

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่
ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำหล่อเย็น



ทวีพงศ์ เทพทวี

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่
ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาศมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่
ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็น

ทวิพงศ์ เทพทวี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำหล่อเย็น
ชื่อผู้เขียน	นายทวิพงษ์ เทพทวี
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการระบายความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 80 Wp และบริเวณด้านหลังมีด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (รุ่น TEC1-12706) จำนวน 28 โมดูล ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมติดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ในด้านตรงกันข้ามเป็นด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกติดกับกล่องน้ำระบายความร้อนที่หุ้มฉนวนและน้ำร้อนที่ได้จะส่งไปเก็บยังถังเก็บน้ำร้อนโดยใช้ปั๊มน้ำ ในการทดลองจะทำการปรับอัตราการไหลน้ำระบายความร้อนในช่วง 0.083 kg/s - 0.0125 kg/s และปรับปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 50 L 100 L และ 150 L เพื่อหาอัตราการไหลน้ำระบายความร้อนและปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดและได้น้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 39 °C

ผลจากการทดลองพบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำระบายความร้อนที่อัตราการไหลเชิงมวล 0.0083 kg/s และปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L สามารถผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนได้ตามเงื่อนไขที่ดีที่สุด และสามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 12.0 °C โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 60.29 W มีประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 11.60% สูงกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน ในส่วนของเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่า สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 0.39 mW และผลิตน้ำร้อนได้สูงสุด 39.02 °C สำหรับประสิทธิภาพโดยรวมของระบบที่ทดสอบเท่ากับ 64.08 % นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายกำลังการผลิตไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำร้อนของระบบตลอดทั้งปี พบว่า ระบบจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าและผลิต

น้ำร้อนคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 821.30 kWh/Year หรือเท่ากับ 3,285.21 Baht/year มีระยะเวลาคืนทุนของระบบเท่ากับ 4.72 ปี

คำสำคัญ : ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ระบายความร้อนด้วยน้ำ เทอร์โมอิเล็กทริก น้ำร้อน



Title	PERFORMANCE STUDY OF PHOTOVOLTAIC/THERMAL HYBRID SYSTEM WITH THERMOELECTRIC AND WATER COOLING UNIT
Author	Mr. Taweepong Teptawee
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sarawut Polvongsri

ABSTRACT

This research proposed to study the cooling of photovoltaic/thermal hybrid system (PVT) using thermoelectrics. The peak power of silicon solar panel was 80 W with its back adhered at the cool side of 28 thermoelectrics (model TEC1-12706). On the opposite side the hot side of the thermoelectric was connected to the insulated cooling water box and the obtained hot water was circulated to the hot water tank by a water pump. In the experiment the cooling water mass flow rate was adjusted in the range of 0.083 kg/s - 0.0125 kg/s and the water volume in the storage tanks was adjusted to 50 L, 100 L, and 150 L. This in order to determine the suitable mass flow rate of cooling water and the quantity of water that makes the photovoltaic/thermal hybrid system operating at maximum power with the hot water in the storage tank not being less than 39 °C.

The results found that the photovoltaic/thermal hybrid system (PVT) with cooling system using thermoelectrics and water at a mass flow rate of 0.0083 kg/s and 100 L of water in the storage tank were the best conditions to produce the electricity and hot water according to the best conditions and could reduce the solar panel temperature by 12 °C. The maximum power generation from the testing PVT was reached was 60.29 W and the obtained efficiency was 11.60% more than in a non-cooling test condition. For the thermoelectric, the maximum power was equal to 0.39 mW and the maximum hot water was 39.02 °C. The overall efficiency of the testing

system was 64.08%. In addition the developed mathematical could predict the power generated and hot water temperature of the system throughout the year and showed that the system could produce electricity and hot water equivalent to 821.30 kWh/year or equal to 3,285.21 Baht/year. The payback period of the system was 4.72 years

Keyword : Photovoltaic/Thermal hybrid system, Water cooling, Thermoelectric, Hot water



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนให้ความดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงตามวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และ อาจารย์ ดร. ปริญญา กระจ่างพันธ์ ซึ่งให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนพื้นที่และอุปกรณ์ในการศึกษาสำหรับการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2559

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณครอบครัว นางวิดา เทพทวี นายแคล้ว เทพทวี นางสาววรรณดี นวลทอง และเพื่อน พี่ น้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำ และเป็นกำลังใจจนการศึกษานี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ทวีพงศ์ เทพทวี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญภาคผนวก.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรังสีอาทิตย์.....	5
การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น.....	8
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก.....	11
การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น.....	15
การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เบื้องต้น.....	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30

การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วย เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำ.....	30
ชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน.....	34
ขั้นตอนการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	41
อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ.....	41
ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ	48
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี	56
การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น	71
การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เบื้องต้น	73
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุปผลงานวิจัย.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณ.....	81
ภาคผนวก ข บทความนำเสนองานประชุมวิชาการ.....	84
ภาคผนวก ค เอกสารข้อมูลของ TEG1-1268-4.3.....	100
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดสอบ.....	102
ประวัติผู้วิจัย.....	144

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีต่างๆ.....	23
ตารางที่ 2 รายละเอียดของแผงระบายความร้อนแบบแผ่นครีป และแบบแท่งครีปทรงกระบอก	25
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพไฟฟ้า ประสิทธิภาพความร้อน และประสิทธิภาพรวมของการระบายความร้อนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแบบ (Babu and Ponnambalam, 2017).....	26
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุที่พร้อมใช้งานสำหรับการใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	28
ตารางที่ 5 คุณสมบัติทั่วไปของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์ รุ่น TEC1-12706.....	31
ตารางที่ 6 ค่าเบื้องต้นสำหรับการคำนวณจำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก.....	31
ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนและระบายความร้อน.....	32
ตารางที่ 8 อัตราการไหลที่ใช้ทดสอบและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนใช้งาน.....	38
ตารางที่ 9 พลังงานสุทธิของระบบที่ผลิตได้ในหนึ่งวันที่อัตราการไหลต่างกัน.....	47
ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิที่ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนต่างกัน	52
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิที่ทดสอบต่อเนื่องในวันที่ 1 - 4	55
ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิที่ทดสอบต่อเนื่องในวันที่ 5 - 7	55
ตารางที่ 13 คุณสมบัติเฉพาะของเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3 ตามภาคผนวก ค	66
ตารางที่ 14 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดจากสถิติภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ. 2524-2553 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561).....	69
ตารางที่ 15 ค่า n ของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2561.....	69
ตารางที่ 16 เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ.....	71
ตารางที่ 17 เงินได้สุทธิของโครงการ.....	72

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การใช้พลังงานการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและพลังงานทดแทน (ม.ค. - ธ.ค. 2560).....	1
ภาพที่ 2 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ ม.ค.-ธ.ค. 2560.....	2
ภาพที่ 3 รังสีอาทิตย์ที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ.....	5
ภาพที่ 4 มุมซันนิธ (Zenith Angle, θ_z).....	6
ภาพที่ 5 การนำความร้อนในหนึ่งมิติ.....	8
ภาพที่ 6 การพาความร้อนแบบบังคับ (A) และการพาความร้อนแบบอิสระ (B).....	9
ภาพที่ 7 การการถ่ายเทความร้อนที่ถึงเก็บน้ำร้อน.....	10
ภาพที่ 8 ระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	11
ภาพที่ 9 การทำงานและส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	13
ภาพที่ 10 สมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน.....	14
ภาพที่ 11 ระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	16
ภาพที่ 12 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	17
ภาพที่ 13 จุดวัดอุณหภูมิ และรูปชุดทดสอบ.....	18
ภาพที่ 14 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่โหลดความต้านทานต่างๆ.....	18
ภาพที่ 15 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆของระบบ PV-TE.....	19
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนกับอัตราส่วนความเข้มการรวมแสง.....	19
ภาพที่ 17 ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก.....	20
ภาพที่ 18 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เทอร์โมอิเล็กทริก และเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	20
ภาพที่ 19 ส่วนประกอบระบบ PV-TE (a) รูปตัดขวางของชุดทดสอบ (b) มุมมองด้านล่าง (c) มุมมองโดยรอบ (d) ภาพถ่ายทางกายภาพ.....	21
ภาพที่ 20 (a) อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลง (b) อุณหภูมิแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (c) ผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนกับด้านเย็นที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (d) กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลงของเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	22
ภาพที่ 21 ฮีตซิงก์อลูมิเนียมสำหรับระบายความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ.....	23

ภาพที่ 22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	24
ภาพที่ 23 ประเภทของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน	26
ภาพที่ 24 ค่า ZT ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (A) N-type และ (B) P-type	27
ภาพที่ 25 แบบจำลองทางกายภาพของระบบ TEG.....	28
ภาพที่ 26 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้	30
ภาพที่ 27 เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์ รุ่น TEC1-12706.....	30
ภาพที่ 28 ลักษณะการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับด้านร้อนและด้านเย็น	33
ภาพที่ 29 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 28 โมดูลที่ต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน.....	33
ภาพที่ 30 การติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็นเข้ากับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
ภาพที่ 31 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง (ซ้าย) และชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (ขวา)	35
ภาพที่ 32 สถานที่ทดสอบวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	35
ภาพที่ 33 ป้อนน้ำสำหรับหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนในระบบ	36
ภาพที่ 34 ส่วนผลิตไฟฟ้าของชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน	36
ภาพที่ 35 ส่วนผลิตความร้อนของชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน.....	37
ภาพที่ 36 วงจรปรับอัตราการไหลของปั้มน้ำกระแสตรง (ซ้าย) และเครื่องวัดอัตราการไหล (ขวา)..	37
ภาพที่ 37 Data logger รุ่น ADAM 5000L/TCP (ซ้าย) PV Analyzer รุ่น PROVA 210 (กลาง) มัลติมิเตอร์ UNI-T รุ่น UT106 (ขวา).....	38
ภาพที่ 38 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	40
ภาพที่ 39 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	42
ภาพที่ 40 สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ	44
ภาพที่ 41 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำระบายความร้อนต่ออุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก และการผลิตกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก	45
ภาพที่ 42 อุณหภูมิของน้ำและปริมาณความร้อนสะสมในถังที่เก็บน้ำร้อนที่อัตราการไหลต่างๆ.....	47
ภาพที่ 43 ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ 50 L (A) 100 L (B) และ 150 L (C) ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 0.0083 kg/s	49
ภาพที่ 44 สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และชุดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่ 50 L (A) 100 L (B) และ 150 L (C).....	50
ภาพที่ 45 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก แต่ละปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	51

ภาพที่ 46	อุณหภูมิและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนที่ปริมาณน้ำ 50 L 100 L และ 150 L	52
ภาพที่ 47	ผลการดำเนินงานต่อเนื่องตามสภาพแวดล้อมจริงของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน.....	53
ภาพที่ 48	อุณหภูมิของน้ำในถัง กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก...	54
ภาพที่ 49	สมดุลพลังงานของส่วนผลิตไฟฟ้าและความร้อน.....	56
ภาพที่ 50	สมรรถนะทางความร้อนของระบบ.....	57
ภาพที่ 51	ขั้นตอนการทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน	59
ภาพที่ 52	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างการทดลองและแบบจำลอง.....	60
ภาพที่ 53	ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	63
ภาพที่ 54	ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	64
ภาพที่ 55	ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการทดลองของอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (B) และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (C)	66
ภาพที่ 56	ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3.....	67
ภาพที่ 57	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3.....	68
ภาพที่ 58	พลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ได้รับ และการใช้พลังงานของปั๊มน้ำหมุนเวียน	70
ภาพที่ 59	พลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนในรอบปี	71

สารบัญภาคผนวก

หน้า

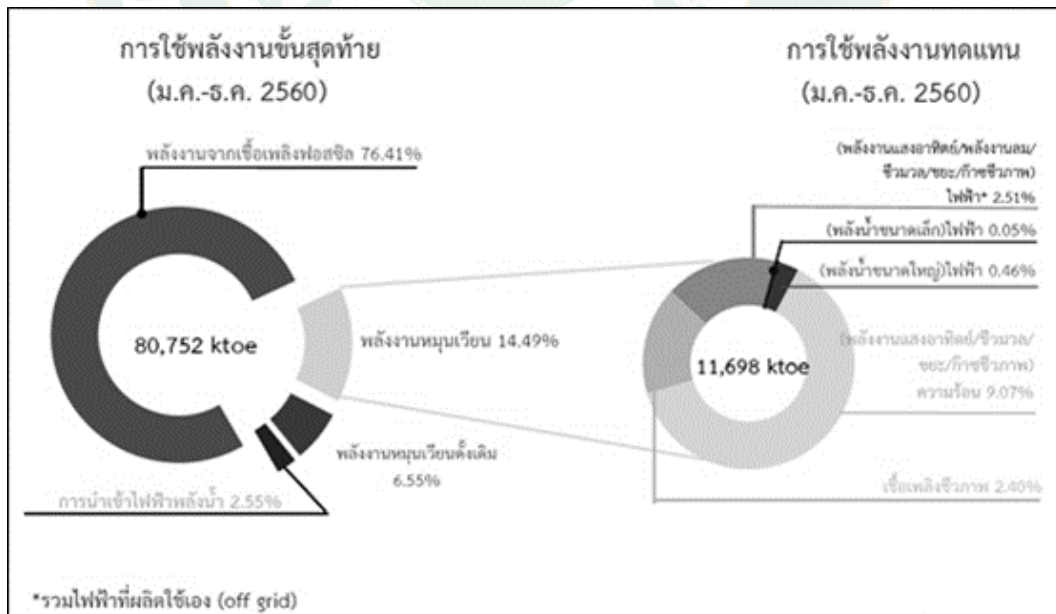
ภาคผนวก ก. 1 ตัวอย่างการคำนวณการทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน.....	81
ภาคผนวก ก. 2 ตัวอย่างการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	82
ภาคผนวก ก. 3 ตัวอย่างการคำนวณการทำนายกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก	82
ภาคผนวก ข. 1 บทความนำเสนองานประชุมวิชาการครั้งที่ 1.....	84
ภาคผนวก ข. 2 บทความนำเสนองานประชุมวิชาการครั้งที่ 2.....	91
ภาคผนวก ค. 1 เอกสารข้อมูลของ TEG1-1268-4.3.....	100
ภาคผนวก ง. 1 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 18 11 2017.....	102
ภาคผนวก ง. 2 ผลการทดสอบที่ 0.0097 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 11 11 2017.....	105
ภาคผนวก ง. 3 ผลการทดสอบที่ 0.0114 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 5 11 2017.....	108
ภาคผนวก ง. 4 ผลการทดสอบที่ 0.0125 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 19 11 2017.....	111
ภาคผนวก ง. 5 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 50 L วันที่ 15 03 2018.....	114
ภาคผนวก ง. 6 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 03 2018.....	117
ภาคผนวก ง. 7 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 150 L วันที่ 14 03 2018.....	120
ภาคผนวก ง. 8 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 8 05 2018.....	123
ภาคผนวก ง. 9 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 9 05 2018.....	126
ภาคผนวก ง. 10 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 10 05 2018.....	129
ภาคผนวก ง. 11 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 11 05 2018.....	132
ภาคผนวก ง. 12 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 12 05 2018.....	135
ภาคผนวก ง. 13 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 05 2018.....	138
ภาคผนวก ง. 14 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 14 05 2018.....	141

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

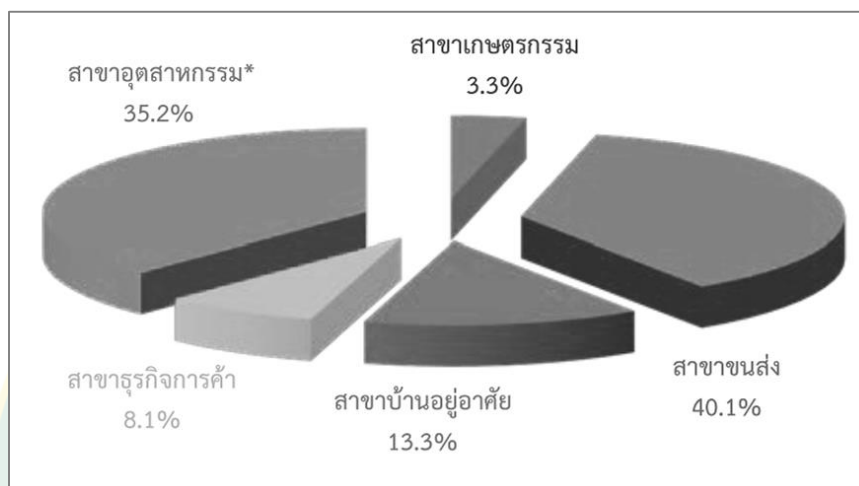
จากสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย เดือนมกราคม ถึงธันวาคม 2560 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) ประเทศไทยมีการใช้พลังงานในปี 2560 มีปริมาณ 80,752 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อน 1.0% คิดเป็นมูลค่ากว่า 1,072,237 ล้านบาท อีกทั้งรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยลดสัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม (Energy intensity) พบว่าในปี 2560 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 11,698 ktoe เพิ่มขึ้น 5.9% จากช่วงเดียวกันของปีก่อน ส่วนสัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับปี 2553 ซึ่งเป็นปีฐานเริ่มดำเนินการตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554 - 2573) และแผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2558 - 2579 ในส่วนของการใช้พลังงานทดแทนในพลังงานขั้นสุดท้าย กลุ่มพลังงานหมุนเวียนประเภทความร้อนมีสัดส่วนมากที่สุด 9.07% รองลงมาคือไฟฟ้าที่รวมถึงการผลิตใช้เอง (Off grid) 2.51% แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การใช้พลังงานการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและพลังงานทดแทน (ม.ค. - ธ.ค. 2560)

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ ม.ค.-ธ.ค. 2560 พบว่ามี การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในแต่ละสาขาเศรษฐกิจประกอบด้วยสาขาเกษตรกรรมมีปริมาณ 2,642 ktoe สาขาอุตสาหกรรมปริมาณ 28,452 ktoe สาขาบ้านอยู่อาศัยปริมาณ 10,761ktoe สาขารัฐกิจ การค้าปริมาณ 6,546 ktoe สาขาขนส่งปริมาณ 32,351 ktoe คิดเป็นสัดส่วนจากการใช้พลังงานขั้น สุดท้ายทั้งหมด 3.3% 35.2% 13.3% 8.1% และ 40.1% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ ม.ค.-ธ.ค. 2560

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560

ในแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติ กระทรวงพลังงาน ได้ทบทวนการจัดทำแผนพลังงาน 5 แผนหลักในช่วงปี พ.ศ 2558 - 2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ที่สอดคล้องกับกรอบของการจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ได้แก่ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย แผนอนุรักษ์พลังงาน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงาน ทางเลือกแผนการจัดการกากธรรมชาติของไทยและแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง โดยในการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative energy development plan : AEDP2015) จะให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงาน จากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศ ให้ได้เต็มตามศักยภาพ

ปัจจุบันโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นำมาใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายตามบ้านพักอาศัยหรืออาคารต่างๆ มากขึ้น ปัญหาที่พบจากการใช้งาน ส่วนใหญ่พบว่าภายใต้รังสีอาทิตย์ที่สูงมีเฉลี่ย $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ระหว่าง $60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (Febba et al., 2018) ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงจากเดิม 20% - 25% (Khan et al., 2016, Sark, 2011) จากปัญหาข้างต้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการระบายความร้อนของโมดูล เซลล์แสงอาทิตย์โดยสามารถแบ่งเป็นสองประเภท (Hasanuzzaman et al., 2016) ได้แก่ การ

ระบายความร้อนแบบบังคับ (Active cooling systems) คือการระบายความร้อนที่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้อนให้แก่ระบบระบายความร้อน เช่น การนำแผ่นทำความเย็นติดหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การใช้น้ำระบายความร้อนด้านหน้าหรือด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การระบายความร้อนด้วยอากาศแบบบังคับผ่านโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดครีปหรือไม่ติดครีประบายความร้อน เป็นต้น อีกประเภทหนึ่งของการระบายความร้อนคือ การระบายความร้อนแบบวิธีธรรมชาติ (Passive cooling systems) เช่น การใช้ชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase changing materials, PCM) ติดตั้งด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการระบายความร้อน การติดครีประบายความร้อนด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยปล่อยอากาศไหลผ่านแบบธรรมชาติ อีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การนำเทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นจากการทำงานภายใต้รังสีอาทิตย์ โดยความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดตั้งด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์หรือเรียกว่าด้านร้อนมาข้างฝั่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอีกด้านหนึ่งที่มีการระบายความร้อนหรือเรียกว่าด้านเย็นโดยการติดครีปที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศหรือน้ำ ซึ่งในบางงานวิจัยนำเสนอการระบายความร้อนด้านเย็นด้วยน้ำ ผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นที่เกิดขึ้นจะทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตไฟฟ้าออกมา ส่งผลถึงไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยรวมของระบบที่เพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อพิจารณาในส่วนน้ำสำหรับรับความร้อนนั้นยังไม่มีการศึกษาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เพียงแต่ได้นำเสนอแนวคิดการใช้งานไว้เพียงอย่างเดียว อีกทั้งในบางการทดสอบไม่ได้กล่าวถึงการนำน้ำระบายความร้อนด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้ประโยชน์และจำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้งาน

ด้วยเหตุนี้การศึกษาคำการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะแวดล้อมจริง และการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของน้ำระบายความร้อนด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกที่อัตราการไหลที่ต่างกัน ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน รวมถึงปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนที่ลดลงพิจารณาเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่ต้องผลิตและจำหน่ายเข้าระบบสายส่งของประเทศไทยที่ลดลงได้จากพลังงานสุทธิตที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำหล่อเย็น ที่เพิ่มเข้ามาเป็นประเด็นหลักในการศึกษาครั้งนี้สำหรับขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น อีกทั้งเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งในส่วนเพิ่มเติมการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายสาขาบ้านอยู่อาศัยในรายงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็น
2. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี

ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนยี่ห้อ Solar Schutten STP6-80/40 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 80 W_p ขนาดกว้าง 0.85 m. ยาว 0.67 m
2. ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (TEC1-12706) ติดด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อระบายความร้อนให้แก่ น้ำที่ไหลผ่านด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก
3. ใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 0.0083 kg/s 0.0097 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน
4. ใช้ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนในการทดสอบ 50 L 100 L และ 150 L เพื่อหาขนาดของถังน้ำร้อนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำร้อน
5. ทดสอบเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลาประมาณ 8:00 น. -17:00 น. ภายใต้สภาพอากาศจังหวัดเชียงใหม่

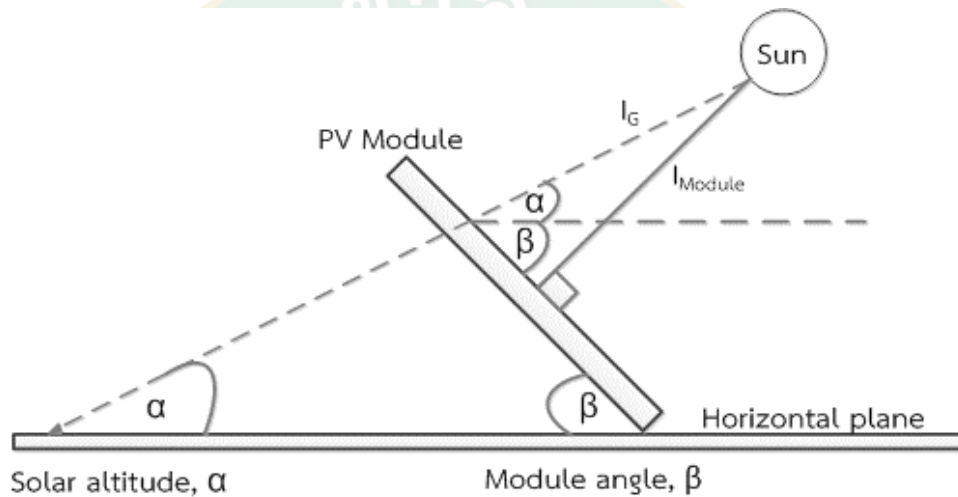
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกำลังการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำ
2. ได้สมการทำนายกำลังการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกตลอดทั้งปี
3. ได้สมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้น
4. ได้ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนสำหรับใช้ในครัวเรือน บ้านพัก และที่อยู่อาศัย
5. กำลังไฟฟ้าและความร้อนที่ผลิตได้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงไฟฟ้าที่ต้องผลิตและจำหน่ายเข้าระบบสายส่ง เพื่อเป็นแนวทางการใช้งานสู่สังคมคาร์บอนต่ำของประเทศไทย

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรังสีอาทิตย์

การหมุนรอบตัวเองของโลก และการโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลกนั้นทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลถึงรังสีอาทิตย์ที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสดงดังภาพที่ 3 โดยสามารถคำนวณเบื้องต้นได้จากสมการที่ 1



ภาพที่ 3 รังสีอาทิตย์ที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ

ในงานวิจัยนี้การทำนายรังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปีสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี (Alzahrani et al., 2014; Intaniwet, 2015; Mousavi et al., 2017) โดยค่ารังสีอาทิตย์รวมที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$I_{\text{Module}} = I_G \sin(\alpha + \beta)$$

สมการที่ 1

เมื่อ I_{Module} คือ รังสีอาทิตย์รวมที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ (W/m^2)

I_G คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบตำแหน่งที่สนใจ (W/m^2)

α คือ มุมเงยของดวงอาทิตย์จากแนวระดับ ระหว่างขอบฟ้าและจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ (Degrees, $^\circ$)

β คือ มุมเอียงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จากแนวระดับ (Degrees, $^\circ$)

รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบตำแหน่งที่สนใจ (I_G) มีปริมาณที่สูงกว่ารังสีตรง 1.1 เท่า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 และเนื่องจากรังสีตรงของดวงอาทิตย์ (I_D) ที่ตกกระทบ ณ ตำแหน่งที่สนใจเปลี่ยนแปลงตามค่ามวลอากาศ (Air mass , AM) และระดับความสูงจากน้ำทะเลของตำแหน่งที่สนใจ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$I_G = 1.1 \times I_D \quad \text{สมการที่ 2}$$

และ

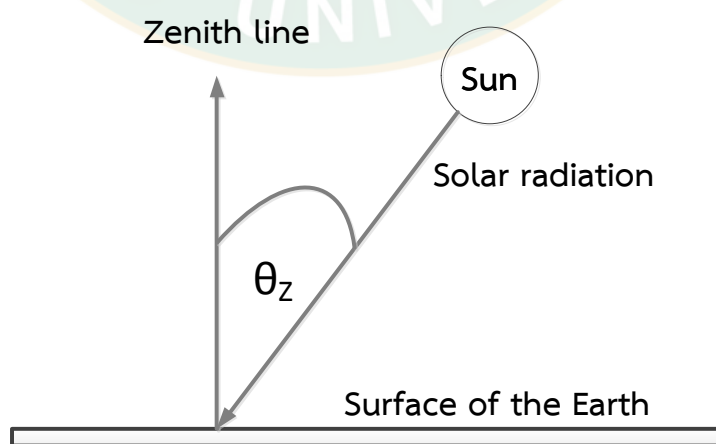
$$I_D = 1,353 \left[\left(1 - \frac{h}{7.1} \right) \times (0.7)^{AM^{0.678}} + \frac{h}{7.1} \right] \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ h คือ ความสูงจากระดับน้ำทะเล ณ ตำแหน่งที่สนใจ (km) และค่ามวลอากาศ (Air mass , AM) คำนวณได้จากสมการที่ 4

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดยที่ $\theta_z = 90 - \alpha$ สมการที่ 5

เมื่อ θ_z คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากกับระนาบระดับและแนวลำแสงดวงอาทิตย์ (Degrees,-°) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 มุมซีนิธ (Zenith Angle, θ_z)

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega_s \quad \text{สมการที่ 6}$$

จากสมการที่ 6 มุมเงยของดวงอาทิตย์จากแนวระดับ ระหว่างขอบฟ้าและจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ (Solar altitude, α) ณ ตำแหน่งที่สนใจเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับละติจูด (Latitude, θ) หรือเรียกว่า เส้นรุ้ง และมุมเอียงของโลก (Declination angle, δ) คำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360(n - 81)}{365} \right] \quad \text{สมการที่ 7}$$

เมื่อ δ คือ มุมเอียงของโลก (Degrees, $^{\circ}$)
 n คือ ลำดับวันที่โดยเริ่มให้วันที่ 1 มกราคม มีค่า $n = 1$

และมุมชั่วโมง (Solar hour angle, ω_s) เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสงอาทิตย์ท้องถิ่น (Local solar time, LST) คำนวณได้จากสมการที่ 8 และสมการที่ 9

$$\omega_s = 15 \times (12 - \text{LST}) \quad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อ ω_s คือ มุมชั่วโมง (Degrees, $^{\circ}$)
 LST คือ เวลาแสงอาทิตย์ท้องถิ่น (hr)

$$\text{โดยที่ } \text{LST} = \text{LT} + \text{TC}/60 \quad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ LT คือ เวลาท้องถิ่น (Local time) ณ ตำแหน่งที่สนใจ (hr)
 TC คือ ค่าปรับแก้เวลา Time correction factor (min)

$$\text{โดยที่ } \text{TC} = 4 \times (\text{L}_{\text{STM}} - \text{L}_{\text{Local}}) + \text{EOT} \quad \text{สมการที่ 10}$$

เมื่อ L_{STM} คือ ลองจิจูดอ้างอิงของท้องถิ่น (Degrees, $^{\circ}$)
 L_{Local} คือ ลองจิจูด ณ ตำแหน่งที่สนใจ (Degrees, $^{\circ}$)

และ EOT คือ สมการปรับแก้เวลา (The equation of time) ที่เปลี่ยนตามวันในหนึ่งปี (min) คำนวณได้จากสมการที่ 11

$$EOT = 9.87\sin(2B) - 7.53\cos(B) - 1.5\sin(B)$$

สมการที่ 11

โดยที่ B คือ ค่าที่เปลี่ยนแปลงตามลำดับวันที่ (n) โดยเริ่มให้วันที่ 1 มกราคม มีค่า n = 1
คำนวณได้จากสมการที่ 12

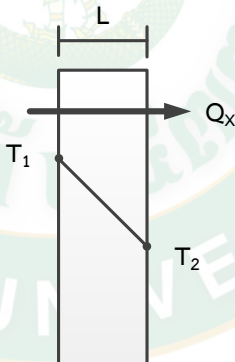
$$B = \left[\frac{360(n - 81)}{365} \right]$$

สมการที่ 12

การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Nath, 2018; Yong et al., 2016)
ได้แก่

1. การนำความร้อน คือการถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การนำความร้อนในหนึ่งมิติ

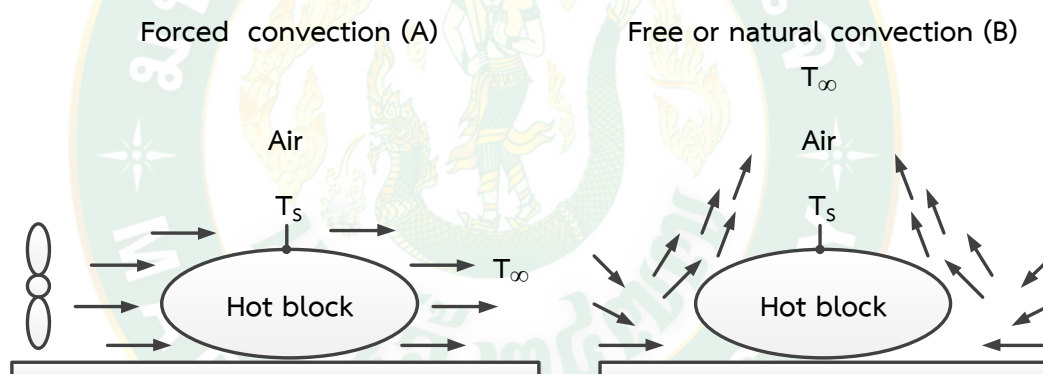
โดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) dT/dx คูณกับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่าน และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าตามสมการ Fourier's law of conduction คำนวณได้จากสมการที่ 13

$$Q_x = kA \frac{T_1 - T_2}{L}$$

สมการที่ 13

เมื่อ	Q_x	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
	A	คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับความร้อนที่ไหลผ่าน (m^2)
	T_1	คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 1 ($^{\circ}C$)
	T_2	คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 2 ($^{\circ}C$)
	L	คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot ^{\circ}C$)

2. การพาความร้อน คือการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือก๊าซ โดยถ่ายเทความร้อนเกิดระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุหรือวัตถุของแข็งวางตัวอยู่ในของไหลเคลื่อนที่ที่จะเกิดการพาความร้อนโดยของไหลนั้น แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) และการพาความร้อนแบบอิสระ (Free or natural convection) แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การพาความร้อนแบบบังคับ (A) และการพาความร้อนแบบอิสระ (B)

ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยเวลาในรูปแบบสมการทั่วไปคำนวณได้จากสมการที่ 14

$$Q_h = hA(T_s - T_{\infty})$$

สมการที่ 14

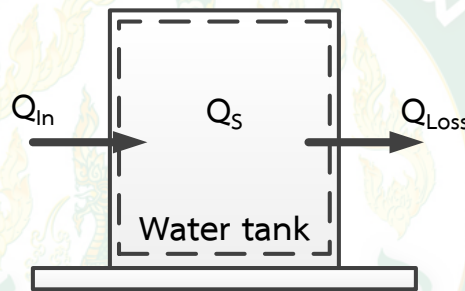
เมื่อ	Q_h	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Watt หรือ J/s)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวของของแข็ง (K)
	T_{∞}	คือ อุณหภูมิที่ทางด้านต้นของของไหล (K)
	h	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)
	A	คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (m^2)

3. การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในสถานะที่เป็นสุญญากาศ โดยไม่อาศัยตัวกลาง โดยมีรูปแบบสมการทั่วไปดังสมการที่ 15

$$Q_r = \epsilon \sigma A T^4$$

สมการที่ 15

เมื่อ	Q_r	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (W)
	A	คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (m^2)
	σ	คือ ค่าคงที่สเตฟานโบลทซ์มานน์ 5.6697×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K$)
	ϵ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวมีค่าระหว่าง 0-1
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิวที่มีการแผ่รังสีความร้อน (K)



ภาพที่ 7 การการถ่ายเทความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อน

จากภาพที่ 7 เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่ถังเก็บน้ำร้อนโดยความร้อนที่เก็บสะสมของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับผลต่างของความร้อนที่น้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้รับกับความร้อนสูญเสียที่ถังเก็บน้ำร้อน เมื่อพิจารณาถังเก็บน้ำร้อนหุ้มฉนวนอย่างดีไม่คิดความร้อนสูญเสีย และมวลของน้ำไม่มีการแยกขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ 16 (Cadafalch et al., 2015)

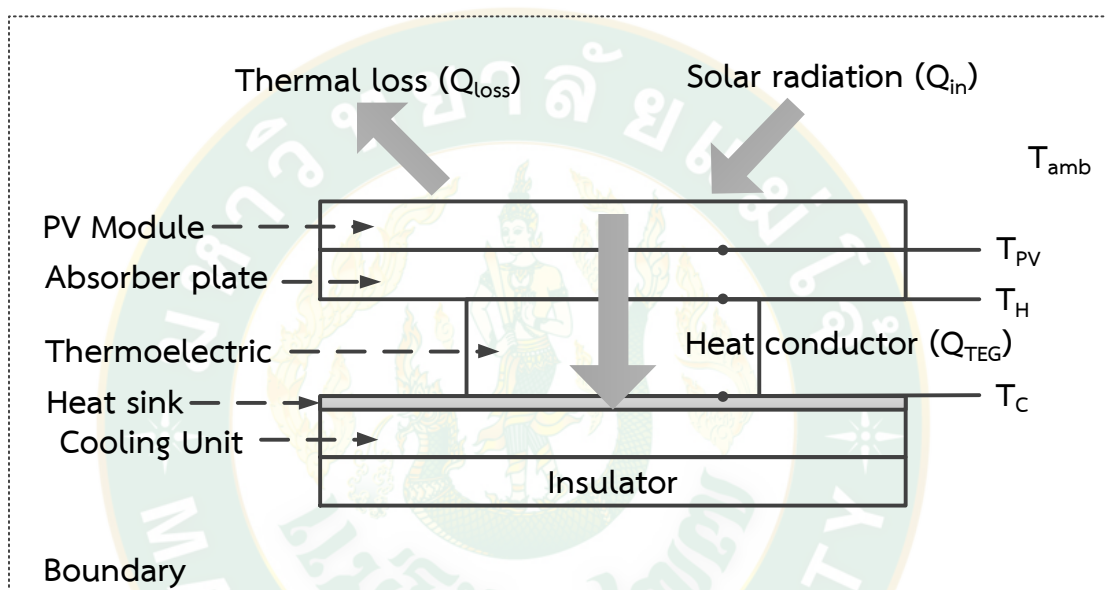
$$Q_s = (MCp)_s \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t}$$

สมการที่ 16

เมื่อ	Q_s	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อน (W)
	$(MCp)_s$	คือ ผลคูณของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ($J/^\circ C$)
	Δt	คือ เวลาที่อุณหภูมิของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง (s)
	$T_s^{t+\Delta t}$	คือ อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป ($^\circ C$)
	T_s	คือ อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาเริ่มต้น ($^\circ C$)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับรังสีแสงอาทิตย์ จะเปลี่ยนรูปร่างรังสีแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ในทางปฏิบัติมีเพียง 15% - 20% ของรังสีแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าเท่านั้น และส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน (Rahman et al., 2015) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์จากความร้อนที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 8 ระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 17 (Hashim et al., 2016, Zhu et al., 2016)



ภาพที่ 8 ระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

$$Q_{TEG} = Q_{in} - Q_{Loss}$$

สมการที่ 17

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตูดกลืนโดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นจุดสูงสุดที่สามารถรับได้ เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 18 (Hashim et al., 2016, Zhu et al., 2016, Sark, 2011)

$$Q_{TEG} = (\tau_g \alpha_c G A_{PV})$$

สมการที่ 18

เมื่อ τ_g คือ ค่าการส่งผ่านของชั้นกระจกของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
 α_c คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์

G คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2)
 A_{PV} คือ พื้นที่ที่รับรังสีอาทิตย์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2)

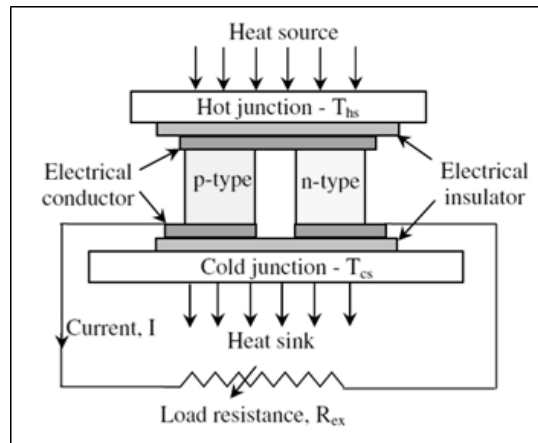
และ
$$Q_{TEG} = k_{TEG} A_{TEG} N_{TEG} \frac{T_H - T_C}{L_{TEG}}$$
 สมการที่ 19

เมื่อ Q_{TEG} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
 A_{TEG} คือ พื้นที่ของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ตั้งฉากกับความร้อนที่ไหลผ่าน (m^2)
 T_H คือ อุณหภูมิด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ($^{\circ}C$)
 T_C คือ อุณหภูมิด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ($^{\circ}C$)
 L_{TEG} คือ ความหนาของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (m)
 k_{TEG} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ($W/m \cdot ^{\circ}C$)
 N_{TEG} คือ จำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Module)

โดยที่
$$Q_{Loss} = UA_{PV} \times (T_{PV} - T_a)$$
 สมการที่ 20

เมื่อ Q_{Loss} คือ การสูญเสียความร้อนด้านหน้าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
 UA_{PV} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($W/^{\circ}C$)
 T_{PV} คือ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($^{\circ}C$)
 T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}C$)

เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ (Thermoelectric generator, TEG) คือทำงานในรูปแบบผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังภาพที่ 9 เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด (n-type and p-type semiconductors) เชื่อมต่อกันด้วยวัสดุซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า (Singh et al., 2011) เทอร์โมอิเล็กทริกถูกลึงถูกนำมาใช้สำหรับแหล่งความร้อนต่ำเช่น แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) ด้านร้อนรับความร้อนจากแหล่งความร้อนและด้านเย็นระบายความร้อนด้วยฮีตซิงก์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเกิด Seebeck effect เกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง p-n junction ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานภายนอก โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น



ภาพที่ 9 การทำงานและส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่มา: (Singh et al., 2011)

โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแสดงดังสมการที่ 21 (Zhu et al., 2016)

$$P_{TEG} = I_{TEG} \times V_{TEG} = I^2 R_L$$

สมการที่ 21

เมื่อ P_{TEG} คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (W)
 I_{TEG} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเทอร์โมอิเล็กทริก (A)
 V_{TEG} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (V)
 R_L คือ ความต้านทานของโหลดไฟฟ้า (Ω)

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22 และกำลังไฟฟ้าสุทธิของระบบ (P_{Net}) คำนวณได้จากสมการที่ 23 (Hashim et al., 2016, Sark, 2011)

$$P_{Total} = P_{PV} + P_{TEG}$$

สมการที่ 22

และ
$$P_{Net} = P_{PV} + P_{TEG} - W_{Pump}$$

สมการที่ 23

เมื่อ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
 P_{TEG} คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (W)
 W_{Pump} คือ กำลังไฟฟ้าที่ปั๊มหมุนเวียนน้ำใช้งาน (W)

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PVT) แบ่งได้ดังนี้

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังสมการที่ 24

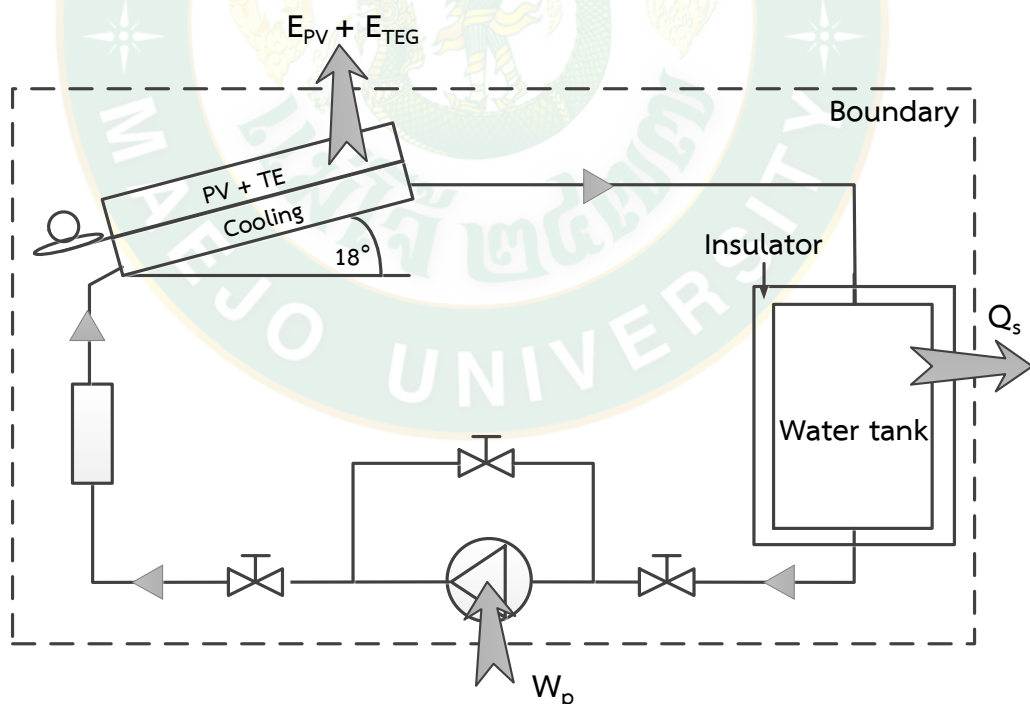
$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{GA_{PV}}$$

สมการที่ 24

- เมื่อ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
 A_{PV} คือ พื้นที่ที่รับรังสีอาทิตย์ของระบบ (m^2)
 G คือ ค่ารังสีอาทิตย์ W/m^2

พลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

เนื่องจากรังสีอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน การพิจารณาในรูปของพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน มีความเหมาะสมและสามารถพิจารณาเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานอื่น ๆ ได้โดยง่าย โดยแสดงสมดุลพลังงานของระบบภายใต้ขอบเขตดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 สมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

จากภาพที่ 10 สมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนสามารถพิจารณาพลังงานสุทธิของระบบที่ผลิตได้ในหนึ่งวันได้โดยสมการที่ 25

$$E_{\text{Net}} = E_{\text{PV}} + E_{\text{TEG}} - W_{\text{Pump}} + Q_S$$

สมการที่ 25

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน PVT แสดงดังสมการที่ 26

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

สมการที่ 26

เมื่อ	E_{PV}	คือ พลังงานที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (J)
	E_{TEG}	คือ พลังงานที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (J)
	W_{Pump}	คือ งานที่ถูกใช้โดยปั๊มน้ำหมุนเวียน (J)
	Q_S	คือ ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมโดยน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (J)
	E_{Sun}	คือ พลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ (J)

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับงานวิจัยเรื่องนี้เพื่อการตัดสินใจการลงทุนสำหรับนาระบบไปใช้งานในด้านพลังงาน สามารถคำนวณได้ง่ายและไม่ซับซ้อนจากสมการที่ 27 (Yang, 2018)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (Year)} = \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ (Baht)}}{\text{เงินกำไรสุทธิ (Baht/Year)}}$$

สมการที่ 27

การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เบื้องต้น

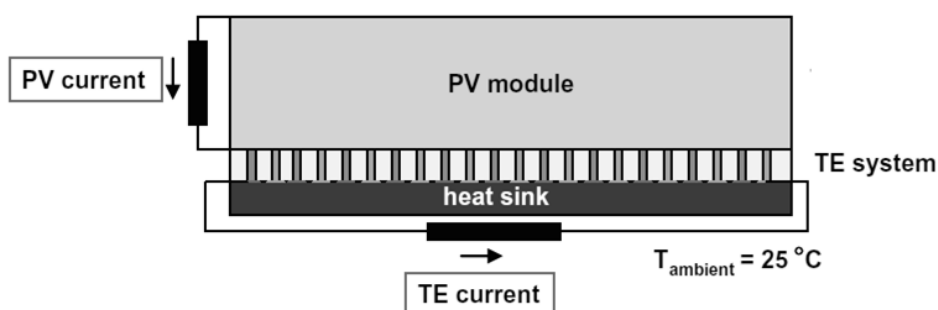
ค่าคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Carbon dioxide equivalent, CO₂eq) หมายถึงหน่วยแสดงความสามารถในการทำให้โลกร้อนเมื่อเทียบในรูปปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Lidberg et al., 2017) โดยอ้างอิงจากสมการที่ 28

ปริมาณก๊าซเรือน กระจกจากกิจกรรมใดๆ (kg CO ₂ eq)	=	ข้อมูลกิจกรรม (Unit)	×	ค่าสัมประสิทธิ์ฯของ แต่ละกิจกรรม (kg CO ₂ eq/Unit)	สมการที่ 28
--	---	-------------------------	---	---	-------------

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้า และศึกษาสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้

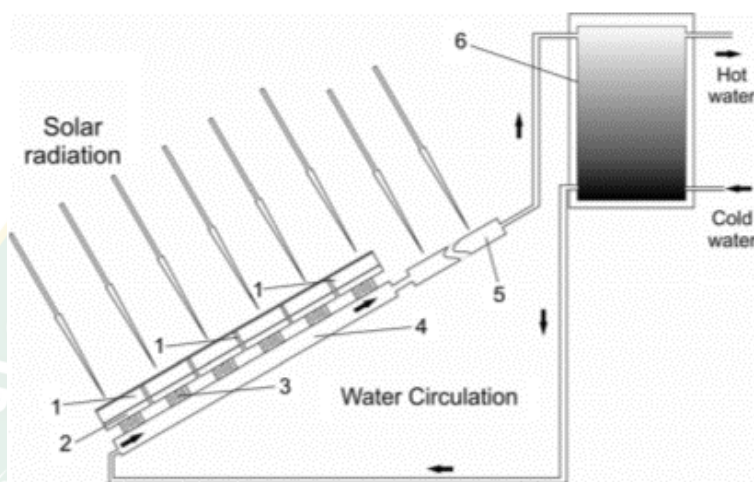
Sark (2011) ศึกษาการนำเทอร์โมอิเล็กทริกติดด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์หรือเรียกว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก (PV-TE) แสดงดังภาพที่ 11 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกจากสมการทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25°C และอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งของระบบแบ่งเป็น 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่ติดตั้งระบบเป็นส่วนหนึ่งของหลังคา กรณีที่ติดตั้งระบบโดยห่างจากหลังคาน้อยกว่า 10 cm กรณีที่ติดตั้งระบบโดยห่างจากหลังคามากกว่า 10 cm และกรณีที่ติดตั้งแยกออกจากหลังคาหรืออิสระ ผลที่ได้จากการศึกษาโดยใช้สมการพบว่าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000\text{ W/m}^2$ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์อาทิตย์กรณีที่ติดตั้งระบบเป็นส่วนหนึ่งของหลังคามีค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 83°C ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 10.3% และ 4% ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งระบบโดยห่างจากหลังคาน้อยกว่า 10 cm มีค่าอุณหภูมิของโมดูลเซลล์อาทิตย์ 61°C ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 11.7% และ 2.5% ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งระบบโดยห่างจากหลังคามากกว่า 10 cm มีค่าอุณหภูมิของโมดูลเซลล์อาทิตย์ 52°C ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 12.1% และ 1.9% ตามลำดับและกรณีที่ติดตั้งแยกออกจากหลังคาหรืออิสระมีค่าอุณหภูมิของโมดูลเซลล์อาทิตย์ 45°C ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 12.8% และ 1.3% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจากลักษณะการติดตั้งทั้ง 4 กรณี มีผลต่ออุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่แปรผกผันกับประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสงอาทิตย์เดียวกัน



ภาพที่ 11 ระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่มา: (Sark, 2011)

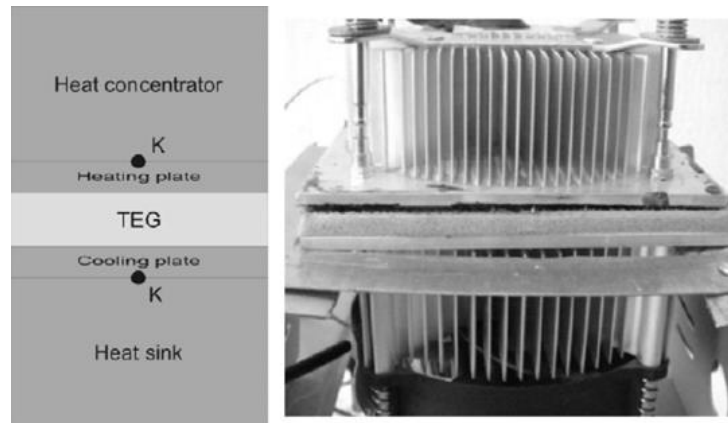
Chávez-Urbiola et al. (2012) นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PVT) แสดงดังภาพที่ 12 โดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาติดตั้งด้านหลังของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีส่วนระบายความร้อนด้วยน้ำไหลผ่านด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริก ในส่วนของน้ำจะดึงความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกสู่ส่วนระบายความร้อนและไหลผ่านไปรับความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่ในส่วนบนเพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้นไปเก็บไว้ในถังน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป



ภาพที่ 12 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

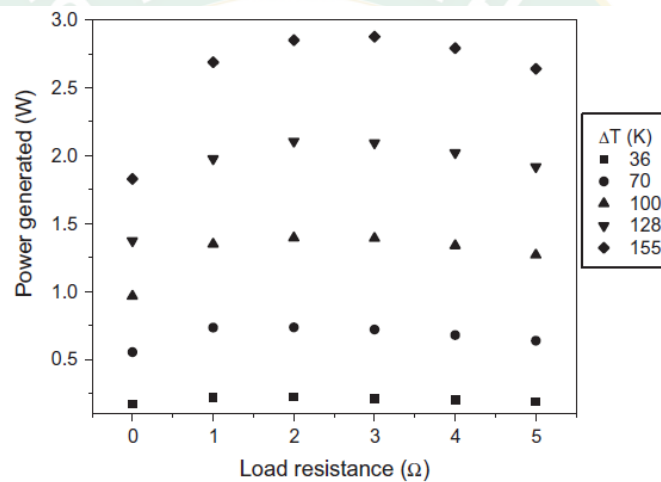
ที่มา: (Chávez-Urbiola et al., 2012)

ในส่วนของการทดลองเพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเทอร์โมอิเล็กทริกโดยชุดทดสอบ แสดงดังภาพที่ 13 โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด Bi_2Te_3 ผลิตโดย Kryotherm (TGM-127-1.4-2.5) ขนาดกว้าง 40 mm ยาว 40 mm และหนา 4.8 mm มีความต้านทานความร้อนประมาณ 2.3 KW และความต้านทานไฟฟ้า 3 - 4 Ω ประสิทธิภาพประมาณ 3% ที่ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองฝั่งของเทอร์โมอิเล็กทริก 100 K กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ประมาณ 1.5 W (2.4 V 0.6 A) ในฝั่งด้านที่ให้ความร้อนและฝั่งระบายความร้อนใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 100 mm \times 100 mm \times 3.175 mm ประกอบด้วยฮีตซิงก์ทั้งสองด้านในการทดสอบมีการปรับค่าของโหลดความต้านทาน 0-5 Ω จากการทดลอง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่โหลดความต้านทานต่างๆ แสดงในภาพที่ 14 พบว่าที่ผลต่างของอุณหภูมิฝั่งที่ให้ความร้อนและฝั่งระบายความร้อน 155 K มีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด 3 W ที่โหลดความต้านทาน 3 Ω



ภาพที่ 13 จุดวัดอุณหภูมิ และรูปชุดทดสอบ

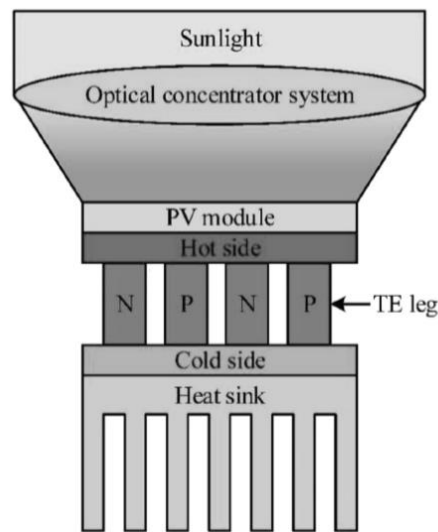
ที่มา: (Chávez-Urbiola et al., 2012)



ภาพที่ 14 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่โหลดความต้านทานต่างๆ

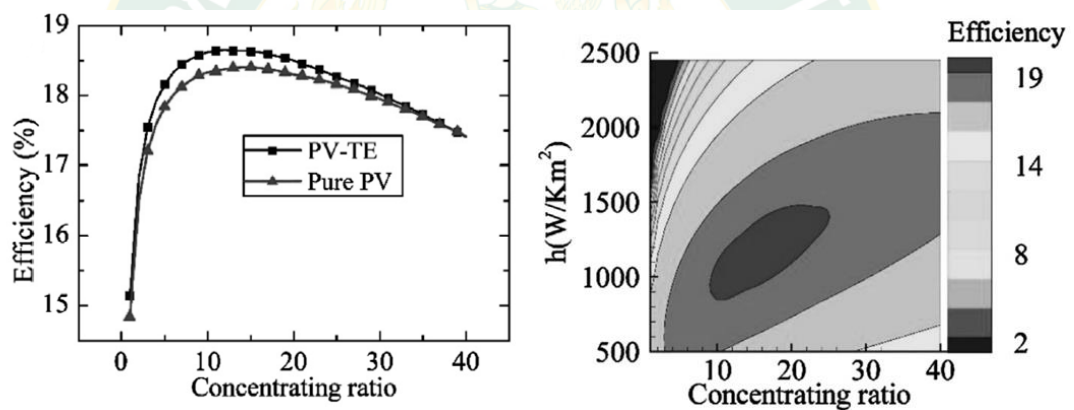
ที่มา: (Chávez-Urbiola et al., 2012)

Zhang et al. (2014) ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก (PV-TE) โดยมีการใช้เลนส์รวมแสง แสดงดังภาพที่ 15 ประกอบด้วยส่วนบนสุดเป็นเลนส์รวมแสงเพื่อรวมแสงอาทิตย์ให้ตกกระทบบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ด้านหลังมีการติดเทอร์โมอิเล็กทริก ประกอบกับส่วนล่างสุดเป็นฮีตซิงก์หรือแผงระบายความร้อนที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนโดยอากาศ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (c-Si PV) โดยใช้สมการทำนายประสิทธิภาพของระบบที่อัตราส่วนความเข้มการรวมแสง ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของเลนส์รวมแสงต่อพื้นที่รับแสงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนที่ต่างกันผลที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 15 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆของระบบ PV-TE

ที่มา: (Zhang et al., 2014)



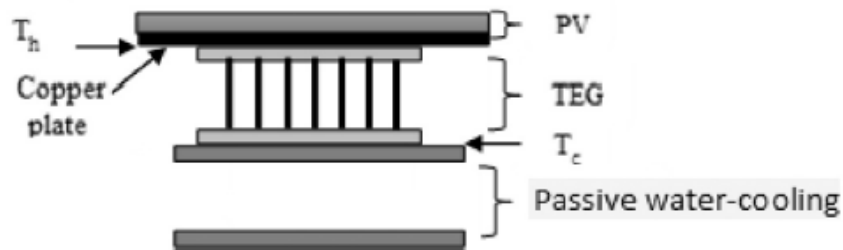
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนกับอัตราส่วนความเข้มการรวมแสง

ที่มา: (Zhang et al., 2014)

จากภาพที่ 16 อัตราส่วนความเข้มการรวมแสงประมาณ 16 ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพสูงสุด 19% และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนประมาณ $1,150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ซึ่งการใช้เลนส์รวมแสงจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 400 K จึงทำให้ฝั่งระบายความร้อนมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนที่มากตามไปด้วย

Hashim et al. (2016) ศึกษาการทำงานร่วมกันของเซลล์แสงอาทิตย์กับเทอร์โมอิเล็กทริก (PV-TE) โดยใช้สมการทำนาย ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญของระบบดังแสดงในภาพที่ 17 ได้แก่เซลล์

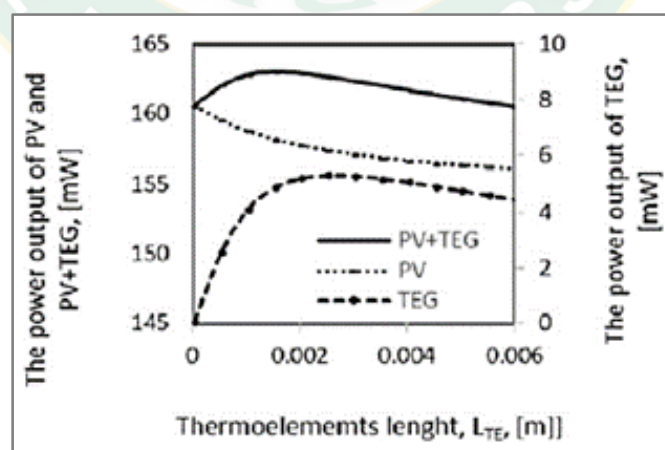
แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งด้านหลังประกอบด้วยแผ่นทองแดงก่อนจะติดด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกแนบติดกับส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่มา: (Hashim et al., 2016)

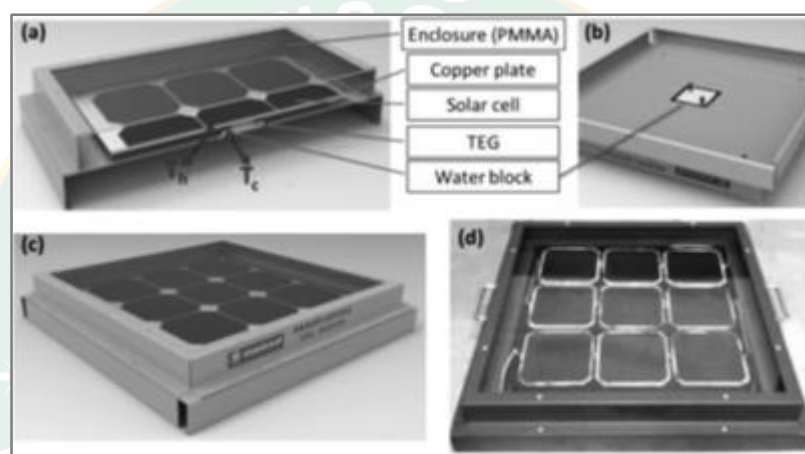
ในการคำนวณสมมติด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกหรือส่วนที่ระบายความร้อนด้วยน้ำคงที่ที่อุณหภูมิห้อง 298 K ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีจำนวน Thermoelement 62 ชิ้นที่บรรจุอยู่ใน มีพื้นที่เท่ากับ 0.64 mm^2 มีอุณหภูมิด้านร้อน 340 K และอุณหภูมิด้านเย็น 300 K ได้ผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 18 เมื่อพิจารณาที่ความยาวของ Thermoelement 0.0034 m พบว่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 158 mW ขณะเดียวกันกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าประมาณ 5 mW และกำลังไฟฟ้ายรวมมีค่าประมาณ 163 mW ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าร่วมกันของเซลล์แสงอาทิตย์กับเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 10.2% ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวประมาณ 9.8%



ภาพที่ 18 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เทอร์โมอิเล็กทริก และเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่มา: (Hashim et al., 2016)

Zhu et al. (2016) ศึกษาการทำงานร่วมกันของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก (PV-TE) แสดงดังภาพที่ 19 ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยวซิลิคอน ยี่ห้อ Sun power จำนวน 9 เซลล์ต่อกันแบบอนุกรมประกบติดอยู่กับแผ่นทองแดง 400 mm x 400 mm และตรงกลางใต้แผ่นทองแดงมีเทอร์โมอิเล็กทริกต่ออนุกรมกัน 4 แผ่น แต่ละแผ่นขนาด 40 mm x 40 mm x 3.7 mm ที่แนบด้วยบล็อกระบายความร้อนด้วยน้ำ ขนาด 80 mm x 80 mm x 20 mm และหุ้มด้วยโฟมพอลิเมอเติมช่องว่างรอบบล็อกระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อน และด้านบนกล่องถูกปิดด้วยโพลีเมทิลเมทาไครเลต (PMMA) หรือแผ่นอะคริลิกใส ป้องกันการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ โดยทดสอบในสภาวะอากาศจริงกลางแจ้ง

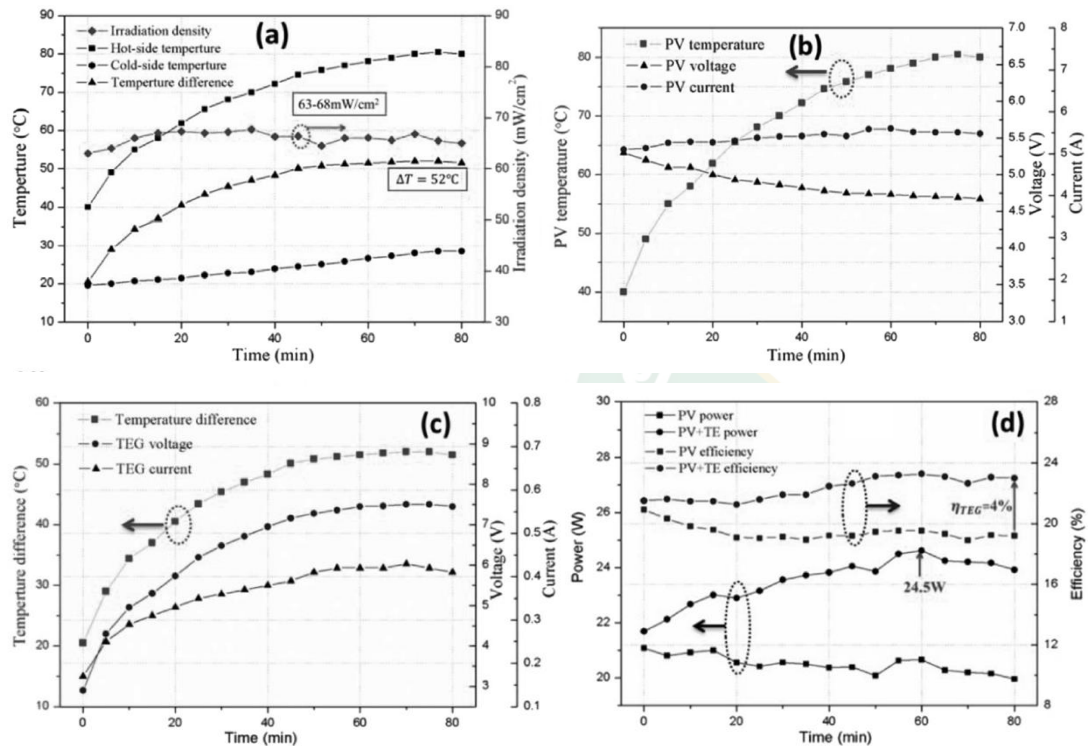


ภาพที่ 19 ส่วนประกอบระบบ PV-TE (a) รูปตัดขวางของชุดทดสอบ (b) มุมมองด้านล่าง (c) มุมมองโดยรอบ (d) ภาพถ่ายทางกายภาพ

ที่มา: (Zhu et al., 2016)

จากการทดสอบพบว่า ในช่วงทดสอบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 33 °C ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ระหว่าง 630 - 680 W/m² อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 40 °C ไปจนถึงอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 °C ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อน มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 20 °C จนถึงอุณหภูมิ 30 °C สุดท้ายความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นมีอุณหภูมิ 52 °C แสดงดังภาพที่ 20 (a) เมื่อพิจารณาที่เวลา 60 - 80 min พบว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน 9 เซลล์ มีค่าประมาณ 4.7 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 5.4 A แสดงดังภาพที่ 20 (b) ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสลัดวงจรของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เวลา 60-80 min ประมาณ 7.5 V และ 0.42 A แสดงดังภาพที่ 20 (c) เมื่อพิจารณาในส่วนของการจ่ายไฟและมีประสิทธิภาพแสดงดังภาพที่ 20 (d) ที่เวลา 60 - 80 min กำลังไฟและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 20 W มีประสิทธิภาพ 19% โดยประมาณ แต่เมื่อคิดกำลังไฟและประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่า 24.5 W ประสิทธิภาพของระบบมีค่าถึง 23% ซึ่ง

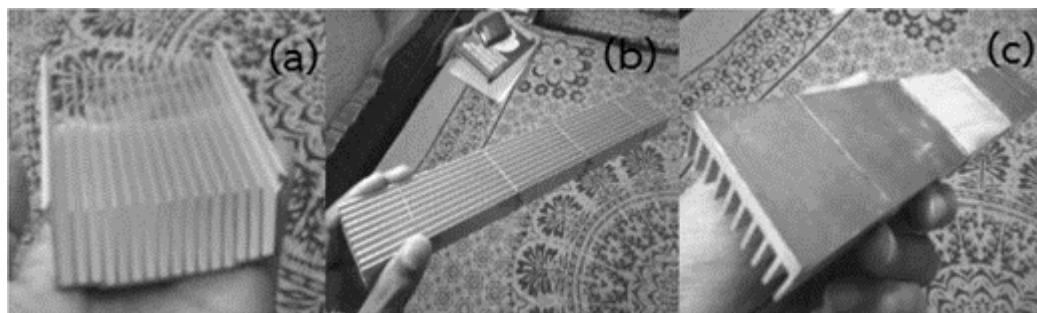
เป็นเพิ่มขึ้น 25% เมื่อเทียบกับที่ประสิทธิภาพ 19% ของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวทั้งหมดนี้ เป็นผลมาจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 20 (a) อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลง (b) อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (c) ผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนกับด้านเย็นที่มีผลต่อ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (d) กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลง ของเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่มา: (Zhu et al., 2016)

John (2014) ศึกษาการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโดยมีแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C จากเตาหุงต้มโดยมีแผ่นดีบุกเป็นส่วนรับความร้อน ในการทดสอบครั้งนี้เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในการศึกษานี้คือ TEC1-12706 ขนาด 4 cm × 4 cm × 0.35 cm หม้อความดัน 3 L มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 cm ช่องวงกลมบนแผ่นดีบุกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.2 cm ผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิของแผ่นดีบุกพบว่าอุณหภูมิสูงสุดตรงกลางแผ่น 140 °C และอุณหภูมิใกล้เปลวไฟ 200 °C โดยมีฮีตซิงก์กระจายความร้อน 3 รูปแบบด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังภาพที่ 21 ได้แก่ ฮีตซิงก์อลูมิเนียม 1 (a) ขนาด 6.2 cm × 8.2 cm จำนวนครีป 15 ครีป ฮีตซิงก์อลูมิเนียม 2 (b) ขนาด 5 cm × 30 cm จำนวนครีป 8 ครีป และฮีตซิงก์อลูมิเนียม 3 (c) แบบเดียวกันกับฮีตซิงก์อลูมิเนียม 2 แต่จะติดแผ่นทองแดงเพิ่มเข้าไปด้านหลัง



ภาพที่ 21 ฮีตซิงก์อลูมิเนียมสำหรับระบายความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ

ที่มา: (John, 2014)

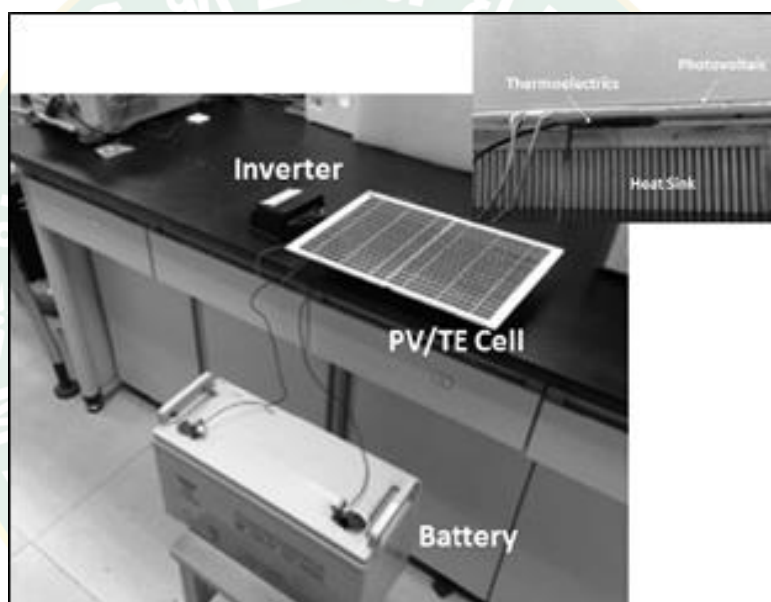
ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีต่างๆ

ตำแหน่ง	กรณี	ระบายความร้อนด้วยน้ำ	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
กลางแผ่น	ฮีตซิงก์ 2 (b)	มี	1.25	0.30	0.375
			1.50	0.35	0.525
			1.20	0.12	0.144
	ฮีตซิงก์ 1 (a)	ไม่มี	1.20	0.18	0.216
			1.10	0.17	0.187
			1.20	0.17	0.204
ใกล้เปลวไฟ	ฮีตซิงก์ 2 (b)	ไม่มี	1.20	0.42	0.504
			1.25	0.48	0.600
			2.70	0.68	1.836
	ฮีตซิงก์ 2 (b)	มี	2.50	0.65	1.625
			2.60	0.67	1.742
			3.26	0.85	2.771
	ฮีตซิงก์ 3 (c)	มี	3.22	0.84	2.705
			3.20	0.83	2.656
			7.00	0.80	5.600
ใกล้เปลวไฟ (เทอร์โมอิเล็กทริก ต่ออนุกรมกัน 2 แผ่น)	ฮีตซิงก์ 3 (c)	มี	7.10	0.82	5.822

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ากรณีที่ใช้ฮีตซิงก์ 2 (b) และฮีตซิงก์ 3 (c) ณ ตำแหน่งของเทอร์โมอิเล็กทริกใกล้กับเปลวไฟบนแผ่นดีบุกที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า

1 W ซึ่งตรงข้ามกับกรณีที่ใช้ฮีตซิงก์ 1 (a) ณ ตำแหน่งของเทอร์โมอิเล็กทริกใกล้กับเปลวไฟที่ไม่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำ และกรณีที่ใช้ฮีตซิงก์ 2 (b) ทั้งตำแหน่งของเทอร์โมอิเล็กทริกใกล้กับเปลวไฟ และตรงกลางที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำ เมื่อน้ำเทอร์โมอิเล็กทริกต่ออนุกรมกัน 2 แผ่น โดยใช้ฮีตซิงก์ 3 (c) สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 6 W โดยประมาณ ซึ่งเพิ่มขึ้นมาเท่าตัวเมื่อเทียบกับกรณีเดียวกันแต่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพียงเซลล์เดียว

Pang et al., (2015) ศึกษาแผงระบายความร้อนแบบแผ่นครีป และแผงระบายความร้อนแบบแท่งครีปทรงกระบอก ที่ติดตั้งด้านหลังของระบบผลิตไฟฟ้าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ที่มา: (Pang et al., 2015)

จากภาพที่ 22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว ซิลิคอน (Zhenyang Solar Science and Technology CO., LTD) ประสิทธิภาพ 14.5% และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 10 Wp ที่การทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน มีพื้นที่ 0.0861 m² เทอร์โมอิเล็กทริก (SP1848) ผลิตโดย Aurin Cooling Device CO., LTD ขนาด 40 mm × 40 mm × 3.8 mm สำหรับการทดลองใช้หลอดฮาโลเจนทั้งสแตนด์ 1,000 W ยี่ห้อ Philips QVF137 เพื่อจำลองแสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกบรรจุในแบตเตอรี่ลิเธียมยี่ห้อ YUASA ผลิตในประเทศญี่ปุ่น การทดสอบใช้แผงระบายความร้อนแบบแผ่นครีป และแบบแท่งครีปทรงกระบอก มีการระบายความร้อนแบบอิสระ มีรายละเอียดของแผงระบายความร้อนแสดงดังตารางที่ 2

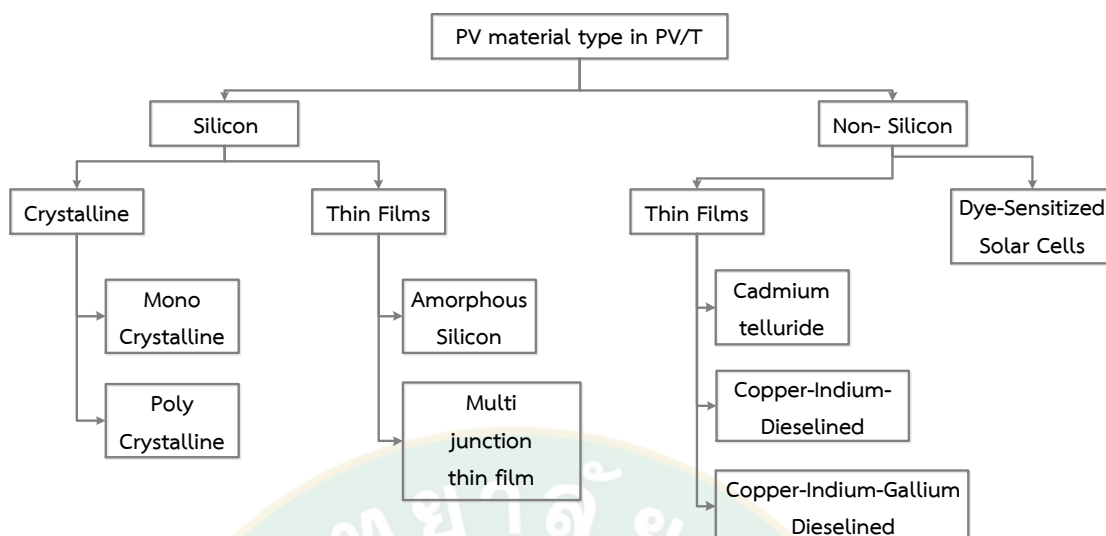
ตารางที่ 2 รายละเอียดของแผงระบายความร้อนแบบแผ่นครีบบ และแบบแท่งครีบทรงกระบอก

แบบแผ่นครีบบ	(mm)	แบบแท่งครีบทรงกระบอก	(mm)
ความยาว	203.2	ความยาว	210.0
ความกว้าง	128.8	ความกว้าง	132.4
ความหนาของฐานครีบบ	5.0	ความหนาของฐานครีบบ	10.0
ความสูงของครีบบ	35.0	ความสูงของครีบบ	30.0
ระยะห่างระหว่างครีบบ	9.8-10.2	ระยะห่างระหว่างครีบบ	3.9 - 4.1
ความหนาครีบบ	4.1-4.8	เส้นผ่านศูนย์กลาง	3.9 - 4.1

จากผลการทดสอบระหว่างแผงระบายความร้อนแบบแผ่นครีบบ และแบบแท่งครีบบ ทรงกระบอกสามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ลงได้เฉลี่ย 9.18 °C สำหรับแผงระบายความร้อนแบบแผ่นครีบบ และ 11.16 °C สำหรับแผงระบายความร้อนแบบแท่งครีบทรงกระบอก ถึงแม้ว่าชุดระบายความร้อนแบบแท่งครีบทรงกระบอกจะสามารถลดอุณหภูมิได้ดีกว่าประมาณ 2 °C แต่ยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากมีโครงสร้างและการผลิตที่ซับซ้อนกว่าชุดระบายความร้อนแบบแผ่นครีบบ

Babu and Ponnambalam (2017) ศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยจัดกลุ่มการใช้งานโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทผลึก (ผลึกเดี่ยวและผลึกรวม) และประเภทฟิล์มบาง (อะมอร์ฟัสซิลิคอนและฟิล์มบางหลายชั้น) อีกกลุ่มคือโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ผลิตจากซิลิคอนแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทสีย้อมไวแสง และประเภทฟิล์มบาง แสดงดังภาพที่ 23

ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยการระบายความร้อนด้วยของไหลพบว่า ประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าประมาณ 8% - 15% ประสิทธิภาพความร้อนประมาณ 10% - 55% และประสิทธิภาพรวมของระบบประมาณ 20% - 65% ซึ่งการระบายความร้อนด้วยน้ำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบมากที่สุดประมาณ 80% เนื่องจากมีการสะสมความร้อนที่ได้โดยน้ำในถังให้ประสิทธิภาพความร้อนที่มากกว่าการระบายความร้อนด้วยอากาศประมาณ 3 เท่า แสดงดังตารางที่ 3



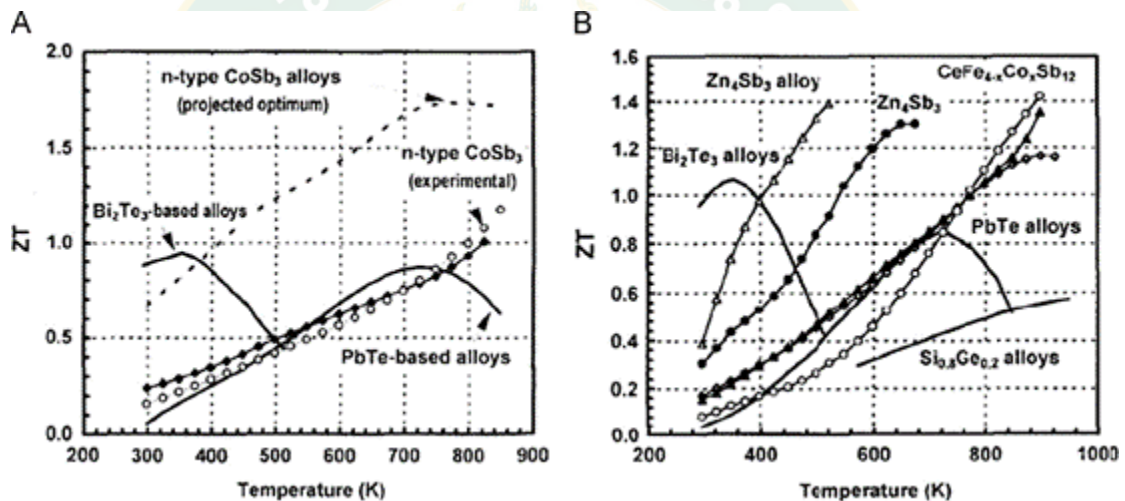
ภาพที่ 23 ประเภทของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

ที่มา: (Babu and Ponnambalam, 2017)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพไฟฟ้า ประสิทธิภาพความร้อน และประสิทธิภาพรวมของการระบายความร้อนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแบบ (Babu and Ponnambalam, 2017)

System parameters	Electrical efficiency	Thermal efficiency	Overall efficiency
Flat plate Mono-crystalline glazed water coolant type aluminum-alloy box with square or rectangular shape channels constructed	11%	51%	62%
Flat plate Mono-crystalline glazed, forced air circulating micro-channel solar cell PV-Thermal	14.7%	10.8%	20.28%
Flat plate poly-crystalline PV/T module Unglazed, liquid type with a pump control	14.46%	47.21%	63%
Flat plate PV/T poly-crystalline PV/T module with air coolant	9.4%	46%	55%
Flat plate Mono-crystalline unglazed BIPVT systems	8%	40%	48%

Zheng et al. (2014) ศึกษาการจัดกลุ่มชนิดของวัสดุสำหรับใช้ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกตามค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) หรือค่าแสดงถึงประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการใช้งานพบว่าประเภท N-type มีค่า ZT สูงสุดประมาณ 1 ของวัสดุ Bi_2Te_3 ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400 - 300 K วัสดุ CoSb_3 ทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 700 - 800 K และ PbTe ทำงานที่อุณหภูมิในช่วง 700 K และประเภท P-type วัสดุ Zn_4Sb_3 และ $\text{CeFe}_{4-x}\text{Co}_x\text{Sb}_{12}$ มีค่า ZT สูงสุดประมาณ 1.4 ที่อุณหภูมิทำงานประมาณ 500 K และ 900 K ตามลำดับ วัสดุ Zn_4Sb_3 มีค่า ZT สูงสุดประมาณ 1.3 ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 600 - 700 K วัสดุ Bi_2Te_3 มีค่า ZT สูงสุดประมาณ 1.1 ที่อุณหภูมิทำงานประมาณ 300 K วัสดุ PbTe มีค่า ZT สูงสุดประมาณ 0.8 ที่อุณหภูมิทำงานประมาณ 500 K และวัสดุ $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ จะมีค่า ZT สูงสุดประมาณ 0.6 ที่อุณหภูมิทำงานประมาณ 900 K แสดงดังภาพที่ 24



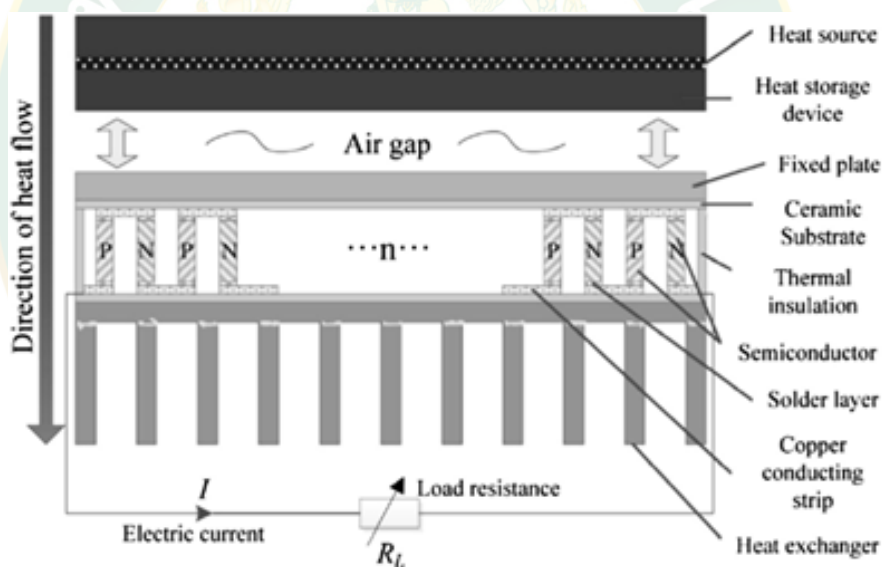
ภาพที่ 24 ค่า ZT ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (A) N-type และ (B) P-type

ที่มา: (Zheng et al., 2014)

Twaha et al. (2016) ศึกษาลักษณะการใช้งานและวัสดุที่ใช้ในการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งแบบ TEG หรือ TEC ที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้ได้เทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีควรมีค่า ZT ที่สูง จากการศึกษพบว่าในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 150 °C วัสดุชนิด Bi_2Te_3 ทั้งประเภท n และ p จะให้ค่า ZT สูงสุดประมาณ 0.8 วัสดุชนิด PbTe ช่วงอุณหภูมิ 150 - 500 °C ทั้งประเภท n และ p จะให้ค่า ZT สูงสุด 0.7 - 0.8 วัสดุชนิด $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ ประเภท p ให้ค่า ZT สูงสุดประมาณ 1.1 และ วัสดุ CoSb_3 ประเภท n ให้ค่า ZT สูงสุดประมาณ 0.8 ในช่วงอุณหภูมิ 500 - 700 °C สำหรับช่วงอุณหภูมิ 700 - 900 °C วัสดุชนิด SiGe ให้ค่า ZT สูงสุดประมาณ 0.6 - 1.0 ทั้งประเภท p และ n วัสดุชนิด LaTe ประเภท n ให้ค่า ZT สูงสุดประมาณ 0.4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุที่พร้อมใช้งานสำหรับการใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริก

Temperature (°C)	Type	TEG material	ZT (maximum)
<150	p	Bi_2Te_3	0.8
	n	Bi_2Te_3	0.8
150 - 500	p	Zn_4Sb_3	-
	p,n	PbTe	0.7 - 0.8
	n	TeAgGeSb (TAGS)	1.2
500 - 700	p	$\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$	1.1
	n	CoSb_3	0.8
700 - 900	p,n	SiGe	0.6 - 1.0
	p	LaTe	0.4



ภาพที่ 25 แบบจำลองทางกายภาพของระบบ TEG

ที่มา: (Twaha et al., 2016)

จากภาพที่ 25 แสดงตัวอย่างระบบ TEG สำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าโดยมีแหล่งความร้อน ประกอบกับอุปกรณ์จัดเก็บความร้อน (ด้านร้อน) จะถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกสู่อุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนหรือส่วนระบายความร้อน (ด้านเย็น) โดยที่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่เลือกใช้ เบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4 เมื่อความร้อนถ่ายเทจากด้านร้อนสู่ด้านเย็นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ผ่านโหลดตัวต้านทานภายนอก ในการนำไปประยุกต์ใช้จากเหตุการณ์นี้สามารถใช้งานได้กว้างขึ้นอยู่ กับอุณหภูมิที่จะนำไปใช้งานตามคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกข้างต้น

จากการค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากที่กล่าวไปข้างต้น มีเนื้อหาและวิธีการที่สามารถปรับใช้ในงานวิจัยนี้ดังนี้

1. ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับรับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Sark, 2011, Zheng et al., 2014)

2. การระบายความร้อนด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโดยน้ำสำหรับดึงความร้อนเก็บสะสมในถังเก็บน้ำร้อน (Chávez-Urbiola et al., 2012, Babu and Ponnambalam, 2017)

3. ใช้แผ่นดูดกลืนความร้อนระหว่างด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กับเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับการดึงความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก (Hashim et al., 2016, Zhu et al., 2016) และด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็น (John, 2014, Pang et al., 2015)

4. เนื่องจากการทำงานภายใต้รังสีอาทิตย์ที่สูง ส่งผลให้อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่า $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเลือกใช้เทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตจาก Bi_2Te_3 หรือวัสดุที่ใกล้เคียงสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ (Twaha et al., 2016, Zheng et al., 2014)

ในการศึกษานี้สิ่งที่ต่างจากงานวิจัยข้างต้นคือ การพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยเลือกใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 80 Wp ร่วมกับ ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น TEC1-12706 ในใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงระดับครัวเรือน บ้านที่อยู่อาศัย รวมถึงปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนที่ลดลงพิจารณาเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่ต้องผลิตและจำหน่ายเข้าระบบสายส่งของประเทศไทย

บทที่ 3

วิธีและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำ

การศึกษานางานวิจัยนี้เลือกใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 80 Wp ยี่ห้อ Solar Schutten STP6-80/40 ขนาดกว้าง 850 mm. ยาว 670 mm.หนา 30 mm แสดงดังภาพที่ 26 และใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์ รุ่น TEC1-12706 แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 26 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่ศึกษานางานวิจัยนี้



ภาพที่ 27 เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์ รุ่น TEC1-12706

เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ รุ่น TEC1-12706 มีราคาถูกกว่าชนิดอื่นในท้องตลาด (John, 2014) และสามารถนำมาใช้งานกับแหล่งความร้อนเกรดต่ำจากการใช้งานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Khan et al., 2016, Sark, 2011) ที่อุณหภูมิประมาณ 70 - 80 °C โดยคุณสมบัติเฉพาะของเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC1-12706 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทั่วไปของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ รุ่น TEC1-12706

รายละเอียด	คุณสมบัติ	
ประเภทวัสดุ	Bismuth Telluride (Bi_2TE_3)	-
จำนวนเทอร์โมคัปเปิล	127	แผง
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	1 - 2	$\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$
กว้าง	40	mm.
ยาว	40	mm.
หนา	3.6	mm.
อายุการใช้งาน	2,000,000	hr

ตารางที่ 6 ค่าเบื้องต้นสำหรับการคำนวณจำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

รายละเอียด	คุณสมบัติ	
ค่ารังสีอาทิตย์ (Fébbba et al., 2018)	G	1,000 W/m^2
พื้นที่ที่รับรังสีอาทิตย์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	A_{PV}	0.5695 m^2
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ (Zhou et al., 2018)	α_C	0.95 -
การส่งผ่านของชั้นกระจกของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Hashim et al., 2016)	τ_g	0.95 -
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Hashim et al., 2016)	k_{TE}	1.5 $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$
พื้นที่ของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ตั้งฉากกับความร้อนที่ไหลผ่าน	A_{TE}	1.6×10^{-3} m^2
ความหนาของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก	L_{TE}	0.0036 m
อุณหภูมิด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกำหนดโดยอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Fébbba et al., 2018)	T_H	70 $^\circ\text{C}$
อุณหภูมิด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกำหนดโดยอุณหภูมิของน้ำร้อนสำหรับใช้งานในครัวเรือน (Bertrand et al., 2017)	T_C	40 $^\circ\text{C}$

จากตารางที่ 6 ค่าเบื้องต้นสำหรับการคำนวณจำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับการคำนวณจำนวนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต้องใช้จากสมการที่ 18 และสมการที่ 19 ได้ดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับจากด้านร้อนคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{TEG} = \tau_g \alpha_C G A_{PV} = 0.95 \times 0.95 \times 1,000 \times 0.5695 \quad (W)$$

$$= 513.97 \quad (W)$$

2. จำนวนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการใช้งานคำนวณได้ดังนี้

$$N_{TEG} = \frac{Q_{TEG} \times L_{TEG}}{k_{TEG} A_{TEG} (T_H - T_C)} = \frac{513.97 \times 0.0036}{1.5 \times 1.6 \times 10^{-3} (70 - 40)}$$

$$= 25.69$$

$$\approx 26 \text{ Module}$$

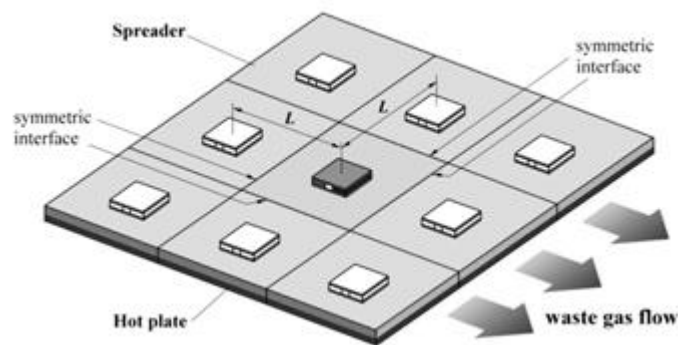
การเลือกวัสดุสำหรับแผ่นดูดกลืนความร้อน และแผ่นระบายความร้อน สามารถพิจารณาคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ ตัวอย่างเช่น (John, 2014)

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนและระบายความร้อน

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m ^{°C})
เพชร (Diamond)	1,000
เงิน (Silver)	429
ทองแดง (Copper)	400
ทอง (Gold)	310
อลูมิเนียม (Aluminum)	235
ทังสเตน (Tungsten)	174
สังกะสี (Zinc)	116
ทองเหลือง (Brass)	109
นิกเกิล (Nickel)	91
เหล็ก (Iron)	80
แพลทินัม (Platinum)	70
โคบอลต์ (Cobalt)	69

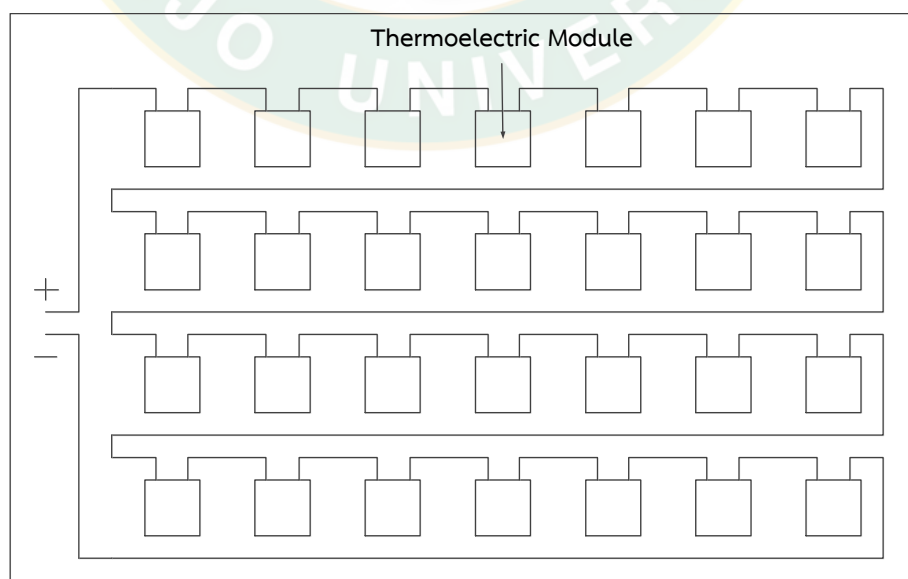
จากตารางที่ 7 พบว่าทั้งสมบัติของอลูมิเนียมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงและราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ประกอบกับแผ่นอลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนและระบายความร้อน

จากการคำนวณแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต้องใช้ 26 โมดูลในการใช้งานสำหรับดึงความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะติดตั้งโดยอ้างอิงจากการศึกษาของ (Jang and Tsai, 2013) แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ลักษณะการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับด้านร้อนและด้านเย็น
ที่มา: (Jang and Tsai, 2013)

โดยการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีการจัดเรียงในแนวอันดับ 7 แถว และขนาน 4 แถว รวมทั้งสิ้น 28 โมดูล ซึ่งใกล้เคียงกับจำนวนที่คำนวณได้ เพื่อให้กระจายในพื้นที่ที่ต้องการดึงความร้อนโดยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 28 โมดูล เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมแสดงดังภาพที่ 29

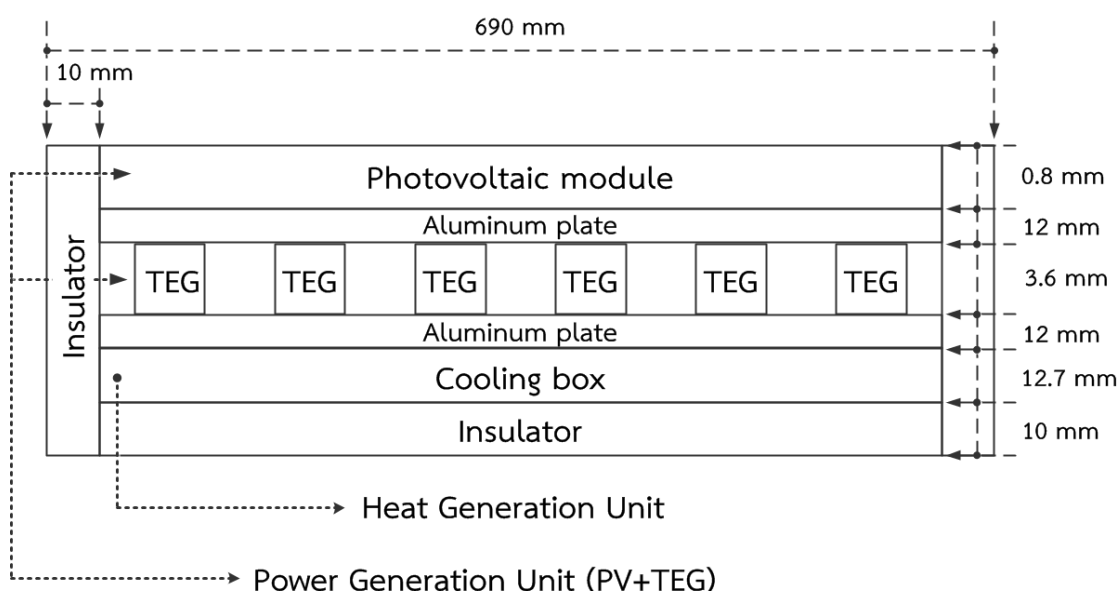


ภาพที่ 29 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 28 โมดูลที่ต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน

ชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

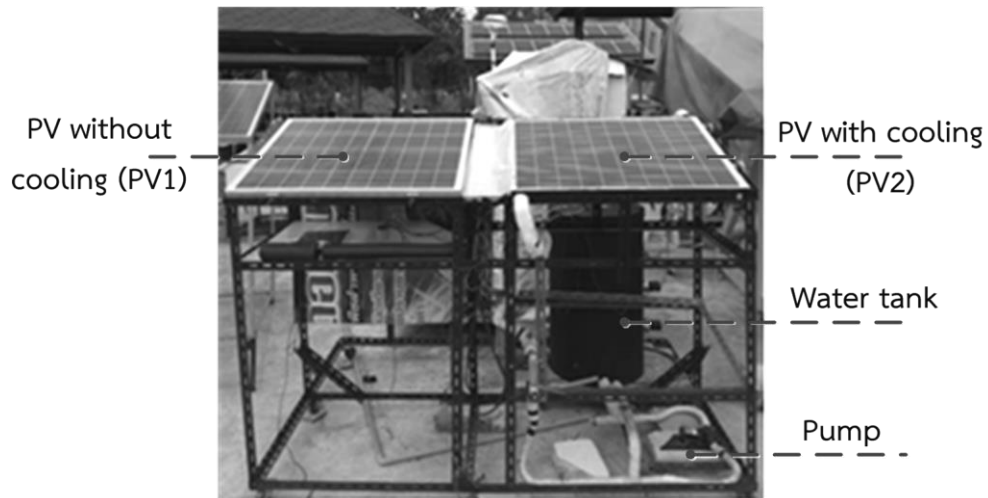
เมื่อได้จำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต้องใช้แล้ว จะทำการติดตั้งเข้ากับแผ่นอลูมิเนียมสำหรับดูดกลืนความร้อนที่ติดเข้ากับด้านหลังของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (ด้านร้อน) และอีกฝั่งหนึ่งติดกับแผ่นระบายความร้อน (ด้านเย็น) แสดงดังภาพที่ 30 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

1. ส่วนผลิตไฟฟ้า (Power Generation Unit) คือส่วนผลิตไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และชุดเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 28 โมดูล
2. ส่วนผลิตความร้อน (Heat Generation Unit) คือส่วนระบายความร้อนที่ถ่ายเทผ่านชุดเทอร์โมอิเล็กทริกมายังแผ่นระบายความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อนส่วนเกินให้กับน้ำระบายความร้อนเพื่อเก็บสะสมความร้อนและผลิตน้ำร้อนสำหรับใช้ประโยชน์ต่อไป



ภาพที่ 30 การติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำหล่อเย็นเข้ากับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 30 ส่วนผลิตความร้อนโดยการระบายความร้อนด้วยน้ำเมื่อติดตั้งเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำและเก็บสะสมความร้อนโดยใช้ถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนจะได้ชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนแสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง (ซ้าย) และชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (ขวา)

ขั้นตอนการทดลอง

จากภาพที่ 31 ชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อยู่ 63 หมู่ที่ 4 ตำบล หนองหาร อำเภอ สันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290 โดยใช้โปรแกรม Google earth pro เวอร์ชัน 7.3.1.4507 (32-bit) ระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ของชุดทดสอบดังนี้ $18^{\circ}55'30.71''N$, $99^{\circ}01'28.81''W$ มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 341 m แสดงดังภาพที่ 32 มีขั้นตอนดังนี้



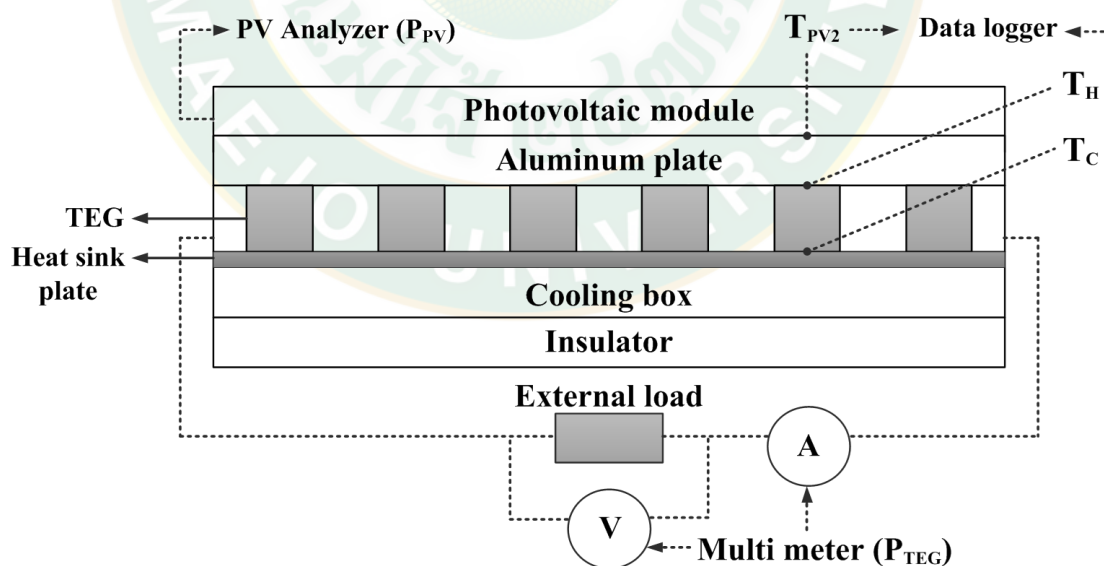
ภาพที่ 32 สถานที่ทดสอบวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ขั้นตอนที่ 1 ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทำมุมกับแนวระดับ 18° หันหน้าไปทางทิศใต้ และใช้ปั้มน้ำ SEAFLO รุ่น SFDP1-005-055-21 ขนาด 12 V แสดงดังภาพที่ 33 สำหรับหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนไปยังกล่องน้ำที่ติดกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และหมุนเวียนกลับมาเก็บสะสมในถังเก็บน้ำร้อน

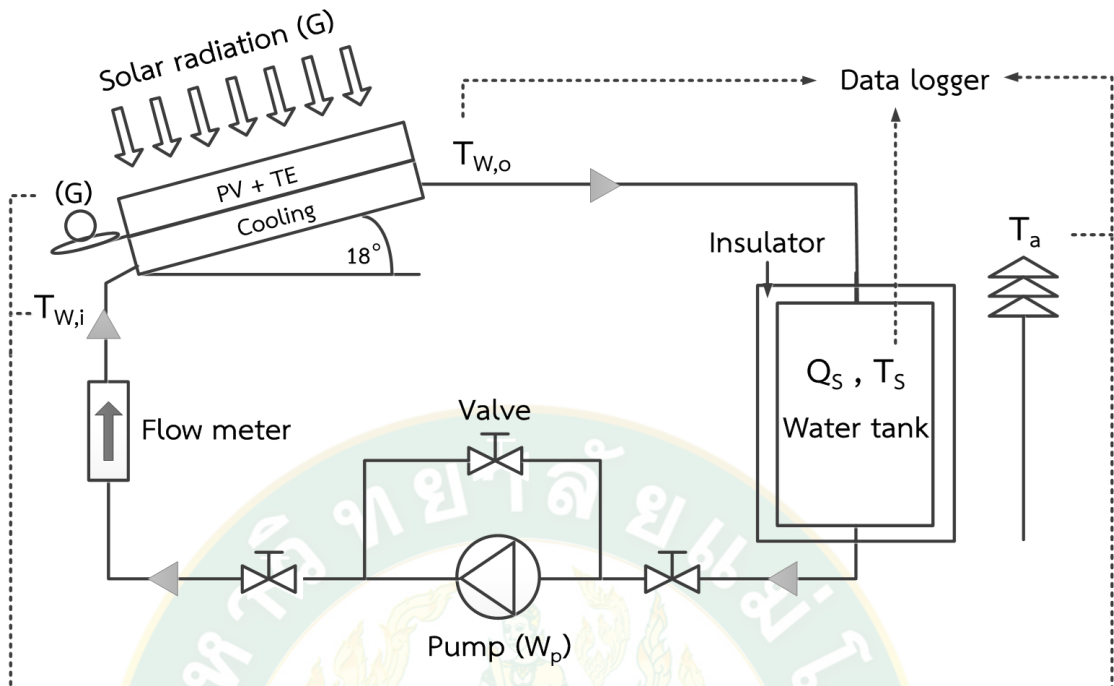


ภาพที่ 33 ปั้มน้ำสำหรับหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนในระบบ

จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนผลิตไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 34 และส่วนผลิตความร้อนแสดงดังภาพที่ 35

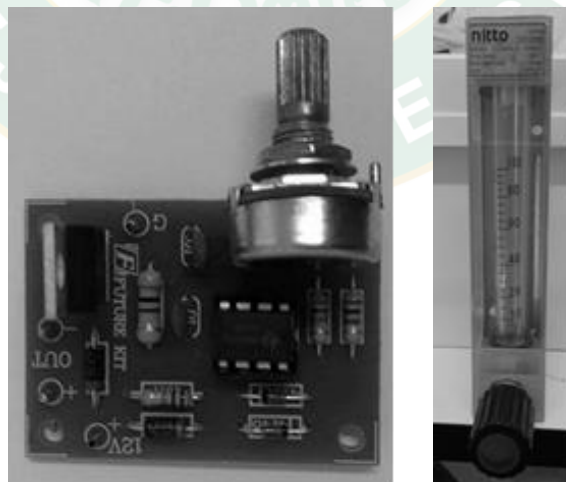


ภาพที่ 34 ส่วนผลิตไฟฟ้าของชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน



ภาพที่ 35 ส่วนผลิตความร้อนของชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบอัตราการไหลที่ 4 อัตราการไหลโดยอ้างอิงอัตราการไหล $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ สำหรับการทดสอบที่มาตรฐาน (ASHRAE Standard 93-2003, 2003) โดยปรับอัตราการไหลด้วยวงจรควบคุมให้ได้อัตราการไหลที่ 0.0083 kg/s 0.0097 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s โดยอ่านค่าอัตราการไหลจากอุปกรณ์ระบุค่าอัตราการไหลของของเหลวดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 วงจรปรับอัตราการไหลของปั้มน้ำกระแสตรง (ซ้าย) และเครื่องวัดอัตราการไหล (ขวา)

จากภาพที่ 36 เมื่อปรับอัตราการไหลด้วยวงจรถบคุมการใช้กำลังไฟฟ้าของปั้มน้ำหมุนเวียนที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 8 เมื่อได้อัตราการไหลที่เหมาะสมแล้วจึงปรับใช้ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 3 ค่าได้แก่ 50 L 100 L และ 150 L เพื่อหาขนาดของถังน้ำร้อนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำร้อน

ตารางที่ 8 อัตราการไหลที่ใช้ทดสอบและกำลังไฟฟ้าที่ปั้มน้ำใช้งาน

อัตราการไหล (Kg/s)	กำลังไฟฟ้าที่ปั้มน้ำใช้งาน (W)
0.0083	1.5170
0.0097	1.7591
0.0114	2.3192
0.0125	2.4070

ขั้นตอนที่ 3 จากภาพที่ 34 และภาพที่ 35 ประกอบด้วยตำแหน่งวัดอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{PV}) อุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_H) อุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_C) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (T_s) อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (T_a) อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าส่วนระบายความร้อน ($T_{w,i}$) อุณหภูมิของน้ำที่ออกส่วนระบายความร้อน ($T_{w,o}$) โดยที่อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) จะเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger รุ่น ADAM 5000L/TCP) และกำลังไฟฟ้าถูกจัดเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าอัตโนมัติสำหรับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Analyzer รุ่น PROVA 210) และกำลังไฟฟ้าของชุดผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก ต่อเข้ากับโหลดภายนอกที่ใช้ตัวต้านทานแบบเซรามิก 0.6Ω โดยใช้มัลติมิเตอร์ UNI-T รุ่น UT106 อ่านค่าสำหรับบันทึกกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ เพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยมีการเชื่อมต่อวงจรการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 Data logger รุ่น ADAM 5000L/TCP (ซ้าย) PV Analyzer รุ่น PROVA 210 (กลาง) มัลติมิเตอร์ UNI-T รุ่น UT106 (ขวา)

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบและเก็บข้อมูลในช่วงเวลาประมาณ 8:00 น. -17:00 น. ภายใต้สภาพอากาศจังหวัดเชียงใหม่ โดยนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ผลดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P_{TEG}) จากสมการที่ 21 และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากสมการที่ 24

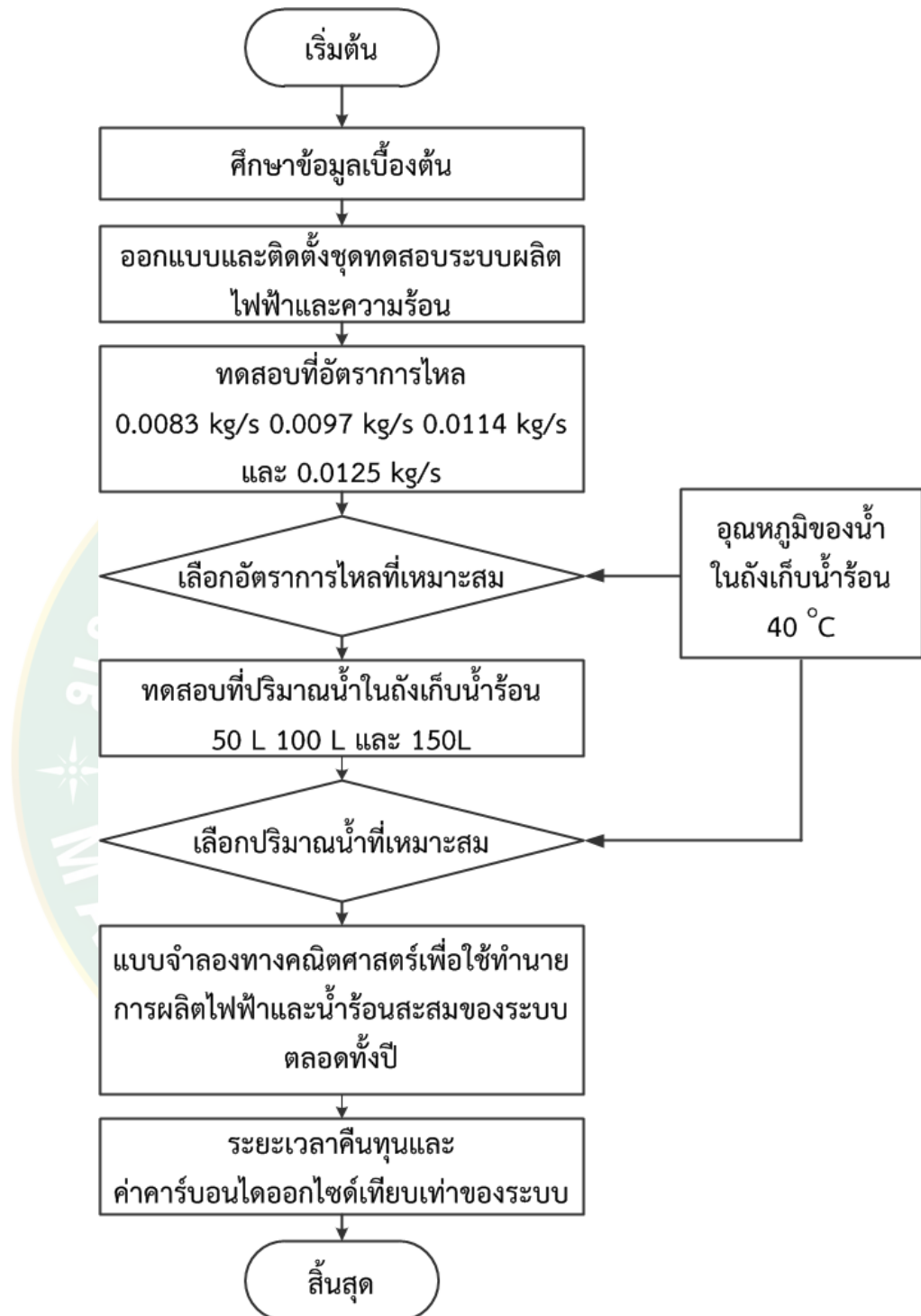
2. รั้งสีอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันที่ต่างกันการพิจารณาในรูปของพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PVT) จึงมีความเหมาะสมแบ่งออกเป็น พลังงานที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกในหนึ่งวัน งานที่ถูกใช้โดยปั้มน้ำหมุนเวียนในหนึ่งวัน และปริมาณความร้อนสะสมของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน นำไปวิเคราะห์พลังงานสุทธิของระบบในหนึ่งวันจากสมการที่ 25 และประสิทธิภาพของระบบได้จากสมการที่ 26 เพื่อเปรียบเทียบแต่ละอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำระบายความร้อนและปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนในการทดสอบ

3. สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี ใช้ชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยเลือกอัตราการไหล และปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะคำนึงถึงอุณหภูมิที่ลดลงได้และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสำหรับใช้งานในครัวเรือนได้โดยตรงที่ประมาณ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Bertrand et al., 2017) และประสิทธิภาพของระบบในช่วง $50\% - 80\%$ (Babu and Ponnambalam, 2017)

4. ระยะเวลาคืนทุนของโครงการจากสมการที่ 27

5. ค่าคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากสมการที่ 28

จากที่กล่าวไปข้างต้นสามารถสรุปวิธีการและขั้นตอนการทดลองชุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

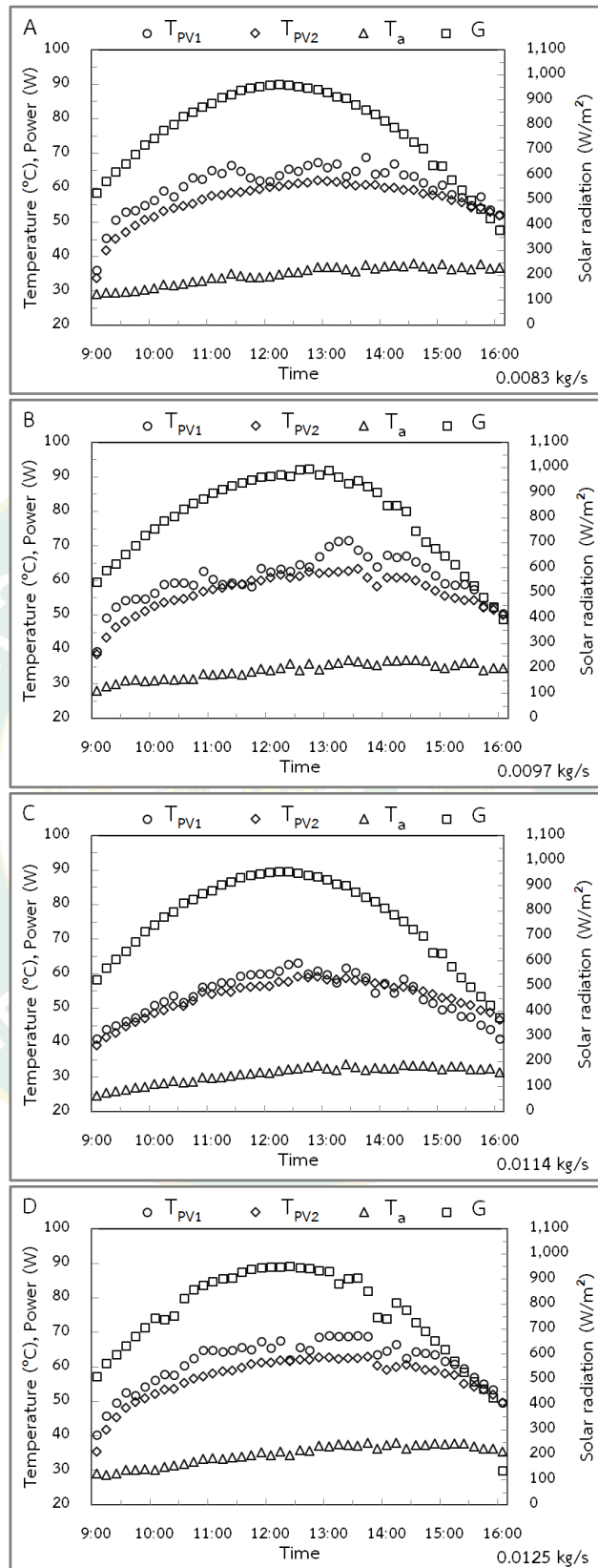
บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

การทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็นภายใต้สภาพอากาศแวดล้อมจริง 2 กรณีศึกษาได้แก่ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนสำหรับอ้างอิง (PV1) และโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อน (PV2) โดยผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

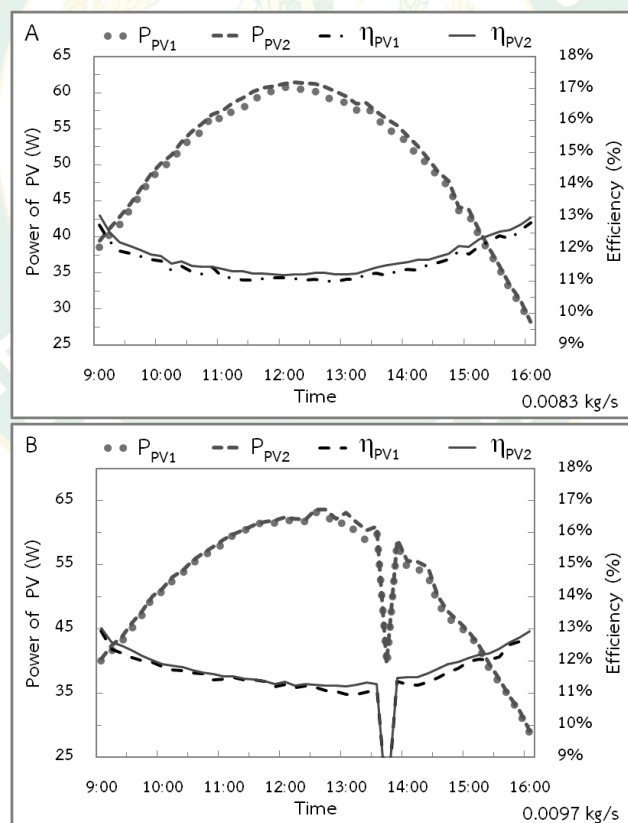
อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ

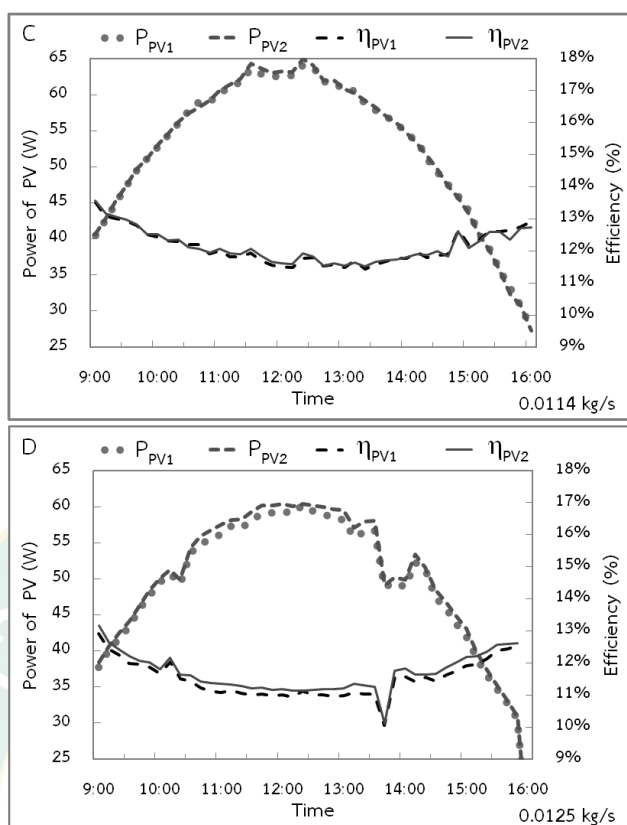
การทดสอบในส่วนแรกใช้ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L ทดสอบในช่วงเดือนตุลาคม - ธันวาคม พ.ศ. 2560 โดยใช้อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 4 อัตราการไหลได้แก่ 0.0083 kg/s 0.0097 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s พบว่าผลการทดสอบทั้ง 4 อัตราการไหลในแต่ละวันมีค่ารังสีอาทิตย์ระหว่าง 400 W/m^2 - $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งผลรวมพลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s 0.0097 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s สะสมรวมในหนึ่งวันมีค่า 11.29 MJ/Day 11.62 MJ/Day 11.22 MJ/Day และ 11.06 MJ/Day ตามลำดับ และพบว่าทุกอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนตลอดช่วงเวลาทำงาน เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นอลูมิเนียมติดกั้นความร้อนสู่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) และน้ำระบายความร้อนด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกผ่านแผ่นระบายความร้อน โดยที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด $8.91 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลา 13:05 น. เมื่อเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน รองลงมาที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s 0.0125 kg/s และ 0.0114 kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ $8.09 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $7.69 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $5.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และพบว่าทุกอัตราการไหลที่ทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุดจะเกิดในช่วงเวลาที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงหรือสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 10:00 น. - 13:00 น. เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดผลต่างระหว่างอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ระบายความร้อนสูงที่สุดทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

จากอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ลดลงส่งผลให้ทุกอัตราการไหลที่ทดสอบมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน โดยที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 8.91 °C ส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 61.45.W มีประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้า 11.26% ในขณะที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 59.75 W กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 1.69 W คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 2.83% รองลงมาที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s 0.0125 kg/s และ 0.0114 kg/s โดยสามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 8.09 °C 7.69 °C และ 5.02 °C ตามลำดับ ส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1.45 W (กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 59.36 W และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 11.30%) 1.28 W (กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 56.73 W และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 11.38%) และ 0.86 W (กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 64.89 W และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 11.92%) ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 2.50% 2.31% และ 1.35% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน แสดงดังภาพที่ 40

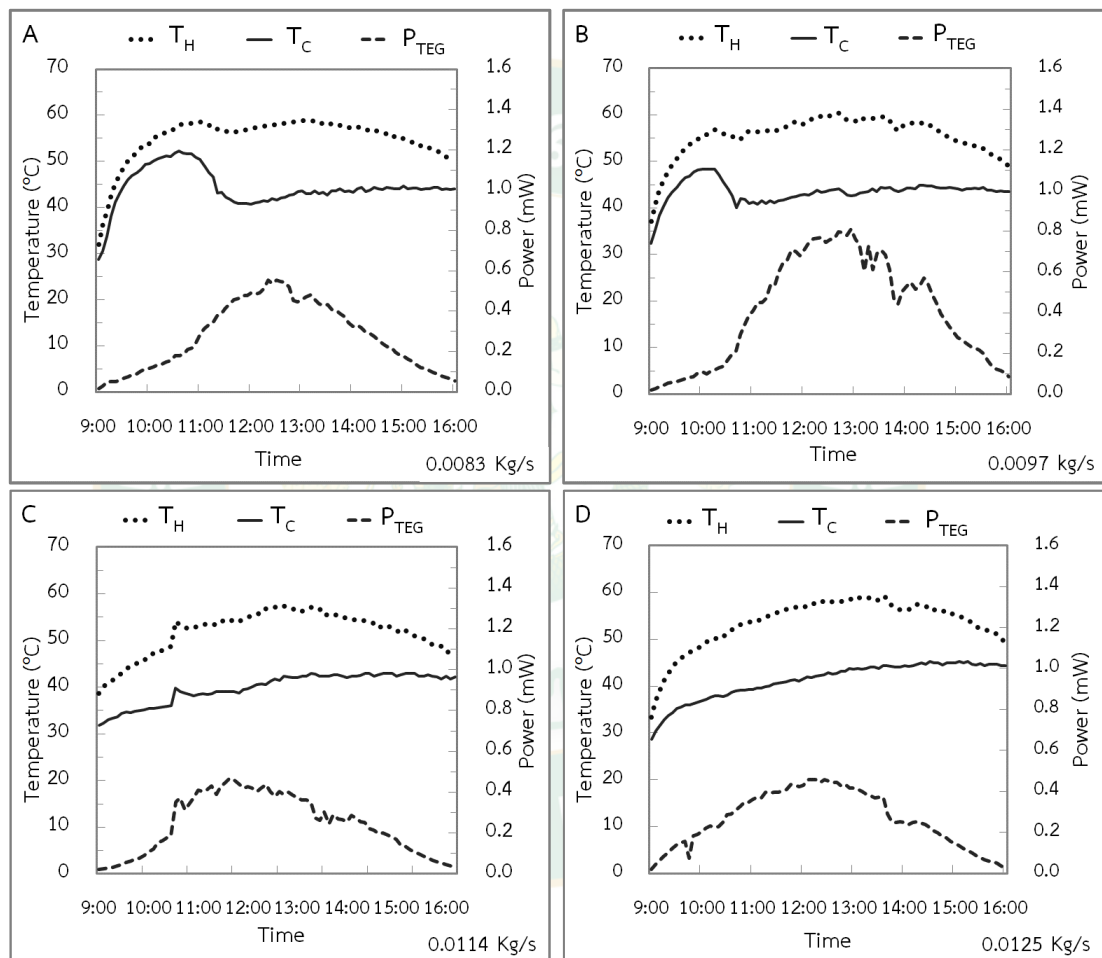




ภาพที่ 40 สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ

ในส่วนของการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยชุดเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) สามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วงเวลาได้แก่ ช่วงที่ 1 เวลา 9:00 น. - 11:00 น. คือช่วงที่ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มทำงานเมื่อได้รับความร้อนจากด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลังผลิตไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงที่ 2 เวลา 11:00 น. - 14:00 น. เป็นช่วงที่ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงเนื่องจากได้รับความร้อนผ่านโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จากรังสีอาทิตย์ที่ค่อนข้างสูงค่าประมาณ 40°C และจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิด้านร้อนและอุณหภูมิด้านเย็นที่เปลี่ยนแปลงสม่ำเสมอทุกอัตราการไหลในการทดสอบที่เวลา 11:00 น. - 14:00 น. โดยที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 0.0083 kg/s และ 0.0097 kg/s สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าอัตราการไหล 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s เนื่องจากอุณหภูมิด้านเย็นที่ต่ำกว่า และเมื่อเข้าสู่การทำงานช่วงที่ 3 เวลา 14:00 น. - 16:00 น. ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกจะผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยลง จากอุณหภูมิของด้านร้อนลดต่ำลงและอุณหภูมิของด้านเย็นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและส่งผลให้อุณหภูมิด้านร้อนสูงขึ้นประมาณ $55 - 60^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของด้านเย็นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีด้านเย็นจึงลดต่ำลง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกจึงค่อยๆลดต่ำลงจนกระทั่งเวลาประมาณ 16:00 น. เมื่อพิจารณาการผลิตกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) ในช่วงที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดช่วงที่ 2 เวลา

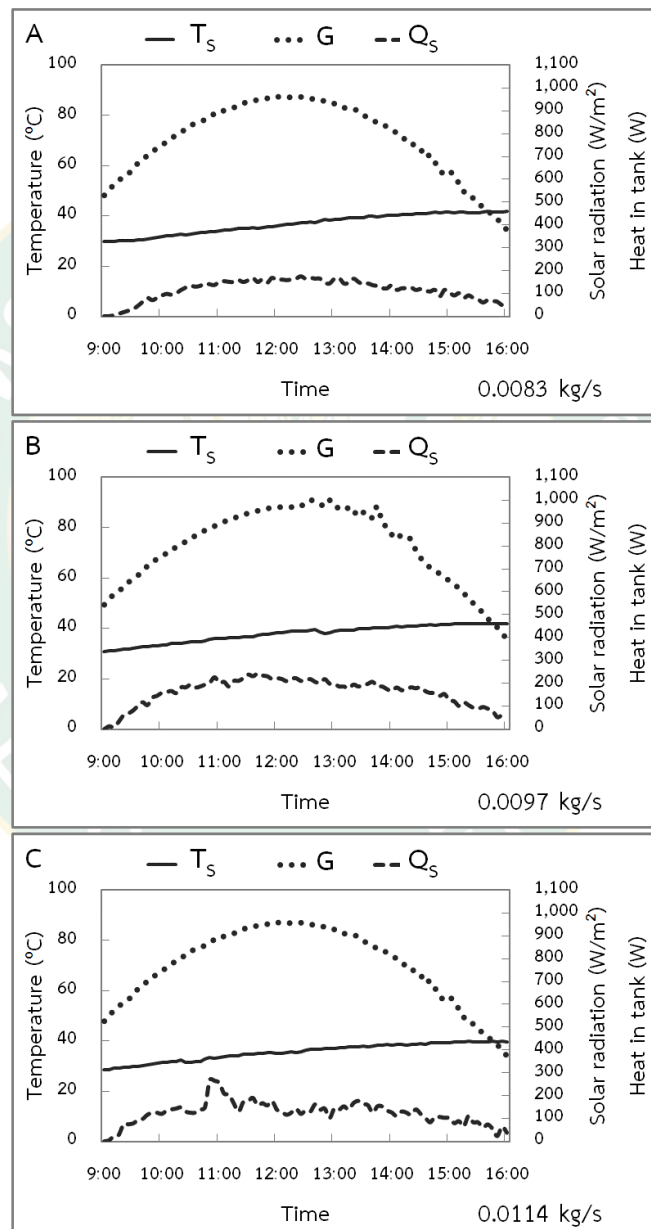
11:00 น. - 14:00 น. อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนได้ดี และผลต่างอุณหภูมิ ด้านร้อนและด้านเย็นสม่ำเสมอ โดยที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 0.81 mW รองลงมาคือที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.55 mW 0.47 mW และ 0.46 mW หลังจากเวลา 14:00 น. อุณหภูมิด้านเย็นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิด้านร้อนลดลง กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกจึงลดลงตามไปด้วยแสดงดังภาพที่ 41

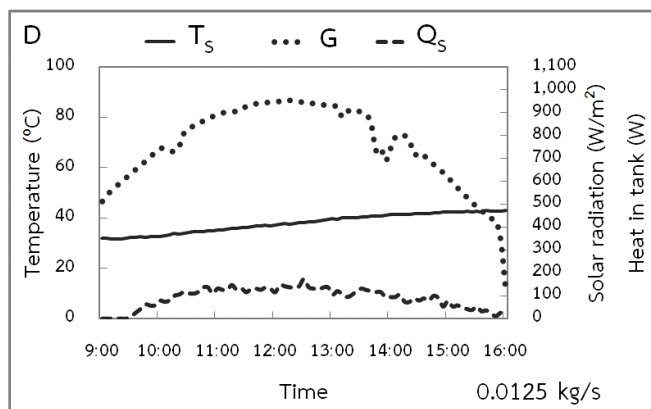


ภาพที่ 41 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำระบายความร้อนต่ออุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก และการผลิตกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก

อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนสิ่งที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์จากการทดสอบนี้ไม่ได้มีเพียงไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างเดียว แต่ความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้จากน้ำระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกด้วยได้ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน และปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนที่ปริมาณน้ำ 100 L เมื่อเวลา 16:00 น. พบว่าที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s ผลิตอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสูงสุด 43.02 °C (ปริมาณ

ความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน 4.56 MJ/Day) รองลงมาที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้ 41.79 °C (ปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน 4.65 MJ/Day) ที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้ 41.75 °C (ปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน 5.04 MJ/Day) และอัตราการไหล 0.0125 kg/s ได้อุณหภูมิน้ำในถัง 39.63 °C (ปริมาณความร้อนสะสมในถัง 4.66 MJ/Day) แสดงดังภาพที่ 42





ภาพที่ 42 อุณหภูมิของน้ำและปริมาณความร้อนสะสมในถังที่เก็บน้ำร้อนที่อัตราการไหลต่างๆ

อย่างไรก็ตามการพิจารณาพลังงานสุทธิที่ของระบบมีความเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากการใช้งานจริงเนื่องจากสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เมื่อพิจารณาพลังงานสุทธิในหนึ่งวันของระบบ พบว่าทั้ง 4 อัตราการไหลให้พลังงานสุทธิต่อวันที่มากกว่า โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยการระบายความร้อนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีการสะสมความร้อนจากการระบายความร้อนให้แก่ถังเก็บน้ำร้อน โดยที่ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็นสูงสุดที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s มีค่า 55.89% รองลงมาที่อัตราการไหล 0.0125 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0097 kg/s มีประสิทธิภาพของระบบ 53.78% 53.62% และ 51.21% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ 11 - 12% สำหรับการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 พลังงานสุทธิของระบบที่ผลิตได้ในหนึ่งวันที่อัตราการไหลต่างกัน

รายละเอียด	อัตราการไหล kg/s							
	0.0083		0.0097		0.0114		0.0125	
	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2
E_{PV} (MJ/Day)	1.29	1.31	1.33	1.35	1.35	1.35	1.27	1.29
E_{TEG} (MJ/Day)	-	7.02	-	10.38	-	5.95	-	6.76
		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$
W_{Pump} (MJ/Day)	-	0.04	-	0.05	-	0.06	-	0.06

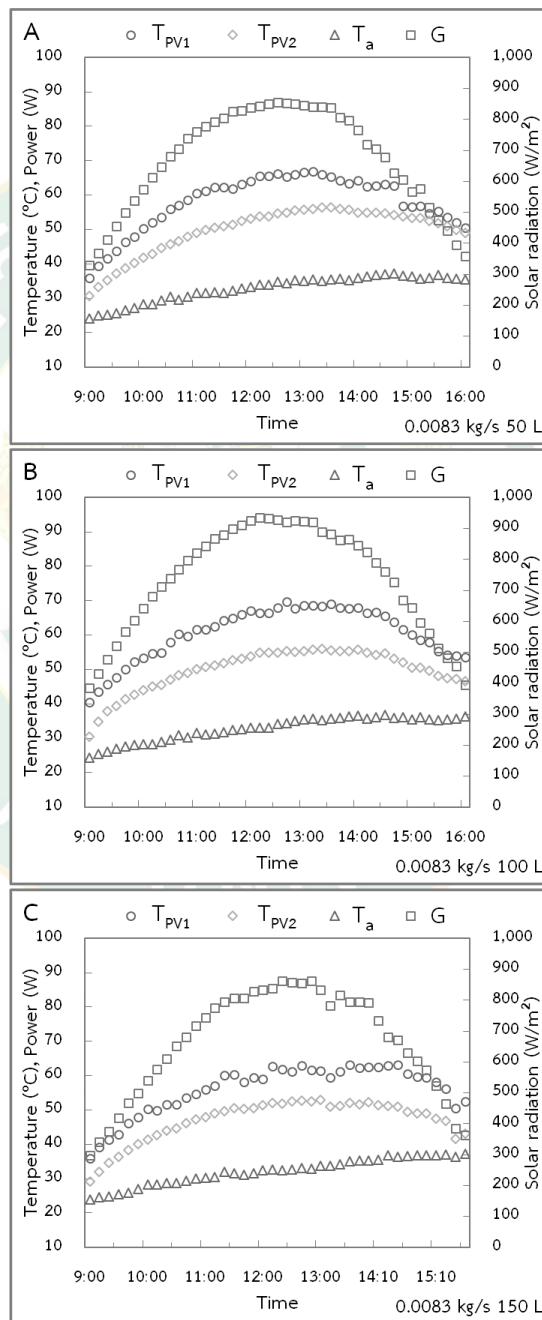
รายละเอียด	อัตราการไหล kg/s							
	0.0083		0.0097		0.0114		0.0125	
	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2
Q_s (MJ/Day)	-	5.04	-	4.65	-	4.72	-	4.66
E_{Sun} (MJ/Day)	11.29		11.62		11.22		11.06	
E_{Net} (MJ/Day)	1.29	6.31	1.33	5.95	1.35	6.02	1.27	5.95
T_s (°C)	-	41.75	-	41.79	-	39.63	-	43.02
η_{sys} (%)	11.41	55.89	11.47	51.21	12.03	53.62	11.44	53.78

ผลการทดลองในส่วนแรกที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s ให้ประสิทธิภาพของระบบสูงสุด รวมถึงประสิทธิภาพกำลังผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนเพิ่มขึ้น และ อุณหภูมิของน้ำที่เก็บสะสมความร้อนในถังที่สูงกว่า 40 °C สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง และมีประสิทธิภาพของระบบที่สูงกว่า 50% จึงเป็นเงื่อนไขในการศึกษาถึงปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป

ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ

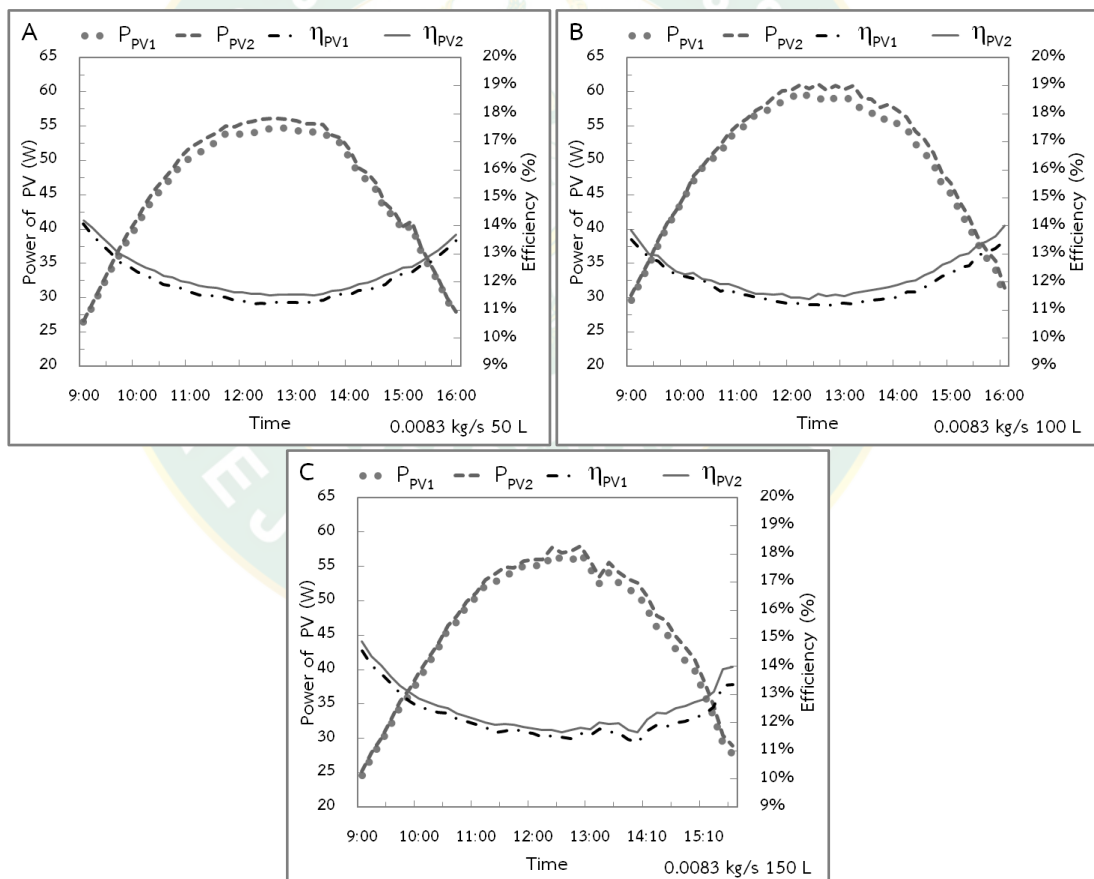
การทดสอบผลของปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ในช่วงเดือนมกราคม - พฤษภาคม โดยใช้ อัตราการไหลที่ 0.0083 kg/s และใช้ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 50 L 100 L และ 150 L พบว่า ผลการทดสอบที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนแต่ละวันมีค่ารังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง 400 - 1,000 W/m² และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 25 - 40 °C ซึ่งผลรวมพลังงานจากรังสีอาทิตย์สะสมที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 50 L 100 L และ 150 L มีค่า 9.81 MJ/Day 10.76 MJ/Day และ 9.22 MJ/Day ตามลำดับ โดยผลการทดสอบที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 50 L 100 L และ 150 L พบว่าทุกการทดสอบ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนตลอดช่วงเวลาทำงาน เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนผ่าน แผ่นอลูมิเนียมดูดกลืนความร้อนสู่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและน้ำระบายความร้อนฝั่งแผ่นระบายความร้อนด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L สามารถลดอุณหภูมิได้สูงสุด 14.38 °C ในช่วงเวลา 12:40 น. เมื่อเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน

ร้อน รองลงมาที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 150 L และ 50 L โดยสามารถลดอุณหภูมิได้ 12.40 °C และ 12.00 °C ตามลำดับ และพบว่าทุกปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสามารถลดอุณหภูมิได้สูงสุดจะเกิดในช่วงเวลาที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงหรือสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 10:00 น.- 13:00 น. เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดผลต่างระหว่างอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของน้ำที่ระบายความร้อนสูงที่สุดทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด แสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ 50 L (A) 100 L (B) และ 150 L (C) ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 0.0083 kg/s

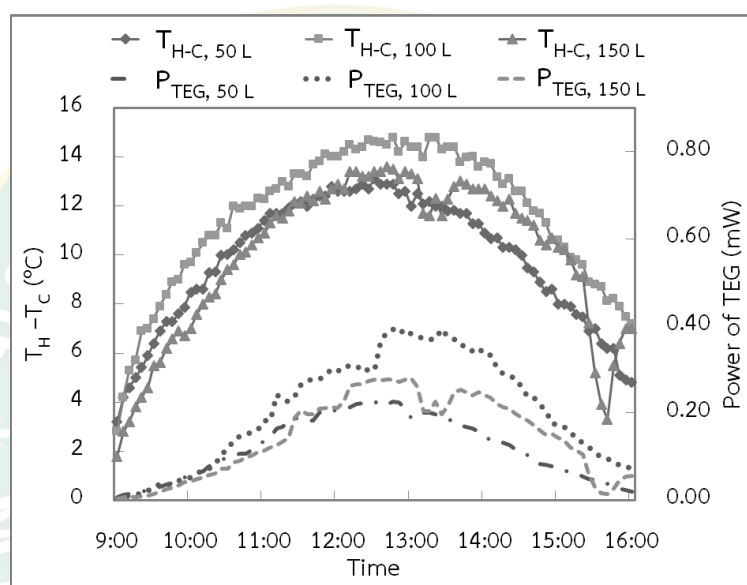
จากผลอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน สูงกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน โดยที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L ณ เวลาที่สามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุดสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 60.29 W มีประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้า 11.50% ในขณะที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 58.47 W ซึ่งคิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 1.82 W มีประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 3.11% และรองลงมาที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 150 L และ 50 L ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 45.83 W (ประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้า 12.35%) และ 55.26 W (ประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้า 11.60%) ณ เวลาที่อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงสูงสุดตามลำดับ สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 1.85 W และ 1.54 W มีประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 4.21% และ 2.86% ตามลำดับเมื่อเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน แสดงดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และชุดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ที่ 50 L (A) 100 L (B) และ 150 L (C)

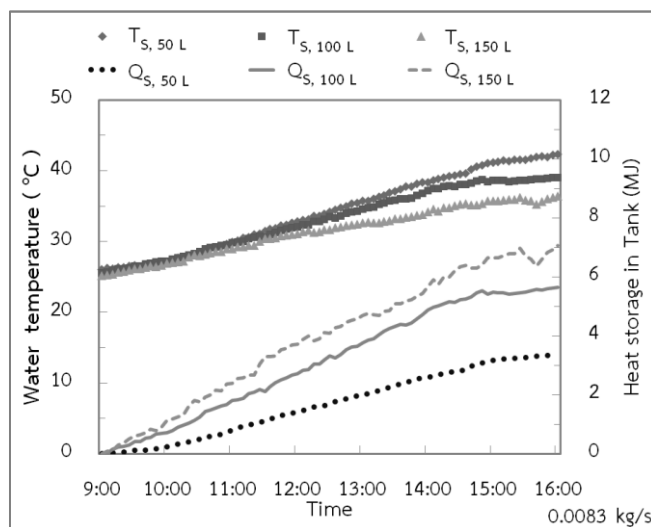
ในขณะที่การผลิตกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงตามผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น เมื่ออุณหภูมิด้านร้อนเพิ่มขึ้นตามรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นในช่วง

เข้าและลดลงตามรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาประมาณหลัง 12:00 น. ประกอบกับอุณหภูมิด้านเย็นที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนในถัง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกจึงลดลงตามไปด้วย โดยที่ปริมาณน้ำระบายความร้อนในถัง 100 L ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.37 mW ที่ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นสูงสุดที่ 14.80 °C รองลงมาที่ปริมาณน้ำระบายความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน 50 L และ 150 L ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดใกล้เคียงกัน 0.23 mW และ 0.28 mW ที่ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น 12.90 °C และ 13.40 °C ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก แต่ละปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

นอกเหนือจากกำลังไฟฟ้าสุทธิจากระบบ สิ่งที่น่าสนใจไปใช้ประโยชน์คือปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้จากน้ำระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น จากผลการทดลองนี้โดยใช้อัตราการไหล 0.0083 kg/s พบว่าปริมาณของน้ำในถังที่เพิ่มขึ้นจะผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิที่ลดลง ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมในถังเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณน้ำในถัง 50 L สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุด 42.29 °C (คิดเป็นความร้อนที่ผลิตได้ 3.40 MJ/Day) รองลงมาที่ปริมาณน้ำในถัง 100 L และ 150 L สามารถผลิตน้ำร้อนได้ 42.00 °C (คิดเป็นความร้อนที่ผลิตได้ 4.65 MJ/Day) และ 39.80 °C (คิดเป็นความร้อนที่ผลิตได้ 4.72 MJ/Day) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 อุณหภูมิน้ำและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนที่ปริมาณน้ำ 50 L 100 L และ 150 L

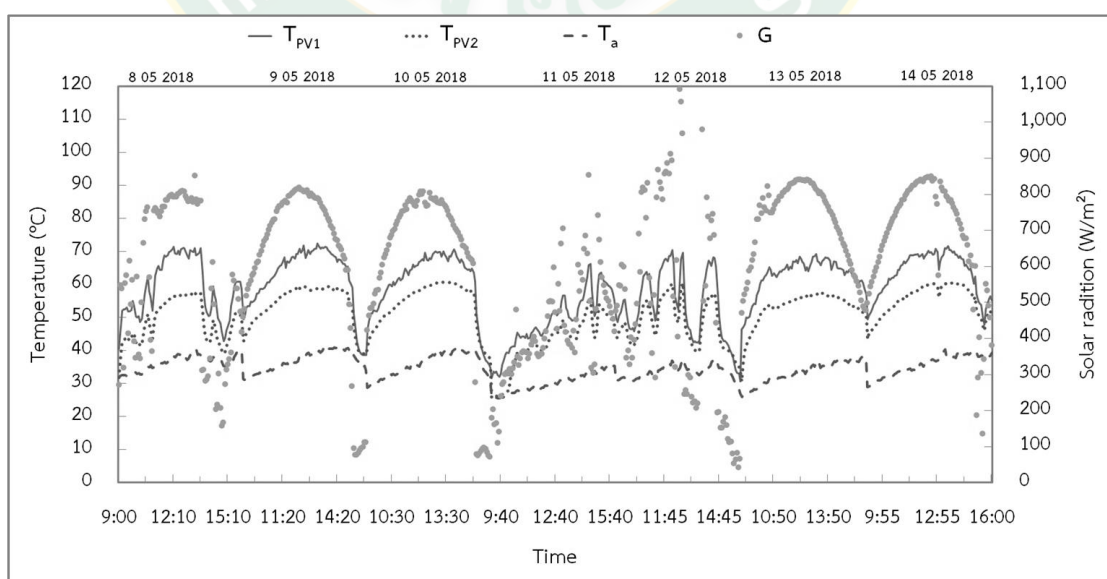
เมื่อพิจารณาพลังงานสุทธิในหนึ่งวันพบว่าทั้ง 3 ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนให้พลังงานสุทธิต่อวันที่มากกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน เนื่องจากระบบสามารถผลิตไฟฟ้ารวมถึงการสะสมความร้อนจากการระบายความร้อนให้แก่ถังเก็บน้ำร้อน โดยที่ปริมาณน้ำ 150 L มีประสิทธิภาพของระบบสูงสุด 77.88% รองลงมาที่ปริมาณน้ำ 100 L และ 50 L มีประสิทธิภาพของระบบ 64.08% และ 46.20% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าในหนึ่งวันเพียงอย่างเดียวประมาณ 11% - 12% ในการทดสอบทั้ง 3 ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิที่ปริมาณของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนต่างกัน

รายละเอียด	ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (L)					
	50		100		150	
	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2
E_{PV} (MJ/day)	1.16	1.19	1.27	1.30	1.13	1.16
E_{TEG} (MJ/day)	-	3.10×10^{-6}	-	5.31×10^{-6}	-	3.72×10^{-6}
W_{Pump} (MJ/day)	-	0.04	-	0.04	-	0.04
Q_s (MJ/day)	-	3.38	-	5.64	-	6.07
E_{Sun} (MJ/day)	9.81		10.76		9.22	
E_{Net} (MJ/day)	1.16	4.53	1.27	6.90	1.13	7.18
T_s (°C)	-	42.29	-	39.02	-	36.42
η_{sys} (%)	11.83	46.20	11.77	64.08	12.23	77.88

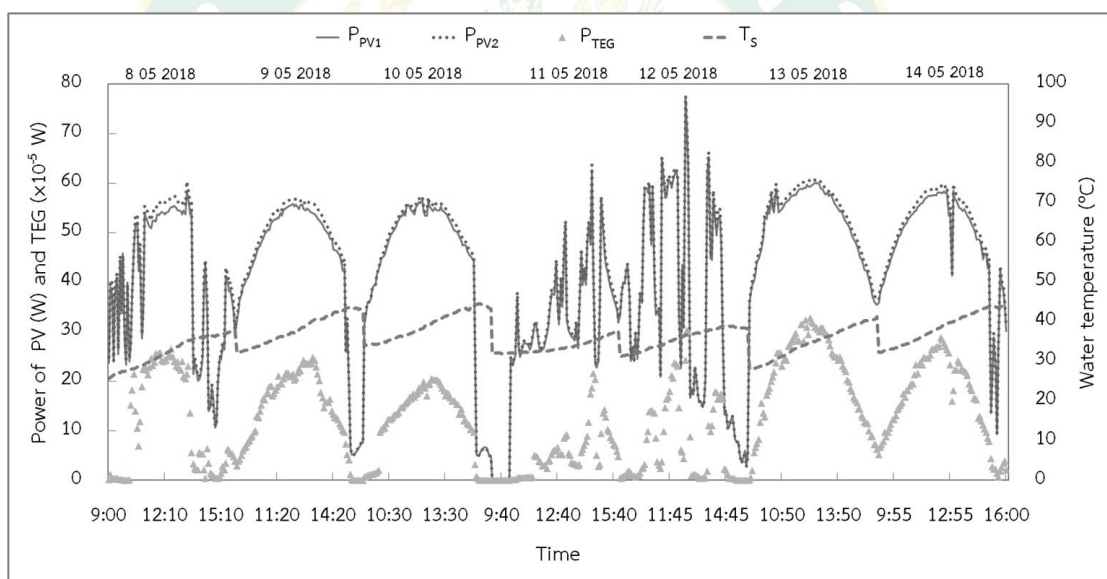
จากผลการทดสอบส่วนที่ 2 โดยใช้ปริมาณน้ำระบายความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน 50 L 100 L และ 150 L สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และส่งผลถึงกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่ปริมาณน้ำ 100 L มีความเหมาะสมกว่าปริมาณน้ำในถังที่ 50 L และ 150 L เนื่องจากผลในการทดสอบที่ปริมาณน้ำในถัง 50 L สามารถเก็บสะสมความร้อนในถังได้และมีประสิทธิภาพสุทธิของระบบต่ำที่สุด รวมถึงที่ปริมาณน้ำในถัง 150 L ถึงจะสามารถเก็บสะสมความร้อนในถังและมีประสิทธิภาพสุทธิของระบบได้สูงที่สุดแต่อุณหภูมิของน้ำต่ำกว่า $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อโดยตรงได้น้อยกว่าที่ปริมาณน้ำในถัง 100 L ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหล 0.0083 kg/s และปริมาณน้ำในถังที่ 100 L ศึกษาสำหรับผลกระทบต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์การทำงานต่อเนื่องตามสภาพแวดล้อมจริงได้ดังนี้

ผลการทดสอบการทำงานต่อเนื่องตามสภาพแวดล้อมจริงในช่วงเดือนเมษายนของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน พบว่าอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนต่ำกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อนทั้ง 7 วัน แต่ละวันช่วงเวลา 9:00 น. 16:00 น. มีค่ารังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง $400 - 1,000\text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม $25 - 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีพลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ในหนึ่งวันสะสม 11.29 MJ/Day 9.03 MJ/Day 8.82 MJ/Day 6.08 MJ/Day 7.08 MJ/Day 10.37 MJ/Day และ 9.80 MJ/Day ตามลำดับ จากผลการทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีในช่วงที่รังสีอาทิตย์มีค่าสูง เวลาประมาณ 10:00 น.- 14:00 น. โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ลดลงได้ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ระหว่าง $15 - 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่งผลถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และมีประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ผลการทำงานต่อเนื่องตามสภาพแวดล้อมจริงของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

การทดสอบทั้ง 7 วันในช่วงเวลา 10:00 น.- 14:00 น. ที่ระบบสามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์ได้ดี สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 55 W - 75 W มีประสิทธิภาพผลิตกำลังไฟฟ้าประมาณ ผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 0.35 W - 2.43 W มีประสิทธิภาพผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.1% - 0.5% เมื่อเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน และในการทดสอบทั้ง 7 วันกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้สูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 20×10^{-5} W - 32×10^{-5} W ที่ผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นประมาณ 12°C - 14°C จากการทดลองการทำงานต่อเนื่องเมื่อพิจารณาการผลิตน้ำร้อนจากอุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 25.5°C .ในวันที่ 1 พบว่าผลิตน้ำร้อนได้สูงกว่า 40°C ในวันที่ 2 วันที่ 3 วันที่ 6 และวันที่ 7 เนื่องจากได้รับรังสีอาทิตย์สม่ำเสมอ และในวันที่ 1 วันที่ 4 และวันที่ 5 ผลิตน้ำร้อนได้ต่ำกว่า 40°C เนื่องจากได้รับรังสีอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนช่วงเวลา 9:00 น. - 16:00 น. แสดงดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 อุณหภูมิของน้ำในถัง กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก

จากการทดสอบพบว่าวันที่ 1 .สามารถเก็บสะสมความร้อนโดยน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้ดีที่สุดมีประสิทธิภาพของระบบ 75.47% และในวันที่ 2 - วันที่ 7 เนื่องจากน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสูงกว่าวันที่ 1 ส่งผลให้เก็บความร้อนสะสมได้ต่ำลง แต่อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้สูงกว่าวันที่ 1 โดยมีประสิทธิภาพของระบบ 50 - 65 % เมื่อเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ระบายความร้อนมีประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 12 - 13 % โดยระบบสามารถทำงานได้ดีในวันที่ท้องฟ้าโปร่งเนื่องจากได้รับรังสีอาทิตย์สม่ำเสมอ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 11 และตารางที่ 12

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิต่ทดสอบต่อเนื่องในวันที่ 1 - 4

รายละเอียด	วันที่							
	1		2		3		4	
	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2
E_{PV} (MJ/day)	1.01	1.04	1.10	1.13	1.10	1.12	0.73	0.75
E_{TEG} (MJ/day)	-	2.85	-	3.48	-	2.88	-	1.21
		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$
W_{Pump} (MJ/day)	-	0.04	-	0.04	-	0.04	-	0.04
Q_S (MJ/day)	-	5.19	-	4.50	-	3.83	-	2.45
E_{Sun} (MJ/day)	8.21		9.03		8.82		6.08	
E_{Net} (MJ/day)	1.01	6.20	1.10	5.59	1.10	4.91	0.73	3.16
T_s (°C)	-	37.99	-	42.89	-	43.35	-	37.84
η_{sys} (%)	12.28	75.47	12.17	61.85	12.51	55.73	12.08	51.97

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบพลังงานสุทธิต่ทดสอบต่อเนื่องในวันที่ 5 - 7

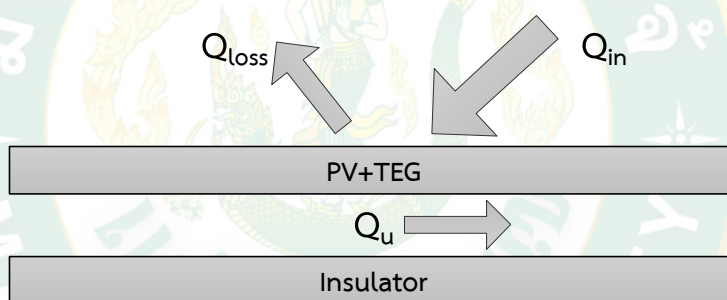
รายละเอียด	วันที่					
	5		6		7	
	PV1	PV2	PV1	PV2	PV1	PV2
E_{PV} (MJ/day)	0.90	0.91	1.32	1.34	1.22	1.25
E_{TEG} (MJ/day)	-	1.79	-	5.23	-	4.12
		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-6}$
W_{Pump} (MJ/day)	-	0.04	-	0.04	-	0.04
Q_S (MJ/day)	-	2.99	-	5.53	-	5.02
E_{Sun} (MJ/day)	7.08		10.37		9.80	
E_{Net} (MJ/day)	0.90	3.86	1.32	6.83	1.22	6.23
T_s (°C)	-	38.34	-	41.25	-	44.23
η_{sys} (%)	12.70	54.62	12.70	65.88	12.42	63.55

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี

จากผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนและปริมาณของน้ำระบายความร้อนในถังที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s ปริมาณของน้ำระบายความร้อนในถัง 100 L เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปี เนื่องจากประสิทธิภาพกำลังผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของน้ำที่เก็บสะสมความร้อนในถังที่ใกล้เคียงและสูงกว่า 40 °C สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง โดยการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

1. ความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

สำหรับการจำลองแบบความร้อนสะสมอธิบายได้ด้วยลักษณะการทำงานของส่วนผลิตความร้อนคล้ายกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยพิจารณาสมดุลพลังงานแสดงดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 สมดุลพลังงานของส่วนผลิตไฟฟ้าและความร้อน

จากภาพที่ 49 เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานโดยมีสมการที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้ (Hashim et al., 2016) และ (Hernández and Quiñonez, 2018)

$$Q_{in} = Q_u - Q_{Loss}$$

สมการที่ 29

เมื่อ Q_u คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่นำใช้ประโยชน์ (W)

Q_{Loss} คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของส่วนผลิตไฟฟ้าและความร้อน (W)

โดยที่ $Q_u = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$

สมการที่ 30

$$Q_u = [F_R(\tau_g \alpha_c)G - F_R U_L (T_i - T_a)] A_{PV}$$

สมการที่ 31

และ
$$\eta_{PVT} = \frac{Q_u}{A_{PV}G}$$

สมการที่ 32

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

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg·°C)

T_o คือ อุณหภูมิน้ำออกส่วนระบายความร้อน (°C)

T_i คือ อุณหภูมิน้ำเข้าส่วนระบายความร้อน (°C)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (W/m²·°C)

G คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m²)

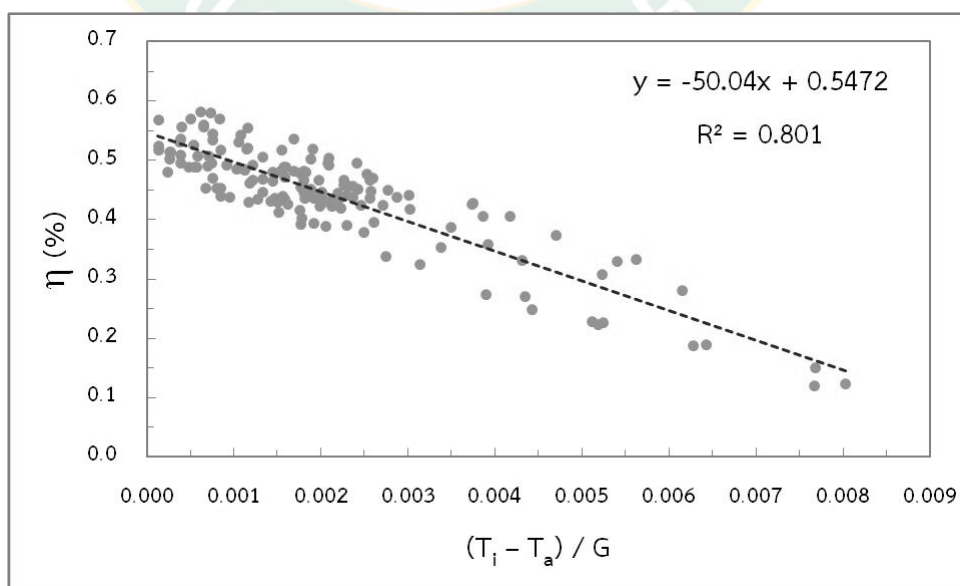
A_{PV} คือ พื้นที่ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

τ_g คือ สัมประสิทธิ์การส่องผ่านของกระจก (Hashim et al., 2016)

α_c คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ (Zhou et al., 2018)

F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat removal factor)

สมรรถนะของส่วนผลิตความร้อนสามารถพิจารณาจากผลการทดสอบโดยใช้สมการที่ 32 และสมการที่ 33 สำหรับระบุถึงค่าคุณสมบัติเฉพาะเมื่อ $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ มีค่าเท่ากับค่าที่ตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ จึงมีค่าเท่า 0.5472 และ F_{RU_L} มีค่าเท่ากับค่าคงตัวที่แสดงความชันหรือเกรเดียนต์ของเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 50.04 W/m²·°C แสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 สมรรถนะทางความร้อนของระบบ

สำหรับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean absolute error, MAE) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, MAPE) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 34 สมการที่ 35 และสมการที่ 36 (Premalatha and Valan Arasu, 2016)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - Y_i| \quad \text{สมการที่ 33}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N |(X_i - Y_i) / X_i|}{N} \times 100 \quad \text{สมการที่ 34}$$

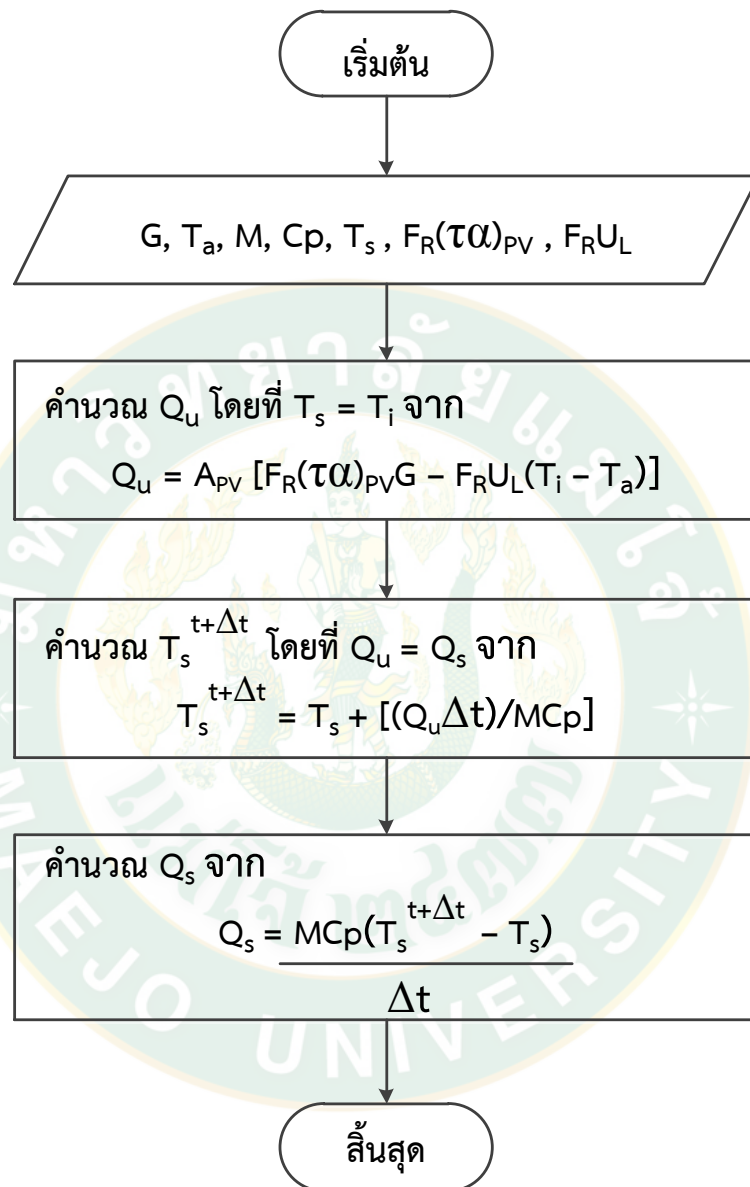
และ $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}$ สมการที่ 35

เมื่อ X_i คือ ผลที่ได้จากการทดลอง
 Y_i คือ ผลที่ได้จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์
 N คือ จำนวนผลข้อมูล

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์กับผลจากการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) บ่งบอกถึงการกระจายตัวของข้อมูลและความถูกต้องแม่นยำระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการจำลอง

สำหรับความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนสามารถทำนายได้โดยกำหนดเงื่อนไขโดยอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองมีขั้นตอนการคำนวณตามขั้นตอนการทำนายอุณหภูมิน้ำและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนแสดงดังภาพที่ 51 เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในวันที่ 13 มีนาคม 2561 โดยกำหนดเงื่อนไขอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองได้แก่ รังสีอาทิตย์ (G) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 25.55 °C ค่าคุณสมบัติเฉพาะ

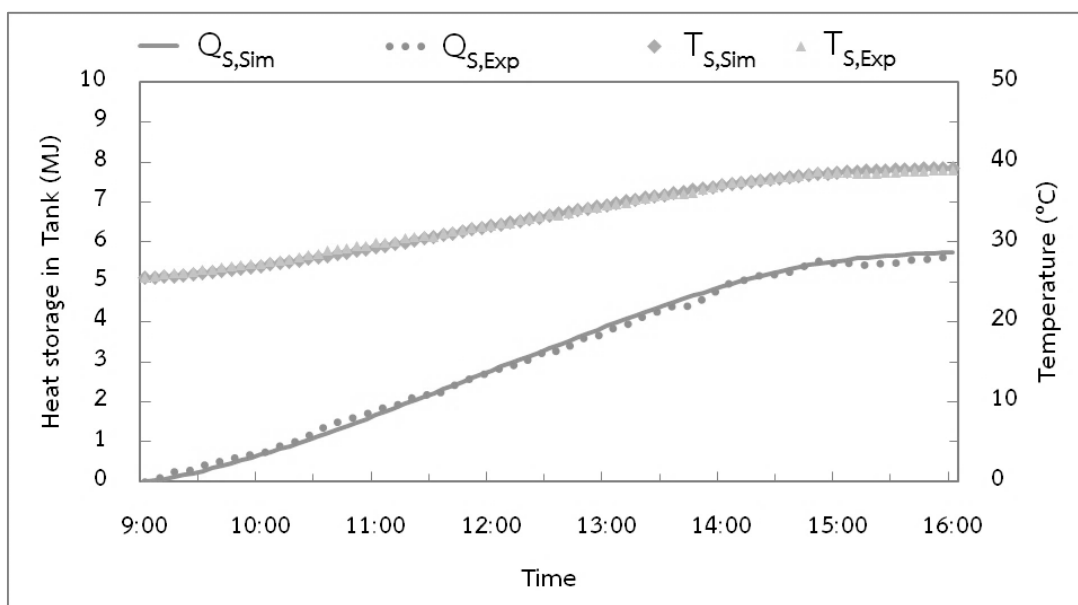
$F_R(\tau\alpha)_{PV}$ เท่ากับ 0.5472 และ F_{RU_L} เท่ากับ $50.04 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L ได้ผลการเปรียบเทียบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันแสดงดังภาพที่ 52



ภาพที่ 51 ขั้นตอนการทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน

เมื่อทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนตามขั้นตอนในภาพที่ 51 เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองและแบบจำลอง พบว่าอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน ($T_{S,Exp}$) และความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน ($Q_{S,Exp}$) จากการทดลอง อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน ($T_{S,Sim}$) และความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน ($Q_{S,Sim}$) จากการจำลอง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ของอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนประมาณและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนเท่ากับ 0.23 และ

0.10 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ของอุณหภูมิน้ำในถังและความร้อนสะสมในถัง 0.69% และ 6.75% ตามลำดับ และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของอุณหภูมิน้ำในถัง 0.26 และ 0.11 ตามลำดับ โดยผลเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างการทดลองและแบบจำลอง

จากการพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) และ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการทำนายตามขั้นตอนดังภาพที่ 51 มีความเหมาะสมและสามารถใช้สำหรับการจำลองในส่วนการจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนในส่วนต่อไป

2. การผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสถิติสำหรับศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามโดยมีรูปแบบสมการทั่วไปแสดงดังสมการที่ 36

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

สมการที่ 36

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม

X คือ อิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม

a และ b คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับตัวแปรอิสระ

ในงานวิจัยนี้อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะใช้สมการที่ 36 สำหรับทำนายอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจากการจำลองแสงอาทิตย์แสดงดังสมการที่ 37

$$T_{PV} = a_1 + b_1G + b_2T_a + b_3T_s \quad \text{สมการที่ 37}$$

เมื่อ G คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2)

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

T_s คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ($^{\circ}C$)

ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนในงานวิจัยนี้ได้แก่

$$a_1 = 4.0478 \quad b_1 = 0.0228 \quad b_2 = 0.563 \quad b_3 = 0.3206$$

การจำลองกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงความสัมพันธ์ของรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ 38

$$P_{PV} = a + bG + cG^2 + dT_{PV} + eGT_{PV} + fG^2T_{PV} \quad \text{สมการที่ 38}$$

เมื่อ G คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2)

T_{PV} คือ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($^{\circ}C$)

โดยที่ $a = 79.1962$ $b = -0.1942$

$c = 2.0411 \times 10^{-4}$ $d = -1.552$

$e = 5.4485 \times 10^{-3}$ $f = -4.3312 \times 10^{-6}$

การจำลองกำลังผลิตไฟฟ้าที่ได้จากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนด้านร้อนที่ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับ และค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กับอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ดังสมการที่ 39

$$P_{TEG} = a + bQ_{TEG} + cQ_{TEG}^2 + dT_{m,TEG} + eQ_{TEG} T_{m,TEG} + fQ_{TEG}^2 T_{m,TEG} \quad \text{สมการที่ 39}$$

เมื่อ Q_{TEG} คือ การถ่ายเทความร้อนด้านร้อนที่ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับ (W)

$T_{m,TEG}$ คือ ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กับอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

โดยที่

$a = -0.4804$	$b = 0.0584$
$c = -0.0025$	$d = 0.0048$
$e = -0.0006$	$f = 4.4356 \times 10^{-5}$

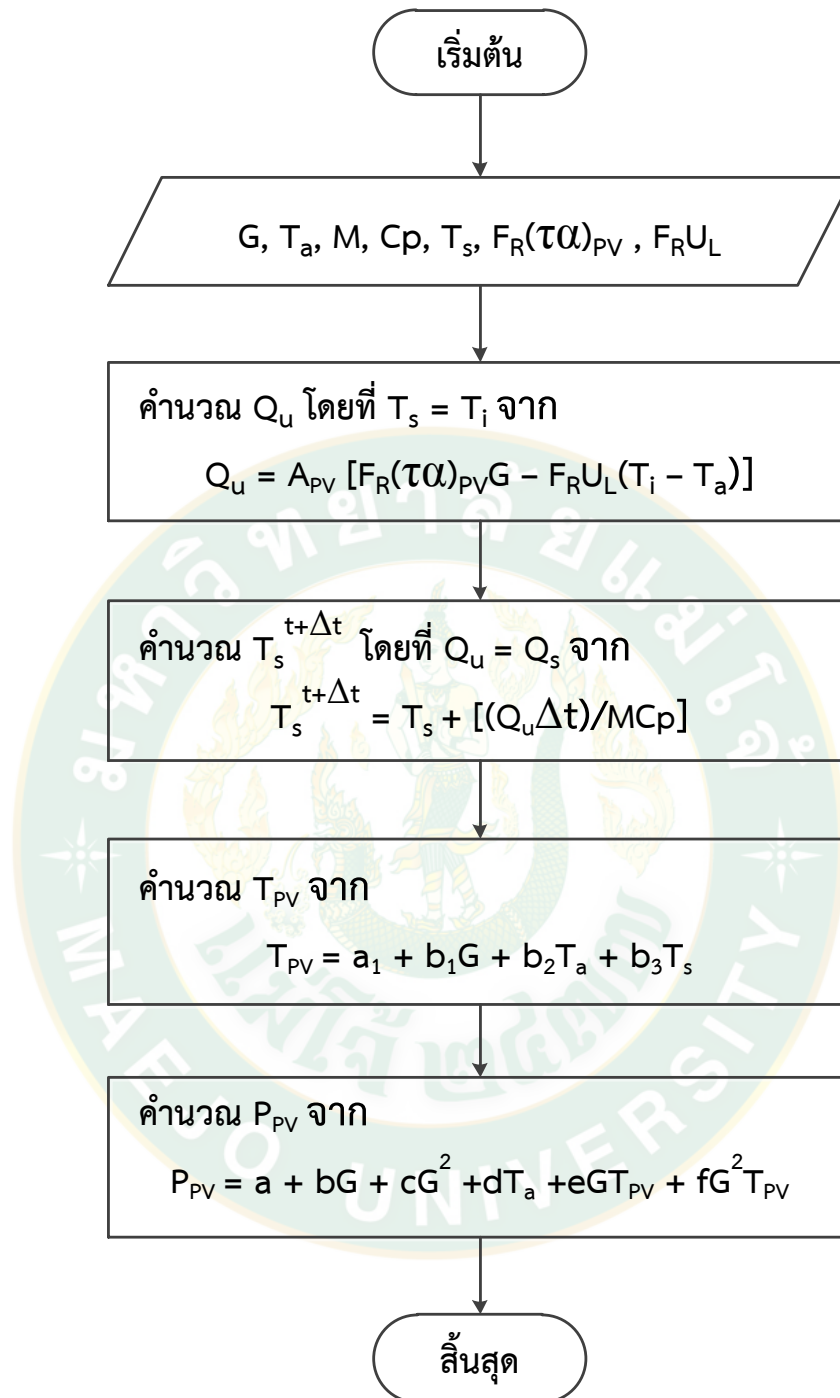
ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กับอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 40

$$T_{m,TEG} = \frac{(T_{PV} + T_S)}{2} \quad \text{สมการที่ 40}$$

เมื่อ T_{PV} คือ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

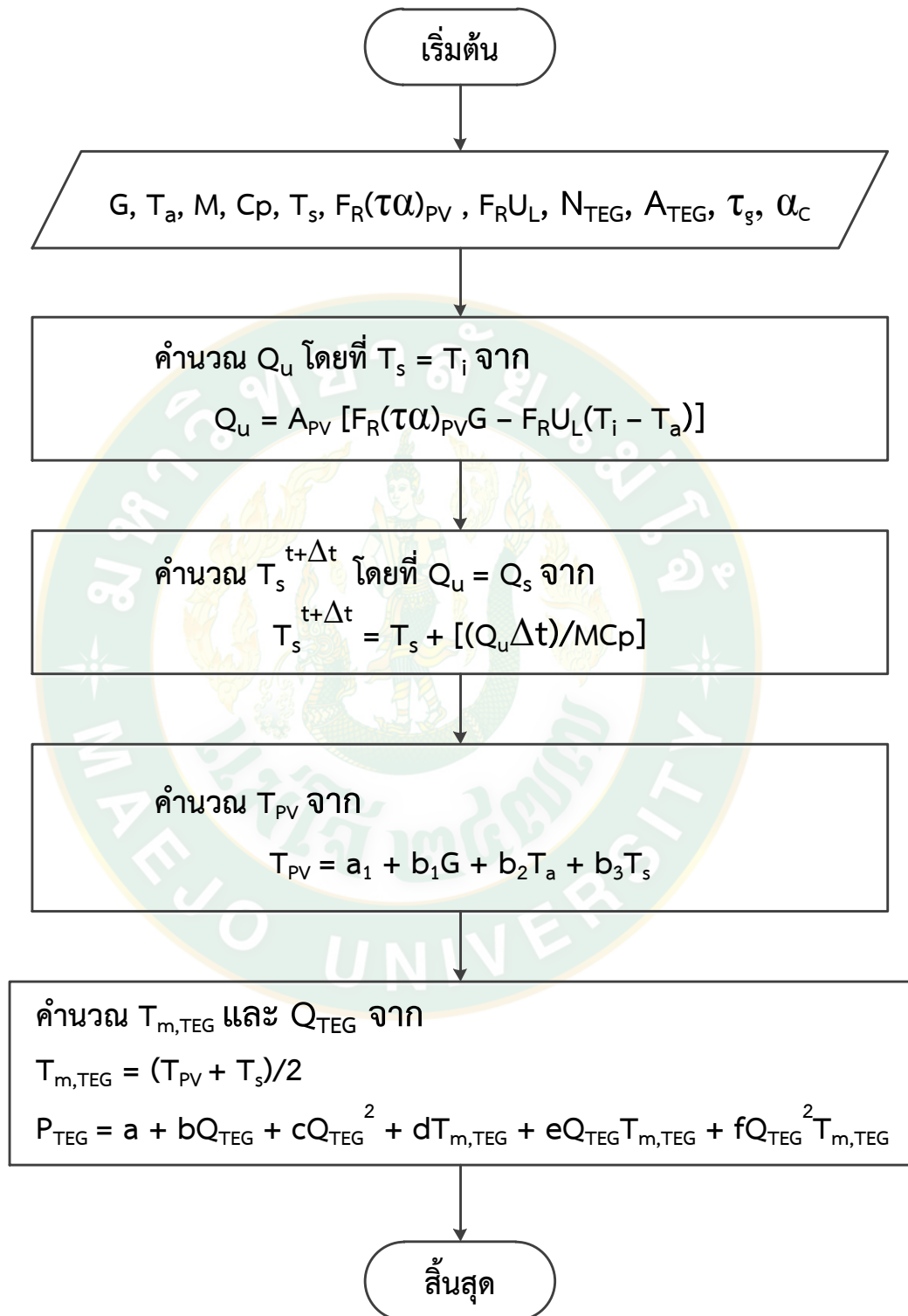
T_S คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

สำหรับการจำลองการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองในวันที่ 13 มีนาคม 2561 โดยกำหนดเงื่อนไขอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองได้แก่ รังสีอาทิตย์ (G) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) และอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 25.55°C ค่าคุณสมบัติเฉพาะ $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ เท่ากับ 0.5472 และ F_{RU_L} เท่ากับ $50.04 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L มีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 53 และภาพที่



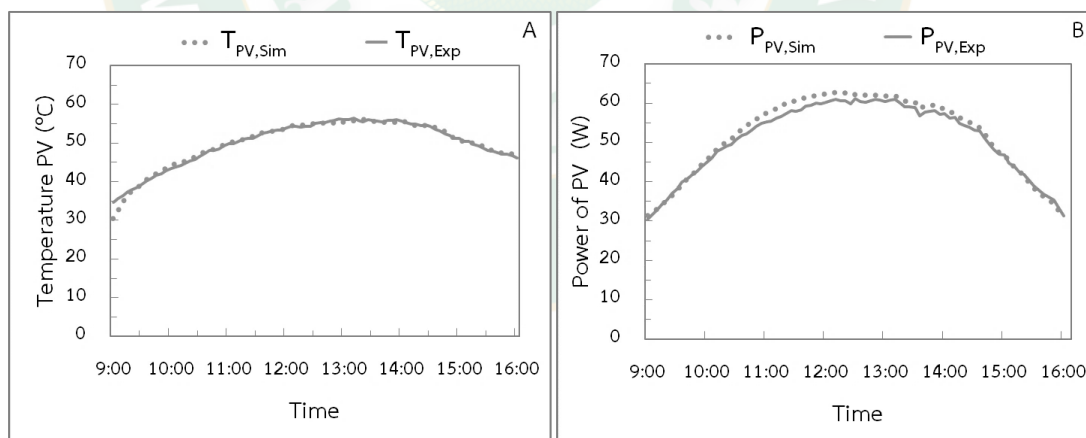
ภาพที่ 53 ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

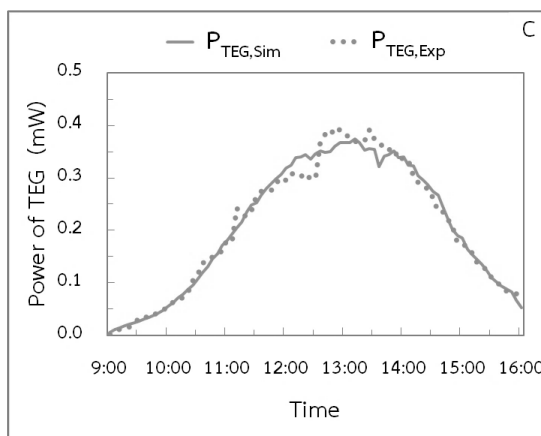
และขั้นตอนการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยชุดเทอร์โมอิเล็กทริกแสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

จากขั้นตอนดังภาพที่ 53 และภาพที่ 54 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในวันที่ 13 มีนาคม 2561 โดยกำหนดเงื่อนไขอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองได้แก่ รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ $25.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าคุณสมบัติเฉพาะ $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ เท่ากับ 0.5472 และ F_{RU_L} เท่ากับ $50.04\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L ผลเปรียบเทียบการจำลองกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกกับการทดลองในวันที่ 13 มีนาคม พบว่าอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($T_{PV,Sim}$) กำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($P_{PV,Sim}$) และชุดเทอร์โมอิเล็กทริก ($P_{TEG,Sim}$) จากการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($T_{PV,Exp}$) กำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($P_{PV,Exp}$) และกำลังไฟฟ้าผลิตจากชุดเทอร์โมอิเล็กทริก ($P_{TEG,Exp}$) จากการทดลอง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และชุดเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 0.44 1.24 และ 0.02 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ของอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าจากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 0.98% 2.31% และ 6.14% ตามลำดับ และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าจากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 0.73 1.44 และ 0.02 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 55





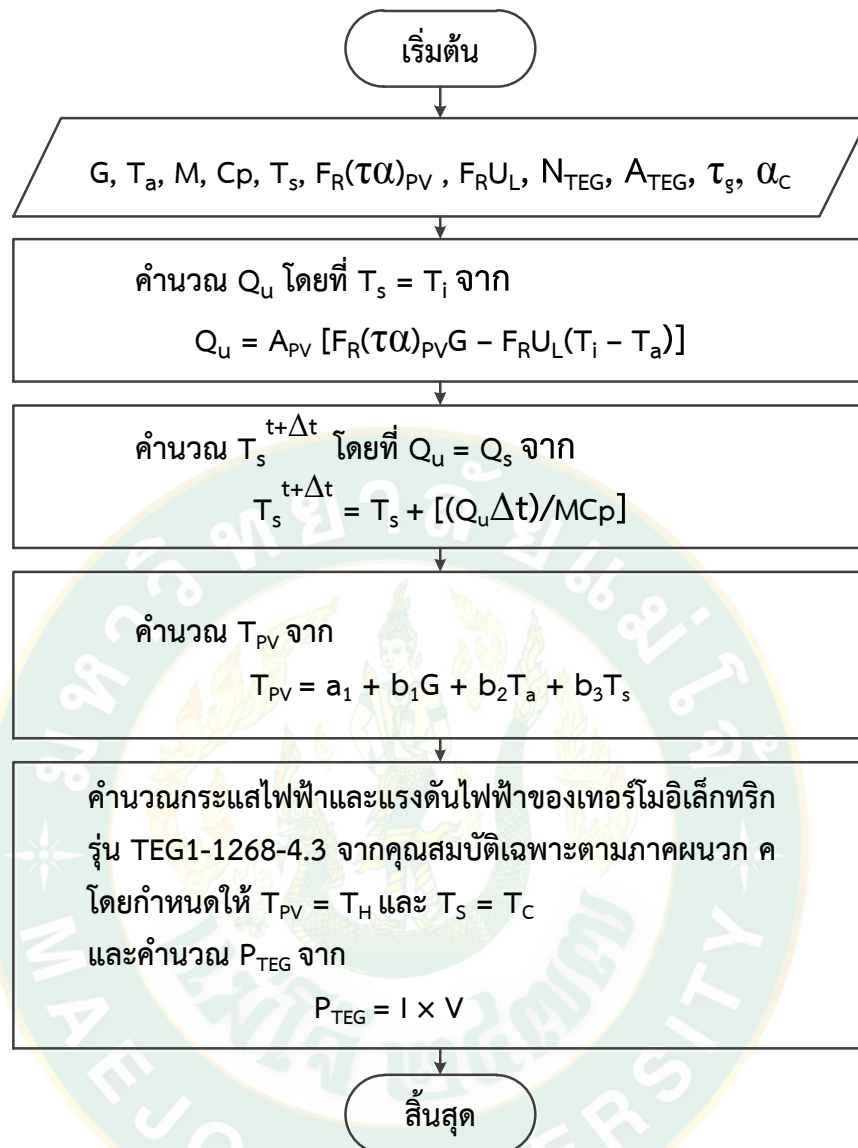
ภาพที่ 55 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการทดลองของอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (B) และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (C)

การนำเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่นใหม่พิจารณาโดยเลือกวัสดุที่ผลิตจาก Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) ที่ใกล้เคียงกับเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น TEC1-12706 ในงานวิจัยนี้สำหรับเปรียบเทียบ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น TEG1-1268-4.3 ตามภาคผนวก ค ผลิตจากวัสดุ ใกล้เคียงกันและมีคุณสมบัติเฉพาะแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 คุณสมบัติเฉพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น TEG1-1268-4.3 ตามภาคผนวก ค

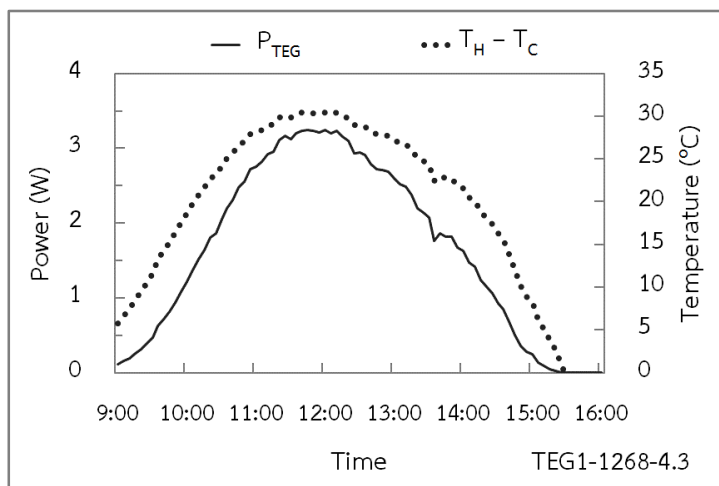
รายละเอียด		หน่วย
อุณหภูมิด้านร้อน	300	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิด้านเย็น	30	$^{\circ}\text{C}$
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	10.7	V
โหลดความต้านทาน	5.4	Ω
แรงดันไฟฟ้า	5.3	V
กระแสไฟฟ้า	1.0	A
กำลังไฟฟ้า	5.2	W

สามารถคำนวณกำลังผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นของเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น TEG1-1268-4.3 จำนวน 28 โมดูลเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้สำหรับกักเก็บความร้อนจากด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดย กำหนดเงื่อนไขอ้างอิงข้อมูลทดลองในวันที่ 13 มีนาคม 2561 ได้แก่ รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ แวดล้อม และอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 25.55°C ค่าคุณสมบัติเฉพาะ $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ เท่ากับ 0.5472 และ F_{RUL} เท่ากับ $50.04 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L แสดงดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 ขั้นตอนการทำนายกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3

กำลังผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นของเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3 จากคุณสมบัติเฉพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกตามภาคผนวก ค โดยอ้างอิงข้อมูลทดลองในวันที่ 13 มีนาคม 2561 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3 รวมทั้ง 28 โมดูลมีค่าสูงสุด 3.24 W ในเวลาประมาณ 12:00 น. เนื่องจากอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และรังสีอาทิตย์มีค่าที่สูง ได้ผลแสดงดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEG1-1268-4.3

แบบจำลองสำหรับทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก และปริมาณความร้อนสะสมของน้ำในถังน้ำร้อนข้างต้น สามารถใช้ทำนายตลอดทั้งปีได้โดยกำหนดรายละเอียดและกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องเริ่มต้นสำหรับการทำนายกำลังไฟฟ้าสุทธิและความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนดังต่อไปนี้

1. ช่วงเวลาทำงานระหว่างเวลา 8:00 น. - 16:00 น.
2. อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเริ่มต้นที่ 25 °C
3. ค่า $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ เท่ากับ 0.5472
4. ค่า $F_R U_L$ เท่ากับ 50.04 W/m²·°C
5. อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 0.0083 kg/s
6. ใช้ปริมาณของน้ำระบายความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน 100 L
7. สัมประสิทธิ์การส่องผ่านของกระจก (τ_g) 0.95 (Hashim et al., 2016)
8. สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ (α_c) 0.95 (Zhou et al., 2018)
9. ค่าความจุความร้อนของน้ำ 4,187 J/kg·°C

10. การประมาณค่าอุณหภูมิอากาศที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยใช้ค่าอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดในหนึ่งวันโดยสมการที่ 41 (นิรันดร์ หันไชยงวา, 2546) โดยใช้ข้อมูลสถิติภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ. 2524 - 2553 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561) จากอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด ในแต่ละเดือน บริเวณจังหวัดเชียงใหม่มีค่าประมาณดังตารางที่ 14 คำนวณได้จากสมการที่ 41

$$T_a(t) = \frac{1}{2} \left[(T_{Max} + T_{Min}) + (T_{Max} - T_{Min}) \sin\left(\frac{2\pi}{24}\right)(t - 8) \right]$$

สมการที่ 41

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

T_{Max} คือ อุณหภูมิสูงสุดในหนึ่งวัน ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Min} คือ อุณหภูมิต่ำสุดในหนึ่งวัน ($^{\circ}\text{C}$)

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

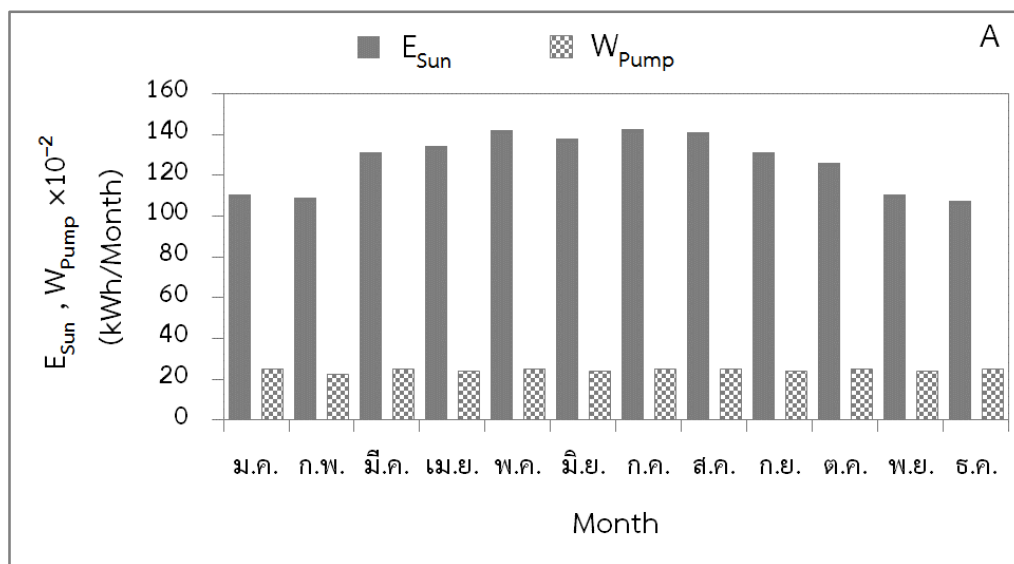
เดือน	อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)		
	ค่าเฉลี่ยสูงสุด	ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
มกราคม	29.8	14.9	21.5
กุมภาพันธ์	32.7	16.2	23.9
มีนาคม	35.2	19.5	27.1
เมษายน	36.5	22.9	29.3
พฤษภาคม	34.2	23.8	28.2
มิถุนายน	32.7	24.0	27.6
กรกฎาคม	31.8	23.9	27.2
สิงหาคม	31.5	23.7	26.8
กันยายน	31.7	23.2	26.7
ตุลาคม	31.4	22.2	26.1
พฤศจิกายน	30.1	19.2	24
ธันวาคม	28.6	15.7	21.4

11. สำหรับการใช้งานในรอบปีโดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้จากสมการที่ 1 อ้างอิงตำแหน่งทดสอบมีพิกัดทางภูมิศาสตร์ $18^{\circ}55'30.71''\text{N}$, $99^{\circ}01'28.81''\text{W}$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 341 m และกำหนดค่า n ในแต่ละเดือนอ้างอิงโดยใช้ปี พ.ศ. 2561 แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่า n ของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2561

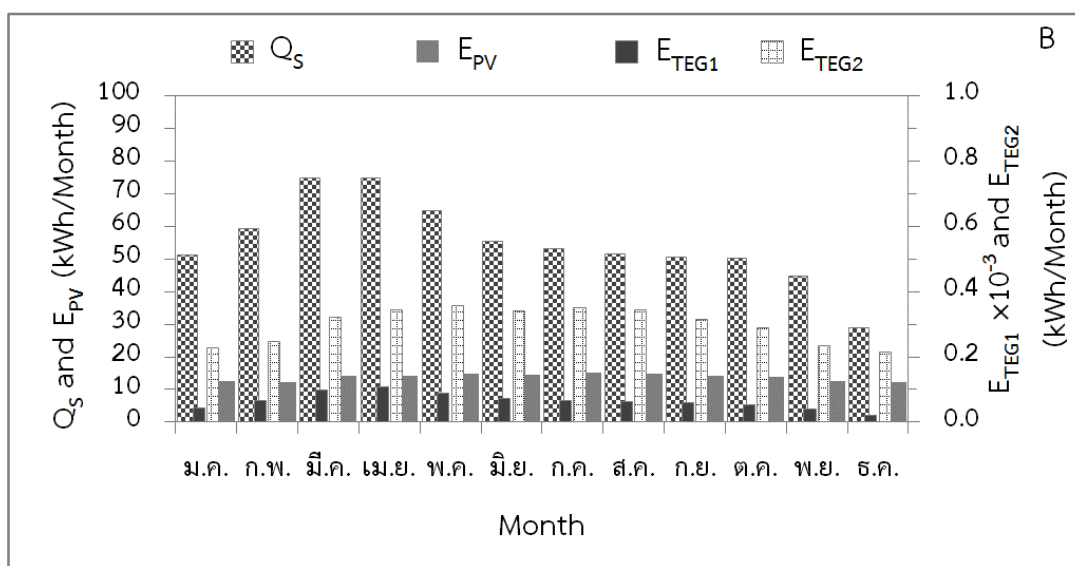
	เดือน											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
n	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347

จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่อทำนายพลังงานสุทธิต่อเดือนตลอดทั้งปีพบว่า พลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ระบบได้รับอยู่ระหว่าง 99 - 130 kWh/Month และการใช้พลังงานของปั้มน้ำหมุนเวียนใกล้เคียงกันในแต่ละเดือนอยู่ระหว่าง 0.30 - 0.33 kWh/Month แสดงดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 พลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ได้รับ และการใช้พลังงานของปั้มน้ำหมุนเวียน

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกกรุ่น TEC1-12706 (TEG1) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกกรุ่น TEG1-1268-4.3 (TEG2) และปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน พบว่า พลังงานสุทธิต่อเดือนจากการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 13 - 17 kWh/Month และพลังงานสุทธิต่อเดือนจากการผลิตกำลังไฟฟ้ากรณีที่ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก TEG1 อยู่ระหว่าง $0.02 - 0.12$ ($\times 10^{-3}$) kWh/Month และกรณีที่ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก TEG2 อยู่ระหว่าง 0.2 - 0.4 kWh/Month เมื่อพิจารณารวมในหนึ่งปีพลังงานสุทธิของส่วนผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยลบการใช้พลังงานของปั้มน้ำออกกรณีที่ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก TEG1 มีค่าประมาณ 162.45 kWh/Year และกรณีที่ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก TEG2 มีค่าประมาณ 165.26 kWh/Year ในส่วนของความร้อนสะสมโดยน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนประมาณ 28 - 75 kWh/Month เมื่อรวมความร้อนที่ได้จากน้ำในถังเก็บน้ำร้อนในหนึ่งปีประมาณ 658.85 kWh/Year คิดเป็นพลังงานสุทธิในหนึ่งปีที่ได้จากระบบกรณีที่ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก TEG1 ประมาณ 821.30 kWh/Year และกรณีที่ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก TEG2 ประมาณ 824.11 kWh/Year จากการศึกษาพบว่าพลังงานสุทธิที่ผลิตได้สูงสุดในเดือนเมษายน เนื่องจากระบบได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่สูงกว่าเดือนอื่นๆ ซึ่งตรงกับช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย และในเดือนธันวาคมพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ต่ำสุดประมาณ เนื่องจากได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ต่ำกว่าเดือนอื่นๆ แสดงดังภาพที่ 59



ภาพที่ 59 พลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนในรอบปี

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ระยะเวลาคืนทุนเบื้องต้นได้จากเงินลงทุนของระบบ จากรายได้ส่วนพลังงานไฟฟ้าสุทธิและความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้เทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยฮีทเตอร์ไฟฟ้า และส่วนของเงินได้สุทธิจากรายได้จากส่วนผลิตไฟฟ้าสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนดังตารางที่ 16 และเงินที่ประหยัดได้จากปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนเทียบเท่าการใช้พลังงานโดยฮีทเตอร์ไฟฟ้ามีรายละเอียดดังตารางที่ 17 (เมื่อกำหนดให้ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4 Baht/kWh)

ตารางที่ 16 เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ

รายละเอียด	จำนวนเงิน(Baht)
เงินลงทุน	
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 80 W	2,600.00
เทอร์โมอิเล็กทริก TEC1-12706 จำนวน 28 โมดูล	3,750.00
ชุดระบายความร้อนและกักเก็บน้ำร้อน	8,600.00
ปั้มน้ำหมุนเวียน	550.00
เทอร์โมอิเล็กทริก TEG1-1268-4.3 จำนวน 28 โมดูล (27.00 USD/โมดูล และ 1 USD เท่ากับ 32.93 THB)	24,895.08
เงินลงทุนสุทธิกรณี TEC1-12706	15,500.00
เงินลงทุนสุทธิกรณี TEG1-1268-4.3	36,645.08

ตารางที่ 17 เงินได้สุทธิของโครงการ

รายละเอียด	จำนวนเงิน (Baht/Year)
เงินได้	
รายได้จากส่วนผลิตไฟฟ้าสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน กรณีที่ใช้ TEC1-12706 (162.45 kWh/Year)	649.81
รายได้จากส่วนผลิตไฟฟ้าสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน กรณีที่ใช้ TEG1-1268-4.3 (165.26 kWh/Year)	661.04
รายได้จากปริมาณความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อนเทียบเท่าการใช้พลังงานโดย ฮีทเตอร์ไฟฟ้า (658.85 kWh/Year)	2,635.40
เงินได้สุทธิกรณี TEC1-12706	3,285.21
เงินได้สุทธิกรณี TEG1-1268-4.3	3,296.44

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนโดยใช้สมการที่ 29 จากรายละเอียดข้างต้นกรณีที่ใช้ TEC1-12706 มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4.72 ปี และกรณี TEG1-1268-4.3 มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11.12 ปี สามารถคำนวณได้ดังนี้

กรณีที่ใช้ TEC1-12706

$$\begin{aligned}
 \text{ระยะเวลาคืนทุน (Year)} &= \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ (Bath)}}{\text{เงินกำไรสุทธิ (Bath/Year)}} \\
 &= \frac{15,500}{3,285.21} \\
 &= 4.72 \text{ year}
 \end{aligned}$$

กรณี TEG1-1268-4.3

$$\begin{aligned}
 \text{ระยะเวลาคืนทุน (Year)} &= \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ (Bath)}}{\text{เงินกำไรสุทธิ (Bath/Year)}} \\
 &= \frac{36,645.08}{3,296.44} \\
 &= 11.12 \text{ year}
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เบื้องต้น

การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เบื้องต้นได้จากพลังงานสุทธิที่ได้ในหนึ่งปี พิจารณาเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่ต้องผลิตและจำหน่ายเข้าระบบสายส่งของประเทศไทยที่ลดลงได้จากพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำหล่อเย็น กรณีที่ใช้ TEC1-12706 ประมาณ 821.30 kWh/Year และกรณีที่ใช้ TEG1-1268-4.3 ประมาณ 824.11 kWh/Year เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า 0.5996 kg CO₂eq/kWh สำหรับการลดก๊าซเรือนกระจกทั่วไปจากการดำเนินกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าระบบสายส่งของประเทศไทย (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน, 2554) โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 29 กรณีที่ใช้ TEC1-12706 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 504.80 kg CO₂eq/Year และกรณีที่ใช้ TEG1-1268-4.3 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 494.14 kg CO₂eq ได้ดังนี้

กรณีที่ใช้ TEC1-12706

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณก๊าซเรือน} && 821.30 && 0.5996 \\ &\text{กระจกจากกิจกรรมใดๆ} &= & \text{kWh/Year} & \times & \text{kg CO}_2\text{eq/kWh} \\ &(\text{kg CO}_2\text{eq}) && && \\ &&= & 492.45 && \text{kg CO}_2\text{eq/Year} \end{aligned}$$

กรณีที่ใช้ TEG1-1268-4.3

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณก๊าซเรือน} && 824.11 && 0.5996 \\ &\text{กระจกจากกิจกรรมใดๆ} &= & \text{kWh/Year} & \times & \text{kg CO}_2\text{eq/kWh} \\ &(\text{kg CO}_2\text{eq}) && && \\ &&= & 494.14 && \text{kg CO}_2\text{eq/Year} \end{aligned}$$

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำหล่อเย็นโดยใช้อัตราการไหลเชิงมวล 0.0083 kg/s ที่ปริมาณของน้ำระบายความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน 100 L สามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด $14.38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 60.29 W มีประสิทธิภาพกำลังผลิตไฟฟ้า 11.50% ส่งผลให้ผลิตกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1.82 W มีประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 3.11% เมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการระบายความร้อน ในส่วนของกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นที่ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 100 L ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.39 mW มีผลต่างอุณหภูมิต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นสูงสุด $14.80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีประสิทธิภาพรวมของระบบ 64.08% มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเนื่องจาก อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ได้จากระบบสามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงที่อุณหภูมิประมาณ $39 \text{ }^{\circ}\text{C} - 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และงานวิจัยนี้สามารถทำนายการผลิตพลังงานสุทธิในหนึ่งปีเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่ลดลงได้จากการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนในงานวิจัยนี้ 841.90 kWh/Year สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ $504.80 \text{ kg CO}_2\text{eq/Year}$ และระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนนี้มีระยะเวลาทุนประมาณ 4.6 ปี โดยสามารถทำนายส่วนผลิตความร้อนของน้ำร้อนสะสมของระบบตลอดทั้งปีจากค่าคุณสมบัติเฉพาะของระบบ $F_R(\tau\alpha)_{PV}$ เท่ากับ 0.5472 และ F_{R,U_L} เท่ากับ $50.04 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าของระบบตลอดทั้งปีได้จากการจำลองกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการ

$$P_{PV} = 79.1962 - 0.1942G + (2.0411 \times 10^{-4})G^2 - 1.552T_{PV} + (5.4485 \times 10^{-3})GT_{PV} - (4.3312 \times 10^{-6})G^2T_{PV}$$

และการจำลองกำลังผลิตไฟฟ้าที่ได้จากชุดเทอร์โมอิเล็กทริกดังสมการ

$$P_{TEG} = - 0.4804 + 0.0584Q_{TEG} - 0.0025Q_{TEG}^2 + 0.0048T_{m,TEG} - 0.0006Q_{TEG} T_{m,TEG} + (4.4356 \times 10^{-5})Q_{TEG}^2 T_{m,TEG}$$

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมการนำเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดอื่นสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง เนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจากเริ่มต้นการระบายความร้อน

2. ศึกษาเพิ่มเติมระบบควบคุมการปรับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำระบายความร้อนแบบอัตโนมัติตามอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจากเริ่มต้นการระบายความร้อน



บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579. กระทรวงพลังงาน. น. 1 - 5.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2560. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม - ธันวาคม 2560. กระทรวงพลังงาน. น. 1 - 5
- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2561. สถิติภูมิอากาศคาบ 30 ปี พ.ศ. 2524-25530 [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://climate.tmd.go.th/statistic/stat30y>. (15 กันยายน 2561)
- นิรันดร์ หันไชยงวา. 2546. การศึกษาความเป็นไปได้และความสิ้นเปลืองพลังงานในการทำควมเย็นแบบระเหยในโรงเรือนเพาะเห็ดหอม. วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน. 2554. รายงานสรุปผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ประจำปี 2553. น. 1 - 15.
- Alzaharani, A., Kimball, J. W. and Dagli, C. 2014. Predicting Solar Irradiance Using Time Series Neural Networks. **Procedia Computer Science**, Vol. 36. p 623 - 628.
- ASHRAE Standard 93-2003. 2003. **Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors**. Atlanta, GA, USA.
- Babu, C. and Ponnambalam, P. 2017. The role of thermoelectric generators in the hybrid PV/T systems: A review. **Energy Conversion and Management**, Vol. 151. p 368 - 385.
- Bertrand, A., Aggoune, R. and Maréchal, F. 2017. In-building waste water heat recovery: An urban-scale method for the characterisation of water streams and the assessment of energy savings and costs. **Applied Energy**, Vol. 192. p 110 - 125.
- Cadafalch, J., Carbonell, D., Consul, R. and Ruiz, R. 2015. Modelling of storage tanks with immersed heat exchangers. **Solar Energy**, Vol. 112. p 154 - 162.
- Chávez-Urbiola, E. A., Vorobiev, Y. V. and Bulat, L. P. 2012. Solar hybrid systems with thermoelectric generators. **Solar Energy**, Vol. 86(1). p 369 - 378.

- Fébba, D. M., Rubinger, R. M., Oliveira, A. F. and Bortoni, E. C. 2018. Impacts of temperature and irradiance on polycrystalline silicon solar cells parameters. **Solar Energy**, Vol 174. p 628 - 639.
- Hasanuzzaman, M., Malek, A. B. M. A., Islam, M. M., Pandey, A. K. and Rahim, N. A. 2016. Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review. **Solar Energy**, Vol. 137. p 25 - 45.
- Hashim, H., Bomphey, J. J. and Min, G. 2016. Model for geometry optimisation of thermoelectric devices in a hybrid PV/TE system. **Renewable Energy**, Vol. 87. p 458 - 463.
- Hernández, A. L. and Quiñonez, J. E. 2018. Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors. **Renewable Energy**, Vol. 117. p 202 - 216.
- Intaniwet, A. 2015. Solar Energy Technology. School of Renewable Energy. Maejo University, Chiangmai. Vol. 1, p 1 - 131
- Jang, J.-Y. and Tsai, Y.-C. 2013. Optimization of thermoelectric generator module spacing and spreader thickness used in a waste heat recovery system. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 51(1-2). p 677 - 689.
- John, T. S. 2014. High Efficient Seebeck Thermoelectric Device for Power System Design and Efficiency Calculation: A Review of Potential Household Appliances. **International Journal of Computer Applications**, Vol. 97. p 0975 – 8887.
- Khan, F., Baek, S.-H. and Kim, J. H. 2016. Wide range temperature dependence of analytical photovoltaic cell parameters for silicon solar cells under high illumination conditions. **Applied Energy**, Vol. 183. p 715 - 724.
- Lidberg, T., Gustafsson, M., Myhren, J. A., Olofsson, T. and Ödlund, L. 2017. Environmental impact of energy refurbishment of buildings within different district heating systems. **Applied Energy**. Vol. XX. p XXX - XXX.

- Mousavi, S., Hizam, H. and Gomes, C. 2017. Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited. **Energies**, Vol. 10(1), p 134.
- Nath, G. 2018. Flow behind an exponential shock in a rotational axisymmetric mixture of non-ideal gas and small solid particles with heat conduction and radiation heat flux. **Acta Astronautica**, Vol. 148. p 355 - 368.
- Pang, W., Liu, Y., Shao, S. and Gao, X. 2015. Empirical study on thermal performance through separating impacts from a hybrid PV/TE system design integrating heat sink. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Vol. 60. p 9 - 12.
- Premalatha, N. and Valan Arasu, A. 2016. Prediction of solar radiation for solar systems by using ANN models with different back propagation algorithms. **Journal of Applied Research and Technology**, Vol. 14(3). p 206 - 214.
- Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M. and Rahim, N. A. 2015. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. **Energy Conversion and Management**. Vol. 103. p 348 - 358.
- Sark, W. G. J. H. M. v. 2011. Feasibility of photovoltaic – Thermoelectric hybrid modules. **Applied Energy**, Vol. 88(8). p 2785 - 2790.
- Singh, R., Tundee, S. and Akbarzadeh, A. 2011. Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules. **Solar Energy**, Vol. 85(2). p 371 - 378.
- Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y. and Li, B. 2016. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 65. p 698 - 726.
- Yang, M.-H. 2018. Payback period investigation of the organic Rankine cycle with mixed working fluids to recover waste heat from the exhaust gas of a large marine diesel engine. **Energy Conversion and Management**. Vol. 162. p 189 - 202.

- Yong, C., Yiping, W., Qunwu, H. and Shichao, W. 2016. Effect of radiation and convection heat transfer on cooling performance of radiative panel. **Renewable Energy**. Vol. 99. p 10 - 17.
- Zhang, J., Xuan, Y. and Yang, L. 2014. Performance estimation of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems. **Energy**. Vol. 78. p 895 - 903.
- Zheng, X. F., Liu, C. X., Yan, Y. Y. and Wang, Q. 2014. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 32. p 486 - 503.
- Zhou, J., Zhang, Z. and Ke, H. 2018. PV module temperature distribution with a novel segmented solar cell absorbance model. **Renewable Energy**. Vol. XX. p 1 - 10
- Zhu, W., Deng, Y., Wang, Y., Shen, S. and Gulfam, R. 2016. High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management. **Energy**. Vol. 100. p 91 - 101.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ก. 1 ตัวอย่างการคำนวณการทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

การคำนวณการทำนายอุณหภูมิและความร้อนสะสมของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนอ้างอิงข้อมูลวันที่ 13 03 2018 เวลา 09:05 น. มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณน้ำในถัง 100 L ที่อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำระบายความร้อน 0.0083 kg/s
รังสีอาทิตย์ (G) 408.96 W/m² อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) 25.09 °C
ค่าคุณสมบัติเฉพาะ F_RU_L เท่ากับ 50.04 F_R(τ_sα)_{PV} เท่ากับ 0.5472
พื้นที่โมดูลเซลล์อาทิตย์ 0.5695 m² อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้น (T_s^t) 25.55 °C
ค่าความจุความร้อนของน้ำ (C_p) 4,187 J/kg·°C

ขั้นตอนการคำนวณจากสมการที่ 32 โดยที่ T_s = T_i = 25.55 °C

$$Q_u = [F_R(\tau_s \alpha_c)G - F_{R,U_L}(T_i - T_a)]A_{PV} \quad (W) \quad (1)$$

$$Q_u = [(0.5472 \times 408.96) - 50.04 \times (25.55 - 25.09)] \times 0.5695 \quad (W) \quad (2)$$

$$Q_u = 114.14 \text{ (W)} \quad (3)$$

เมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังที่เปลี่ยนไป T_s^{t+Δt} โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อน Q_u = Q_s และ Δt = 300 sec คำนวณได้จากสมการที่ 15

$$Q_s = (MC_p)_s \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t} \quad (W) \quad (4)$$

จะได้ $T_s^{t+\Delta t} = T_s + [(Q_u \times \Delta t)/(M \times C_p)] \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$

$$T_s^{t+\Delta t} = 25.55 + [(114.14 \times 300)/(100 \times 4,187)] \quad (^\circ\text{C}) \quad (6)$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 25.63 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (7)$$

คิดเป็นปริมาณความร้อนสะสมของน้ำในถังน้ำร้อนที่เวลา 09:05 น.

$$Q_s = [MC_p \times (T_s^{t+\Delta t} - T_s)] / 10^6 \quad (MJ) \quad (8)$$

$$Q_s = [100 \times 4,187 \times (25.63 - 25.09)] / 10^6 \quad (MJ) \quad (9)$$

$$Q_s = 0.034 \text{ (MJ)} \quad (10)$$

ภาคผนวก ก. 2 ตัวอย่างการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณการทำนายการผลิตกำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงข้อมูลวันที่ 13 03 2018 เวลา 09:05 น. มีรายละเอียดดังนี้

รังสีอาทิตย์ (G) 408.96 W/m² อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) 25.09 °C

อุณหภูมิของน้ำในถัง (T_s) 25.63 °C คำนวณจากภาคผนวก ก. 1

ขั้นตอนการคำนวณจากสมการที่ 35

$$P_{PV} = a + bG + cG^2 + dT_{PV} + eGT_{PV} + fG^2T_{PV} \quad (W)$$

โดยที่

a = 79.1962	b = - 0.1942	c = 2.0411 × 10 ⁻⁴
d = - 1.552	e = 5.4485 × 10 ⁻³	f = - 4.3312 × 10 ⁻⁶

เมื่ออุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณได้จากสมการที่ 36

$$T_{PV} = a_1 + b_1G + b_2T_a + b_3T_s^t \quad (°C)$$

โดยที่

a ₁ = 4.0478	b ₁ = 0.0228	b ₂ = 0.563	b ₃ = 0.3206
-------------------------	-------------------------	------------------------	-------------------------

จะได้

$$T_{PV} = 4.0478 + (0.0228 \times 408.96) + (0.563 \times 25.09) + (0.3206 \times 25.63) \quad (°C)$$

$$T_{PV} = 35.68 \text{ (}°C\text{)}$$

และ

$$P_{PV} = a + bG + cG^2 + dT_{PV} + eGT_{PV} + fG^2T_{PV} \quad (W)$$

$$P_{PV} = 79.1962 + (- 0.1942 \times 408.96) + (2.0411 \times 10^{-4} \times (408.96)^2) + (- 1.552 \times 35.68) + ((5.4485 \times 10^{-3}) \times 408.96 \times 35.68) + ((- 4.3312 \times 10^{-6}) \times (408.96)^2 \times 35.68) \quad (W)$$

$$P_{PV} = 32.19 \text{ (W)}$$

ภาคผนวก ก. 3 ตัวอย่างการคำนวณการทำนายกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก

การคำนวณการทำนายกำลังไฟฟ้าของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกอ้างอิงข้อมูลวันที่ 13 03 2018 เวลา 09:05 น. มีรายละเอียดดังนี้

รังสีอาทิตย์ (G) 408.96 W/m²

อุณหภูมิของน้ำในถัง (T_s) 25.63 °C คำนวณจากภาคผนวก ก. 1

อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{PV}) 35.68 °C จากภาคผนวก ก. 2

จำนวนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ N เท่ากับ 28 Module

พื้นด้านรับความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก A_{TEG} เท่ากับ 0.0016 m^2
 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ α_c เท่ากับ 0.95
 การส่งผ่านของชั้นกระจกของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ τ_g เท่ากับ 0.95

ขั้นตอนการคำนวณจากสมการที่ 37

$$P_{TEG} = a + bQ_{TEG} + cQ_{TEG}^2 + dT_{m,TEG} + eQ_{TEG} T_{m,TEG} + fQ_{TEG}^2 T_{m,TEG} \quad (\text{mW})$$

โดยที่

$a = -0.4804$	$b = 0.0584$	$c = -0.0025$
$d = 0.0048$	$e = -0.0006$	$f = 4.4356 \times 10^{-5}$

เมื่อ $Q_{TEG} = N_{TEG} A_{TEG} (\tau_g \alpha_c) G \quad (\text{W})$

$$Q_{TEG} = 28 \times 0.0016 \times 0.95 \times 0.95 \times 408.96 \quad (\text{W})$$

$$Q_{TEG} = 16.54 \text{ (W)}$$

และ $T_{m,TEG} = (T_{PV} + T_S)/2 \quad (^\circ\text{C})$

$$T_{m,TEG} = (35.68 + 25.63)/2 = 30.66 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

จะได้ $P_{TEG} = (-0.4804) + (0.0584 \times 16.54) + (-0.0025 \times (16.54)^2) + (0.0048 \times 30.66) +$
 $(-0.0006 \times 16.54 \times 30.66) + ((4.4356 \times 10^{-5}) \times (16.54)^2 \times 30.66) \quad (\text{mW})$

$$P_{TEG} = 0.0104 \text{ (mW)}$$

ภาคผนวก ข
บทความนำเสนองานประชุมวิชาการ

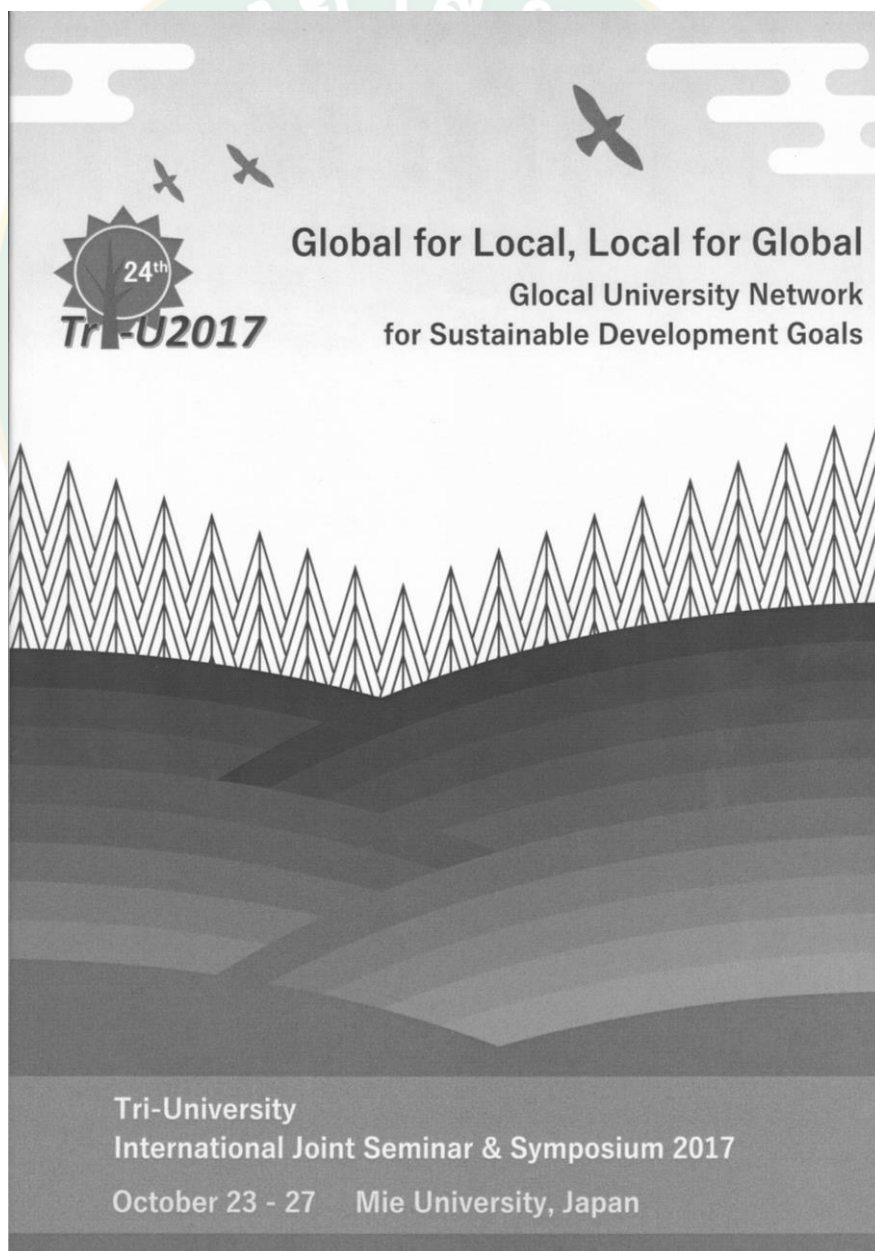
ภาคผนวก ข. 1 บทความนำเสนองานประชุมวิชาการครั้งที่ 1

ชื่องานประชุมวิชาการ

The 24th Tri-University International Joint Seminar and Symposium 2017

ชื่อบทความ

Experimental Investigation of Photovoltaic/Thermal Hybrid System with
Thermoelectric and Water Cooling Unit



TRIU17FD01 (EG1-C4)

Experimental Investigation of Photovoltaic/Thermal Hybrid System with Thermoelectric and Water Cooling Unit

Taweepong Teptawee¹ and Sarawut Polvongsri^{2*}

^{1,2} School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand
*e-mail: saravooth@hotmail.com

Abstract: This research proposed to investigate the photovoltaic/thermal hybrid system (PVT) by using the 28 thermoelectrics received heat from the back of photovoltaic module that called a hot side and the other side called a cool side which installed an insulated cooling box. During the experiment, the testing was carried out at School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand. The tilt of the 80 W solar panel was 18° facing to the south. The water was circulated by a pump at 1.2 liter/min-m² from a cooling box to a 100 liter of hot water storage tank. The inlet temperature and outlet temperature of water from a cooling box, the hot water temperature in a storage tank, the ambient temperature, the power generation from the thermoelectric, and the solar radiation was collected since 9:00 am to 4:00 pm of local time in Thailand. The results were found that the cooling system by using thermoelectrics and water could be decreased the solar panel temperature and the power generation from the testing PVT was increased when comparing a non-cooling test. The solar panel efficiency was increased and the amount of hot water was enough for use in households.

Key words: Photovoltaic, Thermoelectric and Hot water

1. INTRODUCTION

Currently, the photovoltaic (PV) modules are used to convert solar irradiation into the electricity. The encounter problem of PV working under high solar radiation is a PV temperature raise to 60-80 °C and the PV efficiency is decreased approximately 20-25%. (Khan et al., 2016, Van Sark, 2011). Every 1 °C surface temperature rise of the PV module causes a reduction in efficiency of 0.5% (Siecker et al., 2017). From this problem, there are several research studies try to solve these problems. The researches divided into two ways. The first way is a passive cooling system such as water immersion cooling technique (Mehrotra et al., 2014) or cooling with a phase change material (PCM) etc. The second way is using an active cooling systems such as the hybrid solar Photovoltaic/Thermal (PVT) cooled by forced water or forced air circulation, or water spraying for cooling on the front of PV etc.

The other interesting method is using thermoelectric. One side of PV module (hot side) and the other side is heat sink call cool side or called Hybrid PV / TE system with heat sink. Pang et al., (2015). This system could reduce the temperature by about 8 °C in Fig. 1., heat at cold-side is cooled to the air without any benefit. Another idea to solve to this problem is water flow through the cold side and stored water in the hot water tank. (Chavez-Urbiola et al., 2012).

The advantage of cooling the photovoltaic modules can improve the efficiency of electricity production of PV, reduce the degradation of PV modules, lifetime longer, the excess heat is cooling out from the photovoltaic modules. The objective of this study to reduce the temperature of the solar module and rise the PV module efficiency by using thermoplastics with water cooling, heat cooling used to produce hot water.

2. THEORY

2.1 Thermoelectric generator (TEG)

Thermoelectric cooling has the advantage of being available from low heat sources such as waste heat. Fig. 2. (Singh et al., 2011) shows the thermoelectric element consists of two different semiconductor materials (n-type and p-type semiconductors). It is a serial connection. In use, a number of these elements are included in the kit in

the module. The hot side is heated by heat source and the cool side is cooled by a lower temperature reservoir. Seebeck effect is to cause the voltage across the junction p-n junction causes a current to flow through the resistance of the external load. Output power is depending on temperature differences between the hot side and the cool side.

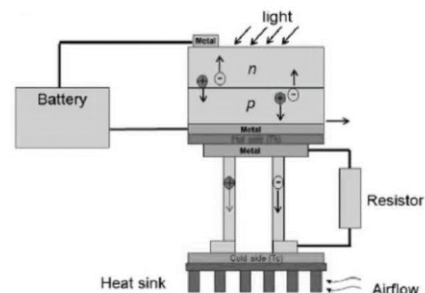


Fig. 1. Hybrid PV/TE system with heat sink (Pang et al., 2015)

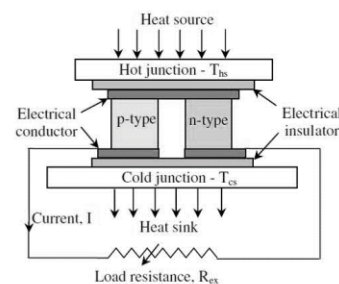


Fig. 2. Schematic diagram of the thermoelectric element. (Singh et al., 2011).

2.2 Thermal efficiency of the PVT

Thermal efficiency of the PVT water collector is given by (Hasanuzzaman et al., 2016)

$$\eta_{PVT} = \frac{Q_{Cooling}}{GA_{PVT}} \quad (1)$$

From Eq. (1), A_{PVT} is an area of PVT (m^2), G is the solar radiation (W/m^2), $Q_{Cooling}$ is The amount of heat from the coolant fluid depend on Eq. (2), C_p is the specific heat capacity of water ($J/kg \cdot ^\circ C$), \dot{m} is mass flow rate (kg/s) and $T_{w,in}$ is inlet water temperature and $T_{w,out}$ is outlet water temperature from cooling box ($^\circ C$).

$$Q_{Cooling} = \dot{m} C_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (2)$$

2.3 Net electrical efficiency of the PVT system

Net electrical efficiency of the PVT system is given by (Skoplaki and Palyvos, 2009, Hasanuzzaman et al., 2016)

$$\eta_{Net, System} = \frac{P_{PV} + P_{TEG} - P_{Pump}}{GA_{PVT}} \quad (3)$$

The output power of PV is given by

$$P_{PV} = I_{PV} V_{PV} \quad (4)$$

The output power of thermoelectric is given by

$$P_{TEG} = I_{TEG} V_{TEG} \quad (5)$$

From Eq. (3), Eq. (4) and Eq. (5), A_{PVT} is area of PVT (m^2), P_{PV} is output power of PV (W), I_{PV} is current of PV (A), V_{PV} is voltage of PV (V), P_{TEG} is output power of thermoelectric (W), I_{TEG} is current of thermoelectric (A), V_{TEG} is voltage of thermoelectric (V), P_{Pump} is power consumption of water pump (W)

3. MATERIALS AND METHODS

The test kit shown in Figure 3 consists of Polycrystalline silicon solar cell module with a maximum power of 80 W, Solar Schutten STP6-80 / 40, size $850 \times 670 \times 30$ mm³ and 28 unit connected in series of thermoelectric generator, TEC1-12706, size $40 \times 40 \times 3.6$ mm³. This system uses a 2.3 WDC pump for circulating water in a closed system at the flow rate of water flowing in a 1.2 liter/min-m² cooling box. Based on the results of solar collector testing, heat from a photovoltaic module is transferred from a 1.2 mm thick aluminum plate to the thermoelectric hot side, with a cooling box as cooling or a cold side. The testing kit is entirely insulated, except for the PV front. The heat from the cooling water will be drained into a 100 L hot water tank.

The testing site was at School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand. Both photovoltaic modules were connected to the Solar Module Analyzer and the thermoelectric is connected to a DC load to measure the current and voltage. The testing period was from 9:00 am to

4:00 pm local time. Parameters were recorded every 5 minutes as follows, solar radiation, ambient temperature, inlet water temperature, outlet water temperature, output current of photovoltaic module and thermoelectric, output voltage of photovoltaic module and thermoelectric.

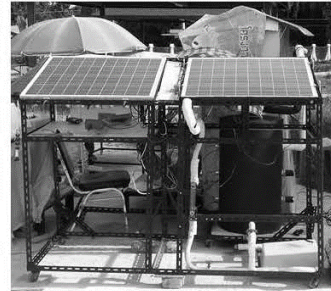


Fig. 3. Photovoltaic/Thermal hybrid system (PVT) with thermoelectrics and water cooling unit

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Temperature of each location and cooling of the system

Figure 4 shows the data on July 16, 2017. The morning weather was mostly cloudy and had very low solar radiation intensity. However, from 10.00 am to 4.00 pm, the intensity changed constantly between 200-800 W/m^2 since the testing period was during rainy season in Thailand. The lowest ambient temperature was 27.70 $^\circ C$ and the maximum was 33.90 $^\circ C$. The study was divided into two cases: photovoltaic modules without cooling (PV1) and cooling photovoltaic modules with thermoelectric combined with water (PV2).

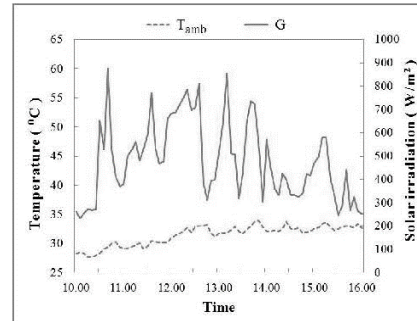


Fig. 4. The variation of ambient temperature and solar irradiation with time of day (July 16, 2017)

Regarding Figures 5 and 6, from 10.00 am to 12.40 pm, the difference of in-out water temperatures of the cooling box rose to a maximum of 4.1 $^\circ C$ until the cooling rate of the water rose to a 192 W with 45.05% of cooling efficiency, and this made the temperature of PV2 module lower than PV1 module between 1-8 $^\circ C$. The temperature of PV2 module was only 1-5 $^\circ C$ lower than PV1 module due to reduce in-out water temperature of the cooling box. This resulted in less heat dissipation from PV2 module, and an average daily cooling efficiency of 43.20%. The cooling system could increase the

temperature of water in the hot water tank (T_s) to a maximum of 35.70 °C from starting water temperature of 29.45 °C, which was the heat emitted from PV2 module.

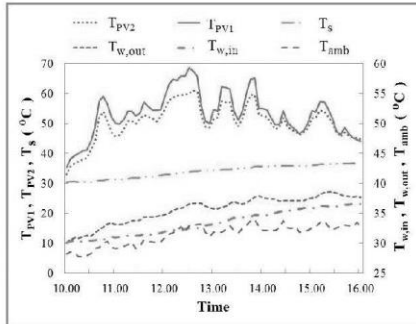


Fig. 5. The variation of temperature of PV, ambient, water cooling and water storage

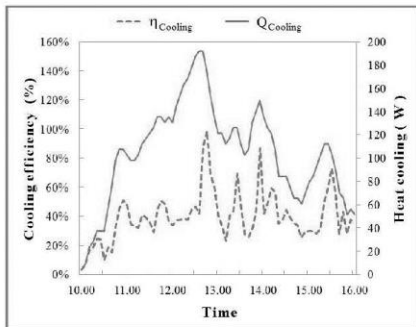


Fig. 6. Cooling efficiency and heat cooling of PVT system

4.2 Electricity produced from thermoelectric generator (TEG)

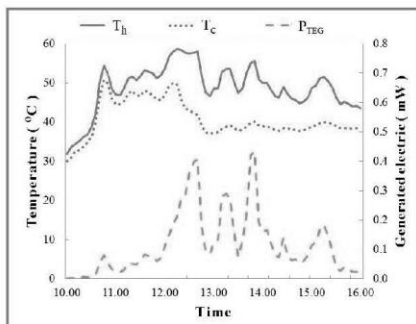


Fig. 7. The effect of temperature on the electricity production by TEG

Thermoelectric was used for the heat from the Photovoltaic module (hot side) by the cooling box (the cold) to produce

power shown in Fig. 7. The power produced by TEG depended on the difference between hot and cold side temperatures between 10.00 to 11.20, which was the start of the system. The difference in temperatures between the hot and cold sides of TEG varies slightly from 1-4 °C due to the rapid increase in solar radiation intensity. The average power produced was 0.04 mW. The difference between hot and cold temperatures was 5.10-16.10 °C since the system was received constant solar radiation intensity, and the average power output produced was 0.16 mW.

4.3 Electricity produced and efficiency of photovoltaic modules.

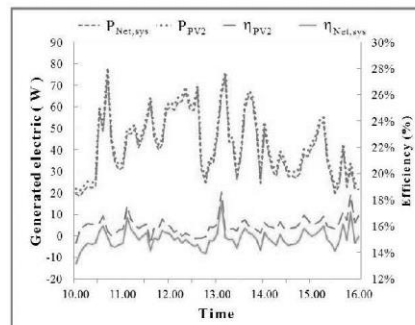


Fig. 8. Electricity produced by PV2, PVT net power, efficiency of PV2 and PVT system

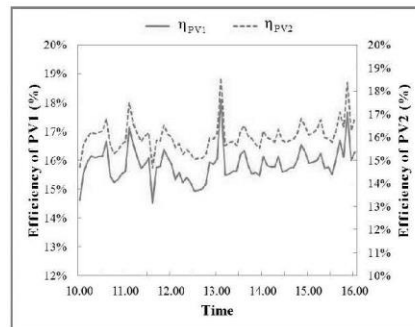


Fig 9 The variation of efficiency of PV2 and PV1

The net capacity of the PVT system was less than that generated by PV2 because the water pump used a net power average of 2.3W, which was greater than the sum of the power produced by TEG and the increased power from PV2 heat dissipation. Therefore, the efficiency of PW system was less than PV2 as shown in Figure 8. At 1.00 pm local time, the maximum output power of PV2 module was 65.70 W at module temperature is 59.40 °, while output power of PV1 module was 63.97 W at module temperature of 64.70 °C, and th efficiency was 15.94% and 15.52%, respectively. The efficiency shown in Figure 9 and the increased power were a result of the lower PV module temperature due to heat dissipation, as shown in Figure 5 (based on PV1 temperature).

Table 1 The net total energy between PVT (with cooling) and PV1 (without cooling).

	PVT (With cooling)	PV1 (Without cooling)
Generated electric of PV (kWh)	19.19	18.98
Generated electric of TEG (kWh)	0.0001	-
Energy consumption of DC pump (kWh)	1.016	-
Heat store of hot water (kWh)	51.92	-
Net total energy (kWh)	70.09	18.98

From Table 1, the total energy gained throughout the trial period of PV2 was slightly higher than that of PV1. However, the benefit from the cooling system was the increased amount of heat from hot water. For this reason, when calculating net energy, the net energy throughout the trial period of PV2 was more than that of PV1.

5. CONCLUSIONS

The cooling system of photovoltaic module with maximum power of 80 W and a thermoelectric generator combined with water at a flow rate of 0.67 liters per minute could reduce the temperature of the photovoltaic module to a maximum of 8.30 °C and increase efficiency of 3% based on PV1 (without cooling). The overall efficiency of power and heat generating system was 15.07%. It could produce hot water with an average temperature of 35.70 °C at a 100 L water tank, which is suitable for household use.

ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank the faculties and staff at School of Renewable Energy, Maejo University, who provided advice and knowledge in various fields, as well as instruments, experimental equipment, research site, and scholarship from the production and development potential graduate of renewable energy in ASEAN countries for graduate students, School of Renewable Energy, Maejo University, academic year 2016

References

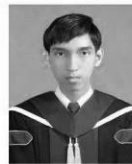
- Van Sark, W.G.J.H.M. (2011). Feasibility of photovoltaic-Thermoelectric hybrid modules, *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 2785-2790.
- Khan, F., Baek, S.H. and Kim, J.H. (2016). Wide range temperature dependence of analytical photovoltaic cell parameters for silicon solar cells under high illumination conditions, *Applied Energy*, Vol. 183, pp. 715-724.
- Stecker, J., Kusakana, K. and Numbi, B.P. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, pp. 192-203.
- Hasanuzzaman, M., Malek, A.B.M.A., Islam, M.M., Pandey, A.K. and Rahim, N.A. (2016). Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review, *Solar Energy*, Vol. 137, pp. 25-45
- Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M. and Sudhakar, K. (2014). Performance of a solar panel with water immersion cooling technique, *Int. J. Sci. Environ. Technol.*, Vol. 3, pp. 1161-1172.
- Pang, W., Liu, Y., Shao, S. and Gao, X. (2015). Empirical study on thermal performance through separating impacts from a hybrid PV/TE system design integrating heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*,

Vol. 60, pp. 9-12.

Cha'vez-Urbiola, E.A., Vorobiev, Y.V. and Bulat, L.P. (2012). Solar hybrid systems with thermoelectric generators, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 369-378.

Singh, R., Tundee, S. and Akbarzadeh, A. (2011). Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules, *Solar Energy*, Vol. 85, pp. 371-378

Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 614-624.



Mr. Taweepong Teptawee
Master degree program in
Engineering (Renewable Energy
Engineering), Maejo University,
Chiang Mai, Thailand.
Professional: Research interests
renewable energy such as solar
energy



Assist. Prof. Dr. Sarawut Polvongsri
Lecturer (School of Renewable
Energy, Maejo University)
Professional: Solar thermal cooling
and heating, thermal application of
solar energy, energy conservation.



Certificate

This is to certify that

Taweepong Teptawee

*Participated in the twenty-fourth Tri-U International
Joint Seminar & Symposium 2017*

*From the twenty-third of October to the twenty-seventh,
two thousand and seventeenth,
Organized and hosted by Mie University*

*Given at Mie University on the f twenty-seventh of
October, two thousand and seventeenth*



Takao Yoshimatsu
Assistant to the President
Chair of the Tri-U Committee 2017



Yoshihiro Komada,
President
Mie University

Certificate of Appreciation

This certificate is awarded to

Taweepong Teptawee

Participated in the 24th Tri-U International Joint Seminar & Symposium hosted by Mie University in
Japan from Oct 23 to 27, 2017

Congratulations

*For your dedication, professionalism and successful oral presentation
Entitled "Experimental Investigation of Photovoltaic/Thermal Hybrid System with
Thermoelectric and Water Cooling Unit"*

*6th December, 2017
Chiang Mai, Thailand*



Assist. Prof. Dr. Natthawut Dodsadee
Director of School of Renewable Energy
Maejo University

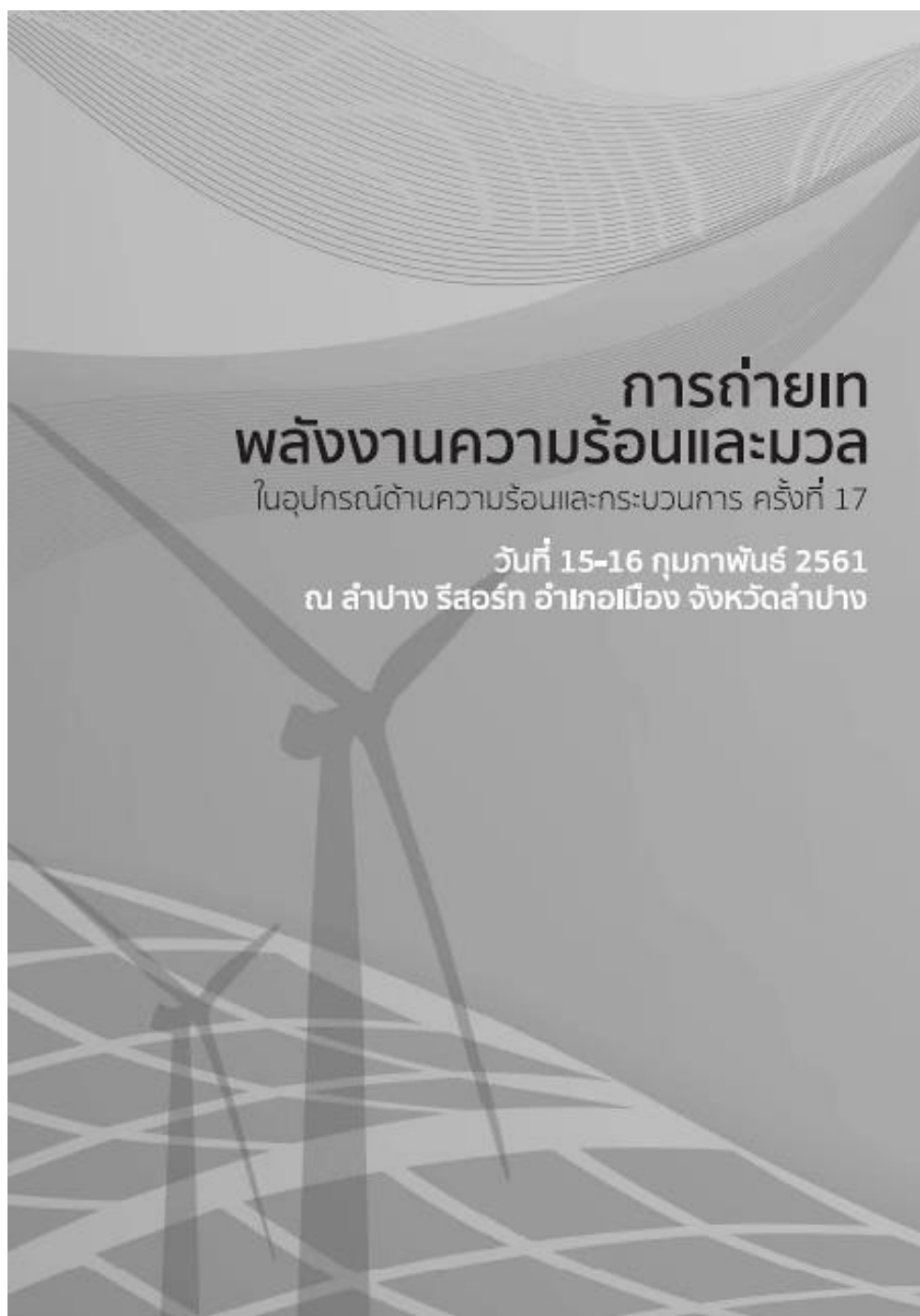
ภาคผนวก ข. 2 บทความนำเสนองานประชุมวิชาการครั้งที่ 2

ชื่องานประชุมวิชาการ

การถ่ายเทพลังงานและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่17)

ชื่อบทความ

ผลของอัตราการไหลเชิงมวลที่มีต่อพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำ



ผลของอัตราการไหลเชิงมวลที่มีต่อพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับน้ำ

Mass Flow Rate Effect on Net Energy of Photovoltaic/Thermal Hybrid System with Thermoelectric and Water Cooling

ทวีพงศ์ เทพทวี

ศราวุธ พลงวงศ์*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

*Email: saravooth@hotmail.com,

053-875590

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงานสุทธิในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีระบบระบายความร้อนด้านหลังของโมดูล การทดลองใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 80Wp หันหน้าไปทางทิศใต้โดยทำมุมเอียง 18° ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 28 ชิ้น รับความร้อนจากด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำระบายความร้อนที่อัตราการไหลเชิงมวล 0.0083-0.0125 kg/s น้ำร้อนที่ได้จะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100L ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน กำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก จะถูกบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 9:00 น. ถึง 16:00 น. ผลจากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s ให้พลังงานสุทธิสูงสุด มีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเท่ากับ 55.89% และสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิเท่ากับ 41.75 °C

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานสุทธิ การระบายความร้อนด้วยน้ำ

Abstract

This research aims to study influence of mass flow rate on net electrical and thermal energy of a solar cell module with thermoelectric cooling at the back. The experiment used a south facing 80 Wp solar cell panel with 18°tilting angle installed at School of Renewable Energy, Maejo University. There was a set of 28 thermoelectrics (TE) taking heat from the back of solar cell module which was transferred to cooling water having a mass flow rate in a range of 0.083-0.0125 kg/s. The cooling water was heated and the generated warm water system was stored in a 100 liter storage tank. The solar radiation, the ambient temperature, the solar module temperature, the hot water temperature, the solar module power generation, and the TE power generation were collected from 9:00 a.m. to 4:00 p.m. The results showed that the mass flow rate at 0.0083 kg/s gave maximum net energy. The overall efficiency of system was equal to 55.89% and the produced hot water temperature was at 41.75 °C.

Keywords: Thermoelectric, Photovoltaic module, Net energy, Water cooling

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเป็นที่นิยมแพร่หลายในหลายประเทศทั่วโลก โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic modules , PV) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานทดแทน โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนรูปรังสีแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ในทางปฏิบัติ, มีเพียง 15%-20% ของรังสีแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าเท่านั้น, และส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน [1] แต่ปัญหาหลักของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้รังสีดวงอาทิตย์ที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิขณะใช้งานเพิ่มขึ้นสูงถึง 60-80 °C และประสิทธิภาพของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงประมาณ 20-25% [2, 3] หรืออุณหภูมิพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นทุก 1 °C ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง 0.5% [4] เพื่อแก้ปัญหาที่มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาการกำจัดหรือการใช้ความร้อนส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีปัญหาหลักนี้ ตัวอย่างเช่น การระบายความร้อนโดยฉีดพ่นน้ำด้านหน้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การปรับปรุงสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟส (PCM) ระบายความร้อนด้วยฮีตซิงก์ ระบบผลิตไฟฟ้าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก (PV/TE) หรือระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยการระบายความร้อนด้วยน้ำหรืออากาศแบบบังคับ เป็นต้น [4, 5]

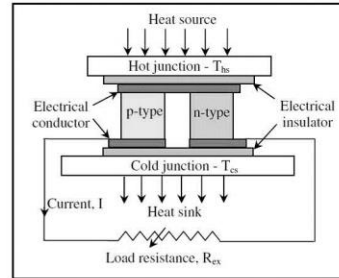
จากการศึกษาความเป็นไปได้ ถึงการใช้เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับน้ำระบายความร้อนในการระบายความร้อนส่วนเกินที่เกิดขึ้นบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (Photovoltaic/Thermal hybrid system, PVT) ด้วยวิธีนี้ ความร้อนส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ถ่ายโอนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกไปยังส่วนน้ำระบายความร้อน โดยศึกษาอัตราการไหลโดยมวลของน้ำระบายความร้อนที่มีผลต่อพลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนสำหรับใช้ในครัวเรือนซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมอิเล็กทริก เจเนอเรเตอร์

เทอร์โมอิเล็กทริก เจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric generator, TEG) คือทำงานในรูปแบบผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก จากรูปที่ 1 เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด (n-type and p-type semiconductors) เชื่อมต่อกันด้วยวัสดุซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า [6] เทอร์โมอิเล็กทริกถูกนำมาใช้สำหรับแหล่งความร้อนต่ำเช่น แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) ด้านร้อนรับความร้อนจากแหล่งความร้อนและด้านเย็นระบายความร้อนด้วยฮีตซิงก์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเกิด Seebeck effect เกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง p-n junction ทำให้กระแสไฟฟ้า

ไหลผ่านตัวต้านทานภายนอก โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น



รูปที่ 1 การทำงานและส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริก [6]

โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแสดงดังสมการที่ 1

$$P_{TEG} = I_{TEG} V_{TEG} \quad (1)$$

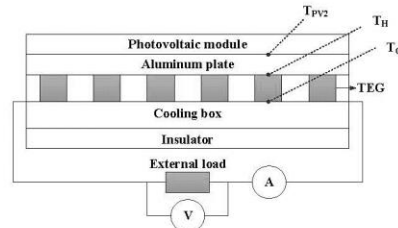
เมื่อ P_{TEG} คือกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (W)

I_{TEG} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเทอร์โมอิเล็กทริก(A)

V_{TEG} คือความต่างศักย์ฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก(V)

2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน

ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนประกอบด้วยส่วนผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และชุดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีรายละเอียดตำแหน่งจุดวัดและเก็บข้อมูลต่าง ๆ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดเทอร์โมอิเล็กทริกและส่วนระบายความร้อน

การประเมินสมรรถนะของระบบ PVT แบ่งได้ดังนี้ [1-8] ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังสมการที่ 2

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{GA_{PV}} \quad (2)$$

เมื่อ P_{pv} คือกำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์(W)

A_{pv} คือพื้นที่ที่รับรังสีอาทิตย์ของระบบ (m²)

G คือค่ารังสีอาทิตย์ W/m²

ความร้อนสะสมในถังเก็บน้ำร้อน แสดงดังสมการที่ 3

$$Q_s = MCp \int \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ Q_s ความร้อนสะสมของน้ำระบายความร้อน (W)

M คือมวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (kg)

Cp คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg·°C)

T คืออุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนในถัง (°C)

t คือเวลาที่อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลง (s)

พลังงานสุทธิของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน PVT แสดงดังสมการที่ 4

$$E_{Net} = E_{PV} + E_{TEG} - W_{Pump} + Q_{Water} \quad (4)$$

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน PVT แสดงดังสมการที่ 5

$$\eta_{system} = \frac{E_{Net}}{E_{sun}} \quad (5)$$

เมื่อ E_{pv} คือพลังงานที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (J)

E_{TEG} คือพลังงานที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (J)

W_{Pump} คืองานที่ปั๊มใช้โดยมีน้ำหมุนเวียน (J)

Q_{Water} คือปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมโดยน้ำในถัง (J)

E_{sun} คือพลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ (J)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองแบ่งเป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 3 ได้แก่กรณีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง (PV1) และกรณีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งส่วนระบายความร้อน (PV2) โดยในการติดตั้งส่วนระบายความร้อนจะใช้แผ่นทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก คูลเลอร์ Thermoelectric cooler Peltier 12V รุ่น TEC1-12706 ขนาดกว้าง 40 mm, ยาว 40 mm, หนา 3.6 mm จำนวน 28 ชิ้น ดังรูปที่ 4 ต่อเชื่อมกันแบบอนุกรมและติดเข้ากับแผ่นอลูมิเนียมที่ติดกับด้านหลังของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 80 W ยี่ห้อ Solar Schutten STP6-80/40 ขนาดกว้าง 850 mm, ยาว 670 mm, หนา 30 mm ส่วนอีกด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก(ด้านเย็น)ติดเข้ากับกล่องบรรจุน้ำซึ่งมีน้ำไหลผ่านเพื่อนำความร้อนที่ระบายได้ไปถ่ายเทให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100 L ที่หมุนวนอย่างดี ในการหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนใช้ปั๊มน้ำ DC โดยมีชุดควบคุมอัตราการไหล ซึ่งในการ

ทดสอบใช้อัตราการไหล 4 อัตราการไหลคือที่ 0.0083 0.0097 0.0114 และ 0.0125 kg/s โดยในแต่ละอัตราการไหลมีการใช้กำลังงาน 1.52W 1.76 W 2.32 W และ 2.41 W ตามลำดับ ทดสอบในช่วงเวลา 9:00 -16:00 น. บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที โดยตัวแปรที่เก็บข้อมูลได้แก่ ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (วัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเครื่อง PV module analyzer) และกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก (วัดกำลังไฟฟ้าโดยการต่อเข้ากับตัวต้านทานขนาด 0.6 โอห์ม)ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



รูปที่ 3 โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง(PV1) (ซ้าย) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งส่วนระบายความร้อน(PV2) (ขวา)



รูปที่ 4 แผ่นทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก คูลเลอร์ Thermoelectric cooler Peltier 12V รุ่น TEC1-12706

4. ผลและอภิปรายผลการศึกษา

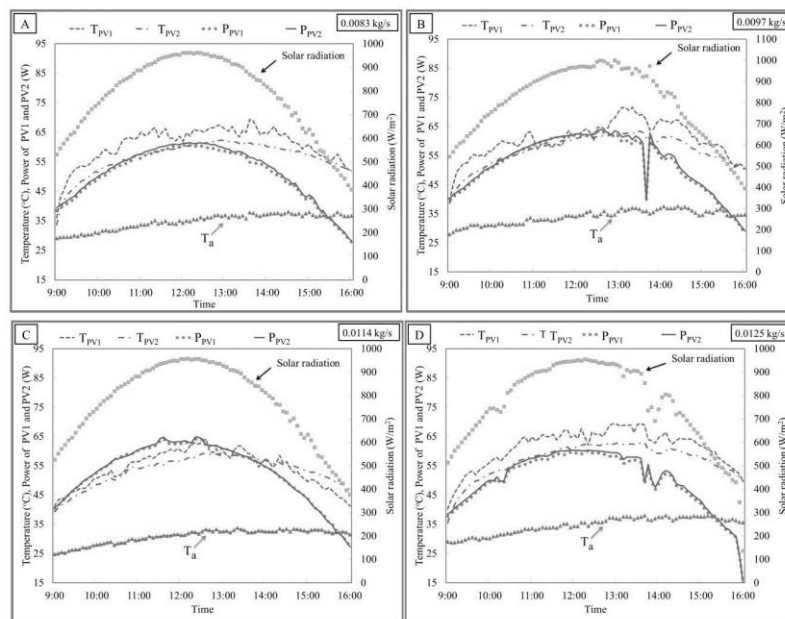
4.1 กำลังผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก

จากการทดสอบเก็บข้อมูลในช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2560 ที่อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 4 อัตราการไหล พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) ทั้งสี่ส่วนมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 25-35 °C และค่ารังสีอาทิตย์มีค่าอยู่

ระหว่าง 400-1,000W/m² ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนทั้ง 4 อัตราการไหลมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของโมดูลเซลล์อาทิตย์อ้างอิงที่ไม่มีการระบายความร้อนตลอดทั้งวันประมาณ 5-9 °C เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนผ่านชุดเทอร์โมอิเล็กทริกสู่นำระบายความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อน แต่มีบางช่วงเวลาของการทดสอบที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s ดังรูปที่ 5B เวลาประมาณ 11:00 น. ถึง 12:40 น. และที่การทดสอบที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s ดังรูปที่ 5C ในช่วงเวลาหลัง 14:30 น. อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนสูงกว่าโมดูลเซลล์อาทิตย์อ้างอิงเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง ประกอบกับหลังเวลา 14:30 น. ค่ารังสีอาทิตย์มีค่าลดลง ส่งผลทำให้ความร้อนสะสมในโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์(PV1)และอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จึงลดลง เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 8.09 °C เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงที่ 66.58 °C ที่เวลา

11:20 น. อัตราการไหล0.0097kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 8.90°C เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงที่ 71.49 °C ที่เวลา 13:05 น. อัตราการไหล 0.0114kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 5.017 °C เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง 71.49 °C ที่เวลา12:20น.และที่อัตราการไหล 0.0125kg/s สามารถลดอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 7.69 °C เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง 71.49 °C ที่เวลา 12:20 น.

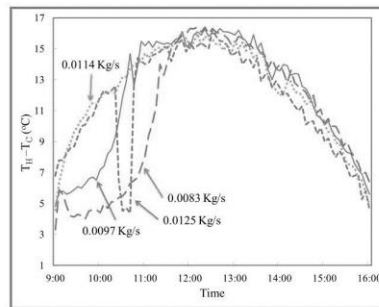
จากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ได้สูงสุด จากการทดสอบอัตราการไหลทั้ง 4 อัตราการไหล ที่ค่ารังสีอาทิตย์ประมาณ 940-1,000 W/m²อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนมีค่าต่ำกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงประมาณ 3-5 °C ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 11-12%



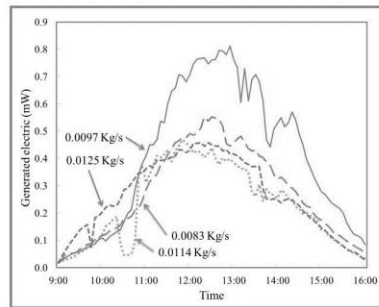
รูปที่ 5 ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ แต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำเปรียบเทียบกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงที่อัตราการไหลต่างๆ

Kg/s	T_{PV1} (°C)	P_{PV1} (W)	η_{PV} (%)	T_{PV2} (°C)	P_{PV2} (W)	η_{PV} (%)	T_a (°C)	G (W/m ²)
0.0083	63.69	60.72	11.08	60.39	61.44	11.21	34.78	962.57
0.0097	64.88	63.41	11.14	61.29	63.90	11.22	34.78	999.69
0.0114	62.79	64.03	11.76	57.76	64.89	11.92	32.29	966.22
0.0125	64.67	59.71	11.08	60.49	60.41	11.21	33.88	945.94



รูปที่ 6 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างตัวร้อนและตัวเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกที่อัตราการไหลต่างๆ แต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 7 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างตัวร้อนและตัวเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกที่อัตราการไหลต่างๆ แต่ละช่วงเวลา

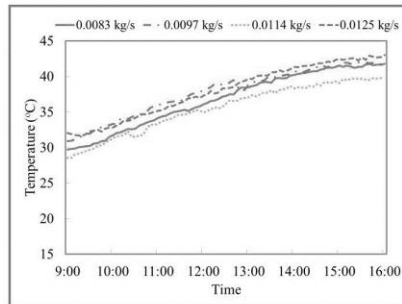
จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 4 อัตราการไหล ขึ้นกับผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกได้สามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงที่ 1 คือช่วงเริ่มต้นการทำงาน 9:00 น. ถึง 11:00 น. กำลังไฟฟ้าที่ได้ทั้ง 4 อัตราการไหลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นโดยที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s มีผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและ

ตัวเย็นสูงกว่าส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงนี้สูงกว่าอัตราการไหลอื่นตามไปด้วยหลังจากนั้นเมื่อการทำงานเข้าสู่ช่วงที่ 2 ที่เวลา 11:00 น. ถึง 14:00 น. ที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s มีผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็นค่อนข้างสูง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกสูงกว่าอัตราการไหลอื่นเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 3 ซึ่งช่วงนี้ค่ารังสีอาทิตย์ลดต่ำลงอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ค่อยๆ ลดลงทั้ง 4 อัตราการไหล ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนในถังเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 8 ส่งผลต่อผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็นลดลง กำลังไฟฟ้าที่ได้ลดลงอย่างต่อเนื่องทั้ง 4 อัตราการไหลในช่วงที่ 3 หลังจาก 14:00 น. ที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกสูงที่สุดที่ 0.81 mW (ผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็น 16.01 °C ที่เวลา 12:55 น. ค่ารังสีอาทิตย์ 998.91 W/m² อุณหภูมิแวดล้อม 34.68 °C) รองลงมาเป็นที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s 0.0114 kg/s และ 0.0125 kg/s ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.55 mW (ผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็น 16.30 °C ที่เวลา 12:30 น. ค่ารังสีอาทิตย์ 955.98 W/m² อุณหภูมิแวดล้อม 35.49 °C) ที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่า 0.46 mW (ผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็น 15.59 °C ที่เวลา 11:50 น. ค่ารังสีอาทิตย์ 949.63 W/m² อุณหภูมิแวดล้อม 31.48 °C) และที่อัตราการไหล 0.0125 kg/s กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกสูงที่สุด 0.45 mW มีผลต่างอุณหภูมิที่ตัวร้อนและตัวเย็น 15.59 °C ที่เวลา 12:30 น. ค่ารังสีอาทิตย์ 948.06 W/m² อุณหภูมิแวดล้อม 35.49 °C

4.2 ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมโดยน้ำในถัง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนแสดงถึงความร้อนที่สะสมได้ของระบบ PVT ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับน้ำแสดงดังรูปที่ 8 ผลที่ได้พบว่าที่อัตราการไหล 0.0125 kg/s สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุด 43.02 °C รองลงมาที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s 0.0083 kg/s และ 0.0114 kg/s สามารถผลิตน้ำร้อนได้ 42.00 °C (จาก 30.89 °C) 41.75 °C (จาก 29.72 °C) และ 39.80 °C (จาก 28.52 °C) ตามลำดับ โดยคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ 4,662.35

kJ/day 4,650.68kJ/day 5,038.73 kJ/day และ 4,720.71kJ/day ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่อัตราการไหลต่างๆ แต่ละช่วงเวลา

4.3 พลังงานสุทธิของระบบ

ผลการเปรียบเทียบพลังงานสุทธิแต่ละอัตราการไหลแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า การผลิตพลังงานจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหล 0.0114kg/s สามารถผลิตพลังงานได้สูงสุดที่ 1,353.42 kJ/day รองลงมาเป็นที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s 0.0083 kg/s และ 0.0125 kg/s ตามลำดับ ส่วนพลังงานที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกที่อัตราการไหล 0.0097 kg/s สามารถผลิตพลังงานได้สูงสุดในขณะเมื่อพิจารณาความร้อนที่สามารถผลิตน้ำร้อนได้พบว่าที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s สามารถผลิตพลังงานได้สูงสุดที่ 5,038.73 kJ/day รองลงมาเป็นที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s 0.0097 kg/s และ 0.0125 kg/s ตามลำดับแต่หากพิจารณาที่พลังงานสุทธิของระบบที่ได้รับพบว่า ที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s สามารถผลิตพลังงานสุทธิได้มากที่สุด 6,311.56kJ/day รองลงมาเป็นที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s 0.0097 kg/s และ 0.0125 kg/s ตามลำดับโดยมีค่าพลังงานสุทธิ 6,015.00 kJ/day 5,952.77 kJ/day และ 5,948.67 kJ/day ตามลำดับ โดยสาเหตุที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s ได้พลังงานสุทธิมากที่สุดเนื่องจากความร้อนสะสมโดยน้ำในถังมากที่สุด โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจากเดิมได้ถึง 12.03 °C ในขณะที่อัตราการไหลอื่นๆ สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ประมาณ 11 °C รวมทั้งการใช้พลังงานโดยปั๊มน้ำหมุนเวียนน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอื่นๆ และเมื่อดูที่ประสิทธิภาพของระบบพบว่าที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s มีประสิทธิภาพระบบสูงสุดที่ 55.89% รองลงมาคือที่อัตราการไหล 0.0125 kg/s มีค่าประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 53.78% ใกล้เคียงกับที่อัตราการไหล 0.0114 kg/s มีค่าประสิทธิภาพของระบบ 53.62% และที่ อัตราการไหล 0.0097 kg/s มีค่า

ประสิทธิภาพน้อยที่สุด 51.21% เนื่องจากปริมาณความร้อนที่สะสมโดยน้ำในถังน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้รับและใช้ไปของระบบ PVT แต่ละอัตราการไหล

รายการ	อัตราการไหล (kg/s)			
	0.0083	0.0097	0.0114	0.0125
E_{PV2} (kJ/day)	1,311.51	1,349.641	1,353.42	1,287.04
E_{TEO} (kJ/day)	70.2 $\times 10^4$	103.8 4	59.5 $\times 10^4$	67.6 $\times 10^4$
W_{Pump} (kJ/day)	38.68	47.56	59.14	61.45
Q_{Water} (kJ/day)	5,038.73	4,650.68	4,720.71	4662.35
E_{Sun} (kJ/day)	11,291.9	11,623.27	11,217.44	11,061.72
E_{Net} (kJ/day)	6,311.56	5,952.77	6,015.00	5,948.67

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาระบบความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับน้ำหล่อเย็นของงานวิจัยนี้ ที่อัตราการไหลเชิงมวลทั้ง 4 อัตราการไหล พบว่าที่อัตราการไหล 0.0083 kg/s ให้พลังงานสุทธิสูงสุดที่ 6,311.56 kJ/day โดยสามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด 8.09 °C สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 61.44W และสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุด 41.75 °C

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ในการให้ความสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนจากโครงการผลิตและพัฒนาศึกษานิเทศก์ทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2559 และทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการภายใต้แผนพัฒนาศึกษานิเทศก์วิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2561

7. อ้างอิง

[1] Rahman M. M., Hasanuzzaman M. and Rahim N.A.. Effects of various parameters on PV-module power

- and efficiency, *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, 2015, p. 348-358
- [2] Van Sark, W.G.J.H.M. Feasibility of photovoltaic - Thermoelectric hybrid modules, *Applied Energy*, Vol. 88, 2011, p. 2785-2790.
- [3] Khan, F., Baek, S.H. and Kim, J.H. Wide range temperature dependence of analytical photovoltaic cell parameters for silicon solar cells under high illumination conditions, *Applied Energy*, Vol. 183, 2016, p. 715-724.
- [4] Siecker, J., Kusakana, K. and Numbi, B. P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, 2017, p. 192-203.
- [5] Sargunenathan, S., Elango, A. and Mohideen, S. T. Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, 2016, p. 382-393
- [6] Singh, R., Tundee, S. and Akbarzadeh, A. Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules, *Solar Energy*, Vol. 85, 2011, p. 371-378
- [7] Bruno S. Dellan, Joseph Schumann and Frédéric J. Lesage. Performance evaluation of a photoelectric-thermoelectric cogeneration hybrid system, *Solar Energy*, Vol. 118, 2015, p. 276-285
- [8] Huide F., Zhao Xuxin., Ma Lei., Zhang Tao., Wu Qixing and Sun Hongyuan. A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems. *Energy Conversion and Management*. Vol.140, 2017, p 1-13



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประกาศนียบัตรฉบับนี้มอบไว้เพื่อแสดงว่า

ทวีพงศ์ เทพทวี, สราวุธ พลวงษ์ศรี

ได้เสนอบทความ เรื่อง ผลของอัตราการใช้พลังงานต่อพลังงานสูญเสียของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
ที่ระบบความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับน้ำ

ในการประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายทอดผลงานความรู้และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 17)

จัดขึ้นระหว่างวันที่ 15-16 กุมภาพันธ์ 2561

ณ สัปปางรีสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

ให้ไว้ ณ วันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2561

(ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)

ประธานการจัดประชุมวิชาการ

เรื่อง การถ่ายทอดผลงานความรู้และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 17)

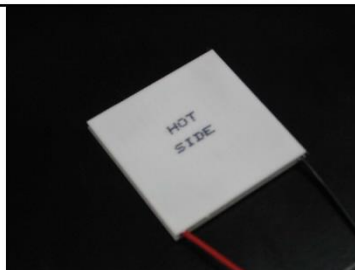
ภาคผนวก ค
เอกสารข้อมูลของ TEG1-1268-4.3

ภาคผนวก ค. 1 เอกสารข้อมูลของ TEG1-1268-4.3



Specifications TEG Module TEG1-1268-4.3

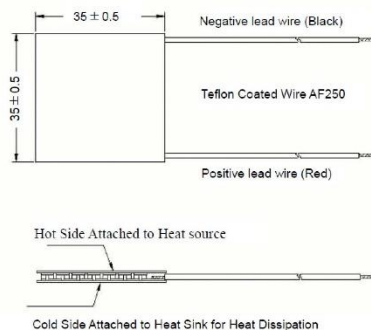
CARBON REDUCING TECHNOLOGY



SNAPSHOT SPECIFICATION FOR TEG1-1268-4.3

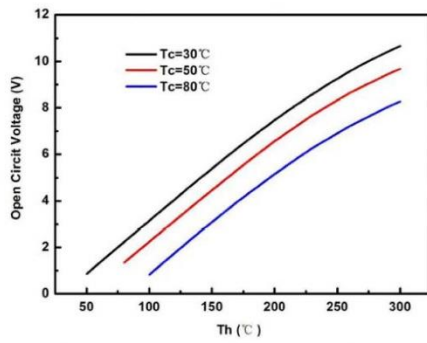
Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	10.7
Matched Load Resistance (ohms)	5.4
Matched load output voltage (V)	5.3
Matched load output current (A)	1.0
Matched load output power (W)	5.2
Heat flow across the module(W)	115
Heat flow density(Wcm ⁻²)	9.5
AC Resistance(ohms) Measured under 27 at 1000Hz	2.7~3.6

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter

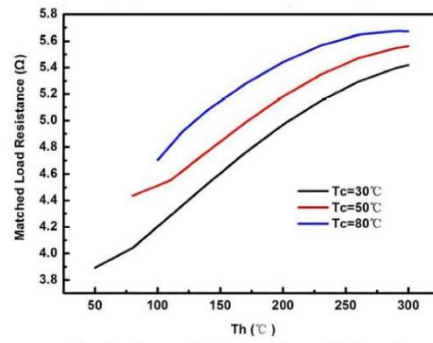




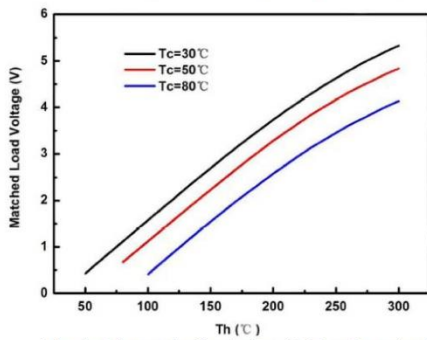
CARBON REDUCING TECHNOLOGY



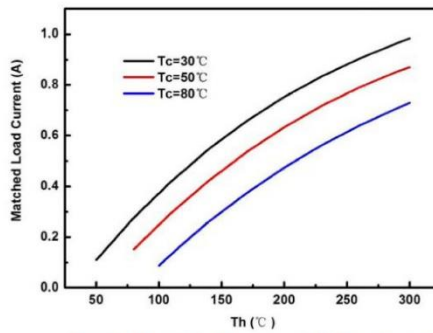
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



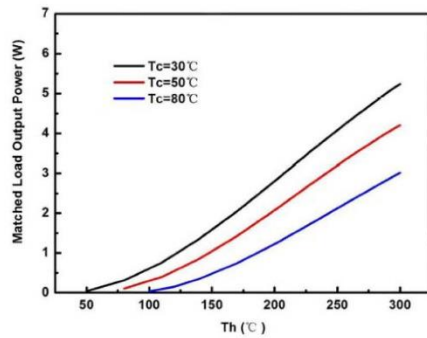
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



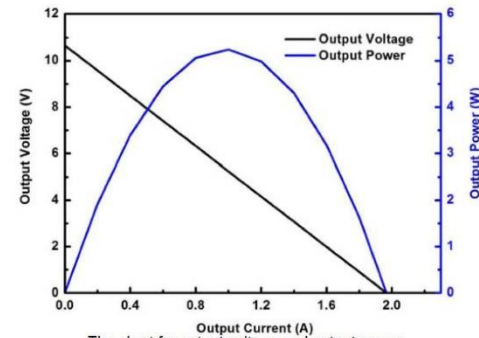
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c



The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for output voltage and output power Vs output current under $T_h=300$ and $T_c=30$

ภาคผนวก ง
ข้อมูลผลการทดสอบ

ภาคผนวก ง. 1 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 18 11 2017

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	531.21	29.08	36.08	33.70	29.72	38.59	39.50	0.016
9:05	556.69	29.39	42.69	38.78	29.79	39.34	40.39	0.031
9:10	577.36	29.50	45.38	41.79	29.85	40.26	41.14	0.051
9:15	594.91	29.50	48.58	43.88	30.05	40.88	41.82	0.053
9:20	614.24	29.50	50.80	45.20	30.09	41.76	42.75	0.052
9:25	624.86	30.00	52.09	46.10	30.19	42.32	43.31	0.057
9:30	646.98	29.68	53.10	47.18	30.26	43.73	44.58	0.070
9:35	671.23	30.48	53.68	48.39	30.56	44.96	45.89	0.077
9:40	683.97	30.00	53.39	48.98	30.62	45.85	46.61	0.085
9:45	707.33	30.40	53.89	49.80	30.88	47.13	47.90	0.088
9:50	723.09	30.40	54.98	50.80	30.95	48.03	48.71	0.103
9:55	735.83	31.09	56.69	51.70	31.45	48.42	49.31	0.112
10:00	749.01	30.79	56.38	51.49	31.73	49.61	50.22	0.118
10:05	766.22	31.59	58.60	52.78	32.05	50.13	51.00	0.122
10:10	781.53	31.80	59.29	53.29	32.15	50.45	51.39	0.134
10:15	793.38	31.48	57.99	53.89	32.36	51.96	52.64	0.138
10:20	803.89	31.69	57.49	54.08	32.59	52.47	53.15	0.147
10:25	824.22	31.59	57.78	54.00	32.56	53.42	54.04	0.157
10:30	836.52	32.09	60.50	54.79	32.66	53.77	54.67	0.180
10:35	844.90	32.59	62.48	55.69	33.09	54.14	55.19	0.180
10:40	852.95	32.70	62.99	55.40	33.29	54.55	55.66	0.188
10:45	861.44	32.99	63.20	56.09	33.52	55.14	56.15	0.210
10:50	874.40	32.99	62.59	56.69	33.69	56.89	56.97	0.219
10:55	886.92	33.09	63.20	57.28	33.86	56.40	57.43	0.245
11:00	886.69	33.70	65.18	57.70	34.19	56.18	57.49	0.287
11:05	902.68	33.59	63.99	57.59	34.36	57.20	58.37	0.314
11:10	910.28	33.78	64.20	57.89	34.45	57.51	58.61	0.333
11:15	914.30	34.49	65.79	58.09	34.76	57.81	59.11	0.342

ภาคผนวก ง. 1 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 18 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:20	922.79	35.10	66.58	58.49	34.99	57.92	59.36	0.377
11:25	932.96	33.99	63.28	58.39	35.09	58.95	59.93	0.389
11:30	940.00	34.39	64.99	58.78	35.16	59.01	60.16	0.416
11:35	944.25	34.89	66.29	59.39	35.32	58.97	60.35	0.437
11:40	947.71	34.10	62.99	59.29	35.12	59.83	60.68	0.457
11:45	951.29	34.18	62.99	59.29	35.42	60.36	60.95	0.465
11:50	954.75	33.99	62.09	59.58	35.65	60.32	60.92	0.477
11:55	952.97	34.99	63.70	60.00	35.79	59.87	60.82	0.477
12:00	961.23	34.28	61.98	60.19	36.05	60.71	61.27	0.491
12:05	961.35	34.99	64.89	60.39	36.26	60.39	61.32	0.485
12:10	962.58	34.79	63.70	60.39	36.55	60.72	61.44	0.493
12:15	957.88	35.50	66.00	60.98	36.62	60.09	61.17	0.512
12:20	961.35	35.39	65.58	60.90	36.82	60.35	61.32	0.553
12:25	961.12	36.08	65.58	61.29	37.19	60.48	61.44	0.538
12:30	955.98	35.50	64.99	61.29	37.26	60.23	61.25	0.553
12:35	955.31	36.08	66.00	61.59	37.48	59.78	61.20	0.548
12:40	947.71	36.08	66.50	61.48	37.45	59.39	60.78	0.543
12:45	948.27	36.79	66.58	62.19	38.05	59.66	60.91	0.518
12:50	942.12	36.98	67.48	62.19	38.46	58.98	60.15	0.454
12:55	941.34	36.58	66.98	62.38	38.39	58.94	60.00	0.445
13:00	931.28	36.90	66.00	61.88	38.52	58.59	59.49	0.456
13:05	927.26	36.08	65.39	61.88	38.65	58.57	59.31	0.471
13:10	913.96	36.90	66.98	61.79	38.79	57.53	58.50	0.482
13:15	912.85	36.69	64.78	61.69	39.09	57.92	58.41	0.457
13:20	907.59	36.29	63.49	61.19	39.22	58.00	58.58	0.437
13:25	899.43	36.79	65.68	61.69	39.22	57.16	58.16	0.428
13:30	882.67	35.79	64.99	60.58	39.12	56.56	57.43	0.432
13:35	869.26	37.80	69.38	61.48	39.75	54.90	56.52	0.409
13:40	860.54	37.59	68.88	60.98	39.79	54.78	56.29	0.405
13:45	847.25	36.90	66.50	60.98	39.72	54.31	55.59	0.388
13:50	844.56	36.58	64.09	60.98	39.79	54.45	55.53	0.375

ภาคผนวก ง. 1 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 18 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
13:55	828.69	37.09	64.89	60.90	40.09	53.55	54.67	0.342
14:00	817.85	37.19	64.39	60.00	40.19	52.96	53.97	0.324
14:05	803.77	37.48	65.79	60.19	40.35	51.94	53.24	0.333
14:10	792.37	37.48	66.98	60.00	40.46	51.18	52.62	0.319
14:15	769.35	37.69	64.60	59.39	40.49	50.23	51.17	0.298
14:20	765.89	37.19	63.78	59.39	40.65	50.17	50.82	0.292
14:25	737.62	37.48	64.68	59.10	40.75	48.32	49.29	0.278
14:30	732.59	37.98	63.38	59.50	40.72	48.26	49.04	0.258
14:35	697.61	37.40	61.69	58.39	40.95	46.49	47.50	0.238
14:40	707.33	37.19	61.59	58.39	41.06	47.03	47.72	0.226
14:45	675.70	37.48	60.98	58.68	41.39	45.02	45.90	0.220
14:50	641.17	36.58	59.39	57.99	41.19	43.61	44.12	0.196
14:55	624.30	37.48	60.39	57.49	41.36	42.32	42.99	0.181
15:00	637.48	37.88	60.90	57.70	41.55	43.00	43.84	0.175
15:05	614.46	36.98	58.78	56.88	41.35	41.90	42.73	0.162
15:10	583.51	36.40	58.18	56.38	41.55	40.14	40.86	0.151
15:15	548.08	36.69	57.09	55.80	41.38	38.15	38.67	0.134
15:20	541.93	36.90	57.20	55.80	41.22	37.81	38.38	0.120
15:25	517.46	36.29	55.69	54.98	41.32	36.12	36.48	0.118
15:30	501.93	36.29	54.98	54.39	41.36	35.46	35.88	0.107
15:35	477.56	36.98	56.48	54.50	41.66	33.80	34.43	0.097
15:40	465.16	37.88	57.59	54.29	41.75	32.64	33.35	0.090
15:45	443.37	37.19	55.48	53.39	41.59	31.57	32.07	0.080
15:50	429.29	36.58	53.79	52.99	41.66	30.73	31.18	0.072
15:55	399.78	36.58	52.39	52.28	41.62	29.04	29.38	0.064
16:00	381.57	36.69	52.18	51.99	41.75	27.87	28.19	0.055

ภาคผนวก ง. 2 ผลการทดสอบที่ 0.0097 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 11 11 2017

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	543.85	27.99	39.49	38.59	30.89	40.05	40.30	0.019
9:05	567.32	28.68	44.88	41.50	30.95	40.83	41.45	0.027
9:10	590.78	29.39	49.29	43.59	31.13	41.63	42.37	0.037
9:15	607.21	29.50	50.99	45.20	31.32	42.41	43.21	0.046
9:20	616.93	30.00	52.39	46.39	31.69	43.02	43.84	0.054
9:25	641.41	30.19	52.49	47.29	31.85	44.35	45.01	0.057
9:30	655.27	31.09	54.39	48.29	31.99	45.18	45.97	0.060
9:35	671.47	31.09	55.40	49.29	32.39	46.37	47.08	0.070
9:40	689.13	31.19	54.79	49.69	32.70	47.15	47.75	0.076
9:45	713.27	30.48	55.19	50.09	32.86	48.67	49.01	0.082
9:50	731.93	30.90	54.69	51.09	33.02	49.84	50.09	0.087
9:55	741.99	31.09	56.48	51.59	33.16	50.20	50.56	0.102
10:00	756.63	31.09	56.38	52.60	33.32	50.93	51.26	0.109
10:05	768.25	30.90	58.18	52.78	33.29	51.02	51.93	0.098
10:10	787.69	31.48	58.99	53.79	34.03	52.62	53.15	0.113
10:15	792.95	31.59	60.08	54.19	34.16	52.94	53.56	0.122
10:20	806.58	31.19	59.39	54.29	34.05	53.76	54.20	0.132
10:25	819.32	31.19	59.29	54.58	34.26	54.61	54.93	0.139
10:30	835.53	31.48	59.39	54.79	34.56	55.27	55.76	0.169
10:35	843.57	31.29	58.09	55.40	34.69	56.18	56.34	0.197
10:40	857.54	31.40	58.68	55.69	34.69	56.64	56.78	0.213
10:45	867.49	31.40	60.29	55.98	35.09	57.12	57.61	0.290
10:50	876.87	32.99	62.88	56.80	35.59	57.02	57.84	0.341
10:55	886.26	33.59	63.20	57.20	35.86	57.48	58.41	0.384
11:00	898.55	32.78	60.39	57.59	35.96	58.54	58.96	0.408
11:05	905.82	32.70	57.28	57.59	36.12	59.31	59.32	0.450
11:10	912.97	32.99	58.89	57.89	36.29	59.68	59.84	0.450
11:15	921.35	32.88	59.10	58.28	36.39	59.93	60.18	0.470
11:20	928.17	33.09	59.50	58.68	36.45	60.33	60.50	0.536
11:25	938.12	32.59	57.59	58.89	36.69	61.01	60.69	0.531
11:30	940.91	32.70	58.89	58.99	36.62	61.20	61.22	0.600

ภาคผนวก ง. 2 ผลการทดสอบที่ 0.0097 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 11 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	947.06	33.28	58.68	59.68	36.79	61.38	61.35	0.646
11:40	952.98	33.49	58.39	60.08	37.26	61.71	61.67	0.659
11:45	955.10	34.28	62.09	60.08	37.56	61.28	61.70	0.707
11:50	963.37	34.39	63.59	60.08	37.62	61.46	61.93	0.701
11:55	965.05	34.18	61.29	60.58	37.80	61.98	62.11	0.681
12:00	965.94	33.99	62.59	60.90	38.12	62.00	62.47	0.709
12:05	970.64	34.49	62.48	61.19	38.26	61.97	62.50	0.747
12:10	971.19	34.60	63.38	61.69	38.49	61.78	62.15	0.764
12:15	969.52	35.39	64.20	61.69	38.95	61.76	62.32	0.766
12:20	966.72	35.89	62.88	60.90	38.95	61.71	62.09	0.768
12:25	971.19	34.28	60.08	61.29	38.82	62.42	62.47	0.747
12:30	993.10	34.10	64.60	61.40	38.90	63.19	63.62	0.760
12:35	999.69	34.79	64.89	61.29	39.15	63.41	63.90	0.762
12:40	995.00	35.89	64.09	62.48	39.48	62.80	63.61	0.796
12:45	984.83	34.68	64.49	62.88	38.56	62.38	62.85	0.794
12:50	971.64	34.28	67.08	62.19	37.89	61.18	62.15	0.780
12:55	998.91	34.68	67.98	62.38	38.15	62.38	63.52	0.812
13:00	989.75	35.79	69.88	62.38	38.86	61.77	63.11	0.764
13:05	957.90	36.90	71.49	62.59	39.25	59.75	61.45	0.733
13:10	962.14	36.08	71.39	62.59	39.19	60.00	61.65	0.605
13:15	962.93	36.48	70.60	62.80	39.38	60.14	61.81	0.729
13:20	936.89	36.98	71.58	62.88	39.38	58.81	60.43	0.611
13:25	961.25	36.90	69.78	62.48	39.89	60.21	61.73	0.690
13:30	947.50	36.58	68.88	63.38	39.93	59.86	60.92	0.707
13:35	921.46	35.79	69.20	62.99	39.92	58.10	59.32	0.682
13:40	925.93	35.89	67.08	60.98	40.22	39.39	39.58	0.612
13:45	972.76	34.99	63.78	59.58	40.12	62.29	62.77	0.470
13:50	902.02	35.50	64.09	58.39	40.25	58.31	58.98	0.442
13:55	882.02	36.40	66.39	59.68	40.29	56.53	57.64	0.507
14:00	849.27	36.79	67.48	60.98	40.65	54.45	55.61	0.529
14:05	829.49	37.48	66.69	61.48	40.79	53.28	54.51	0.549

ภาคผนวก ง. 2 ผลการทดสอบที่ 0.0097 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 11 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	849.05	36.79	66.79	60.79	40.59	54.36	55.54	0.516
14:15	842.01	36.79	66.08	61.48	40.75	54.30	55.43	0.533
14:20	826.70	36.90	67.19	60.90	40.92	53.40	54.66	0.571
14:25	781.10	37.48	67.29	60.58	41.02	50.64	51.88	0.539
14:30	747.91	36.90	65.58	60.00	41.29	48.92	50.09	0.488
14:35	728.02	37.29	65.18	59.39	41.09	47.78	49.03	0.448
14:40	704.55	36.79	63.78	58.60	41.42	46.71	47.73	0.396
14:45	693.26	36.08	61.40	57.49	41.19	46.33	47.18	0.364
14:50	678.51	35.29	61.59	57.09	41.39	45.49	46.23	0.332
14:55	661.86	34.39	58.68	55.88	41.45	45.00	45.48	0.305
15:00	648.90	34.60	59.29	55.69	41.52	44.24	44.68	0.277
15:05	634.59	35.79	59.10	55.59	41.86	42.91	43.53	0.269
15:10	614.03	35.58	58.68	54.90	41.96	42.14	42.64	0.250
15:15	595.37	35.29	58.28	54.90	41.79	41.38	41.63	0.235
15:20	568.88	36.19	58.89	54.29	41.92	39.00	39.65	0.226
15:25	550.33	36.58	58.39	54.58	41.95	37.88	38.63	0.217
15:30	528.76	36.08	57.49	54.29	42.00	36.52	37.24	0.200
15:35	509.32	34.49	54.90	52.89	41.96	35.78	36.18	0.164
15:40	483.39	34.10	52.68	52.18	41.86	34.43	34.63	0.139
15:45	468.30	34.28	51.49	51.00	41.92	33.51	33.79	0.122
15:50	444.83	34.60	52.28	51.59	41.86	31.92	32.24	0.117
15:55	419.02	34.60	51.89	50.99	41.73	29.91	30.59	0.106
16:00	394.99	34.68	50.49	50.00	41.79	28.69	29.09	0.085

ภาคผนวก ง. 3 ผลการทดสอบที่ 0.0114 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 5 11 2017

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	526.08	24.79	41.29	39.38	28.52	40.51	40.62	0.021
9:05	551.56	24.98	43.29	40.60	28.52	41.42	41.63	0.025
9:10	572.23	25.48	43.98	41.68	29.09	42.63	42.88	0.030
9:15	589.78	25.19	43.69	42.29	29.12	43.89	44.07	0.033
9:20	609.11	25.88	45.09	42.98	29.36	45.09	45.33	0.039
9:25	619.73	26.19	46.28	44.19	29.52	46.29	46.49	0.046
9:30	641.86	26.30	46.28	44.69	29.69	47.29	47.47	0.056
9:35	666.11	26.38	47.18	45.20	29.85	48.21	48.39	0.064
9:40	678.85	27.09	47.29	45.99	30.22	49.49	49.62	0.072
9:45	702.20	26.88	47.50	46.39	30.33	50.31	50.34	0.076
9:50	717.96	27.20	48.90	47.10	30.66	51.15	51.20	0.091
9:55	730.70	27.78	50.38	47.89	30.99	51.70	51.99	0.107
10:00	743.89	27.99	50.88	48.58	31.29	52.73	53.01	0.121
10:05	761.10	28.10	51.28	48.90	31.56	53.63	53.91	0.153
10:10	776.41	28.39	51.99	49.48	31.68	54.42	54.54	0.161
10:15	788.25	28.79	51.70	50.19	31.75	54.89	55.14	0.176
10:20	798.76	29.00	53.58	50.80	32.26	55.92	56.22	0.186
10:25	819.10	27.89	51.20	50.09	31.48	57.22	57.15	0.086
10:30	831.39	28.49	51.70	50.80	31.55	57.77	57.40	0.046
10:35	839.77	28.68	52.09	51.49	31.62	58.26	57.83	0.046
10:40	847.82	28.68	53.39	52.18	31.79	58.94	58.24	0.051
10:45	856.31	29.50	55.48	54.19	32.69	58.88	58.58	0.094
10:50	869.28	30.00	56.30	54.79	33.25	58.97	59.20	0.352
10:55	881.79	29.50	56.30	54.19	33.12	59.92	59.99	0.371
11:00	881.57	29.68	56.48	54.08	33.42	60.29	60.54	0.312
11:05	897.55	30.08	57.38	54.29	33.66	60.69	61.07	0.340
11:10	905.15	30.08	57.59	54.90	33.89	60.91	61.40	0.376
11:15	909.17	30.90	58.39	55.19	33.93	61.14	61.88	0.410
11:20	917.66	30.40	57.49	54.79	34.16	61.81	62.21	0.403
11:25	927.83	30.79	58.49	55.69	34.56	62.05	62.61	0.414
11:30	934.87	30.79	59.39	56.09	34.63	63.51	64.28	0.430

ภาคผนวก ง. 3 ผลการทดสอบที่ 0.0114 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 5 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	939.12	31.19	59.50	55.40	34.63	64.19	64.81	0.389
11:40	942.59	31.09	59.89	56.30	34.86	62.81	63.65	0.429
11:45	946.16	31.19	60.69	56.69	34.98	62.50	63.26	0.446
11:50	949.63	31.48	60.00	56.48	35.29	62.46	63.05	0.469
11:55	947.84	31.59	60.90	56.69	35.18	62.50	63.22	0.457
12:00	956.11	31.29	60.08	56.48	34.95	62.62	63.28	0.442
12:05	956.22	31.29	59.58	57.09	35.12	63.13	63.55	0.420
12:10	957.45	31.88	60.90	57.70	35.39	62.65	63.16	0.429
12:15	952.76	32.38	62.80	58.18	35.66	62.32	62.88	0.422
12:20	956.22	32.30	62.80	57.78	35.49	64.03	64.89	0.404
12:25	956.00	31.80	62.48	58.60	35.68	64.37	64.74	0.419
12:30	950.86	32.59	63.20	59.18	36.19	63.80	64.09	0.439
12:35	950.19	33.28	64.20	59.18	36.63	61.72	62.13	0.401
12:40	942.59	32.99	60.08	58.99	36.56	61.85	62.00	0.378
12:45	943.14	32.59	59.50	58.68	36.62	61.81	61.91	0.401
12:50	937.00	33.28	60.79	59.10	36.92	61.73	61.98	0.390
12:55	936.22	32.49	58.89	58.60	36.96	61.07	61.45	0.399
13:00	926.16	32.59	59.79	58.39	37.09	60.58	60.82	0.385
13:05	922.13	32.70	58.78	58.89	37.43	60.66	60.58	0.373
13:10	908.84	32.19	57.49	58.28	37.15	60.48	60.18	0.363
13:15	907.72	32.99	60.19	58.68	37.52	59.47	59.62	0.363
13:20	902.47	33.78	61.79	58.68	37.76	58.75	59.22	0.351
13:25	894.31	33.28	61.79	58.39	37.68	58.41	58.78	0.274
13:30	877.55	32.99	60.50	58.09	38.05	57.85	58.28	0.261
13:35	864.13	32.19	59.29	57.89	37.66	57.91	58.07	0.305
13:40	855.42	32.19	58.89	57.89	38.09	56.89	57.07	0.243
13:45	842.12	32.38	57.70	57.49	38.15	56.46	56.55	0.288
13:50	839.44	32.78	54.58	57.20	38.28	56.31	56.14	0.271
13:55	823.57	32.70	56.19	56.99	38.63	55.29	55.24	0.266
14:00	812.73	32.49	57.38	56.88	38.32	54.49	54.64	0.255
14:05	798.65	32.49	56.48	56.30	38.52	53.88	54.03	0.285

ภาคผนวก ง. 3 ผลการทดสอบที่ 0.0114 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 5 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	787.25	32.49	54.50	56.09	38.46	53.67	53.32	0.273
14:15	764.23	32.49	55.59	55.40	38.33	52.33	52.43	0.255
14:20	760.76	33.49	58.60	56.19	38.69	51.08	51.50	0.253
14:25	732.49	32.88	55.88	55.29	38.56	50.41	50.69	0.222
14:30	727.46	33.39	56.38	55.29	38.88	49.18	49.65	0.216
14:35	692.48	32.49	54.19	54.69	38.72	48.41	48.42	0.198
14:40	702.20	33.39	52.68	54.90	39.15	47.56	47.31	0.201
14:45	670.58	33.28	53.18	54.50	39.15	46.55	46.45	0.191
14:50	636.04	33.09	51.49	54.19	39.12	45.86	45.72	0.180
14:55	619.17	32.78	50.69	53.58	39.29	44.79	44.69	0.170
15:00	632.36	32.38	49.69	53.10	39.09	43.85	43.52	0.140
15:05	609.34	32.99	50.30	52.78	39.66	42.21	41.99	0.136
15:10	578.38	33.20	50.09	52.89	39.45	40.65	40.51	0.117
15:15	542.95	33.09	49.08	52.39	39.66	40.00	39.79	0.107
15:20	536.81	33.09	47.68	51.49	39.75	38.61	38.46	0.099
15:25	512.33	32.38	46.89	51.28	39.70	37.64	36.93	0.086
15:30	496.80	32.38	47.58	50.88	39.66	35.69	35.60	0.078
15:35	472.44	31.88	46.49	50.19	39.52	35.02	34.80	0.067
15:40	460.03	32.30	45.28	49.40	39.52	33.15	32.38	0.059
15:45	438.24	32.30	44.09	48.79	39.79	32.08	31.83	0.052
15:50	424.16	32.49	43.88	48.90	39.69	30.80	30.73	0.046
15:55	394.66	32.19	42.40	47.58	39.80	29.06	28.89	0.039
16:00	376.44	31.48	41.29	46.79	39.63	27.68	27.33	0.034

ภาคผนวก ง. 4 ผลการทดสอบที่ 0.0125 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 19 11 2017

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	513.34	29.08	40.28	35.58	32.02	37.77	38.46	0.018
9:05	539.38	28.79	43.40	39.28	31.89	38.73	39.39	0.043
9:10	564.63	28.79	45.89	41.89	31.75	40.01	40.66	0.064
9:15	581.17	29.08	47.79	43.88	31.69	40.86	41.51	0.086
9:20	599.84	29.18	49.69	45.38	31.65	41.81	42.42	0.103
9:25	617.72	29.68	51.70	46.79	31.93	42.53	43.51	0.122
9:30	635.26	30.19	52.68	48.19	32.29	43.39	44.18	0.139
9:35	653.59	30.58	53.18	49.08	32.39	44.56	45.41	0.150
9:40	672.70	30.19	51.89	49.80	32.53	45.85	46.24	0.158
9:45	688.46	29.68	53.58	50.19	32.25	46.81	47.42	0.075
9:50	707.01	30.40	54.39	50.99	32.68	47.73	48.41	0.183
9:55	728.80	30.19	55.19	51.59	32.79	48.83	49.45	0.189
10:00	744.56	30.19	56.30	52.28	32.82	49.47	50.07	0.204
10:05	745.23	30.79	57.28	52.78	33.09	49.23	49.89	0.220
10:10	739.08	31.09	57.89	53.39	33.35	50.63	51.23	0.230
10:15	730.03	31.48	56.59	53.58	33.82	49.19	49.69	0.225
10:20	752.83	31.48	57.78	53.58	33.75	49.30	49.92	0.229
10:25	811.27	31.98	58.99	54.00	33.89	52.95	53.62	0.250
10:30	822.45	31.80	60.50	55.29	34.19	53.54	54.34	0.287
10:35	845.70	32.30	61.29	55.80	34.49	54.66	55.34	0.290
10:40	858.44	32.49	62.59	56.69	34.69	54.86	55.87	0.310
10:45	863.46	32.70	64.28	57.09	34.65	55.03	56.34	0.329
10:50	875.42	33.39	64.89	57.20	34.86	55.45	56.73	0.347
10:55	884.36	33.28	62.99	57.78	35.02	56.29	57.32	0.347
11:00	890.51	33.59	64.99	58.18	35.19	56.23	57.54	0.362
11:05	900.34	33.09	63.38	58.28	35.29	56.94	57.81	0.373
11:10	902.58	33.39	64.49	58.68	35.52	57.30	58.19	0.369
11:15	905.37	33.99	65.68	59.10	35.89	57.27	58.47	0.395
11:20	906.71	33.78	64.99	58.99	35.85	57.02	58.22	0.393
11:25	913.42	33.78	64.99	59.39	36.12	57.48	58.64	0.395
11:30	929.40	33.99	65.79	59.89	36.32	58.24	59.30	0.397

ภาคผนวก ง. 4 ผลการทดสอบที่ 0.0125 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 19 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	936.33	33.78	63.89	60.19	36.49	58.97	59.81	0.404
11:40	940.24	34.49	65.18	60.79	36.95	59.03	60.16	0.409
11:45	943.59	35.18	66.98	61.19	36.92	58.76	60.01	0.432
11:50	945.72	35.18	67.40	61.40	37.15	59.13	60.13	0.431
11:55	945.94	33.89	64.68	60.50	36.99	59.71	60.41	0.422
12:00	948.06	34.39	65.49	61.29	37.32	59.38	60.34	0.429
12:05	950.63	34.28	64.39	61.40	37.45	59.39	60.27	0.456
12:10	948.29	35.58	67.69	61.98	37.96	59.02	60.09	0.456
12:15	955.10	35.50	64.78	62.38	37.59	59.49	60.09	0.457
12:20	951.75	34.49	62.09	61.79	37.76	60.24	60.34	0.445
12:25	948.06	35.50	66.50	62.38	38.28	59.37	60.16	0.458
12:30	946.61	35.89	65.79	62.19	38.28	59.37	60.13	0.450
12:35	940.46	35.58	66.00	61.98	38.42	59.32	60.00	0.445
12:40	941.69	35.68	64.99	62.19	38.52	59.02	59.94	0.445
12:45	935.10	36.19	66.58	62.19	38.95	58.82	59.69	0.428
12:50	935.10	37.19	68.80	62.80	39.26	58.35	59.62	0.432
12:55	935.32	37.19	69.38	62.38	39.38	58.14	59.42	0.416
13:00	931.30	36.98	69.20	62.69	39.69	58.24	59.50	0.416
13:05	924.48	36.69	68.69	62.59	39.61	58.07	59.04	0.410
13:10	882.69	37.59	68.88	62.30	40.05	55.71	57.08	0.400
13:15	909.17	37.59	68.80	62.19	40.09	56.69	58.01	0.385
13:20	900.90	37.48	68.99	62.48	40.16	56.54	57.93	0.378
13:25	906.60	36.69	66.39	62.38	40.09	57.04	57.92	0.370
13:30	904.70	37.19	69.20	62.48	40.56	56.85	58.00	0.371
13:35	894.08	37.48	69.38	62.88	40.59	56.11	57.53	0.371
13:40	853.29	37.98	68.99	62.99	40.90	48.86	49.17	0.290
13:45	736.06	36.58	63.99	60.58	40.69	54.18	55.45	0.253
13:50	749.48	36.40	63.59	60.39	40.76	49.45	50.14	0.249
13:55	690.92	36.98	62.80	59.29	41.02	46.87	47.54	0.253
14:00	741.43	37.48	64.68	59.29	41.32	48.89	49.92	0.249
14:05	793.39	37.40	65.18	59.29	41.29	51.56	52.43	0.238

ภาคผนวก ง. 4 ผลการทดสอบที่ 0.0125 kg/s ปริมาณน้ำ 100 L วันที่ 19 11 2017 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	805.35	37.98	66.50	60.00	41.45	52.29	53.36	0.249
14:15	800.88	37.29	63.78	61.19	41.50	52.04	52.86	0.252
14:20	777.08	36.29	62.59	60.58	41.49	51.15	51.53	0.246
14:25	718.85	36.90	63.70	60.50	41.63	48.15	48.79	0.238
14:30	727.46	37.48	64.49	60.00	41.82	47.33	48.35	0.226
14:35	714.16	37.59	64.20	59.50	41.86	47.18	48.06	0.208
14:40	693.60	37.48	63.99	59.18	41.86	45.94	46.82	0.196
14:45	675.27	37.40	64.20	58.60	42.10	44.98	45.93	0.181
14:50	655.27	37.80	63.70	58.99	41.95	43.78	44.81	0.173
14:55	639.84	37.69	62.48	58.39	42.35	42.97	43.83	0.158
15:00	620.40	37.59	61.79	58.09	42.42	42.11	43.09	0.146
15:05	593.24	37.59	61.29	57.09	42.33	40.24	41.19	0.137
15:10	573.02	37.88	60.79	57.78	42.46	39.00	39.88	0.123
15:15	548.54	37.80	59.89	56.30	42.55	37.68	38.44	0.112
15:20	531.00	37.80	59.68	55.19	42.59	36.65	37.38	0.100
15:25	507.97	36.58	57.70	54.58	42.26	35.72	36.42	0.089
15:30	491.43	36.90	57.09	54.29	42.65	34.65	35.21	0.079
15:35	470.87	36.19	55.69	53.79	42.36	33.33	33.69	0.067
15:40	463.05	36.29	55.19	53.50	42.92	32.77	33.19	0.062
15:45	439.36	36.79	54.08	53.50	42.79	31.27	31.81	0.058
15:50	428.96	36.29	53.39	51.99	42.69	30.60	30.84	0.050
15:55	343.81	35.79	51.99	51.09	42.73	23.74	23.96	0.037
16:00	136.28	35.58	49.69	49.69	43.02	14.73	14.86	0.026

ภาคผนวก ง. 5 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 50 L วันที่ 15 03 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	329.73	24.19	35.89	30.58	26.42	26.44	26.67	0.007
9:05	354.09	24.58	38.09	31.98	26.62	27.87	28.36	0.012
9:10	368.62	24.98	39.49	33.28	26.66	28.69	29.24	0.014
9:15	393.31	24.79	40.39	34.39	26.89	30.20	30.78	0.017
9:20	411.87	25.29	41.58	35.18	26.89	31.30	31.91	0.020
9:25	438.58	25.40	43.19	36.19	27.16	32.78	33.41	0.023
9:30	455.67	25.69	43.80	37.19	27.36	33.89	34.59	0.028
9:35	482.72	26.19	45.09	38.09	27.25	35.38	36.15	0.031
9:40	498.70	26.49	46.49	38.78	27.42	36.15	36.97	0.036
9:45	519.26	26.70	47.10	39.59	27.72	37.49	38.24	0.040
9:50	538.60	27.20	48.00	40.18	27.82	38.56	39.45	0.044
9:55	560.39	27.70	49.59	40.79	27.99	39.64	40.57	0.052
10:00	573.46	28.18	50.38	41.89	28.23	40.44	41.37	0.056
10:05	593.02	28.28	51.49	42.29	28.56	41.50	42.50	0.061
10:10	613.81	28.39	52.09	42.79	28.83	42.78	43.75	0.067
10:15	633.36	29.00	52.99	43.69	28.95	43.92	44.89	0.077
10:20	647.00	29.39	53.68	44.59	29.25	44.64	45.73	0.085
10:25	661.52	30.08	54.98	45.09	29.52	45.28	46.42	0.092
10:30	680.19	30.40	55.98	45.78	29.82	46.14	47.32	0.100
10:35	690.58	30.19	56.48	46.28	29.96	46.85	48.05	0.103
10:40	704.66	29.58	57.09	46.68	30.39	47.66	48.85	0.106
10:45	723.66	29.89	56.80	46.89	30.69	48.98	50.01	0.107
10:50	737.74	30.40	58.60	47.89	30.92	49.47	50.60	0.116
10:55	747.69	31.09	59.18	48.48	31.29	49.79	51.14	0.126
11:00	759.76	31.59	60.50	48.98	31.52	50.38	51.82	0.136
11:05	767.24	32.19	60.90	48.98	31.75	50.54	52.01	0.145
11:10	777.41	31.48	61.29	49.80	32.08	51.16	52.58	0.164
11:15	792.39	31.88	61.88	50.19	32.28	51.93	53.40	0.168
11:20	792.95	31.80	62.38	50.49	32.56	51.95	53.37	0.179
11:25	807.70	31.98	62.19	50.88	32.82	52.73	54.11	0.189
11:30	804.46	31.59	62.30	50.99	33.02	52.74	54.01	0.182

ภาคผนวก ง. 5 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 50 L วันที่ 15 03 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	809.15	32.19	62.38	51.28	33.25	52.89	54.20	0.183
11:40	825.69	32.30	61.98	51.49	33.41	53.91	55.06	0.182
11:45	830.72	32.59	62.38	52.28	33.59	53.96	55.19	0.200
11:50	828.82	32.88	63.20	52.60	33.72	53.64	54.93	0.206
11:55	840.55	32.19	63.28	52.78	33.99	54.56	55.82	0.203
12:00	836.98	33.28	63.99	53.10	34.09	54.02	55.50	0.210
12:05	839.77	33.39	64.99	53.50	34.33	53.96	55.53	0.210
12:10	844.02	33.99	65.49	53.79	34.36	54.00	55.72	0.213
12:15	836.75	33.70	65.79	53.79	34.76	53.72	55.26	0.221
12:20	849.49	33.99	65.68	53.79	34.93	54.43	56.01	0.223
12:25	857.76	33.99	64.60	54.08	35.09	55.10	56.53	0.218
12:30	855.31	34.79	66.18	54.69	35.41	54.63	56.15	0.224
12:35	860.11	34.79	66.50	54.69	35.69	54.85	56.42	0.226
12:40	852.74	34.49	65.39	54.79	35.98	54.86	56.14	0.218
12:45	855.19	34.39	66.00	54.98	36.16	55.16	56.30	0.226
12:50	850.95	35.29	66.08	55.48	36.46	54.63	55.96	0.224
12:55	855.86	35.10	66.18	55.59	36.52	54.86	56.22	0.210
13:00	846.48	34.99	66.58	55.69	36.89	54.40	55.77	0.190
13:05	848.15	35.10	66.18	55.80	37.05	54.48	55.71	0.203
13:10	841.67	35.58	66.98	56.09	37.36	53.96	55.33	0.201
13:15	841.45	35.39	66.50	56.09	37.59	54.22	55.40	0.201
13:20	841.78	34.99	66.08	56.48	37.78	54.25	55.33	0.197
13:25	832.73	35.79	66.39	56.38	38.12	53.58	54.83	0.190
13:30	837.20	35.50	65.39	56.38	38.28	54.10	55.23	0.185
13:35	819.54	35.79	64.39	56.09	38.56	53.38	54.29	0.182
13:40	807.14	35.79	64.20	56.09	38.89	52.99	53.72	0.172
13:45	805.35	35.68	62.59	55.80	38.88	52.96	53.74	0.167
13:50	797.42	35.18	63.49	55.80	39.19	52.54	53.25	0.165
13:55	764.23	35.89	63.59	55.40	39.36	50.49	51.35	0.158
14:00	766.01	35.89	64.28	54.98	39.45	50.35	51.52	0.147
14:05	732.15	35.89	63.78	55.08	39.59	48.44	49.53	0.137

ภาคผนวก ง. 5 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s ปริมาณน้ำ 50 L วันที่ 15 03 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	720.08	36.29	62.59	54.98	39.79	48.05	48.91	0.130
14:15	717.51	36.29	63.28	54.69	39.99	47.96	48.94	0.133
14:20	705.00	36.90	62.80	54.98	40.12	47.13	48.12	0.126
14:25	698.85	36.08	62.09	54.98	40.12	46.93	47.83	0.117
14:30	679.18	36.98	63.28	54.69	40.35	45.67	46.77	0.114
14:35	653.25	37.59	63.28	54.58	40.49	43.94	45.12	0.103
14:40	627.33	37.19	62.80	54.19	41.02	42.53	43.78	0.094
14:45	620.51	36.40	58.99	54.39	41.33	42.62	43.48	0.084
14:50	605.31	36.48	56.80	53.89	41.35	42.12	42.62	0.081
14:55	599.61	36.58	57.78	53.89	41.55	41.56	42.45	0.078
15:00	566.87	36.29	56.59	53.39	41.75	39.71	40.37	0.071
15:05	586.87	35.79	56.09	53.29	41.75	41.30	41.79	0.067
15:10	576.93	35.79	56.80	53.29	41.89	40.54	41.20	0.067
15:15	549.10	35.79	56.48	52.99	41.89	38.89	39.12	0.061
15:20	515.35	35.89	54.69	52.49	42.02	36.93	37.40	0.054
15:25	494.68	35.89	54.90	51.89	42.03	35.64	36.25	0.048
15:30	475.68	36.69	55.40	51.89	42.12	34.41	35.05	0.046
15:35	464.95	36.48	53.89	51.38	42.19	33.70	34.24	0.041
15:40	440.36	36.00	53.58	50.99	42.36	32.41	32.90	0.037
15:45	423.38	36.00	52.99	50.59	42.40	31.38	31.85	0.032
15:50	393.65	35.79	51.99	49.98	42.29	29.58	30.07	0.027
15:55	379.68	35.29	51.49	49.40	42.62	28.84	29.21	0.023
16:00	359.23	35.39	50.59	48.90	42.59	27.59	27.98	0.020

ภาคผนวก ง. 6 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 03 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	385.05	24.40	40.60	30.40	25.55	29.64	30.40	0.00
9:05	408.96	25.09	41.68	32.59	25.62	30.98	31.68	0.01
9:10	430.08	25.40	43.48	34.79	25.92	32.25	32.86	0.01
9:15	457.01	26.19	44.80	36.40	26.12	33.70	34.44	0.01
9:20	476.68	26.19	45.70	37.88	26.16	34.93	35.32	0.02
9:25	498.92	26.38	46.49	38.38	26.28	36.43	37.00	0.02
9:30	519.82	26.88	47.79	39.49	26.52	37.70	38.30	0.03
9:35	549.77	27.09	49.08	40.68	26.56	39.14	39.92	0.04
9:40	566.98	27.59	50.19	41.29	26.82	40.24	40.79	0.03
9:45	583.97	27.99	51.20	42.19	26.89	41.24	41.78	0.04
9:50	604.08	27.99	52.18	42.69	27.15	42.29	42.65	0.05
9:55	623.86	28.28	52.28	43.48	27.18	43.62	43.87	0.05
10:00	642.75	28.39	53.39	43.98	27.25	44.66	44.96	0.05
10:05	661.97	28.49	53.79	44.80	27.46	45.81	46.13	0.06
10:10	679.96	28.39	54.58	45.09	27.69	47.00	47.73	0.07
10:15	694.38	28.49	54.19	45.28	27.86	47.97	48.40	0.07
10:20	712.48	28.89	54.98	45.59	28.05	49.02	49.14	0.08
10:25	720.53	29.18	56.09	46.39	28.29	49.13	49.53	0.11
10:30	739.86	29.68	57.89	47.10	28.56	50.12	50.78	0.12
10:35	754.73	30.19	58.99	47.89	28.96	50.66	51.74	0.14
10:40	767.02	30.98	60.29	48.29	29.11	51.00	52.15	0.15
10:45	786.47	30.00	58.39	48.48	29.26	52.88	53.18	0.15
10:50	795.96	30.19	59.79	48.90	29.45	53.33	54.05	0.16
10:55	813.17	30.90	60.79	49.48	29.55	53.75	54.90	0.16
11:00	820.44	31.48	61.69	50.09	29.86	54.06	55.28	0.18
11:05	829.94	30.79	61.40	50.30	29.96	54.89	55.47	0.18
11:10	842.23	31.19	61.69	50.80	30.03	55.39	56.11	0.24
11:15	849.94	31.80	62.19	50.99	30.45	55.84	56.66	0.23
11:20	868.16	31.29	62.48	51.20	30.56	56.68	57.31	0.23
11:25	876.54	30.90	62.59	51.70	30.79	57.41	58.17	0.24
11:30	878.33	31.80	64.20	51.89	30.59	57.06	57.97	0.27

ภาคผนวก ง. 6 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 03 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	891.63	32.70	64.78	52.60	30.99	57.24	58.24	0.27
11:40	899.90	32.49	64.99	52.78	31.29	58.06	59.21	0.28
11:45	907.27	32.78	65.58	53.10	31.52	58.19	59.42	0.28
11:50	910.74	32.59	66.08	53.18	31.72	58.53	60.11	0.29
11:55	914.31	32.38	66.18	53.39	31.92	58.78	59.88	0.30
12:00	924.71	33.09	67.08	53.79	32.05	59.13	60.28	0.30
12:05	927.05	33.39	66.50	54.50	32.33	59.40	60.56	0.31
12:10	935.99	32.99	66.39	54.79	32.36	59.99	60.99	0.31
12:15	931.30	32.59	66.18	54.69	32.79	59.84	60.63	0.30
12:20	931.75	32.99	66.39	54.79	32.82	59.38	60.53	0.31
12:25	918.34	33.39	67.69	54.98	33.15	58.72	59.90	0.30
12:30	927.50	34.18	67.98	54.98	33.49	59.20	61.16	0.30
12:35	929.62	34.28	67.79	54.90	33.32	59.06	60.42	0.37
12:40	920.91	34.49	69.78	55.40	33.62	58.47	60.29	0.38
12:45	919.56	35.10	68.99	55.48	33.99	58.61	60.58	0.39
12:50	924.93	34.99	67.69	55.19	34.22	59.20	60.88	0.38
12:55	929.18	35.39	68.38	55.69	34.26	59.26	60.87	0.39
13:00	922.81	35.39	68.59	55.40	34.55	59.08	60.42	0.38
13:05	918.78	35.50	68.99	55.59	34.76	58.77	60.71	0.38
13:10	921.69	35.79	68.59	55.69	34.89	58.91	60.93	0.37
13:15	907.94	35.10	68.59	55.88	35.22	58.12	60.02	0.37
13:20	888.61	35.29	68.38	56.09	35.46	57.24	59.08	0.37
13:25	888.16	36.19	69.38	55.69	35.68	57.02	59.01	0.39
13:30	882.24	35.79	68.99	55.59	35.85	57.00	58.92	0.38
13:35	844.47	36.90	69.49	55.88	36.05	54.70	56.81	0.37
13:40	861.56	35.89	67.98	55.40	35.99	55.90	57.73	0.36
13:45	860.34	36.48	68.48	55.40	36.15	56.10	58.00	0.36
13:50	864.58	36.29	67.79	55.40	36.49	56.27	58.17	0.34
13:55	848.71	37.19	68.59	55.48	36.79	55.01	57.11	0.35
14:00	846.14	36.48	67.88	55.69	37.22	55.26	57.30	0.33
14:05	827.03	36.19	68.38	55.40	37.45	54.30	56.25	0.33

ภาคผนวก ง. 6 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 03 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	822.67	35.79	66.50	54.98	37.52	54.60	56.32	0.30
14:15	799.99	36.58	66.08	54.50	37.73	53.12	54.89	0.29
14:20	789.15	36.08	66.58	54.19	37.89	52.35	54.24	0.28
14:25	777.97	37.09	65.79	54.58	37.79	51.79	53.81	0.28
14:30	761.10	36.79	65.68	54.58	38.05	51.18	53.09	0.26
14:35	752.60	35.89	64.09	54.08	38.10	51.36	52.89	0.24
14:40	725.78	35.89	63.78	53.18	38.26	49.60	51.13	0.23
14:45	696.28	35.89	62.38	52.99	38.58	47.90	49.50	0.22
14:50	668.90	36.08	61.59	51.99	38.75	46.48	48.07	0.21
14:55	651.80	35.39	59.50	51.09	38.49	45.68	47.06	0.18
15:00	644.54	35.50	60.19	50.59	38.66	45.20	46.78	0.17
15:05	612.46	35.68	59.10	50.59	38.62	43.17	44.73	0.17
15:10	596.26	36.08	58.60	50.49	38.59	42.53	44.00	0.16
15:15	579.83	35.29	56.99	49.80	38.49	41.41	42.67	0.14
15:20	562.73	35.39	57.89	49.69	38.56	40.36	41.77	0.13
15:25	537.70	35.39	56.30	49.08	38.60	39.07	40.30	0.12
15:30	513.12	35.29	55.29	48.19	38.63	37.84	38.90	0.11
15:35	496.91	35.68	54.29	48.19	38.76	36.76	37.83	0.10
15:40	482.27	35.39	54.19	47.58	38.86	35.85	36.93	0.10
15:45	468.64	35.10	53.79	47.50	38.82	34.94	36.02	0.08
15:50	455.67	35.68	54.00	47.29	38.92	34.28	35.40	0.08
15:55	424.05	36.48	54.50	47.18	38.99	32.29	33.46	0.08
16:00	393.65	36.40	53.58	46.68	39.02	30.21	31.40	0.07

ภาคผนวก ง. 7 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 150 L วันที่ 14 03 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	297.21	24.00	36.00	29.18	25.76	24.62	25.22	0.004
9:05	322.80	24.48	37.80	30.79	25.85	26.18	26.80	0.007
9:10	342.24	24.58	39.20	31.98	25.80	27.36	27.97	0.009
9:15	362.81	24.90	39.89	33.59	25.96	28.56	29.19	0.007
9:20	375.99	24.90	41.29	34.60	25.96	29.44	30.06	0.010
9:25	398.90	24.98	42.29	35.50	25.89	30.71	31.31	0.012
9:30	417.68	25.48	42.98	36.40	26.02	31.92	32.53	0.015
9:35	442.26	25.80	44.59	37.48	26.05	33.18	33.86	0.020
9:40	467.30	25.98	46.10	38.30	26.09	34.69	35.41	0.025
9:45	483.05	26.38	47.18	39.28	26.19	35.49	36.29	0.029
9:50	499.37	26.99	48.00	40.10	26.12	36.35	37.21	0.034
9:55	514.90	27.78	49.29	40.49	26.26	37.01	38.07	0.042
10:00	539.27	28.39	50.30	41.29	26.33	38.57	39.54	0.044
10:05	555.81	28.18	50.69	41.68	26.42	39.56	40.46	0.048
10:10	576.03	28.18	49.98	42.69	26.49	40.95	41.73	0.052
10:15	599.39	28.49	51.59	43.19	26.58	42.19	43.12	0.058
10:20	610.23	28.79	51.70	43.88	26.93	42.95	43.79	0.061
10:25	632.58	28.39	51.49	43.98	26.99	44.49	45.18	0.071
10:30	651.69	28.79	51.70	44.59	27.02	45.80	46.45	0.072
10:35	664.65	29.18	52.89	45.49	27.16	46.35	47.10	0.087
10:40	680.86	29.29	53.68	46.10	27.26	47.03	47.83	0.090
10:45	699.63	30.00	53.79	46.68	27.42	48.27	49.04	0.097
10:50	716.84	30.00	54.58	47.18	27.39	49.17	49.90	0.102
10:55	729.58	30.08	56.09	47.39	27.69	49.75	50.65	0.110
11:00	742.55	30.19	55.88	48.00	27.75	50.48	51.24	0.115
11:05	759.98	30.19	55.80	48.29	28.09	51.53	52.30	0.121
11:10	775.96	30.48	57.09	48.98	28.19	52.33	53.04	0.127
11:15	785.46	31.09	58.68	49.40	28.22	52.92	53.88	0.134
11:20	794.18	31.98	60.19	49.69	28.22	52.69	53.92	0.144
11:25	804.23	31.48	59.89	50.19	28.62	53.33	54.36	0.190
11:30	805.91	31.48	60.29	50.49	28.88	53.77	54.90	0.206

ภาคผนวก ง. 7 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 150 L วันที่ 14 03 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	806.58	31.19	58.09	50.38	29.06	54.13	54.82	0.198
11:40	818.20	31.80	59.39	50.69	29.16	54.37	55.20	0.209
11:45	827.59	31.48	59.58	50.49	29.20	55.07	55.83	0.211
11:50	834.63	31.98	59.39	51.09	29.39	55.48	56.21	0.213
11:55	833.74	32.38	58.99	51.38	29.42	55.25	55.99	0.211
12:00	842.01	31.88	61.29	51.59	29.72	55.67	56.73	0.227
12:05	837.98	32.59	62.80	51.99	29.89	54.88	56.05	0.262
12:10	862.46	32.30	61.29	51.89	29.79	56.28	57.47	0.267
12:15	863.02	32.38	61.79	51.89	30.02	56.73	57.75	0.267
12:20	853.52	32.70	61.48	52.28	30.16	56.55	57.57	0.274
12:25	857.99	32.59	61.29	52.39	30.35	56.09	57.01	0.276
12:30	857.54	33.28	62.69	52.49	30.49	55.86	57.01	0.275
12:35	855.86	32.99	62.88	52.68	30.56	55.79	57.18	0.276
12:40	841.00	33.59	64.20	52.28	30.82	54.66	56.27	0.276
12:45	861.23	32.78	61.59	52.39	30.89	56.97	57.96	0.271
12:50	859.89	33.39	62.19	52.78	30.96	56.40	57.45	0.276
12:55	832.84	33.70	61.48	52.89	31.26	54.78	55.82	0.281
13:00	825.91	33.09	60.29	52.39	31.32	54.46	55.30	0.261
13:05	283.80	33.28	56.88	49.40	31.45	54.87	55.57	0.204
13:10	804.01	33.78	58.60	50.59	31.52	53.80	54.86	0.205
13:15	782.33	33.70	59.50	50.88	31.72	52.49	53.54	0.227
13:20	619.17	34.10	60.08	49.80	31.72	53.88	55.09	0.197
13:25	815.86	34.10	61.19	51.28	32.02	54.23	55.52	0.217
13:30	806.13	34.39	62.88	51.99	32.09	53.51	54.98	0.248
13:35	793.62	34.99	63.20	51.99	32.26	52.63	54.14	0.253
13:40	776.63	34.79	63.20	51.89	32.22	51.49	53.02	0.249
13:45	794.96	35.18	62.38	51.70	32.42	51.70	53.22	0.240
13:50	781.77	35.39	63.99	52.28	32.70	48.98	50.85	0.248
13:55	792.17	35.29	62.59	52.18	32.86	51.01	52.60	0.240
14:00	714.50	35.10	62.48	51.89	33.09	48.27	49.67	0.235
14:05	733.94	35.39	62.48	51.49	33.09	48.89	50.64	0.222

ภาคผนวก ง. 7 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 150 L วันที่ 14 03 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	733.94	35.39	62.48	51.49	33.09	48.89	50.64	0.222
14:15	716.28	36.40	62.48	51.59	33.26	47.95	49.55	0.213
14:20	680.75	36.69	62.99	51.09	33.39	46.24	47.86	0.210
14:25	676.50	36.19	61.69	50.99	33.62	45.46	47.09	0.199
14:30	671.02	36.29	63.20	50.88	33.59	45.32	47.12	0.190
14:35	651.47	36.90	62.99	50.59	33.73	43.98	45.83	0.182
14:40	630.01	36.48	60.58	49.48	33.66	43.08	44.91	0.172
14:45	593.91	36.00	59.68	49.08	33.83	41.09	42.94	0.160
14:50	602.97	36.90	59.79	49.08	33.96	41.38	43.21	0.151
14:55	589.44	36.79	59.89	49.19	34.22	40.84	42.66	0.152
15:00	574.36	36.79	59.50	48.90	34.26	39.89	41.62	0.143
15:05	526.19	36.79	57.89	48.69	34.26	37.42	38.94	0.137
15:10	523.28	36.90	58.18	47.58	34.32	36.63	38.27	0.121
15:15	506.86	36.90	56.48	47.18	34.42	35.85	37.38	0.115
15:20	465.51	36.98	56.30	46.89	34.52	33.28	34.71	0.105
15:25	247.03	35.50	51.28	43.48	34.76	15.87	17.43	0.062
15:30	80.18	35.10	46.18	39.99	34.59	11.35	11.70	0.031
15:35	82.19	34.49	42.98	37.69	34.55	11.73	12.01	0.016
15:40	119.29	34.68	42.79	37.09	34.52	18.48	19.45	0.014
15:45	402.03	35.58	47.50	40.39	34.89	30.71	31.84	0.027
15:50	384.15	36.40	50.49	41.68	35.06	29.17	30.43	0.045
15:55	371.19	37.19	52.09	42.69	35.26	28.43	29.74	0.054
16:00	363.59	37.29	52.60	43.08	35.42	27.64	28.94	0.056

ภาคผนวก ง. 8 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 8 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	271.36	31.88	40.49	31.80	25.59	23.70	24.85	0.001
9:05	408.04	31.88	42.98	34.28	25.74	30.46	31.37	0.002
9:10	547.81	32.30	47.29	38.88	26.00	39.08	40.37	0.012
9:15	549.93	32.59	49.40	40.60	26.24	39.40	40.99	0.001
9:20	538.18	32.49	51.99	42.58	26.34	37.43	39.60	0.002
9:25	318.46	32.49	52.39	42.98	26.58	22.63	24.12	0.003
9:30	552.91	32.59	52.39	43.48	26.58	37.64	38.78	0.004
9:35	574.49	32.30	52.99	44.19	26.74	40.75	41.79	0.004
9:40	413.92	32.88	51.89	43.69	27.29	25.42	26.50	0.002
9:45	614.85	33.20	51.78	43.08	27.19	44.41	45.35	0.001
9:50	495.02	33.09	52.18	43.69	27.49	33.70	34.42	0.001
9:55	562.93	33.39	54.98	45.28	27.49	44.61	45.16	0.001
10:00	391.57	33.59	53.39	45.09	27.53	27.27	28.50	0.001
10:05	346.49	33.39	50.19	42.40	27.74	23.34	23.82	0.000
10:10	571.50	32.88	50.09	42.69	27.79	38.80	36.26	0.000
10:15	354.68	33.20	50.49	42.90	27.98	23.94	24.50	0.001
10:20	344.57	32.70	48.69	41.50	27.98	27.17	27.78	0.151
10:25	499.84	32.78	49.59	42.00	28.14	37.39	37.49	0.182
10:30	664.45	33.59	53.50	44.69	28.10	47.40	47.99	0.214
10:35	731.30	34.18	56.88	47.18	28.28	51.70	53.11	0.140
10:40	752.20	34.39	60.39	49.69	28.59	52.04	53.65	0.105
10:45	762.99	35.10	62.19	50.99	28.64	42.20	43.92	0.069
10:50	568.52	34.99	57.89	48.00	28.84	45.32	47.86	0.119
10:55	394.94	35.50	56.30	46.39	28.93	28.63	29.43	0.189
11:00	364.89	34.68	52.09	43.69	29.18	24.13	25.22	0.224
11:05	754.90	34.99	57.28	47.58	29.29	53.81	55.43	0.230
11:10	761.45	34.89	62.59	50.59	29.64	52.71	54.63	0.223
11:15	756.54	36.08	64.89	51.99	29.79	52.04	54.03	0.213
11:20	747.20	36.19	65.58	52.68	29.88	51.26	53.33	0.230
11:25	737.18	36.19	64.39	53.10	30.13	50.90	52.56	0.246
11:30	753.07	36.19	64.39	53.10	30.20	52.41	54.12	0.232

ภาคผนวก ง. 8 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 8 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	766.27	36.19	67.29	53.79	30.58	52.51	54.60	0.239
11:40	765.79	36.48	68.88	54.08	30.69	52.21	54.44	0.255
11:45	782.93	36.19	68.38	54.58	31.04	53.67	55.88	0.252
11:50	784.18	36.29	68.80	54.98	31.10	53.59	55.79	0.257
11:55	792.66	37.48	69.88	55.29	31.49	54.00	56.21	0.257
12:00	796.51	37.40	70.09	55.98	31.59	54.23	56.45	0.243
12:05	797.57	38.09	70.60	56.09	31.73	54.02	56.38	0.240
12:10	793.14	38.38	71.39	56.48	31.89	53.66	56.10	0.244
12:15	792.95	37.98	69.38	56.48	32.18	54.11	56.18	0.243
12:20	792.27	38.59	69.28	56.19	32.43	54.19	56.18	0.251
12:25	799.98	38.88	70.20	56.38	32.64	54.75	56.77	0.254
12:30	803.64	38.78	68.99	56.80	32.88	55.14	56.97	0.266
12:35	807.49	39.28	70.60	56.59	33.08	55.12	57.20	0.249
12:40	810.19	38.78	70.99	56.99	33.09	55.38	57.40	0.240
12:45	807.88	38.78	70.99	57.28	33.44	55.08	57.11	0.230
12:50	793.91	37.80	69.99	56.80	33.83	54.52	56.35	0.240
12:55	786.59	37.09	68.69	56.69	33.89	54.51	55.98	0.227
13:00	779.66	37.48	67.88	56.80	34.35	54.34	55.71	0.223
13:05	781.68	38.78	70.39	57.20	34.69	53.76	55.74	0.240
13:10	789.19	38.38	70.09	56.99	34.69	54.55	56.45	0.209
13:15	778.40	38.99	69.78	57.20	34.80	53.75	55.71	0.205
13:20	851.42	40.10	70.99	57.78	34.98	58.34	60.39	0.214
13:25	785.34	40.10	68.88	56.80	35.39	57.04	58.78	0.230
13:30	772.62	38.78	69.20	56.88	35.34	53.71	55.66	0.136
13:35	781.29	38.99	69.70	57.28	35.49	54.57	56.41	0.056
13:40	781.68	38.49	70.99	57.28	35.70	53.13	55.63	0.033
13:45	311.24	37.98	63.38	51.89	36.04	23.59	24.93	0.025
13:50	312.68	38.09	56.80	47.18	35.84	22.53	23.24	0.021
13:55	281.19	37.88	53.18	44.38	35.88	20.08	20.95	0.022
14:00	285.04	37.48	51.59	43.29	36.04	20.37	21.10	0.056
14:05	294.38	37.09	50.49	42.40	36.09	21.29	21.67	0.055

ภาคผนวก ง. 8 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 8 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	344.09	36.79	50.59	42.48	35.95	24.89	25.76	0.050
14:15	538.66	36.90	52.60	44.30	35.99	38.90	41.56	0.052
14:20	611.86	37.98	59.39	49.29	36.38	44.05	44.55	0.057
14:25	493.96	37.98	56.88	47.79	36.44	33.33	35.66	0.056
14:30	203.36	37.98	55.19	45.89	36.58	13.93	14.38	0.035
14:35	215.40	37.40	49.80	42.48	36.44	14.88	15.38	0.015
14:40	301.90	37.59	49.08	42.08	36.48	23.23	22.98	0.013
14:45	206.15	37.29	48.19	41.50	36.44	14.71	15.70	0.005
14:50	157.32	36.40	45.59	40.10	36.38	10.84	11.63	0.006
14:55	166.56	35.39	42.79	38.99	36.64	11.44	11.55	0.003
15:00	271.94	35.18	43.80	39.70	36.69	19.64	20.16	0.004
15:05	313.74	35.58	45.99	41.29	36.69	24.89	24.98	0.007
15:10	328.29	35.89	47.79	42.90	36.79	24.36	24.98	0.014
15:15	343.03	36.00	49.08	43.88	37.09	27.03	27.57	0.028
15:20	360.94	36.58	53.39	46.89	37.04	26.34	27.15	0.032
15:25	576.70	36.58	56.38	48.48	37.04	41.29	42.94	0.045
15:30	560.33	37.88	59.50	50.80	37.24	40.02	41.56	0.051
15:35	538.08	38.99	60.58	51.28	37.39	38.10	39.70	0.063
15:40	538.95	39.70	60.90	50.99	37.59	38.34	40.02	0.061
15:45	509.09	40.18	60.90	51.20	37.59	35.82	37.39	0.054
15:50	474.70	40.39	60.79	50.80	37.73	33.41	34.95	0.054
15:55	443.01	40.39	59.58	50.49	37.94	31.61	33.07	0.048
16:00	417.19	38.88	58.68	49.69	37.99	29.27	30.55	0.044

ภาคผนวก ง. 9 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 9 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	459.67	31.29	49.40	42.79	32.14	32.25	33.12	0.029
9:05	471.52	30.98	49.48	43.29	32.19	33.19	33.98	0.035
9:10	482.12	31.19	50.49	43.88	32.25	33.98	34.82	0.039
9:15	503.88	31.40	51.28	44.69	32.34	35.55	36.39	0.041
9:20	518.62	31.69	52.78	45.20	32.44	36.48	37.37	0.043
9:25	536.44	31.69	53.39	45.70	32.50	37.61	37.95	0.050
9:30	548.77	32.19	53.39	46.68	32.63	39.22	40.14	0.061
9:35	561.10	32.59	54.90	48.00	32.83	39.42	40.39	0.065
9:40	575.16	32.30	54.58	48.48	32.74	40.47	41.31	0.067
9:45	580.85	32.49	54.98	49.19	32.99	40.76	41.63	0.076
9:50	594.72	32.70	55.59	49.69	33.13	41.72	42.64	0.079
9:55	609.55	32.88	57.20	49.88	33.29	42.78	43.81	0.086
10:00	614.08	32.88	57.38	49.98	33.40	43.21	44.27	0.089
10:05	632.28	33.28	58.60	50.80	33.54	44.32	45.42	0.097
10:10	643.55	32.78	58.60	50.99	33.64	44.98	46.09	0.099
10:15	656.94	33.20	58.60	51.20	33.84	46.14	47.22	0.130
10:20	670.52	32.70	58.99	51.59	33.74	47.16	48.11	0.127
10:25	676.59	33.70	59.79	52.09	34.14	47.35	48.41	0.140
10:30	688.25	33.78	60.58	52.39	34.34	48.10	49.15	0.152
10:35	700.86	33.99	60.58	52.89	34.48	48.88	49.99	0.165
10:40	711.36	34.28	61.40	53.50	34.69	49.70	50.68	0.162
10:45	721.57	33.99	61.79	53.50	34.69	50.25	51.35	0.174
10:50	728.22	34.28	62.38	54.19	34.80	50.58	51.75	0.178
10:55	731.30	34.60	62.99	54.58	35.14	50.56	51.81	0.189
11:00	752.97	35.18	63.78	54.90	35.14	52.16	53.32	0.191
11:05	761.36	35.10	64.89	55.69	35.34	52.24	53.62	0.171
11:10	767.71	35.10	65.68	55.98	35.43	52.65	54.09	0.176
11:15	769.06	35.18	65.89	56.59	35.68	52.66	54.15	0.182
11:20	776.48	36.19	66.69	57.09	35.99	53.01	54.49	0.189
11:25	778.50	36.08	68.19	57.20	36.08	52.89	54.54	0.210
11:30	782.74	35.89	64.99	57.09	36.29	53.92	55.02	0.194

ภาคผนวก ง. 9 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 9 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	776.67	36.08	66.98	56.99	36.24	53.38	54.67	0.194
11:40	795.26	35.18	66.58	57.49	36.38	54.81	55.99	0.205
11:45	796.13	35.89	67.29	57.99	36.59	54.76	55.93	0.213
11:50	801.62	36.58	68.19	58.28	36.94	54.99	56.23	0.217
11:55	806.43	36.40	68.48	58.39	36.78	55.24	56.45	0.216
12:00	808.55	36.29	67.79	58.60	37.04	55.50	56.60	0.209
12:05	812.21	36.40	69.28	58.78	37.23	55.52	56.72	0.210
12:10	815.39	36.79	69.20	59.58	37.28	55.85	56.88	0.214
12:15	818.09	38.09	70.78	58.89	37.09	55.36	56.72	0.202
12:20	813.95	37.48	69.59	58.89	37.80	55.70	56.80	0.206
12:25	810.38	38.19	70.20	59.39	37.80	55.13	56.36	0.217
12:30	807.69	38.30	71.79	59.50	37.93	54.79	56.30	0.226
12:35	806.92	38.38	67.98	59.18	38.29	55.54	56.43	0.222
12:40	811.35	39.09	68.99	59.10	38.63	55.75	56.81	0.234
12:45	801.81	39.38	70.49	58.89	38.59	54.77	56.21	0.243
12:50	794.49	38.59	69.20	58.18	38.79	54.54	55.85	0.235
12:55	801.62	38.78	69.99	58.28	39.08	54.95	56.40	0.235
13:00	796.90	38.99	70.20	58.28	39.44	54.72	56.24	0.234
13:05	791.02	39.49	70.78	58.49	39.79	54.20	55.89	0.239
13:10	790.06	38.99	70.89	58.60	40.10	54.14	55.81	0.235
13:15	788.81	39.59	72.50	58.89	40.39	53.95	55.89	0.248
13:20	784.95	39.89	71.58	59.10	40.59	53.72	55.64	0.243
13:25	775.80	39.28	70.89	58.99	40.74	53.41	55.19	0.229
13:30	764.82	39.89	71.18	58.68	40.84	52.87	54.78	0.214
13:35	759.33	40.68	70.99	58.60	40.89	52.45	54.33	0.201
13:40	754.13	41.58	71.39	58.78	40.69	52.05	53.94	0.178
13:45	743.54	41.79	71.29	59.18	40.89	51.52	53.18	0.167
13:50	731.78	40.49	70.39	59.39	40.89	50.89	52.43	0.146
13:55	725.04	40.60	69.78	59.10	41.29	50.46	52.01	0.157
14:00	711.94	40.49	69.20	59.18	41.44	49.94	51.22	0.157
14:05	705.10	40.49	68.99	58.68	41.64	49.65	51.03	0.158

ภาคผนวก ง. 9 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 9 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	690.27	40.89	68.69	58.18	41.75	48.78	50.15	0.164
14:15	675.44	40.79	68.19	57.78	41.64	48.78	49.03	0.140
14:20	671.78	40.89	66.90	58.78	42.38	46.69	47.91	0.133
14:25	657.42	40.68	67.59	58.49	42.49	46.54	47.80	0.127
14:30	653.86	39.78	67.48	58.60	42.49	46.40	47.77	0.127
14:35	645.48	39.99	66.79	58.49	42.44	45.94	47.40	0.123
14:40	629.10	40.28	66.18	57.89	42.29	45.30	46.70	0.114
14:45	620.24	39.89	66.18	57.89	42.74	44.17	45.68	0.109
14:50	589.52	40.49	65.18	57.20	42.74	42.38	43.65	0.101
14:55	589.71	40.79	65.49	57.38	43.10	42.93	44.58	0.097
15:00	494.83	39.99	61.29	54.69	43.43	25.98	26.26	0.073
15:05	429.14	38.88	60.08	53.58	43.53	31.81	32.82	0.052
15:10	266.64	39.49	59.10	52.78	43.59	18.11	18.66	0.042
15:15	94.80	38.30	51.20	47.18	43.69	6.68	6.72	0.013
15:20	75.83	37.80	45.99	43.48	43.29	5.19	5.14	0.001
15:25	75.73	37.09	42.69	41.50	43.29	5.18	5.09	0.000
15:30	81.12	36.58	40.79	39.99	43.48	5.45	5.55	0.000
15:35	88.64	35.10	39.59	39.38	43.53	5.97	6.10	0.000
15:40	95.67	34.79	38.78	39.28	43.14	6.54	6.67	0.000
15:45	99.14	34.89	38.59	39.09	43.24	6.80	6.89	0.000
15:50	112.14	35.29	38.69	39.09	43.08	7.72	7.83	0.000
15:55	113.87	34.60	38.69	39.09	42.94	7.87	7.98	0.000
16:00	110.98	33.99	38.69	38.78	42.89	7.65	7.79	0.000

ภาคผนวก ง. 10 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 10 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	422.01	28.68	46.49	41.29	34.19	31.33	32.06	0.006
9:05	425.77	29.18	47.50	42.00	34.14	31.12	31.82	0.007
9:10	462.66	29.08	48.90	43.08	34.14	33.85	34.72	0.008
9:15	480.48	29.68	49.98	44.09	34.34	35.67	35.88	0.009
9:20	482.79	29.58	51.20	44.88	34.28	35.92	35.92	0.010
9:25	485.01	30.00	51.20	45.38	34.49	35.99	36.00	0.011
9:30	495.70	30.69	52.18	46.10	34.44	36.68	36.73	0.012
9:35	523.82	30.90	52.09	46.79	34.53	38.63	38.67	0.013
9:40	532.30	30.58	51.89	47.29	34.39	39.30	39.43	0.014
9:45	534.80	30.58	52.68	47.89	34.34	39.41	39.56	0.015
9:50	568.13	31.19	54.00	48.58	34.39	41.46	41.52	0.016
9:55	582.68	31.40	55.29	49.59	34.53	42.80	42.89	0.020
10:00	603.67	31.09	55.48	50.09	34.53	43.62	44.10	0.097
10:05	625.06	31.59	56.48	50.38	34.74	44.94	45.44	0.102
10:10	632.57	31.80	58.09	50.49	34.85	45.21	45.99	0.107
10:15	643.65	32.70	58.78	50.99	34.98	45.51	46.52	0.106
10:20	658.29	32.70	59.79	51.28	34.89	46.53	47.51	0.114
10:25	678.52	33.09	60.08	51.70	35.25	47.91	48.87	0.123
10:30	687.38	32.59	59.50	52.28	35.39	48.83	49.70	0.123
10:35	697.97	32.99	60.90	52.49	35.64	49.53	50.37	0.123
10:40	703.75	32.49	59.79	52.99	35.64	50.10	50.84	0.126
10:45	715.99	32.70	60.79	53.50	35.74	50.56	51.44	0.132
10:50	724.95	32.88	61.59	54.00	35.94	51.20	52.04	0.133
10:55	736.99	33.09	62.09	54.29	36.09	52.12	52.89	0.134
11:00	742.76	33.09	61.19	54.90	36.24	52.55	53.15	0.137
11:05	752.30	33.59	61.79	55.08	36.44	53.43	53.98	0.146
11:10	754.90	34.10	63.38	55.48	36.33	53.28	54.08	0.147
11:15	769.54	34.49	64.78	55.98	36.69	53.92	54.76	0.150
11:20	757.31	35.10	63.78	56.19	36.73	53.46	54.06	0.154
11:25	780.91	34.79	62.88	56.48	36.78	55.24	55.67	0.157
11:30	789.29	34.60	64.20	56.88	36.83	55.65	55.78	0.160

ภาคผนวก ง. 10 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 10 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	783.80	36.08	64.60	57.49	37.04	55.11	55.61	0.167
11:40	779.08	35.58	66.08	57.70	37.19	54.55	55.37	0.164
11:45	769.74	35.58	65.29	57.49	37.39	54.04	54.71	0.175
11:50	766.46	35.39	65.68	57.49	37.59	53.71	54.42	0.167
11:55	781.10	35.50	65.79	57.70	37.80	55.02	55.73	0.173
12:00	797.48	35.10	66.79	57.99	37.89	55.73	56.51	0.176
12:05	807.11	36.08	66.98	58.68	37.98	56.18	56.94	0.186
12:10	799.60	36.69	67.69	58.89	38.09	55.97	56.76	0.181
12:15	807.98	36.58	67.29	58.99	38.33	56.69	57.23	0.189
12:20	776.96	37.59	69.59	59.18	38.43	54.19	55.03	0.198
12:25	767.71	37.69	67.40	59.29	38.94	53.44	54.28	0.186
12:30	768.77	37.59	67.29	59.29	39.09	53.47	54.45	0.171
12:35	803.83	38.09	68.09	59.50	39.29	56.36	57.21	0.193
12:40	790.06	38.38	67.69	59.89	39.58	55.31	55.89	0.194
12:45	787.84	38.69	69.28	60.08	39.54	54.82	55.91	0.205
12:50	783.51	38.59	69.70	60.08	39.94	54.36	55.57	0.202
12:55	789.00	39.38	69.99	60.29	40.09	55.01	56.21	0.202
13:00	778.89	38.30	69.59	60.58	40.28	54.62	55.72	0.203
13:05	775.80	39.38	69.78	60.69	40.49	54.51	55.68	0.203
13:10	775.23	39.28	69.78	60.79	40.54	54.53	55.85	0.198
13:15	782.93	38.49	68.38	60.79	40.89	55.24	56.00	0.193
13:20	774.65	39.28	69.99	60.69	41.04	54.51	55.59	0.186
13:25	769.25	39.89	68.99	60.58	41.29	54.23	55.33	0.181
13:30	762.80	38.99	68.38	60.58	41.39	53.91	54.89	0.171
13:35	755.29	39.49	67.08	60.58	41.50	53.70	54.52	0.178
13:40	742.48	38.88	68.59	60.58	41.79	52.73	53.66	0.175
13:45	733.90	38.69	68.38	60.50	41.89	52.26	53.30	0.167
13:50	726.00	39.78	69.88	60.69	41.95	51.42	52.67	0.159
13:55	714.64	40.10	70.60	60.39	42.19	50.77	52.23	0.159
14:00	704.62	40.49	69.78	60.29	42.38	50.32	51.75	0.160
14:05	699.61	39.78	68.48	60.08	42.49	50.24	51.37	0.153

ภาคผนวก ง. 10 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 10 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	694.60	39.49	67.48	59.89	42.74	49.83	50.89	0.153
14:15	682.76	39.28	66.69	59.58	42.90	49.12	50.09	0.133
14:20	673.61	40.10	67.69	59.29	42.94	48.37	49.57	0.144
14:25	657.13	39.99	66.58	58.89	43.24	47.47	48.59	0.133
14:30	655.30	39.49	65.29	58.78	43.35	47.62	48.50	0.119
14:35	650.01	39.20	64.78	58.39	43.53	47.38	48.15	0.119
14:40	637.39	39.28	64.49	57.59	43.19	46.41	47.34	0.115
14:45	626.79	39.59	64.68	57.38	43.04	45.61	46.63	0.112
14:50	621.49	39.70	64.09	57.99	43.59	45.33	46.26	0.102
14:55	616.58	40.60	64.89	57.89	43.89	44.92	45.98	0.102
15:00	606.95	40.10	63.59	57.89	44.04	44.20	45.04	0.097
15:05	278.68	39.89	60.90	54.90	44.18	25.33	25.55	0.032
15:10	79.10	38.88	51.20	48.08	44.39	5.21	5.31	0.008
15:15	74.96	38.09	46.49	44.49	44.39	4.92	4.98	0.002
15:20	79.68	37.48	43.40	42.48	44.59	5.27	5.30	0.000
15:25	88.06	36.19	41.18	41.50	44.54	6.01	5.92	0.000
15:30	92.97	34.68	39.28	40.18	44.23	6.47	6.34	0.000
15:35	96.05	33.89	38.09	39.38	44.19	6.72	6.56	0.000
15:40	93.74	33.28	37.09	38.88	44.19	6.69	6.52	0.000
15:45	84.40	32.70	36.58	38.69	43.73	6.05	5.87	0.000
15:50	74.48	32.19	35.89	37.98	43.44	5.21	5.05	0.000
15:55	70.14	31.88	35.39	37.80	43.34	4.87	4.69	0.000
16:00	71.59	31.59	34.79	37.48	43.35	4.99	4.82	0.000

ภาคผนวก ง. 11 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 11 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	179.66	25.29	31.69	25.69	31.98	0.00	0.00	0.000
9:05	222.33	25.29	33.09	25.80	32.18	0.00	0.00	0.000
9:10	202.11	25.59	33.70	25.98	32.19	0.00	0.00	0.000
9:15	172.92	25.48	33.49	25.98	32.14	0.00	0.00	0.000
9:20	161.65	25.59	33.20	26.09	32.14	0.00	0.00	0.000
9:25	164.44	25.80	33.59	26.19	32.14	0.00	0.00	0.000
9:30	108.96	25.48	32.70	26.09	32.14	0.00	0.00	0.000
9:35	140.84	25.48	31.98	26.09	32.09	0.00	0.00	0.000
9:40	240.25	25.69	33.09	26.38	32.04	0.00	0.00	0.000
9:45	272.52	25.80	35.58	26.70	32.04	0.00	0.00	0.000
9:50	277.62	25.98	37.40	27.09	32.19	0.00	0.00	0.000
9:55	300.45	26.70	38.78	27.20	32.18	0.00	0.00	0.000
10:00	305.17	26.78	39.49	27.70	32.14	0.00	0.00	0.000
10:05	302.28	27.09	39.28	27.78	32.18	0.00	0.00	0.000
10:10	315.09	27.28	40.60	31.09	32.09	24.77	24.81	0.001
10:15	299.87	27.09	40.99	33.28	32.14	23.16	23.30	0.001
10:20	316.83	27.20	41.18	34.79	32.19	24.29	24.58	0.001
10:25	332.33	27.20	41.29	35.89	32.39	25.29	25.67	0.001
10:30	478.84	27.70	43.80	38.69	32.34	37.02	37.95	0.005
10:35	348.90	27.89	45.49	39.28	32.43	27.08	27.16	0.005
10:40	326.07	27.78	44.49	38.78	32.29	24.97	25.33	0.005
10:45	344.47	27.78	43.88	38.78	32.34	26.31	26.71	0.005
10:50	361.04	28.18	44.19	39.09	32.34	27.58	28.08	0.005
10:55	363.35	28.18	44.30	39.38	32.44	27.71	28.19	0.005
11:00	361.52	28.39	43.80	39.70	32.39	27.54	28.04	0.006
11:05	361.33	28.79	45.09	40.18	32.25	27.42	27.88	0.006
11:10	344.76	28.10	43.59	40.18	32.34	26.44	26.93	0.006
11:15	356.61	27.99	43.80	40.18	32.38	27.13	27.66	0.006
11:20	381.84	28.60	45.28	40.68	32.39	28.63	29.22	0.006
11:25	393.50	28.79	45.70	41.58	32.49	31.34	31.65	0.050
11:30	403.81	29.29	46.68	41.89	32.44	31.79	32.18	0.048

ภาคผนวก ง. 11 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 11 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	392.05	29.00	46.99	42.08	32.44	30.19	30.68	0.048
11:40	357.09	29.29	46.49	41.29	32.68	26.92	27.55	0.039
11:45	348.61	28.60	45.59	40.60	32.70	26.11	26.60	0.037
11:50	353.72	28.39	44.59	39.99	32.64	26.43	26.88	0.029
11:55	355.93	28.68	44.49	39.99	32.68	26.65	27.09	0.029
12:00	373.56	28.79	45.28	40.39	32.64	27.89	28.39	0.030
12:05	398.41	29.29	46.39	40.79	32.68	29.59	30.20	0.025
12:10	418.25	29.39	46.49	41.10	32.64	31.24	31.84	0.038
12:15	460.73	29.29	47.18	42.00	32.74	34.36	35.02	0.040
12:20	502.34	28.89	48.79	43.59	32.79	37.83	38.52	0.052
12:25	504.27	29.50	50.38	44.30	32.94	37.52	38.32	0.058
12:30	502.05	30.00	51.20	44.99	32.94	37.46	38.24	0.061
12:35	596.07	29.79	51.20	45.99	32.94	43.89	44.55	0.061
12:40	472.29	30.19	51.89	46.68	33.04	35.62	36.16	0.067
12:45	426.83	29.68	50.69	45.20	33.09	31.51	32.14	0.052
12:50	550.70	30.40	51.28	45.70	33.28	40.15	41.17	0.052
12:55	476.14	30.90	51.99	45.99	33.33	35.06	35.85	0.052
13:00	662.62	30.90	55.08	48.29	33.24	46.90	48.05	0.085
13:05	704.33	31.09	56.59	49.08	33.54	51.64	52.34	0.090
13:10	435.69	31.80	56.59	48.90	33.59	32.15	32.85	0.092
13:15	417.29	31.80	52.78	46.28	33.74	30.15	30.82	0.054
13:20	394.27	32.19	52.09	45.59	33.84	29.60	30.21	0.050
13:25	383.48	31.29	50.09	44.30	33.79	29.06	29.66	0.037
13:30	382.23	31.19	49.69	44.19	33.69	28.69	29.28	0.034
13:35	372.50	30.69	49.08	44.19	33.94	28.31	28.84	0.034
13:40	420.57	31.09	49.29	44.09	33.98	31.49	32.16	0.032
13:45	359.79	31.40	48.98	43.69	34.14	26.70	27.27	0.029
13:50	452.06	31.80	49.40	43.69	34.24	34.42	35.02	0.032
13:55	604.93	32.49	52.89	46.28	34.28	46.02	46.75	0.056
14:00	530.95	33.09	54.58	47.68	34.48	39.44	40.36	0.063
14:05	582.48	32.30	55.29	47.89	34.53	41.99	43.03	0.070

ภาคผนวก ง. 11 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 11 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	562.83	32.59	55.29	48.29	34.59	39.51	40.54	0.078
14:15	648.85	32.09	56.80	49.88	34.84	47.87	48.80	0.090
14:20	685.65	32.99	60.19	51.70	34.89	51.57	52.08	0.117
14:25	635.94	32.88	62.19	53.39	35.14	47.63	48.56	0.175
14:30	853.82	34.68	65.89	55.69	35.29	62.68	63.68	0.186
14:35	502.73	34.60	66.29	55.98	35.54	43.09	44.02	0.216
14:40	318.95	33.99	58.39	50.30	35.64	23.47	24.25	0.204
14:45	302.76	33.70	53.58	46.49	35.59	22.81	23.40	0.050
14:50	327.81	33.70	50.49	43.88	35.64	23.99	24.62	0.028
14:55	482.21	32.88	52.09	45.28	35.70	35.11	35.81	0.032
15:00	742.09	33.99	59.68	50.80	36.04	56.51	57.29	0.095
15:05	673.80	35.10	63.09	53.89	36.28	50.91	52.03	0.135
15:10	611.48	34.49	63.59	53.58	36.44	46.39	47.50	0.143
15:15	569.77	34.89	62.19	53.10	36.69	43.40	44.67	0.128
15:20	546.94	34.10	60.98	51.59	36.54	41.96	43.03	0.103
15:25	527.68	34.79	60.69	51.20	36.94	40.29	41.45	0.098
15:30	509.86	35.18	60.19	50.80	36.99	39.05	40.24	0.087
15:35	503.11	36.19	59.58	50.49	37.10	37.72	38.95	0.082
15:40	488.67	36.19	59.39	49.80	37.28	36.60	37.85	0.072
15:45	470.27	36.08	58.60	49.48	37.49	35.41	36.62	0.070
15:50	453.41	35.39	57.28	48.90	37.73	34.42	35.50	0.058
15:55	435.98	35.79	56.80	48.00	37.69	33.01	34.01	0.050
16:00	419.99	35.39	55.29	47.79	37.84	31.84	32.76	0.048

ภาคผนวก ง. 12 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 12 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	476.24	30.69	49.59	44.09	31.19	33.45	33.99	0.005
9:05	395.23	31.09	47.68	43.19	31.19	30.19	30.78	0.004
9:10	490.11	30.90	48.58	43.88	31.24	37.60	37.70	0.004
9:15	548.19	31.09	50.49	45.59	31.49	39.85	39.96	0.008
9:20	545.01	31.48	51.70	46.49	31.49	39.76	39.89	0.009
9:25	603.58	31.69	53.50	47.18	31.59	42.61	42.83	0.010
9:30	598.76	31.88	55.19	48.39	31.64	43.46	43.70	0.017
9:35	536.44	31.59	55.40	48.39	31.73	37.27	37.64	0.018
9:40	346.01	31.48	50.80	46.28	31.94	24.09	24.20	0.013
9:45	366.72	30.79	48.29	43.69	31.98	26.91	27.11	0.009
9:50	328.39	30.79	46.60	42.48	31.99	24.11	24.24	0.009
9:55	403.13	30.98	46.49	42.29	32.04	29.47	29.69	0.007
10:00	345.92	30.69	46.89	42.40	32.29	24.49	25.00	0.009
10:05	395.91	30.90	45.78	41.58	32.44	30.33	30.76	0.010
10:10	439.93	31.29	48.08	42.98	32.34	37.78	38.24	0.015
10:15	496.37	31.48	49.69	43.88	32.44	35.85	36.27	0.024
10:20	690.08	31.48	51.70	45.49	32.68	51.33	51.67	0.025
10:25	583.54	32.49	55.98	48.90	32.79	58.93	59.09	0.032
10:30	805.09	32.78	59.50	51.28	32.94	58.98	59.09	0.083
10:35	818.47	33.20	62.48	54.08	33.13	58.08	59.58	0.098
10:40	810.58	33.20	62.99	54.79	33.40	59.67	60.22	0.139
10:45	733.81	33.09	63.89	55.08	33.49	47.62	47.95	0.141
10:50	831.48	32.78	62.09	53.18	33.64	59.02	59.23	0.139
10:55	568.32	33.70	63.28	54.19	33.65	39.58	41.54	0.136
11:00	496.18	33.49	58.99	51.20	33.73	33.39	34.19	0.085
11:05	359.21	32.78	54.00	48.00	33.89	33.70	33.83	0.037
11:10	519.01	32.59	51.99	46.39	33.99	34.72	34.84	0.031
11:15	290.14	32.49	49.08	44.49	34.04	20.86	21.20	0.025
11:20	791.50	32.19	52.28	46.89	34.04	65.19	65.21	0.038
11:25	868.27	33.89	60.90	53.18	34.39	60.62	61.27	0.098
11:30	834.08	34.10	64.09	55.29	34.60	57.00	57.65	0.147

ภาคผนวก ง. 12 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 12 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	814.62	34.60	65.18	55.69	34.68	57.14	57.95	0.164
11:40	785.92	34.49	66.50	56.19	34.89	60.72	61.56	0.168
11:45	856.71	35.68	67.40	57.78	35.09	60.38	61.16	0.181
11:50	861.72	36.19	67.79	57.99	35.19	59.08	59.97	0.212
11:55	886.00	35.68	67.08	58.18	35.44	60.67	61.19	0.207
12:00	857.29	36.08	68.69	58.89	35.54	61.62	62.89	0.238
12:05	911.81	35.50	68.69	59.68	35.83	62.60	63.06	0.234
12:10	894.09	36.90	70.39	60.19	36.04	60.71	61.09	0.231
12:15	515.35	36.29	66.18	56.88	36.14	33.50	33.61	0.147
12:20	320.39	34.68	56.38	50.80	36.24	22.68	23.12	0.061
12:25	616.58	33.99	53.89	49.29	36.29	43.52	42.59	0.057
12:30	405.35	33.99	52.39	48.39	36.34	30.72	31.10	0.044
12:35	1091.36	34.68	60.08	53.58	36.74	77.09	77.52	0.242
12:40	1056.01	36.19	67.59	58.89	36.69	71.60	71.71	0.303
12:45	969.41	37.48	69.70	60.50	36.74	63.12	63.61	0.300
12:50	244.78	35.89	59.50	52.60	36.94	16.60	16.91	0.088
12:55	255.37	34.89	51.70	46.79	36.83	17.71	18.66	0.009
13:00	244.39	34.10	47.50	44.49	36.99	17.39	17.54	0.012
13:05	299.01	34.28	46.60	43.59	37.09	22.84	23.03	0.011
13:10	290.92	33.70	46.28	43.59	37.14	21.07	21.15	0.010
13:15	238.61	33.39	43.98	42.00	37.24	16.90	16.93	0.008
13:20	220.89	32.99	42.40	40.60	37.14	15.78	15.82	0.004
13:25	224.36	33.28	42.79	40.18	37.24	15.93	15.93	0.004
13:30	207.40	33.39	42.40	39.59	37.44	14.81	14.81	0.004
13:35	220.02	32.99	42.48	39.59	37.73	15.79	15.85	0.006
13:40	270.30	32.59	43.08	39.78	37.79	20.45	20.64	0.006
13:45	722.54	33.20	50.09	45.49	37.64	62.11	62.74	0.019
13:50	979.43	33.70	56.80	49.19	37.94	65.31	66.28	0.110
13:55	503.31	34.79	60.29	52.49	37.94	44.75	45.17	0.098
14:00	545.79	35.29	62.09	52.49	38.04	44.55	47.10	0.110
14:05	791.12	35.18	64.68	54.58	38.34	56.94	58.53	0.145

ภาคผนวก ง. 12 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 12 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	738.62	34.68	67.29	56.19	38.39	52.19	53.87	0.178
14:15	676.59	35.29	66.58	56.59	38.39	49.39	50.81	0.177
14:20	727.06	36.58	65.58	56.30	38.34	52.81	54.24	0.163
14:25	745.56	36.98	68.19	57.20	38.59	53.49	55.06	0.170
14:30	687.48	36.90	67.98	57.20	38.84	47.70	49.44	0.174
14:35	443.20	37.48	65.39	55.29	38.94	31.14	32.19	0.163
14:40	194.30	35.89	57.09	49.29	39.19	13.33	13.71	0.023
14:45	195.65	34.79	50.19	45.20	39.13	14.07	14.26	0.021
14:50	151.15	34.68	46.39	42.69	38.99	10.47	10.50	0.013
14:55	152.40	34.49	43.88	41.29	38.89	10.80	10.85	0.004
15:00	168.49	34.10	42.90	40.60	38.79	11.98	12.03	0.004
15:05	180.53	33.99	42.79	40.39	38.89	12.85	12.88	0.004
15:10	158.09	33.89	42.48	40.39	38.79	10.88	10.91	0.003
15:15	121.29	33.99	41.50	40.10	38.58	8.23	8.29	0.002
15:20	112.14	33.39	40.28	39.20	38.64	7.69	7.75	0.000
15:25	113.78	32.70	39.38	38.78	38.79	7.88	7.97	0.000
15:30	79.87	31.98	37.88	38.38	38.54	5.24	5.10	0.000
15:35	52.42	30.90	35.79	37.29	38.54	3.66	3.51	0.000
15:40	62.82	29.58	34.10	36.19	38.50	4.42	4.26	0.000
15:45	81.70	29.00	33.28	35.58	38.50	5.96	5.77	0.000
15:50	41.54	28.68	32.99	34.99	38.23	2.89	2.71	0.000
15:55	44.81	27.70	31.40	34.18	38.23	3.22	3.03	0.000
16:00	65.91	27.09	30.58	33.78	38.34	4.76	4.53	0.000

ภาคผนวก ง. 13 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	469.69	25.98	46.39	30.69	28.04	36.04	36.53	0.001
9:05	484.43	25.88	46.49	34.49	28.10	37.17	37.18	0.001
9:10	503.02	26.49	47.29	37.69	28.14	37.90	38.29	0.005
9:15	520.84	26.30	48.00	40.10	28.14	39.45	40.24	0.020
9:20	536.35	26.38	49.98	41.50	28.24	40.39	41.35	0.056
9:25	553.88	26.70	49.88	42.69	28.24	41.79	42.70	0.067
9:30	588.26	27.20	50.19	43.80	28.43	44.14	44.83	0.075
9:35	596.07	27.70	52.09	44.59	28.59	44.74	45.64	0.083
9:40	616.77	27.78	53.39	45.59	28.73	45.70	46.54	0.117
9:45	633.53	28.28	54.29	46.10	28.73	46.71	47.56	0.157
9:50	665.80	28.18	54.08	47.29	28.93	49.12	49.86	0.135
9:55	730.44	28.39	56.88	48.39	29.39	53.26	54.13	0.128
10:00	729.76	29.00	58.18	49.29	29.29	52.78	53.90	0.172
10:05	768.96	29.50	60.29	50.88	29.49	54.85	55.87	0.181
10:10	747.77	29.58	61.29	51.20	29.63	53.84	54.99	0.186
10:15	789.29	30.08	61.19	51.99	29.94	57.27	58.50	0.200
10:20	763.47	30.29	62.38	52.68	30.13	54.81	55.97	0.209
10:25	754.90	30.08	62.80	52.39	30.40	54.06	55.10	0.218
10:30	821.94	30.29	63.59	52.78	30.54	58.90	59.82	0.238
10:35	796.13	31.29	65.18	54.08	30.69	56.99	58.21	0.258
10:40	749.41	31.59	64.39	53.58	30.94	54.08	55.25	0.258
10:45	748.83	31.98	62.59	53.18	31.14	54.52	55.46	0.258
10:50	758.18	31.48	63.38	52.68	31.39	54.83	55.95	0.231
10:55	770.70	31.29	62.88	52.99	31.49	55.38	56.37	0.242
11:00	779.27	31.09	62.19	52.78	31.69	55.91	56.71	0.248
11:05	782.26	31.69	62.99	53.10	31.89	56.21	57.09	0.242
11:10	792.08	31.69	64.09	53.50	32.13	56.47	57.60	0.270
11:15	795.36	31.88	63.78	53.79	32.39	56.87	57.77	0.274
11:20	803.06	31.98	64.49	53.79	32.68	57.45	58.36	0.280
11:25	805.95	31.88	64.68	54.29	32.99	57.44	58.44	0.286
11:30	811.54	31.80	65.29	54.29	33.14	57.76	58.79	0.292

ภาคผนวก ง. 13 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	796.13	31.29	65.18	54.08	30.69	56.99	58.21	0.258
11:40	749.41	31.59	64.39	53.58	30.94	54.08	55.25	0.258
11:45	748.83	31.98	62.59	53.18	31.14	54.52	55.46	0.258
11:50	758.18	31.48	63.38	52.68	31.39	54.83	55.95	0.231
11:55	770.70	31.29	62.88	52.99	31.49	55.38	56.37	0.242
12:00	779.27	31.09	62.19	52.78	31.69	55.91	56.71	0.248
12:05	782.26	31.69	62.99	53.10	31.89	56.21	57.09	0.242
12:10	792.08	31.69	64.09	53.50	32.13	56.47	57.60	0.270
12:15	795.36	31.88	63.78	53.79	32.39	56.87	57.77	0.274
12:20	803.06	31.98	64.49	53.79	32.68	57.45	58.36	0.280
12:25	805.95	31.88	64.68	54.29	32.99	57.44	58.44	0.286
12:30	811.54	31.80	65.29	54.29	33.14	57.76	58.79	0.292
12:35	812.79	32.19	66.08	54.50	33.33	57.56	58.66	0.298
12:40	819.05	31.29	64.49	54.69	33.54	58.39	59.25	0.281
12:45	826.85	31.59	65.39	54.79	33.64	58.79	59.89	0.281
12:50	829.84	32.30	64.78	54.90	33.79	58.92	59.79	0.315
12:55	831.48	32.78	67.08	54.98	33.94	58.77	60.05	0.315
13:00	833.79	32.88	66.90	55.29	34.15	59.03	60.23	0.281
13:05	837.93	33.70	67.40	55.88	34.14	59.07	60.48	0.324
13:10	840.44	32.30	66.50	55.59	34.53	59.68	60.66	0.309
13:15	841.01	33.28	68.38	55.88	34.69	59.31	60.69	0.294
13:20	840.05	33.59	67.79	56.09	34.85	59.32	60.54	0.328
13:25	838.99	33.89	66.79	56.09	34.93	59.56	60.72	0.321
13:30	838.80	33.70	66.39	56.30	35.09	59.65	60.83	0.318
13:35	837.74	32.99	64.20	56.09	35.04	60.09	60.66	0.309
13:40	840.44	34.10	65.18	56.69	35.18	59.96	60.72	0.309
13:45	837.93	33.20	64.09	56.09	35.44	60.14	60.74	0.305
13:50	836.29	33.78	65.89	56.59	35.50	59.67	60.56	0.300
13:55	831.48	35.10	66.79	56.69	35.70	58.95	60.21	0.308
14:00	829.26	35.68	68.38	56.88	35.74	58.70	59.97	0.308
14:05	822.33	35.10	68.59	57.09	35.99	58.14	59.35	0.300

ภาคผนวก ง. 13 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 13 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	731.11	36.79	67.08	56.80	38.23	52.66	53.73	0.226
14:15	720.61	36.48	66.79	56.38	38.29	52.22	53.50	0.220
14:20	708.76	36.90	65.10	56.09	38.54	51.86	53.04	0.203
14:25	699.03	36.08	64.89	55.98	38.69	51.14	52.25	0.198
14:30	690.27	36.08	64.89	55.80	38.84	50.43	51.63	0.185
14:35	675.24	36.69	64.60	55.69	38.94	49.45	50.60	0.181
14:40	663.20	37.19	64.39	55.29	39.24	48.63	49.86	0.167
14:45	654.92	36.90	62.80	55.19	39.29	48.30	49.38	0.162
14:50	643.17	36.98	63.99	54.79	39.49	47.24	48.44	0.157
14:55	629.78	36.29	63.59	54.58	39.53	46.36	47.51	0.144
15:00	615.14	36.90	64.39	53.89	39.69	45.16	46.55	0.144
15:05	605.31	37.29	63.59	54.19	39.89	44.44	45.78	0.131
15:10	590.38	36.48	62.88	53.68	39.94	43.68	44.90	0.126
15:15	574.01	37.29	62.99	53.29	40.24	42.46	43.74	0.118
15:20	569.29	37.40	61.29	53.18	40.24	42.33	43.46	0.115
15:25	558.31	36.79	60.98	53.39	40.35	41.55	42.74	0.115
15:30	546.17	36.58	60.00	52.60	40.35	40.48	41.54	0.100
15:35	527.58	37.40	60.98	52.09	40.39	39.07	40.28	0.088
15:40	504.75	37.98	61.29	51.99	40.48	37.27	38.49	0.089
15:45	488.18	38.09	60.39	51.49	40.69	36.16	37.40	0.072
15:50	481.06	37.59	58.89	51.20	40.80	35.76	36.81	0.072
15:55	464.01	37.69	57.38	50.80	41.19	34.45	35.47	0.067
16:00	477.59	37.69	56.99	50.38	41.25	35.46	36.51	0.062

ภาคผนวก ง. 14 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 14 05 2018

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
9:00	497.62	29.00	49.48	43.48	32.24	35.80	36.52	0.05
9:05	510.15	29.08	50.19	44.30	32.34	36.79	37.55	0.06
9:10	522.67	29.18	50.59	45.20	32.38	37.97	38.64	0.07
9:15	543.86	29.50	51.59	45.49	32.24	38.97	39.79	0.07
9:20	556.57	29.89	52.68	46.49	32.59	39.69	40.54	0.08
9:25	570.93	30.29	53.79	46.89	32.74	40.73	41.59	0.10
9:30	585.47	30.40	54.39	47.50	32.79	41.92	42.73	0.09
9:35	597.32	30.90	55.59	48.00	32.89	42.79	43.70	0.10
9:40	610.61	30.90	56.80	48.79	33.04	43.59	44.66	0.11
9:45	626.70	30.98	57.28	49.40	33.13	44.66	45.70	0.11
9:50	643.94	31.09	57.70	49.98	33.13	45.75	46.87	0.12
9:55	657.13	31.80	58.60	50.49	33.29	46.55	47.62	0.12
10:00	671.00	31.88	58.99	50.99	33.40	47.41	48.55	0.13
10:05	680.93	31.80	59.58	51.28	33.54	48.33	49.18	0.14
10:10	691.91	31.98	60.00	51.70	33.94	49.11	49.97	0.15
10:15	705.49	32.19	61.79	52.28	33.90	49.72	50.86	0.15
10:20	714.25	32.49	61.48	52.39	34.09	50.46	51.48	0.16
10:25	723.98	32.19	61.98	52.78	34.14	51.06	52.10	0.17
10:30	732.94	32.30	61.98	52.99	34.39	51.76	52.63	0.17
10:35	740.26	32.88	62.59	53.79	34.48	51.93	52.95	0.18
10:40	750.66	33.09	62.88	54.00	34.44	52.64	53.62	0.18
10:45	760.78	33.59	64.39	55.08	34.74	53.14	54.17	0.19
10:50	766.65	33.78	64.39	54.98	34.84	53.58	54.51	0.19
10:55	773.20	34.18	65.58	55.40	35.09	53.77	54.71	0.19
11:00	782.93	34.10	66.08	55.40	35.39	54.35	55.55	0.21
11:05	785.53	33.99	66.98	56.19	35.50	54.41	55.80	0.23
11:10	796.13	33.59	66.50	55.88	35.64	55.35	56.35	0.22
11:15	802.68	34.10	67.19	56.69	35.84	55.48	56.80	0.23
11:20	809.52	34.28	67.79	57.38	36.13	55.80	57.15	0.24
11:25	813.95	34.49	68.80	57.49	36.49	56.00	57.37	0.23
11:30	818.47	33.89	68.80	57.49	36.64	56.51	57.91	0.25

ภาคผนวก ง. 14 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 14 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
11:35	824.93	34.10	68.80	57.89	36.69	56.87	58.28	0.25
11:40	826.18	34.10	68.99	57.89	36.94	57.14	58.35	0.25
11:45	831.29	33.59	68.99	57.78	37.09	57.48	58.69	0.25
11:50	834.75	34.28	69.20	58.28	37.35	57.40	58.66	0.25
11:55	836.10	35.58	68.38	59.10	37.69	57.50	58.77	0.26
12:00	840.24	36.19	68.69	59.10	37.79	57.55	58.89	0.27
12:05	838.99	35.79	69.20	59.29	37.99	57.51	58.91	0.27
12:10	834.95	35.18	67.88	59.10	38.04	57.60	58.64	0.27
12:15	843.71	36.40	68.69	59.18	38.38	58.16	59.25	0.27
12:20	846.12	36.90	69.49	59.79	38.54	58.07	59.45	0.27
12:25	847.95	37.29	70.20	59.89	38.68	58.05	59.37	0.29
12:30	846.50	37.40	69.59	60.08	39.04	58.02	59.41	0.28
12:35	849.39	37.09	69.88	60.19	39.19	58.37	59.85	0.28
12:40	836.58	37.29	68.99	60.29	39.24	57.90	59.19	0.27
12:45	841.88	36.90	69.28	60.29	39.38	58.17	59.46	0.26
12:50	792.95	36.79	70.78	60.00	39.74	53.46	55.33	0.26
12:55	772.14	36.98	69.88	59.39	39.89	54.07	55.29	0.23
13:00	574.20	37.09	64.49	56.09	39.99	41.36	41.71	0.16
13:05	834.27	37.88	67.08	57.99	40.04	58.46	59.81	0.18
13:10	818.09	38.59	68.19	59.68	40.24	56.86	58.28	0.22
13:15	808.75	39.49	68.99	59.89	40.39	56.43	57.71	0.22
13:20	806.63	40.39	70.99	60.19	40.64	55.63	57.26	0.24
13:25	794.10	38.09	70.89	60.29	40.59	55.04	56.67	0.24
13:30	790.64	38.38	71.58	60.58	41.14	54.71	56.46	0.23
13:35	782.26	38.19	70.49	60.58	41.23	54.40	55.91	0.22
13:40	784.47	38.38	70.39	60.58	41.29	54.72	56.17	0.22
13:45	773.78	37.69	69.70	60.19	41.54	54.16	55.57	0.22
13:50	762.80	38.09	70.09	60.29	41.69	53.38	54.85	0.21
13:55	753.65	37.69	68.99	60.29	41.83	52.89	54.30	0.19
14:00	744.50	38.99	68.99	60.50	41.79	52.23	53.60	0.19
14:05	729.66	39.38	67.98	59.79	42.13	51.57	52.87	0.18

ภาคผนวก ง. 14 ผลการทดสอบที่ 0.0083 kg/s 100 L วันที่ 14 05 2018 (ต่อ)

Time	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _{PV1} (°C)	T _{PV2} (°C)	T _s (°C)	P _{PV1} (W)	P _{PV2} (W)	P _{TEG} (mW)
14:10	717.53	40.18	68.69	59.79	42.13	50.73	52.17	0.17
14:15	702.21	39.28	67.79	59.68	42.44	49.98	51.31	0.17
14:20	685.45	38.78	67.69	59.89	42.64	48.60	50.04	0.16
14:25	677.75	38.78	65.58	59.39	42.79	48.62	49.78	0.13
14:30	676.59	38.88	66.08	59.10	42.99	48.50	49.68	0.13
14:35	658.96	39.09	64.99	58.39	42.99	47.49	48.59	0.12
14:40	613.98	38.69	64.39	57.99	43.23	44.67	45.63	0.11
14:45	629.68	39.28	64.78	57.20	43.44	45.74	46.82	0.10
14:50	602.81	38.30	63.20	57.09	43.44	45.76	46.72	0.10
14:55	480.38	38.88	60.19	55.40	43.73	42.82	43.28	0.09
15:00	599.92	39.20	62.48	56.19	43.79	43.75	44.80	0.08
15:05	187.18	39.09	56.99	52.09	43.79	13.61	13.92	0.04
15:10	290.05	38.09	54.90	50.80	43.74	20.92	21.08	0.03
15:15	402.26	38.09	54.29	50.49	43.68	28.92	29.77	0.02
15:20	304.30	38.59	53.79	50.09	43.84	22.65	22.79	0.02
15:25	134.78	38.30	49.69	47.29	43.60	9.34	9.42	0.01
15:30	342.93	37.40	47.89	46.10	43.64	26.12	26.67	0.01
15:35	550.99	37.69	52.39	48.98	43.84	42.53	43.35	0.02
15:40	533.17	38.09	53.79	50.49	43.89	39.57	40.40	0.03
15:45	489.82	38.19	55.69	51.70	44.05	38.00	38.80	0.04
15:50	457.17	38.30	56.38	51.99	43.94	34.82	35.60	0.04
15:55	124.37	39.59	55.48	50.59	44.14	14.60	14.87	0.03
16:00	379.92	39.38	55.19	50.19	44.23	30.15	30.82	0.02

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายทวีพงศ์ เทพทวี
เกิดเมื่อ	28 ธันวาคม 2536
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 ปริญญาตรี วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2551 มัธยมศึกษา ตอนปลาย โรงเรียนตรังวิทยา จังหวัดตรัง taweepong_teptawee@outlook.com

