14:23	843.92	40.00	58.72	56.90	58.30	57.00	19.41	3.43	48.20
14:27	839.30	39.30	60.27	57.20	58.50	57.25	19.40	3.34	48.19
14:31	841.33	38.50	59.38	57.30	58.60	57.50	19.38	3.35	48.11
14:35	855.18	39.30	57.60	57.50	58.90	57.65	19.37	3.54	49.91
14:39	846.51	40.90	58.75	57.90	59.10	57.95	19.34	3.60	51.10
14:43	832.99	38.60	63.18	58.00	59.30	58.10	19.33	3.19	45.25
14:47	827.32	38.50	60.74	58.20	59.50	58.35	19.29	3.25	45.52
14:51	825.86	38.60	60.86	58.40	59.80	58.60	19.30	3.16	42.92
14:55	822.22	38.40	59.49	58.50	59.80	58.75	19.25	3.24	46.33
14:59	825.62	38.80	61.30	58.90	60.20	58.95	19.21	3.20	45.81
15:03	825.13	38.90	60.15	59.00	60.20	59.10	19.18	3.30	47.59
15:07	820.03	38.10	62.64	59.30	60.50	59.40	19.18	3.19	45.10
15:11	812.33	38.30	62.08	59.50	60.80	59.60	19.15	3.17	44.00
15:15	800.02	38.70	63.03	59.70	61.00	59.80	19.13	3.14	44.24
15:19	803.26	38.70	61.17	59.80	61.00	59.95	19.12	3.16	45.76
15:23	800.83	38.60	63.93	60.00	61.20	60.15	19.12	3.06	44.36
15:27	796.46	38.80	61.64	60.20	61.40	60.35	19.10	3.05	43.08
15:31	784.31	38.80	63.29	60.30	61.50	60.50	19.08	3.00	42.86
15:35	780.91	38.50	65.23	60.60	61.80	60.70	19.07	2.99	42.51
15:39	779.53	38.50	65.81	60.70	61.70	60.80	19.07	2.99	42.61
15:43	765.69	38.70	65.94	60.90	61.90	61.00	19.06	2.91	41.19
15:47	760.58	38.20	68.33	60.90	62.00	61.10	19.07	2.84	40.65
15:51	763.26	38.80	68.42	61.20	62.30	61.40	19.04	2.87	39.62

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
15:55	755.81	39.00	69.07	61.30	62.30	61.50	19.05	2.90	39.98
15:59	748.03	39.50	69.16	61.50	62.60	61.65	19.03	2.88	39.67
16:03	745.68	38.70	69.98	61.60	62.60	61.85	19.04	2.78	38.51



ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 60 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
8:59	694.58	32.30	40.62	33.90	35.20	33.60	20.38	1.57	25.32
9:03	702.43	32.60	41.05	34.30	35.60	34.00	20.37	1.58	25.35
9:07	711.67	32.30	43.23	34.60	35.80	34.30	20.29	1.60	25.76
9:11	712.72	33.30	44.05	34.90	36.20	34.60	20.24	1.60	25.69
9:15	721.06	33.20	44.97	35.30	36.30	34.90	20.23	1.62	25.86
9:19	727.95	33.50	42.21	35.40	36.60	35.20	20.22	1.63	25.99
9:23	728.43	33.50	45.24	35.70	37.00	35.50	20.21	1.63	25.79
9:27	740.58	33.10	43.81	36.00	37.20	35.80	20.18	1.63	25.76
9:31	755.64	33.20	44.83	36.30	37.40	36.00	20.17	1.65	26.10
9:35	747.95	34.20	46.21	36.60	37.90	36.30	20.13	1.64	25.78
9:39	762.28	34.80	45.58	36.90	38.10	36.55	20.11	1.65	25.94
9:43	757.99	33.90	47.98	37.20	38.50	36.90	20.11	1.65	25.87
9:47	764.47	34.40	46.55	37.50	38.70	37.20	20.07	1.65	25.93
9:51	777.11	34.40	47.36	37.70	39.10	37.50	20.06	1.66	26.26
9:55	790.63	34.10	48.51	38.10	39.50	37.80	20.06	1.67	26.35
9:59	794.19	33.90	49.27	38.40	39.80	38.25	20.03	1.65	26.06
10:03	803.59	34.60	48.95	38.80	40.20	38.50	20.03	1.61	25.51
10:07	805.69	35.50	49.03	39.00	40.50	38.80	19.99	1.59	25.06
10:11	804.64	35.50	48.78	39.40	40.90	39.15	19.92	1.73	26.98
10:15	809.42	34.60	46.42	39.70	41.10	39.40	19.90	1.73	26.82
10:19	811.28	35.10	50.14	40.00	41.50	39.80	19.89	1.73	26.77
10:23	820.68	35.60	49.13	40.30	41.80	40.20	19.87	1.73	26.62
10:27	821.00	35.80	47.95	40.50	42.10	40.35	19.85	1.72	26.63
10:31	816.63	36.40	47.23	41.00	42.40	40.75	19.82	1.70	26.20
10:35	819.14	35.00	50.64	41.30	42.70	41.05	19.82	1.71	26.15
10:39	821.73	35.90	49.36	41.60	43.10	41.35	19.80	1.69	26.22

ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 60 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	822.54	36.50	48.74	41.90	43.50	41.65	19.77	1.69	26.02
10:47	822.54	35.60	54.23	42.10	43.70	41.95	19.79	1.69	25.98
10:51	827.32	35.10	52.78	42.40	43.90	42.30	19.76	1.69	25.98
10:55	827.32	35.90	52.91	42.70	44.30	42.60	19.73	1.69	26.01
10:59	828.05	36.70	50.04	43.20	44.80	42.95	19.69	1.69	25.66
11:03	825.45	36.90	53.56	43.30	44.90	43.20	19.69	1.69	25.70
11:07	826.67	37.40	54.08	43.60	45.20	43.45	19.66	1.68	25.48
11:11	826.35	37.00	51.71	43.90	45.40	43.75	19.64	1.70	25.47
11:15	826.18	36.90	53.12	44.20	45.80	44.10	19.62	1.70	25.33
11:19	835.01	36.60	52.25	44.50	46.00	44.35	19.61	1.72	25.53
11:23	830.48	36.00	54.60	44.80	46.40	44.75	19.59	1.71	25.31
11:27	826.83	38.10	55.76	45.20	46.60	45.00	19.55	1.68	25.33
11:31	835.42	36.90	56.11	45.50	47.00	45.35	19.55	1.70	25.29
11:35	836.39	38.00	56.51	45.70	47.30	45.65	19.54	1.69	25.32
11:39	845.30	36.90	55.90	46.00	47.60	45.95	19.51	1.70	25.30
11:43	850.24	37.20	54.02	46.40	47.90	46.30	19.48	1.71	25.16
11:47	847.65	38.20	54.71	46.70	48.20	46.50	19.49	1.72	25.27
11:51	847.16	38.50	53.24	47.00	48.50	46.85	19.52	1.72	25.21
11:55	845.62	38.00	56.15	47.30	48.90	47.20	19.49	1.72	25.10
11:59	847.16	37.40	60.15	47.50	49.10	47.45	19.51	1.73	25.33
12:03	857.77	38.80	53.59	48.00	49.50	47.90	19.53	1.75	25.46
12:07	855.58	38.10	59.70	48.10	49.70	48.15	19.53	1.75	25.45
12:11	855.74	38.60	56.44	48.30	50.00	48.35	19.44	1.75	25.36
12:15	865.62	38.60	57.43	48.60	50.40	48.65	19.43	1.77	25.60
12:19	862.87	38.80	59.14	48.90	50.90	49.00	19.42	1.75	25.51
12:23	847.89	38.80	59.04	49.20	51.00	49.30	19.41	1.74	25.38

ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 60 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
12:27	825.62	38.50	60.72	49.70	51.30	49.60	19.38	1.70	24.94
12:31	823.59	37.90	61.15	49.90	51.50	49.90	19.38	1.71	25.34
12:35	850.24	38.60	58.51	50.10	51.70	50.20	19.34	1.76	25.76
12:39	855.01	39.60	60.62	50.40	52.00	50.45	19.31	1.77	25.72
12:43	853.31	38.30	60.89	50.60	52.30	50.70	19.28	1.78	25.70
12:47	847.32	38.90	60.38	50.90	52.60	50.95	19.29	1.78	25.93
12:51	836.39	38.70	61.44	51.20	52.80	51.30	19.25	1.76	25.77
12:55	843.92	39.10	61.95	51.50	53.10	51.55	19.19	1.76	25.84
12:59	850.72	38.50	61.91	51.80	53.40	51.85	19.17	1.77	25.70
13:03	844.81	39.60	58.19	51.90	53.60	52.05	19.16	1.77	25.84
13:07	846.51	40.00	60.31	52.30	53.90	52.35	19.08	1.77	25.75
13:11	855.18	39.40	62.50	52.60	54.10	52.65	19.05	1.78	25.72
13:15	850.40	38.90	64.15	52.90	54.40	52.90	19.05	1.79	25.86
13:19	840.84	39.00	63.56	53.10	54.40	53.15	19.04	1.80	26.05
13:23	841.89	38.80	62.51	53.40	54.60	53.40	19.02	1.79	25.67
13:27	840.68	38.70	61.64	53.50	54.90	53.65	19.01	1.78	25.51
13:31	835.01	39.20	64.06	53.80	55.10	53.90	18.99	1.77	25.30
13:35	844.81	38.80	63.02	54.10	55.50	54.20	18.95	1.79	25.45
13:39	837.76	38.20	67.31	54.30	56.10	54.45	18.98	1.79	26.00
13:43	847.89	38.30	64.82	54.40	55.90	54.65	18.93	1.80	25.92
13:47	848.86	38.70	64.95	54.80	56.20	55.00	18.93	1.80	25.79
13:51	842.70	38.80	63.45	55.00	56.40	55.15	18.89	1.78	24.99
13:55	848.37	39.30	63.35	55.30	56.80	55.35	18.85	1.79	25.06
13:59	843.43	39.20	65.15	55.50	57.20	55.65	18.86	1.79	25.32
14:03	839.79	39.50	65.32	55.70	57.00	55.95	18.82	1.79	25.35
14:07	842.06	39.20	64.45	56.00	57.40	56.15	18.82	1.80	25.53

ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 60 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
14:11	835.01	39.90	62.95	56.20	57.60	56.40	18.79	1.80	25.80
14:15	835.42	39.60	64.74	56.50	57.80	56.65	18.78	1.80	25.54
14:19	835.90	39.60	64.70	56.70	58.00	56.90	18.74	1.81	25.44
14:23	841.41	39.20	63.73	56.90	58.10	57.05	18.70	1.83	26.17
14:27	843.11	39.50	63.98	57.20	58.50	57.35	18.58	1.81	25.49
14:31	834.85	39.00	67.58	57.40	58.60	57.65	18.57	1.77	25.27
14:35	842.38	39.30	66.24	57.60	58.90	57.85	18.50	1.79	24.97
14:39	804.64	40.20	67.87	57.80	59.00	58.00	18.49	1.76	24.84
14:43	827.32	39.80	68.91	58.10	59.30	58.25	18.56	1.78	25.11
14:47	809.72	39.50	65.84	58.30	59.50	58.50	18.55	1.69	24.06
14:51	804.18	40.10	67.78	58.80	59.90	58.65	18.41	1.37	24.18
14:55	797.65	39.80	64.38	58.60	59.70	58.90	17.87	0.94	23.96
14:59	791.12	38.60	60.36	58.70	59.80	59.00	17.87	0.90	23.74
15:03	784.58	39.00	62.33	58.60	59.60	59.05	18.58	1.73	23.52
15:07	779.21	39.50	63.08	58.60	59.60	59.05	18.62	1.84	25.23
15:11	757.22	40.40	66.15	58.90	60.00	59.20	18.46	1.68	24.38
15:15	746.30	40.10	67.67	59.10	60.00	59.40	18.48	1.74	23.68
15:19	732.62	39.60	69.07	59.10	60.00	59.50	18.44	1.70	22.21
15:23	718.94	39.30	67.31	59.20	60.10	59.60	18.56	1.86	24.35
15:27	748.27	39.70	62.11	59.20	59.90	59.55	18.73	1.89	25.60
15:31	749.08	39.70	63.72	59.50	60.20	59.65	18.72	1.81	26.37
15:35	722.44	40.60	65.70	59.70	60.60	59.90	18.48	1.65	23.21
15:39	733.78	40.30	71.55	59.80	61.00	60.05	18.51	1.73	23.90
15:43	739.53	39.10	76.11	60.00	61.00	60.25	18.51	1.68	23.18
15:47	730.78	39.50	73.79	60.20	61.10	60.50	18.46	1.63	22.49
15:51	737.02	39.40	73.85	60.30	61.30	60.60	18.44	1.63	22.30

ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 60 cm อัตราการไหล 10LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
15:55	743.50	39.30	77.39	60.40	61.50	60.80	18.41	1.64	22.18
15:59	749.25	39.70	76.40	60.50	61.50	60.85	18.38	1.63	22.07
16:03	750.95	40.50	70.70	61.80	62.60	61.15	18.32	1.63	22.23



ภาคผนวก ค.4 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 5 LPM ปริมาณน้ำ 200L

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
8:59	753.05	30.60	34.55	32.60	35.00	32.35	21.13	2.26	34.26
9:03	752.00	31.60	35.08	33.00	36.00	32.80	21.08	2.31	36.26
9:07	762.93	31.50	38.61	33.40	35.90	33.10	21.04	2.26	32.94
9:11	767.22	31.80	37.64	33.70	36.40	33.50	20.93	2.08	32.02
9:15	772.00	30.70	38.19	34.10	36.70	33.90	20.90	2.11	32.52
9:19	773.06	31.20	40.03	34.40	37.00	34.20	20.80	2.07	32.93
9:23	775.24	31.40	39.12	34.70	37.10	34.60	20.73	2.09	33.19
9:27	780.67	31.00	39.65	35.00	37.40	34.90	20.71	2.10	32.97
9:31	787.55	31.90	37.30	35.40	37.70	35.15	20.68	2.10	33.05
9:35	791.28	32.30	38.89	35.70	38.10	35.50	20.68	2.13	33.29
9:39	784.96	32.30	40.26	36.10	38.40	35.90	20.64	2.12	33.33
9:43	798.81	31.90	41.44	36.40	38.80	36.20	20.65	2.16	33.47
9:47	802.37	32.70	38.92	36.60	38.90	36.50	20.62	2.41	35.20
9:51	798.16	32.80	39.44	37.00	39.40	36.80	20.58	2.39	34.82
9:55	801.24	33.00	42.20	37.30	39.80	37.10	20.57	2.37	35.23
9:59	814.20	33.00	41.61	37.60	40.00	37.40	20.56	2.39	35.49
10:03	814.04	32.80	43.48	37.90	40.20	37.70	20.58	2.48	37.87
10:07	813.55	32.60	42.73	38.20	40.50	38.10	20.59	2.47	38.01
10:11	816.06	32.90	40.73	38.40	40.90	38.35	20.60	2.48	38.10
10:15	820.84	33.60	42.27	38.90	41.00	38.70	20.57	2.49	38.44
10:19	827.88	33.20	41.56	39.10	41.40	39.00	20.57	2.52	38.71
10:23	826.83	33.70	39.77	39.50	41.80	39.25	20.55	2.53	38.88
10:27	826.83	33.20	41.29	39.80	41.90	39.65	20.53	2.53	38.86
10:31	824.24	33.60	43.00	40.10	42.40	39.95	20.53	2.50	38.48
10:35	814.85	34.70	42.10	40.30	42.50	40.15	20.51	2.53	38.82
10:39	826.02	34.00	43.94	40.60	42.90	40.50	20.51	2.51	38.80

ภาคผนวก ค.4 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 5 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	827.56	34.50	42.70	41.00	43.30	40.80	20.47	2.52	39.25
10:47	832.50	33.60	45.23	41.20	43.30	41.10	20.48	2.55	39.33
10:51	833.88	34.30	45.99	41.60	43.90	41.45	20.45	2.53	39.20
10:55	831.45	33.70	45.68	41.70	43.80	41.65	20.46	2.54	39.32
10:59	840.36	34.50	43.25	42.00	44.30	41.90	20.46	2.54	39.42
11:03	836.95	33.80	47.17	42.30	44.80	42.30	20.43	2.52	39.19
11:07	835.01	33.50	46.05	42.50	44.90	42.50	20.38	2.56	39.44
11:11	843.27	34.50	42.57	43.00	45.10	42.80	20.38	2.62	40.18
11:15	844.08	34.20	49.77	43.10	45.50	43.10	20.38	2.63	40.22
11:19	843.11	34.30	44.59	43.50	45.90	43.45	20.34	2.63	40.18
11:23	846.67	34.40	49.01	43.70	46.30	43.70	20.34	2.66	40.64
11:27	842.22	35.50	46.33	44.10	46.50	44.05	20.31	2.68	40.53
11:31	848.86	34.60	49.07	44.30	46.80	44.30	20.29	2.68	39.93
11:35	850.97	34.20	49.36	44.50	46.90	44.55	20.31	2.71	41.06
11:39	853.31	35.00	49.70	44.80	47.10	44.85	20.31	2.72	41.01
11:43	855.18	36.50	45.81	45.30	48.00	45.25	20.29	2.74	41.37
11:47	848.70	36.00	50.02	45.40	47.90	45.45	20.29	2.77	41.39
11:51	848.37	36.40	49.92	45.80	48.00	45.75	20.27	2.74	41.39
11:55	855.34	36.20	50.99	46.10	48.40	46.10	20.28	2.76	41.59
11:59	855.91	35.50	53.36	46.20	48.50	46.30	20.30	2.73	40.90
12:03	859.15	35.70	50.85	46.60	49.00	46.60	20.29	2.80	41.85
12:07	863.44	37.10	51.80	46.90	49.30	46.95	20.26	2.84	42.44
12:11	856.39	37.30	52.64	47.20	49.80	47.25	20.22	2.81	42.13
12:15	869.75	36.00	51.30	47.40	50.10	47.55	20.24	2.82	41.77
12:19	864.73	35.60	52.17	47.90	50.60	47.90	20.20	2.79	41.97
12:23	866.27	36.10	52.40	48.10	50.30	48.15	20.19	2.81	41.98

ภาคผนวก ค.4 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 5 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
12:27	874.37	35.30	54.25	48.20	50.50	48.35	20.21	2.79	42.08
12:31	878.99	36.20	53.86	48.60	50.90	48.80	20.18	2.89	42.94
12:35	868.54	36.60	54.33	48.80	51.20	48.95	20.11	2.88	42.58
12:39	873.32	36.50	52.34	49.10	51.60	49.25	20.08	2.90	42.64
12:43	875.18	36.60	53.90	49.40	51.90	49.50	20.07	2.95	43.38
12:47	878.10	36.10	55.16	49.70	52.10	49.80	20.05	2.92	42.23
12:51	891.95	36.60	55.22	50.00	52.20	50.05	20.04	2.98	43.40
12:55	913.33	37.40	52.22	50.20	52.60	50.35	19.99	3.00	44.24
12:59	966.78	36.60	56.42	50.60	52.80	50.60	19.96	3.05	45.91
13:03	968.48	36.80	57.94	50.80	53.00	50.90	20.07	3.67	35.81
13:07	241.86	35.80	53.33	50.80	52.00	51.00	18.21	1.07	14.76
13:11	1218.2	36.40	50.97	51.00	51.70	51.25	20.58	4.56	59.83
13:15	346.17	36.10	53.69	51.00	51.80	51.25	18.87	1.52	24.41
13:19	546.78	36.60	51.86	51.10	51.80	51.35	19.59	2.39	31.43
13:23	852.26	35.90	54.09	51.20	52.00	51.45	20.11	3.09	45.09
13:27	977.87	36.40	52.43	51.20	52.70	51.45	20.03	3.45	50.68
13:31	727.06	37.00	55.45	51.60	53.10	51.65	19.68	2.79	44.53
13:35	962.16	37.70	57.10	51.90	53.60	51.90	19.86	3.31	48.97
13:39	908.30	37.20	59.23	52.00	53.90	52.10	19.75	3.13	46.08
13:43	862.22	37.30	60.52	52.30	54.10	52.40	19.67	3.00	45.74
13:47	540.38	37.20	56.31	52.50	53.80	52.55	19.40	2.18	34.49
13:51	427.40	36.40	59.28	52.60	53.60	52.75	19.04	1.69	24.94
13:55	676.28	36.70	58.68	52.70	53.50	52.85	19.68	2.53	38.22
13:59	779.53	37.50	55.31	52.70	54.10	52.85	19.77	2.91	42.54
14:03	832.99	37.20	56.07	53.00	55.30	53.15	19.71	2.91	43.33
14:07	962.16	37.50	52.55	53.20	55.20	53.25	19.77	3.16	47.21

ภาคผนวก ค.4 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 5 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
14:11	956.49	37.50	53.69	53.50	55.30	53.60	19.79	3.17	46.82
14:15	943.05	37.10	55.60	53.70	56.00	53.80	19.68	3.17	46.54
14:19	582.25	36.90	58.07	53.90	55.90	54.00	19.21	2.31	39.77
14:23	919.80	38.10	55.47	54.10	56.00	54.20	19.58	3.21	45.38
14:27	861.57	38.60	59.19	54.40	56.20	54.50	19.59	3.08	43.89
14:31	864.57	38.60	57.90	54.70	56.60	54.75	19.49	3.06	42.66
14:35	925.07	38.60	58.10	54.90	56.90	54.95	19.50	3.21	46.26
14:39	846.19	39.00	54.36	55.20	57.20	55.15	19.39	3.05	44.64
14:43	917.38	38.90	57.43	55.60	57.60	55.45	19.40	3.20	46.15
14:47	907.49	39.50	56.09	55.80	57.80	55.70	19.36	3.13	45.27
14:51	891.22	39.10	59.84	56.10	58.10	55.95	19.34	3.03	42.52
14:55	903.04	38.60	61.53	56.30	58.30	56.20	19.34	3.10	44.35
14:59	920.78	39.00	58.13	56.60	58.50	56.35	19.34	3.26	46.84
15:03	920.29	39.30	59.15	56.70	58.70	56.65	19.31	3.15	44.58
15:07	889.52	39.20	60.77	57.00	59.00	56.85	19.30	3.12	44.78
15:11	895.51	37.80	61.82	57.20	59.00	57.20	19.32	3.09	44.03
15:15	924.91	38.80	62.56	57.50	59.30	57.45	19.31	3.22	45.45
15:19	917.78	38.60	60.63	57.70	59.60	57.65	19.27	3.22	44.75
15:23	867.00	39.30	62.61	57.90	59.70	57.85	19.24	3.04	31.06
15:27	62.88	38.10	62.82	57.70	57.90	58.00	16.33	0.38	4.66
15:31	61.50	37.40	58.45	57.60	57.90	58.00	16.46	0.35	4.16
15:35	58.51	37.10	57.23	57.50	57.60	58.00	16.61	0.37	4.22
15:39	87.09	36.70	57.17	57.40	57.50	58.00	17.25	0.48	7.23
15:43	83.13	36.40	56.68	57.30	57.40	58.00	16.81	0.40	4.76
15:47	89.36	36.70	55.05	57.30	57.40	57.90	16.78	0.40	4.78
15:51	106.61	36.50	55.21	57.20	57.30	57.85	16.80	0.45	5.25

ภาคผนวก ค.4 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 5 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
15:55	142.08	36.70	54.27	57.20	57.30	57.85	17.45	0.60	7.93
15:59	161.93	36.60	55.22	57.00	57.20	57.70	17.77	0.80	10.24
16:03	352.41	35.90	56.12	57.00	57.20	57.70	18.98	1.43	23.94



ภาคผนวก ค.5 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10 LPM ปริมาณน้ำ 200L

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
8:59	745.03	29.80	36.40	33.90	35.10	33.70	20.72	2.31	34.75
9:03	753.21	29.60	34.83	34.20	35.30	34.00	20.70	2.34	34.94
9:07	760.34	30.30	35.92	34.50	35.60	34.20	20.68	2.34	34.17
9:11	762.04	30.90	38.07	34.70	35.90	34.50	20.68	2.36	34.35
9:15	768.44	30.10	36.54	35.00	36.20	34.80	20.66	2.41	34.89
9:19	772.00	31.30	36.59	35.40	36.50	35.10	20.64	2.41	33.28
9:23	773.54	30.60	40.03	35.60	36.80	35.40	20.63	2.43	33.33
9:27	780.91	31.60	38.31	35.80	37.10	35.70	20.60	2.45	33.72
9:31	788.77	31.40	39.56	36.20	37.30	36.00	20.59	2.48	34.00
9:35	789.74	31.60	38.74	36.40	37.70	36.20	20.58	2.47	34.19
9:39	793.38	32.20	37.32	36.70	37.90	36.50	20.56	2.47	34.40
9:43	797.59	32.10	40.02	37.00	38.30	36.80	20.56	2.45	34.72
9:47	802.21	32.40	40.35	37.30	38.60	37.10	20.55	2.45	34.79
9:51	798.97	32.00	39.63	37.50	38.80	37.40	20.53	2.44	35.29
9:55	792.98	32.70	40.03	37.80	39.10	37.60	20.47	2.46	34.89
9:59	815.09	32.20	41.40	38.20	39.50	38.00	20.47	2.53	35.51
10:03	816.95	31.90	41.35	38.40	39.70	38.30	20.44	2.43	35.32
10:07	811.28	31.50	41.96	38.60	40.00	38.50	20.52	2.46	34.98
10:11	814.36	32.50	40.28	38.90	40.30	38.85	20.47	2.46	35.21
10:15	811.85	32.90	42.06	39.30	40.70	39.10	20.46	2.47	35.86
10:19	816.95	32.90	41.03	39.60	41.10	39.45	20.44	2.48	36.02
10:23	818.98	32.40	42.29	39.80	41.20	39.70	20.44	2.53	36.98
10:27	822.78	33.50	41.55	40.10	41.80	39.95	20.39	2.56	37.63
10:31	819.14	33.70	41.54	40.30	41.80	40.25	20.36	2.51	37.43
10:35	817.76	32.80	43.18	40.70	42.10	40.60	20.35	2.56	37.97
10:39	822.05	32.70	44.06	41.00	42.50	40.95	20.33	2.53	38.44

ภาคผนวก ค.5 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	823.43	33.00	43.79	41.20	42.60	41.20	20.31	2.53	38.63
10:47	826.18	33.30	44.67	41.50	42.90	41.50	20.30	2.55	38.69
10:51	825.13	32.80	44.55	41.80	43.10	41.80	20.31	2.55	38.73
10:55	826.83	33.00	45.85	42.10	43.50	42.10	20.28	2.56	39.16
10:59	828.05	33.50	45.21	42.30	43.80	42.30	20.27	2.59	39.45
11:03	825.62	32.90	46.40	42.60	44.10	42.65	20.24	2.58	39.09
11:07	827.16	33.20	44.69	42.90	44.40	42.95	20.31	2.60	39.25
11:11	830.48	34.20	45.71	43.20	44.70	43.20	20.31	2.62	39.92
11:15	836.23	34.10	46.98	43.40	44.90	43.45	20.29	2.63	39.82
11:19	834.20	33.00	48.85	43.70	45.30	43.80	20.29	2.62	39.56
11:23	830.80	33.90	44.77	43.90	45.50	44.00	20.25	2.62	39.64
11:27	837.44	34.20	48.17	44.30	45.80	44.40	20.27	2.62	39.63
11:31	841.89	33.60	48.06	44.60	46.00	44.60	20.24	2.67	39.94
11:35	841.89	34.70	46.87	44.80	46.30	44.85	20.23	2.67	40.36
11:39	838.33	35.50	48.90	45.10	46.60	45.10	20.21	2.66	39.76
11:43	839.14	34.40	49.37	45.50	46.90	45.50	20.22	2.56	39.99
11:47	840.84	34.00	48.97	45.60	47.10	45.75	20.23	2.73	40.72
11:51	846.19	35.30	49.45	45.90	47.40	46.00	20.22	2.75	40.44
11:55	844.97	34.10	50.86	46.10	47.70	46.25	20.24	2.75	40.50
11:59	843.76	35.60	48.13	46.40	47.90	46.50	20.19	2.74	41.00
12:03	845.13	36.10	47.94	46.80	48.20	46.80	20.19	2.76	41.52
12:07	853.48	36.80	51.20	47.10	48.60	47.10	20.23	2.84	41.72
12:11	852.67	36.70	51.95	47.30	48.80	47.30	20.22	2.86	42.10
12:15	846.19	36.30	51.43	47.60	49.30	47.75	20.18	2.85	41.71
12:19	848.86	36.30	50.23	47.80	49.40	47.95	20.18	2.83	41.33
12:23	848.21	36.20	49.71	48.00	49.60	48.25	20.19	2.77	41.10

ภาคผนวก ค.5 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
12:27	849.75	36.70	51.46	48.40	50.00	48.55	20.15	2.76	41.31
12:31	854.21	35.70	52.40	48.50	50.10	48.70	20.15	2.82	41.68
12:35	853.88	35.90	53.12	48.90	50.30	49.00	20.08	2.86	41.94
12:39	855.42	37.40	51.91	49.10	50.50	49.20	19.99	2.89	42.49
12:43	853.31	37.80	52.63	49.30	50.80	49.50	19.95	2.87	42.41
12:47	848.70	37.80	53.82	49.70	51.50	49.85	19.94	2.92	42.46
12:51	852.10	37.10	54.97	49.90	51.40	50.10	20.00	2.88	41.99
12:55	854.37	36.40	54.56	50.20	51.80	50.45	19.99	2.90	41.97
12:59	857.93	35.80	54.82	50.50	51.90	50.65	19.93	2.89	42.02
13:03	853.64	37.10	52.79	50.60	52.10	50.95	19.91	2.93	42.06
13:07	851.61	37.10	56.81	51.00	52.30	51.10	19.83	2.91	42.46
13:11	857.77	37.00	55.68	51.20	52.60	51.35	19.82	2.94	42.17
13:15	860.85	36.50	55.27	51.40	52.90	51.60	19.79	2.93	41.88
13:19	853.80	37.40	56.77	51.70	53.40	51.90	19.74	2.86	41.35
13:23	858.42	36.90	56.68	51.90	53.40	52.10	19.75	2.91	41.78
13:27	851.29	36.60	58.42	52.20	53.50	52.30	19.74	2.88	41.26
13:31	853.48	36.90	57.73	52.50	53.60	52.65	19.72	2.92	41.82
13:35	851.94	37.30	56.27	52.60	53.90	52.85	19.69	2.99	42.93
13:39	853.15	37.70	54.64	52.90	54.10	53.00	19.64	2.91	41.56
13:43	850.24	38.00	57.34	53.20	54.50	53.30	19.59	2.93	41.56
13:47	853.31	38.40	52.71	53.30	54.60	53.55	19.54	2.92	42.12
13:51	847.65	37.70	54.41	53.50	54.80	53.65	19.53	2.92	42.01
13:55	844.81	38.20	57.30	53.80	55.00	54.00	19.45	2.91	41.39
13:59	839.30	37.60	56.94	54.00	55.20	54.15	19.39	2.92	41.04
14:03	842.95	37.70	60.83	54.30	55.50	54.40	19.34	2.89	41.11
14:07	853.31	37.20	57.29	54.40	55.70	54.60	19.30	2.96	41.59

ภาคผนวก ค.5 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
14:11	847.32	38.10	59.87	54.60	55.90	54.75	19.26	2.95	41.33
14:15	845.78	39.00	56.99	54.90	56.10	55.00	19.14	2.95	41.39
14:19	843.76	38.70	60.21	55.20	56.30	55.25	19.10	2.91	40.80
14:23	849.43	39.20	61.45	55.40	56.70	55.50	19.01	2.95	41.54
14:27	848.86	38.40	63.48	55.60	56.90	55.75	19.00	2.90	40.89
14:31	845.78	38.50	63.53	55.80	57.00	55.95	18.95	2.88	40.80
14:35	845.46	38.00	66.36	56.00	57.20	56.15	18.96	2.89	41.23
14:39	828.69	38.10	64.54	56.10	57.20	56.30	18.92	2.93	41.31
14:43	823.11	38.40	64.44	56.30	57.70	56.55	18.89	2.86	39.97
14:47	839.63	38.60	65.87	56.70	57.70	56.80	18.89	2.87	40.63
14:51	844.41	38.90	64.78	56.80	57.90	56.95	18.81	2.87	39.72
14:55	836.71	38.20	69.82	57.00	58.10	57.20	18.80	2.84	39.91
14:59	838.98	37.70	70.62	57.20	58.20	57.40	18.79	2.88	39.87
15:03	842.87	38.60	66.42	57.40	58.40	57.60	18.73	2.88	40.31
15:07	837.60	39.20	68.80	57.60	58.70	57.80	18.69	2.84	39.18
15:11	824.81	40.00	67.98	57.90	58.90	58.00	18.64	2.82	38.58
15:15	818.65	39.20	69.30	58.10	59.10	58.20	18.68	2.85	39.90
15:19	820.19	39.20	68.67	58.30	59.50	58.45	18.75	2.84	39.95
15:23	811.77	39.50	68.84	58.40	59.60	58.65	18.83	2.78	38.79
15:27	809.10	39.30	68.94	58.60	59.70	58.85	18.87	2.74	38.07
15:31	808.69	38.60	73.15	58.80	60.00	59.10	18.92	2.74	38.04
15:35	810.31	38.20	70.53	59.10	60.00	59.30	18.95	2.83	39.41
15:39	824.97	38.30	73.06	59.20	60.10	59.45	18.97	2.88	39.96
15:43	819.87	39.90	69.86	59.30	60.50	59.65	18.90	2.84	38.82
15:47	793.22	40.00	74.13	59.70	60.50	59.80	18.88	2.72	36.80
15:51	797.76	39.20	75.90	59.80	60.60	59.90	18.91	2.71	37.04

ภาคผนวก ค.5 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 10 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
15:55	789.74	39.40	73.26	60.00	60.90	60.15	18.92	2.68	36.47
15:59	795.89	39.80	70.80	60.00	60.90	60.30	18.97	2.69	37.09
16:03	800.83	38.90	74.08	60.30	61.20	60.50	18.98	2.66	36.16



ภาคผนวก ค.6 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 15 LPM ปริมาณน้ำ 200L

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
8:59	773.38	29.30	34.20	33.30	34.00	33.10	21.11	2.35	34.73
9:03	780.02	29.50	34.36	33.60	34.40	33.45	21.11	2.38	35.39
9:07	767.39	29.90	35.25	33.90	34.70	33.70	21.07	2.37	34.90
9:11	762.77	29.70	37.23	34.10	35.00	34.05	21.06	2.41	34.94
9:15	752.89	31.30	33.00	34.40	35.20	34.30	21.04	2.41	35.36
9:19	775.97	31.00	36.25	34.80	35.60	34.65	21.03	2.45	36.04
9:23	794.52	31.50	35.30	35.00	35.80	34.85	21.01	2.49	36.62
9:27	792.65	30.10	37.07	35.40	36.20	35.20	21.01	2.49	36.61
9:31	776.94	30.90	35.59	35.70	36.60	35.50	20.97	2.46	35.97
9:35	785.37	32.20	35.86	36.00	36.80	35.80	20.94	2.50	36.94
9:39	782.94	31.10	39.29	36.40	37.20	36.20	20.93	2.50	36.69
9:43	796.30	32.80	38.09	36.70	37.50	36.50	20.91	2.47	36.29
9:47	810.80	32.40	38.00	37.00	37.90	36.90	20.90	2.49	36.50
9:51	827.88	31.90	39.51	37.20	38.10	37.10	20.88	2.52	36.58
9:55	833.88	32.10	39.54	37.50	38.40	37.45	20.87	2.50	36.24
9:59	844.97	31.60	41.56	37.80	38.80	37.75	20.86	2.53	36.88
10:03	842.70	32.00	40.11	38.20	39.10	38.05	20.85	2.77	37.74
10:07	836.71	32.70	36.87	38.60	39.40	38.40	20.82	2.74	38.90
10:11	795.25	32.60	38.21	38.90	39.80	38.75	20.76	2.63	38.46
10:15	821.16	33.10	37.85	39.20	40.00	39.05	20.81	2.77	40.43
10:19	744.71	32.80	41.20	39.50	40.30	39.40	20.69	2.57	35.98
10:23	749.08	32.80	41.51	39.60	40.40	39.60	20.72	2.61	39.59
10:27	803.91	31.90	42.99	39.90	40.80	39.90	20.75	2.77	41.91
10:31	796.79	32.40	38.81	40.30	41.10	40.15	20.72	2.74	41.53
10:35	759.53	31.90	43.57	40.40	41.20	40.40	20.70	2.65	39.88
10:39	784.64	32.50	39.55	40.70	41.50	40.70	20.69	2.70	40.50

ภาคผนวก ค.6 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 15 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
10:43	790.63	32.50	43.53	41.00	41.80	41.00	20.68	2.70	40.04
10:47	820.19	32.60	42.71	41.20	42.10	41.20	20.68	2.77	41.61
10:51	826.51	32.40	42.79	41.40	42.30	41.45	20.68	2.83	42.62
10:55	822.94	32.40	44.91	41.70	42.60	41.70	20.66	2.80	42.17
10:59	816.38	31.80	45.28	41.80	42.80	42.00	20.65	2.81	41.52
11:03	826.99	32.90	44.55	42.20	43.20	42.30	20.62	2.83	42.30
11:07	819.87	32.70	44.60	42.30	43.40	42.50	20.60	2.81	41.81
11:11	815.25	33.20	44.22	42.70	43.60	42.75	20.58	2.80	42.02
11:15	833.63	32.90	46.13	42.90	43.90	43.10	20.58	2.85	42.71
11:19	835.25	33.20	45.65	43.30	44.30	43.35	20.55	2.83	42.13
11:23	848.86	34.60	43.73	43.50	44.50	43.60	20.54	2.88	42.62
11:27	850.40	34.10	47.36	43.90	44.90	43.90	20.53	2.91	43.17
11:31	827.32	33.80	46.79	44.10	45.10	44.20	20.49	2.86	42.40
11:35	841.89	33.50	47.30	44.40	45.30	44.50	20.51	2.89	42.73
11:39	846.35	33.20	49.39	44.60	45.60	44.75	20.49	2.93	43.15
11:43	837.28	34.00	47.42	44.90	45.90	45.00	20.46	2.91	43.05
11:47	852.99	34.80	46.23	45.10	46.20	45.30	20.44	2.96	43.48
11:51	831.61	34.80	47.45	45.50	46.50	45.55	20.43	2.93	43.01
11:55	841.89	35.50	46.05	45.80	46.80	45.90	20.42	2.95	43.48
11:59	847.00	35.90	49.04	46.10	47.10	46.10	20.41	2.96	43.90
12:03	846.84	35.00	47.89	46.20	47.20	46.40	20.41	2.98	43.40
12:07	855.91	35.70	48.39	46.60	47.60	46.75	20.42	3.04	44.58
12:11	857.44	35.80	48.91	46.90	47.80	46.90	20.39	3.00	43.43
12:15	840.36	35.00	51.83	47.20	48.10	47.30	20.40	3.09	45.03
12:19	855.58	34.80	48.17	47.30	48.30	47.50	20.36	3.03	44.10
12:23	844.65	35.40	50.40	47.70	48.70	47.80	20.34	3.03	44.18

ภาคผนวก ค.6 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 15 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
12:27	852.50	34.80	51.94	47.80	48.90	48.05	20.33	2.94	44.26
12:31	867.00	35.60	50.57	48.20	49.30	48.40	20.30	3.08	44.55
12:35	862.22	35.00	49.67	48.50	49.50	48.70	20.29	3.07	44.30
12:39	868.86	35.80	48.04	48.80	49.90	48.95	20.28	3.07	44.27
12:43	842.38	36.00	52.96	49.10	50.10	49.25	20.24	3.06	44.37
12:47	865.14	35.80	51.80	49.30	50.40	49.50	20.23	3.07	44.58
12:51	870.89	35.50	53.70	49.60	50.70	49.80	20.21	3.06	43.67
12:55	874.21	36.10	53.82	49.80	50.90	50.00	20.19	3.11	45.34
12:59	876.88	36.10	55.58	50.10	51.20	50.35	20.20	3.03	44.17
13:03	871.46	36.10	54.03	50.40	51.50	50.55	20.16	3.04	44.09
13:07	874.86	36.80	53.59	50.70	51.70	50.90	20.12	3.07	44.54
13:11	877.45	36.30	56.45	51.00	52.00	51.10	20.10	3.01	43.45
13:15	880.36	35.60	57.98	51.20	52.20	51.40	20.10	3.04	44.05
13:19	880.28	35.90	59.43	51.50	52.40	51.60	20.08	3.10	44.39
13:23	881.90	37.20	57.70	51.70	52.60	51.90	20.06	3.16	45.21
13:27	870.73	36.40	63.46	52.00	52.90	52.10	20.04	3.09	43.74
13:31	874.69	36.10	60.66	52.10	53.10	52.25	20.03	3.07	43.30
13:35	856.88	36.60	65.87	52.50	53.30	52.65	20.00	3.03	42.70
13:39	849.75	37.00	64.14	52.80	53.60	52.85	19.98	3.11	43.03
13:43	794.36	36.90	65.15	52.80	53.70	53.05	19.91	2.93	40.88
13:47	859.63	37.90	62.43	53.10	53.90	53.30	19.95	3.09	43.10
13:51	880.69	37.50	65.32	53.40	54.60	53.60	19.94	3.10	42.87
13:55	868.05	36.80	65.66	53.80	55.00	53.95	19.93	3.06	43.77
13:59	852.10	36.80	60.64	54.00	54.90	54.20	19.89	3.08	44.61
14:03	851.29	37.30	63.72	54.30	55.10	54.45	19.87	3.09	44.65
14:07	867.65	36.80	65.80	54.40	55.30	54.70	19.89	3.14	44.35

ภาคผนวก ค.6 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 15 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
14:11	858.09	37.80	63.16	54.60	55.50	54.80	19.85	3.21	45.48
14:15	849.75	37.70	66.81	54.90	55.60	55.10	19.83	3.12	43.63
14:19	850.97	37.10	67.60	55.10	55.80	55.30	19.81	3.12	43.96
14:23	860.85	37.90	68.42	55.30	56.10	55.55	19.81	3.20	44.47
14:27	850.24	37.30	70.55	55.50	56.30	55.75	19.77	3.11	43.09
14:31	839.63	37.40	69.29	55.70	56.50	55.95	19.74	3.09	42.91
14:35	838.98	37.20	67.97	55.90	57.20	56.20	19.73	3.05	43.14
14:39	848.54	37.30	67.15	56.10	57.00	56.40	19.71	3.08	43.45
14:43	854.21	37.70	67.77	56.40	57.30	56.65	19.68	2.92	40.21
14:47	856.88	37.30	67.00	56.70	57.50	56.90	19.65	2.79	37.64
14:51	859.47	36.80	69.82	56.90	57.70	57.10	19.63	2.47	33.58
14:55	844.81	38.00	67.48	57.00	57.80	57.30	19.58	2.81	38.26
14:59	860.68	38.20	68.81	57.20	58.10	57.50	19.58	2.87	38.50
15:03	855.34	37.30	70.49	57.50	58.30	57.80	19.53	2.67	35.60
15:07	848.05	37.40	67.96	57.70	58.50	57.95	19.49	3.01	41.29
15:11	820.03	37.60	69.21	57.90	58.70	58.15	19.43	2.95	40.64
15:15	830.39	37.40	70.32	58.00	58.90	58.40	19.44	3.01	41.30
15:19	818.65	37.60	68.62	58.30	59.00	58.55	19.41	3.07	42.48
15:23	800.51	37.50	69.69	58.50	59.30	58.80	19.40	2.95	40.37
15:27	826.51	37.00	71.00	58.60	59.50	58.95	19.42	2.85	38.21
15:31	826.02	37.40	68.52	58.80	59.60	59.20	19.40	2.95	39.50
15:35	823.59	37.20	70.02	58.90	59.80	59.35	19.40	2.95	39.61
15:39	809.91	37.10	69.30	59.10	59.90	59.50	19.37	2.85	38.44
15:43	794.19	37.10	68.89	59.30	60.10	59.75	19.34	2.88	39.02
15:47	779.05	37.00	69.06	59.40	60.30	59.85	19.31	2.82	36.28
15:51	800.19	36.90	69.79	59.60	60.40	60.05	19.34	2.77	36.94

ภาคผนวก ค.6 ผลการทดลองระดับความสูงเป่ารับรังสีที่ 55 cm อัตราการไหล 15 LPM ปริมาณน้ำ 200L (ต่อ)

Time	I_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_{CPVT} (°C)	T_{fi} (°C)	T_{fo} (°C)	T_s (°C)	$V_{OC,CPVT}$ (V)	$I_{SC,CPVT}$ (A)	$P_{m,CPVT}$ (W)
15:55	808.37	37.00	70.05	59.70	60.50	60.15	19.35	2.83	38.29
15:59	868.86	37.80	68.97	60.00	60.80	60.35	19.37	3.20	43.35
16:03	863.76	37.50	68.47	60.10	60.90	60.55	19.37	3.29	44.54





ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	พินชนะ ยาละศรี
เกิดเมื่อ	28 กันยายน 2537
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549-2555 มัธยมศึกษา โรงเรียนเลิงนงทา พ.ศ. 2556-2560 ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (พลังงาน) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

