

การเลือกขนาดของโมดูลพีวี/ทีและถังเก็บน้ำเย็นสำหรับเครื่องผลิตน้ำร้อน ปั๊มความร้อนเสริมพีวี/ที : กรณีศึกษาประเทศไทย

กรกช อุตมะ¹ ณัฐ วรยศ^{2*} ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์³ ธรณิศวรรค์ ดีทยาพา⁴

¹สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

¹บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

^{2*,3,4}ห้องปฏิบัติการระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : nat.v@cmu.ac.th

รับต้นฉบับ : 25 ตุลาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข : 27 ธันวาคม 2565; ตอรับบทความ : 6 กุมภาพันธ์ 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนแบบอัดไอทำงานร่วมกับโมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน (พีวี/ที) โดยปั๊มความร้อนมีความสามารถในการทำความร้อนสูงสุดที่ 3,000 วัตต์ ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากโมดูลพีวี/ที โดยแต่ละโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 200 วัตต์ และมีพื้นที่รับรังสี 1.326 ม² การศึกษาจะพิจารณาขนาดของโมดูลพีวี/ที และขนาดของถังน้ำเย็นที่เหมาะสมในการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350, 500 และ 700 ลิตร ให้มีอุณหภูมิน้ำแต่ละวัน 60 °C และพิจารณาปริมาณพลังงานความร้อน และไฟฟ้าที่ผลิตได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมดูล และขนาดถังน้ำเย็น รวมถึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ลวดไฟฟ้า ภายใต้สภาวะอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ผลการศึกษาพบว่าการผลิตน้ำร้อนปริมาณดังกล่าว ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายได้มากกว่าร้อยละ 90, 90 และ 70 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 8, 8 และ 10 โมดูล ตามลำดับ โดยมีขนาดถังน้ำเย็นที่ 300, 300 และ 50 ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.70, 3.95 และ 4.83 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ : การประหยัดพลังงาน ปั๊มความร้อน โมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน การผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์



Sizing of PV/T Module and Its Cool Water Tank for PV/T-boosted Heat Pump Water Heating: A Case Study of Thailand

Korakote Utama¹ Nat Vorayos^{2*} Tanongkiat Kiatsiriroat³ Thoranis Deethayat⁴

¹Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

¹Graduate School, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

²Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: nat.v@cmu.ac.th

Received: 25 October 2022; Revised: 27 December 2022; Accepted: 6 February 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

The research aims to investigate the potential for hot water production of vapor compression heat pump together with photovoltaic/thermal (PV/T). The heat pump with a maximum heating capacity of 3,000 W extracted heat from each PV/T module of 1.326 m² in parallel connection that generated a maximum heating capacity of 200 Wp. This study was considered the suitable sizes of PV/T module and cool water tank for hot water production volumes of 350, 500, and 700 liters at 60 °C every day. The amount of heat and electrical energy generated with various PV/T modules, and cool water sizing including the saving of electrical energy from transmission line compare with that from electrical coil for hot water production were investigated under Chiang Mai, Khon Kaen, Bangkok, and Songkhla climates. The result showed that the presented unit could save electrical energy over 90, 90, 70% of the transmission line, respectively. In term of economic analysis, the suitable numbers of PV/T modules with 300, 300, 50 L of cool water tank, respectively, were found and the payback periods were 5.70, 3.95, 4.83 years, respectively.

Keywords: Energy saving, Heat pump, Photovoltaic/thermal module, Solar hot water

1) บทนำ

โมดูลโฟโตวอลเทจิก (พีวี) จะเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้าโดยตรง สมรรถนะในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิโมดูลสูงขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม [1] จึงมีการหาวิธีการในการระบายความร้อนจากโมดูล โดยใช้อากาศหรือน้ำในการระบายความร้อน Lungkadee และ Asanakham [2] ได้ติดตั้งครีบบที่ด้านหลังของโมดูล และมีการเป่าอากาศผ่านพื้นที่ผิวดังกล่าวช่วยในการลดอุณหภูมิของโมดูล Wilson [3] ได้ทำการฝังท่อด้านหลังโมดูล โดยมีน้ำช่วยในการระบายความร้อน ทั้งนี้อากาศหรือน้ำร้อนที่ได้ ถ้านำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทางความร้อน จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ในลักษณะการทำงานเช่นนี้ อุปกรณ์จะเรียกว่าโมดูลโฟโตวอลเทจิก/ความร้อน (พีวี/ที) ในกรณีที่ทำการผลิตไฟฟ้า และน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์ จะมีการเชื่อมต่อโมดูลพีวี/ทีกับถังเก็บน้ำร้อน ในช่วงแรกของการทำงานเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนยังมีค่าต่ำ น้ำจะช่วยระบายความร้อนจากโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามีค่าสูง แต่เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนขึ้นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง แนวทางหนึ่งในการลดอุณหภูมิของโมดูลพีวี/ที และสามารถผลิตน้ำร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ คือ การใช้ปั๊มความร้อนแบบอัดไอดึงความร้อนจากโมดูลพีวี/ที และความร้อนดังกล่าวจะถูกเพิ่มคุณภาพความร้อนไปผลิตน้ำร้อนที่คอนเดนเซอร์ของระบบอัดไอ เช่นเดียวกับระบบปั๊มความร้อนทำงานเสริมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน [4] อุณหภูมิของโมดูลจะลดลงทำให้ผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะได้น้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลพีวี/ที จะถูกนำมาใช้ในการเดินเครื่องปั๊มความร้อน Obalanlege และคณะ [5] ได้วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิของน้ำที่ไหลในโมดูลพีวี/ที ความเข้มรังสีอาทิตย์ ขนาดของถังเก็บน้ำร้อน และอัตราการไหลของน้ำในโมดูลที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พบว่าเมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิในโมดูลพีวี/ทีเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของโมดูลพีวี/ทีลดลง และขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) ของระบบปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาตรถังน้ำร้อนให้มีค่าสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิโมดูลพีวี/ทีลดลงด้วย ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของโมดูลพีวี/ที นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลของน้ำในโมดูลพีวี/

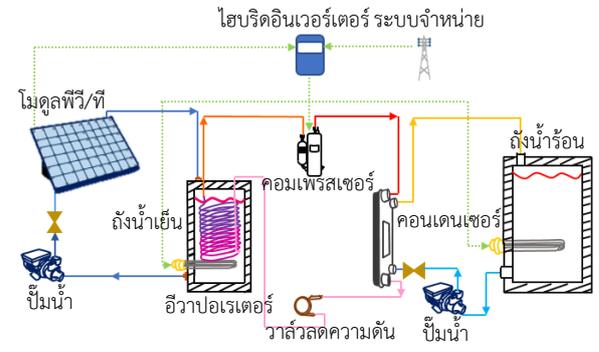
ที่จากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพรวมของโมดูลพีวี/ทีสูงขึ้นอีก Vaishak และ Bhale [6] ได้แนะนำให้ใช้ R134a และ R410A เป็นสารทำงานในปั๊มความร้อน เนื่องจากมีเสถียรภาพทางเคมี และค่าความร้อนแฝงสูง รวมถึงความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม Kosan และคณะ [7] ได้วิเคราะห์สมรรถนะของโมดูลพีวี/ทีทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งใบมินต์ โมดูลพีวี/ทีจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน และมีโมดูลพีวีจ่ายไฟฟ้าให้กับพัดลม และหลอดไฟเพื่ออบแห้งใบมินต์ ผลการวิจัยพบว่ามีประสิทธิภาพด้านไฟฟ้าต่ำสุด 11.9% และสูงสุด 14.02% ประสิทธิภาพความร้อนมีค่าต่ำสุด 38.51% และสูงสุด 70.56% ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ โมดูลพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับการอบแห้งนี้มีค่า COP เฉลี่ยเท่ากับ 4.18 และมีระยะเวลาคืนทุน 2.32 ปี Evangelos และคณะ [8] ได้ทำการประเมินระบบที่ประกอบด้วยโมดูลพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อน พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายตลอดทั้งปีได้ถึง 67% และราคาค่าไฟฟ้ามีอิทธิพลอย่างมากต่อความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งในประเทศที่มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูง จะยิ่งเหมาะกับการนำโมดูลพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อนมาใช้ประโยชน์ Bai และคณะ [9] ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโมดูลพีวี/ทีทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนใช้ในศูนย์กีฬาขนาดใหญ่ โดยใช้ข้อมูลอุตุนิมวิทยาที่ ฮองกง ปารีส ลียง และนิช พบว่านิชสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด 75.63% เมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนแบบขดลวดไฟฟ้า เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูง และระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดที่ 8.40 ปี

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการทำงานร่วมกันของโมดูลพีวี/ที และปั๊มความร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลพีวี/ที และเพิ่มสมรรถนะในการผลิตความร้อนของปั๊มความร้อน อย่างไรก็ตามการเลือกขนาดถังเก็บน้ำเย็น การควบคุมอุณหภูมิของโมดูลพีวี/ที และจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เหมาะสม สอดคล้องกับขนาดของปั๊มความร้อนเพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้า และภาระความร้อนได้ตามที่ต้องการ ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง โดยเฉพาะในประเทศไทยจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

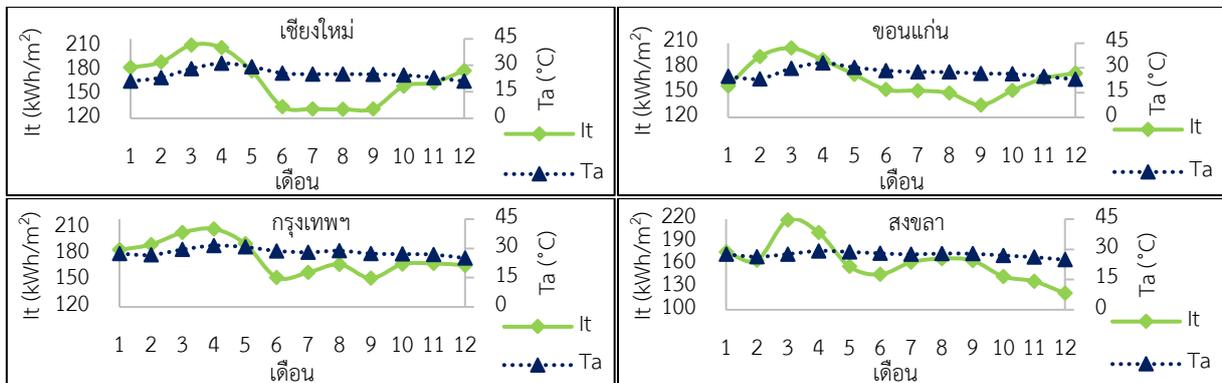
สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ปั๊มความร้อนขนาดความสามารถในการทำความร้อนสูงสุด 3,000 วัตต์ ที่ใช้สารทำงาน R134a เป็นสารทำงาน เพื่อผลิตน้ำร้อนในเวลากลางวัน น้ำร้อนที่ได้จะถูก

นำไปใช้ทั้งหมดในเวลากลางคืน โดยโมดูลพีวี/ทีเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน และลดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ถังฮีววาเปอร์เตอร์ไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C ตลอดการทำงานในตอนกลางวัน เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของโมดูลพีวี/ทีต่ำเกินไปจนเกิดการควบแน่นของไอน้ำ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งยังทำให้ค่า COP ของปั๊มความร้อนมีค่าต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิแตกต่างระหว่างคอนเดนเซอร์ และฮีววาเปอร์เตอร์ที่สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิ น้ำที่ถังคอนเดนเซอร์ จะถูกควบคุมไม่ให้ต่ำกว่า 60 °C เมื่อสิ้นสุดการทำงานในตอนเย็นของแต่ละวัน ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้จะมีกำลังไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายร่วมจ่ายให้กับระบบทั้งหมดในกรณีที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์ไม่เพียงพอ ข้อมูลรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศโดยรอบจะใช้ข้อมูลของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ในแต่ละภูมิภาค ซึ่งค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมแต่ละจังหวัดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้า โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ขณะเดียวกันอุณหภูมิโมดูลที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลง ทำให้มีผลต่อการเลือกขนาดของโมดูลพีวี/ทีที่เหมาะสม ในการศึกษาจะพิจารณาจำนวนโมดูลพีวี/

ทีที่มีความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ที่สภาวะมาตรฐาน 200 วัตต์ และโมดูลพีวี/ทีจะต่อขนานกันทางความร้อน และพิจารณาขนาดของถังน้ำเย็นที่ฮีววาเปอร์เตอร์ของปั๊มความร้อนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350, 500, 700 ลิตร ในแต่ละวัน จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 1 : ระบบผลิตน้ำร้อนพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อน



รูปที่ 2 : ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ (It) และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ta) ในแต่ละจังหวัด [10]

2) ระบบทำน้ำร้อนแบบปั๊มความร้อนเสริมพีวี/ที

จากรูปที่ 1 ชุดโมดูลพีวี/ที ขนาดความสามารถสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า 200 วัตต์ กำหนดให้หันไปทางทิศใต้ โดยมีมุมเอียงเท่ากับมุมละติจูดของจังหวัดที่ติดตั้ง โมดูลพีวี/ทีจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบปั๊มความร้อนขนาดความสามารถในการทำความร้อนสูงสุด 3 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้สารทำความเย็น R134a โดยมีถังน้ำเย็นที่ฮีววาเปอร์เตอร์ของปั๊มความร้อน โดยมีลดความร้อน 2 กิโลวัตต์

ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C ขณะที่ปั๊มความร้อนทำงาน โดยมีอัตราการไหลของน้ำในโมดูลพีวี/ที และถังน้ำเย็นฮีววาเปอร์เตอร์ 6 ลิตรต่อนาที ที่คอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนจะมีการปลดปล่อยความร้อน โดยมีอัตราการไหลของน้ำที่คอนเดนเซอร์ 3 ลิตรต่อนาที มารับความร้อนที่คอนเดนเซอร์ไปจ่ายที่ถังน้ำร้อน โดยจะมีการให้ความร้อนเสริมด้วยลวดไฟฟ้าในกรณีที่อุณหภูมิสูงสุดของน้ำไม่ถึง 60 °C เมื่อสิ้นสุดการทำงานในตอนเย็นของแต่ละวัน

ละวัน ทั้งนี้จะไม่มีการนำน้ำร้อนไปใช้งานในตอนกลางวัน และ น้ำร้อนที่ได้จะถูกนำไปใช้หมดในเวลากลางวัน

2.1) โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน

โมดูลพีวี/ที ทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนในรูปแบบน้ำร้อน และพลังงานไฟฟ้า ในกรณีการผลิตน้ำร้อน โมดูลพีวี/ที ทำหน้าที่เช่นเดียวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งอัตรา ความร้อน [11] จะคำนวณจาก

$$Q_{PV/T} = F_R(\tau\alpha)I_t A_C - F_R U_L A_C (T_{fi} - T_a) \quad (1)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุด [11] จะคำนวณจาก

$$P_m = P_{m, stc} \cdot (1 - \gamma(T_{PV} - 25)) \cdot \left(\frac{I_T}{1000}\right) \quad (2)$$

อุณหภูมิโมดูล สามารถคำนวณจาก

$$T_{PV} = T_a + (NOCT - 20) \left(\frac{I_T}{800}\right) \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } NOCT = 800 F_R \cdot \frac{T_{fi} - T_a}{I_T} + \frac{(\tau\alpha)}{U_L} \cdot (1 - F_R) 800 + 20 \quad (4)$$

โมดูลพีวี/ทีที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเช่นเดียวกับ S. Vat และคณะ [11] โดยข้อมูลอุปกรณ์วัด และข้อมูลทางเทคนิคแสดง ในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 : ข้อมูลอุปกรณ์วัดของโมดูลพีวี/ที

Sensor	Characteristics and Measured Range	Accuracy
K-type thermocouple	Measures PV module temperature, inlet/outlet temperature, and ambient temperature Range: -270 to 1260 °C	±0.5 °C
Pyranometer MS-602 with data logger Hukseflux LI19	Measures solar irradiation. Range: 0-2000 W/m ²	±1.5%
Range: 0-2000 W/m ²	0-60 V 0.01-12 A	±1% ±1%
Rotameter	Measures water flow rate Range: 1- 10 LPM	±4%

ตารางที่ 2 : ข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลพีวี/ที [11]

Cell type	Mono-crystalline
Dimensions	828 mm x 1601 mm x 90 mm
Aperture area	1.326m ²
Maximum power, P _m	200 Wp
Electrical efficiency of module, η _{stc}	15.08%
Temperature coefficients of P _m , γ	0.45%/°C
m _{PVT}	6 LPM
F _R U _L	10.16
F _R (τα)	0.46

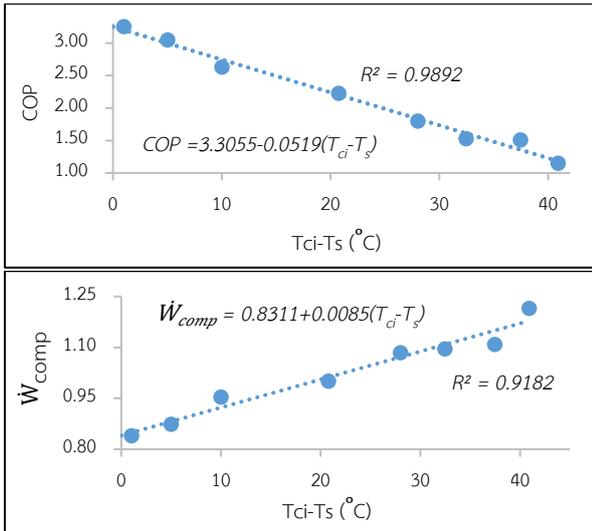
2.2) ปั๊มความร้อน พร้อมถังน้ำร้อนและถังน้ำเย็น

ปั๊มความร้อนที่ใช้ในการศึกษา จะเป็นปั๊มความร้อนขนาดเล็กของ Utama [12] ซึ่งได้มีการทดสอบในการนำมาผลิตน้ำร้อน โดยข้อมูลอุปกรณ์วัดแสดงในตารางที่ 3 และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้คอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน, W_{comp} ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนในถังน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำเย็นในถังน้ำเย็นที่คอนเดนเซอร์ และอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน, (T_{ci} - T_s) ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} \quad (5)$$

ตารางที่ 3 : ข้อมูลอุปกรณ์วัดของปั๊มความร้อน

Sensor	Characteristics and measured range	Accuracy
K-type thermocouple	Measures water temperature and ambient temperature Range: -270 to 1260 °C	±0.5 °C
Rotameter	Measures water flow rate Range: 1- 10 LPM	±4%
Power meter with clamp sensor	Measures compressor power consumption Range: 10-600 ACV, 0.2-1200 ACA	±1%



รูปที่ 3 : COP และ \dot{W}_{comp} ที่แปรผันตามอุณหภูมิแตกต่างของน้ำร้อนในถังน้ำร้อนและน้ำเย็นในถังน้ำเย็น

สำหรับปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานนี้ จะมีกำลังความสามารถในการทำความร้อนสูงสุดที่ 3 กิโลวัตต์ โดย ค่า COP และกำลังไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์ (สมมุติมีค่าเท่ากับกำลังงานที่คอมเพรสเซอร์) จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแตกต่างของน้ำในถังน้ำเย็น และถังน้ำร้อน ดังรูปที่ 3 โดย

$$COP = 3.3055 - 0.0519(T_{ci} - T_s) \quad (6)$$

$$\dot{W}_{comp} = 0.8311 + 0.0085(T_{ci} - T_s) \quad (7)$$

อุณหภูมิของน้ำร้อนในถังน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำเย็นในถังน้ำเย็น เมื่อเวลาผ่านไป Δt , $T_{ci}^{t+\Delta t}$ และ $T_s^{t+\Delta t}$ ตามลำดับ ในกรณีที่สมมุติว่าถังหุ้มฉนวนอย่างดี สามารถคำนวณจาก

$$\begin{aligned} T_{ci}^{t+\Delta t} &= \left(\frac{\dot{Q}_{cond}}{M_w C_p} \right) \cdot \Delta t + T_{ci}^t \\ &= \left(\frac{COP}{M_w C_p} \right) \dot{W}_{comp} \cdot \Delta t + T_{ci}^t \\ &= \left(\frac{3.3055 - 0.0519(T_{ci} - T_s)}{M_w C_p} \right) [0.8311 + 0.0085(T_{ci} - T_s)] \Delta t + T_{ci}^t \quad (8) \end{aligned}$$

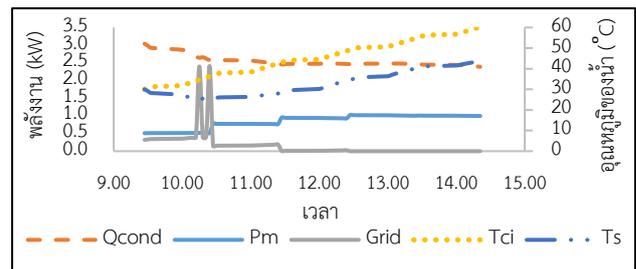
$$T_s^{t+\Delta t} = \left(\frac{\dot{Q}_{PV/T} - \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{aux,c}}{M_s C_p} \right) \cdot \Delta t + T_s^t \quad (9)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อกำหนดอัตราการความร้อนที่คอนเดนเซอร์ อุณหภูมิน้ำในถังน้ำร้อน และถังน้ำเย็น ในสภาวะเริ่มต้น จะสามารถคำนวณอุณหภูมิในถังน้ำร้อน และในถังน้ำเย็นเมื่อเวลาผ่านไป Δt ได้

3) ผลการวิจัย

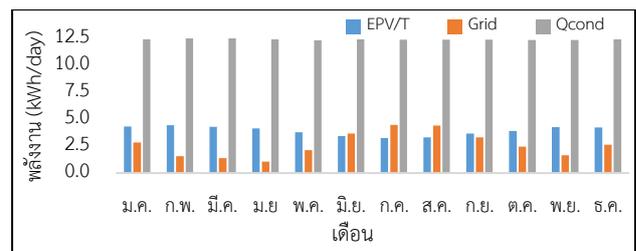
รูปที่ 4 แสดงข้อมูลรายชั่วโมงในเดือนเมษายนของการผลิตน้ำร้อน 350 ลิตร โดยใช้โมดูลพีวี/ทีจำนวน 6 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 100 ลิตร ที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าในช่วงเช้าความเข้ม

รังสีอาทิตย์มีค่าต่ำส่งผลให้อุณหภูมิถังน้ำเย็น (Ts) ต่ำกว่า 25 °C ดังนั้นจึงมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย (Grid) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิถังน้ำเย็นในถังไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C และหลังจากราว 11:30 น.รังสีอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูงพอ จะไม่มีการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย และที่เวลาประมาณ 14:45 น. อุณหภูมิถังน้ำร้อน (Tci) มีอุณหภูมิ 60 °C ระบบจึงหยุดทำงาน อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดวันในตอนเย็น จะมีการให้ความร้อนด้วยหลอดไฟฟ้าในถังน้ำร้อน ในกรณีที่อุณหภูมิถังน้ำเย็นไม่ถึง 60 °C

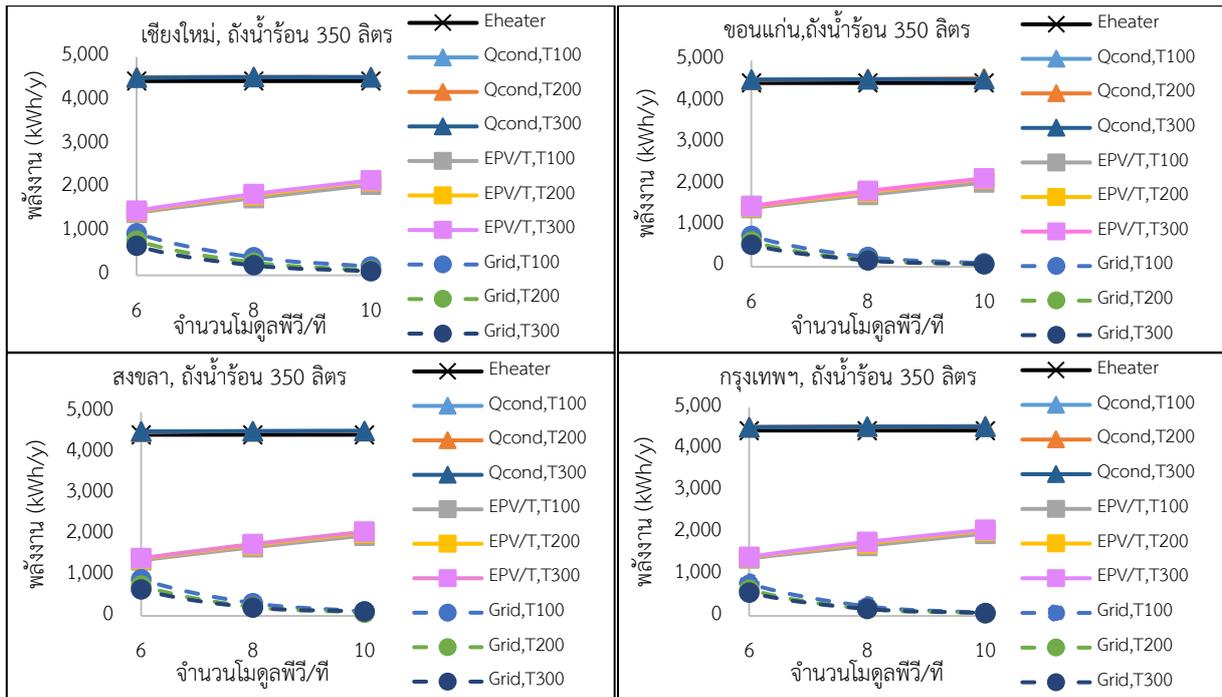


รูปที่ 4 : ข้อมูลรายชั่วโมงในเดือนเมษายนที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้โมดูลพีวี/ที 6 โมดูล ถังน้ำเย็น 100 ลิตร และถังน้ำร้อน 350 ลิตร

รูปที่ 5 แสดงข้อมูลรายเดือนของการผลิตน้ำร้อน 350 ลิตร โดยใช้โมดูลพีวี/ทีจำนวน 6 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 100 ลิตร ที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าในช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาว (ตุลาคม-พฤษภาคม) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลพีวี/ที (EPV/T) จะมากกว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย (Grid) แต่ในช่วงฤดูฝน (เดือนมิถุนายน-สิงหาคม) ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ และยังพบว่าในแต่ละเดือน ค่าพลังงานความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ (Qcond) ค่อนข้างคงที่เนื่องจากก่อนสิ้นสุดวันในตอนเย็นระบบสามารถผลิตน้ำในถังน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 60 °C



รูปที่ 5 : ข้อมูลรายเดือน ที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้โมดูลพีวี/ที 6 โมดูล ถังน้ำเย็น 100 ลิตร และถังน้ำร้อน 350 ลิตร

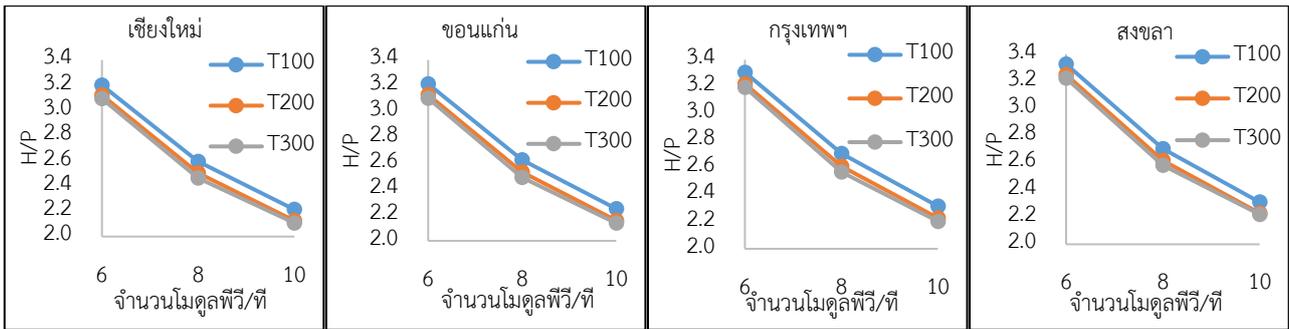


รูปที่ 6 : ข้อมูลแสดงค่าพลังงานต่าง ๆ ใน 1 ปี ของการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350 ลิตรต่อวัน แต่ละจังหวัด

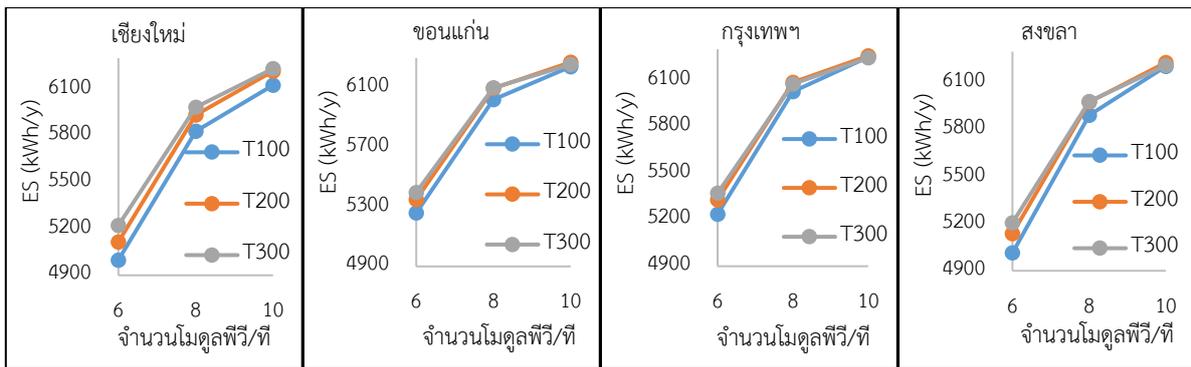
รูปที่ 6 แสดงผลการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350 ลิตรต่อวัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมดูล 6-10 โมดูล และถังน้ำเย็นที่อิวาปอเรเตอร์ 100-300 ลิตร (T100-T300) ใช้ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่โมดูลพีวี/ทีผลิตได้ (EPV/T) มีค่าเพิ่มขึ้น และพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบจำหน่าย (Grid) จะลดลงตามจำนวนโมดูลที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนโมดูลมากกว่า 8 สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายมากกว่าร้อยละ 90 เทียบกับพลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า (Eheater) และเมื่อขนาดถังน้ำเย็นเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลจะสูงขึ้น และความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายจะลดลง เนื่องจากขนาดของถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น จะสามารถรักษาอุณหภูมิน้ำในถังน้ำเย็นไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C ได้ดีกว่า จึงลดการให้ความร้อนเสริมที่ถังดังกล่าว สำหรับพลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อน (Qcond) ค่อนข้างคงที่ ผลที่เกิดขึ้นในแต่ละจังหวัด มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเชียงใหม่ และขอนแก่น สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบที่สงขลา

เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงกว่า (ผลรวมของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่โมดูลพีวี/ทีได้รับใน 1 ปี 2011.04, 2001.57 kWh/m² ตามลำดับ) และยังพบว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่ากรุงเทพฯ แม้กรุงเทพฯ จะมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด (ผลรวมของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่โมดูลพีวี/ทีได้รับใน 1 ปี 2120.9 kWh/m²) เนื่องจากกรุงเทพฯ มีอุณหภูมิอากาศสูง ทำให้อุณหภูมิโมดูลมีค่าสูง ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำลง

รูปที่ 7 แสดงอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูล (H/P) ของการผลิตน้ำร้อน 350 ลิตร โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ซึ่งมีค่าลดลงตามจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันผลที่เกิดขึ้นใน 4 จังหวัด มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และเมื่อขนาดถังน้ำเย็นเพิ่มขึ้นความสามารถในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงไปอีกเล็กน้อย



รูปที่ 7 : อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (H/P) ของขนาดถังน้ำร้อน 350 ลิตร ในแต่ละจังหวัด



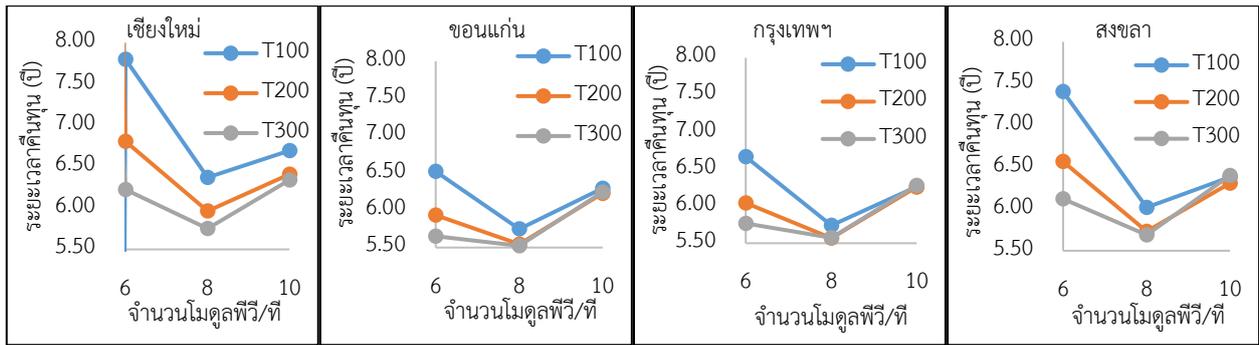
รูปที่ 8 : พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ES) ของถังน้ำร้อน 350 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

รูปที่ 8 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ใน 1 ปี (ES) เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า และใช้พลังงานจากระบบจำหน่าย โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา โดยปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ในแต่ละวัน 350 ลิตร จะเห็นได้ว่าพลังงานจะประหยัดได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนโมดูลพีวี/ที และขนาดถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น แต่มีผลน้อยลงเมื่อจำนวนโมดูลเพิ่มขึ้น สำหรับจังหวัดเชียงใหม่ และสงขลา การประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายมีค่าใกล้เคียงกัน และสำหรับจังหวัดขอนแก่น และกรุงเทพฯ มีค่าประหยัดพลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุน โดยใช้ข้อมูลตามตารางที่ 4

โดยที่กำหนดให้พีวี/ทีมีอายุการใช้งาน 20 ปี และปีความร้อนมีอายุการใช้งาน 10 ปี มูลค่าซากกำหนดให้เป็น 10% ของเงินลงทุนทั้งหมด นอกจากนั้นค่าดำเนินการและซ่อมบำรุงกำหนดให้เป็น 15% และ 5% ของเงินลงทุนตามลำดับ พบว่าการผลิตน้ำร้อนขนาดถัง 350 ลิตร ที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ สงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร มีระยะเวลาคืนสั้นที่สุด โดยทั้ง 4 จังหวัด มีระยะเวลาคืนทุน 5.75, 5.52, 5.57 และ 5.69 ปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 9

ตารางที่ 4 : ข้อมูลต้นทุนและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ

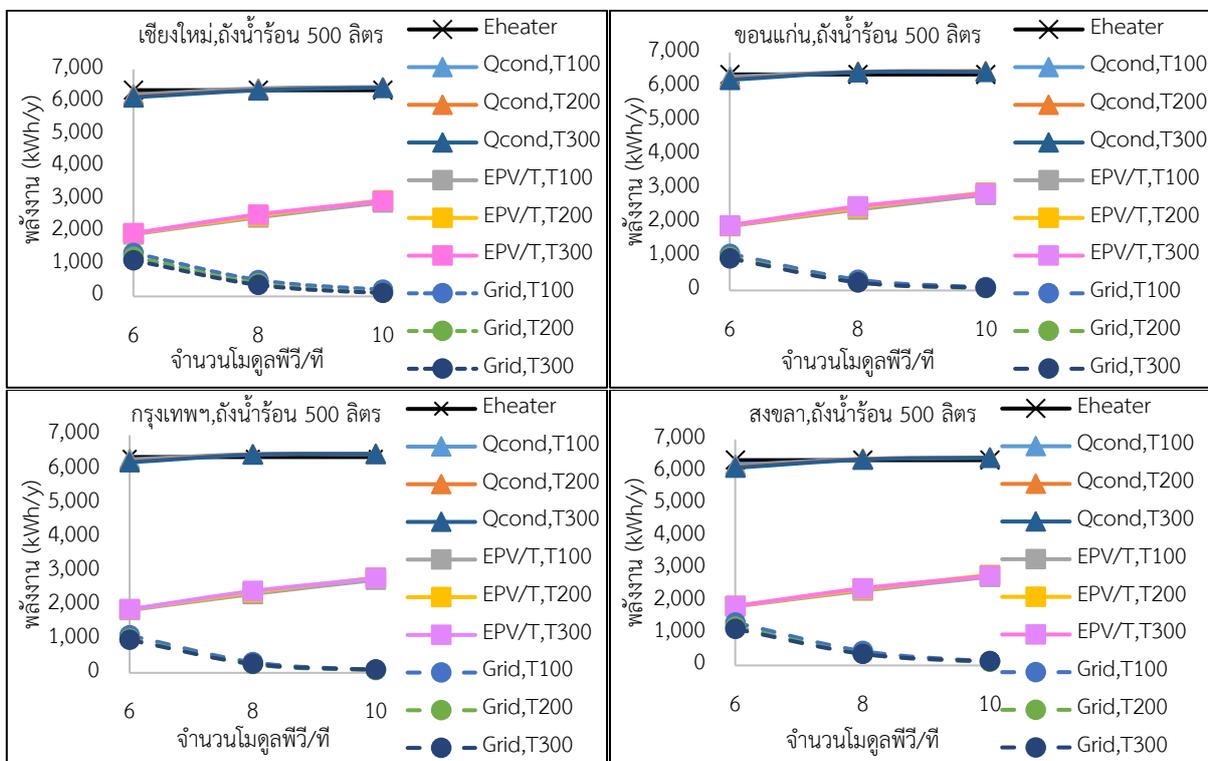
รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)
พีวี/ที	10,595
ปั๊มความร้อน	26,740
PV/T DC-AC MPPT inverter	20,000
อุปกรณ์เสริมต่อ 1 โมดูลพีวี/ที	1,000
ปั๊มน้ำ	2,000
ขนาดถังน้ำ 50 ลิตร	300
ขนาดถังน้ำ 100 ลิตร	600
ขนาดถังน้ำ 200 ลิตร	1,200
ขนาดถังน้ำ 300 ลิตร	1,300
ขนาดถังน้ำ 350 ลิตร	1,400
ขนาดถังน้ำ 400 ลิตร	1,600
ขนาดถังน้ำ 500 ลิตร	2,000
ขนาดถังน้ำ 700 ลิตร	2,400



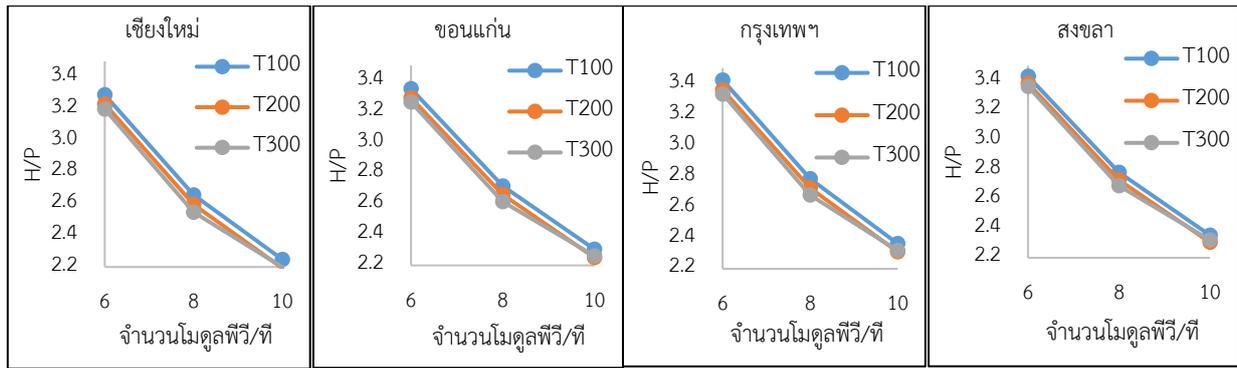
รูปที่ 9 : ระยะเวลาคืนทุนของขนาดถังน้ำร้อน 350 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำร้อนที่ต้องการจาก 350 ลิตร เป็น 500 ลิตร โดยมีผลแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าที่จำนวน 6 โมดูล พลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ต่ำกว่าพลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า ดังนั้นจำนวนโมดูลพีวี/ที จะต้องมีความตั้งแต่ 8 โมดูลขึ้นไป ปริมาณพลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อน จึงจะเพียงพอที่จะผลิตน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิสุดท้ายได้ถึง 60 °C จากรูปจะเห็นว่าพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะมากกว่ากรณีการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350 ลิตร เนื่องจากในกรณีผลิตน้ำร้อนขนาด 350 ลิตร ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามที่ต้องการได้รวดเร็วกว่ากรณีปริมาณ

500 ลิตร ทำให้ระบบหยุดการทำงานก่อน ลักษณะของพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อจำนวนโมดูลมากกว่า 8 ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายในการดำเนินการมากกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกันกับอัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ มีค่าลดลงตามจำนวนโมดูล ดังแสดงผลในรูปที่ 11 การเพิ่มขึ้นของขนาดถังน้ำเย็นมีผลน้อยลงมากต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในถังเย็นแต่ละขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ลักษณะเช่นนี้จะคล้ายคลึงกันทั้ง 4 จังหวัด



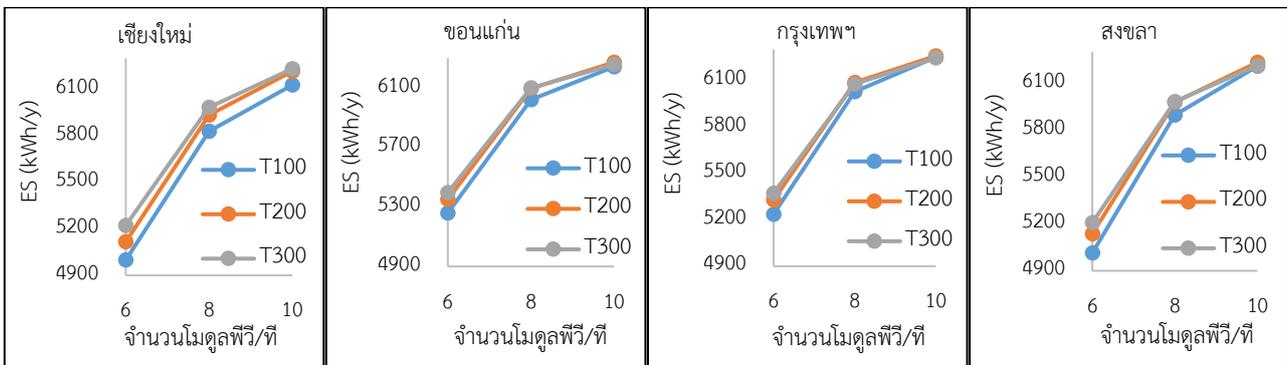
รูปที่ 10 : ข้อมูลแสดงค่าพลังงานต่างๆใน 1 ปี ของการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 500 ลิตรต่อวัน แต่ละจังหวัด



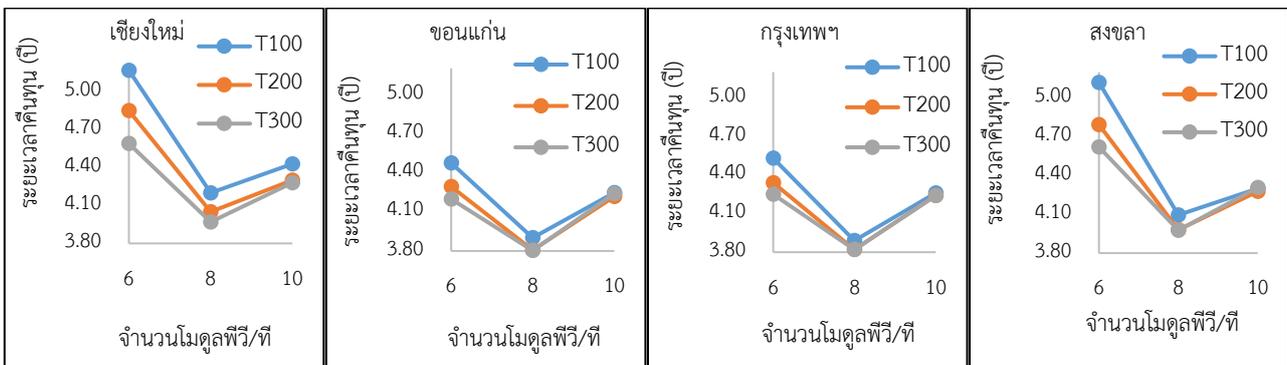
รูปที่ 11 : อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (H/P) ของขนาดถังน้ำร้อน 500 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

รูปที่ 12 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ใน 1 ปี (ES) เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้าของแต่ละจังหวัด และปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ในแต่ละวัน 500 ลิตร จะเห็นได้ว่าพลังงานไฟฟ้าจะประหยัดได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อจำนวนโมดูลมากกว่า 8 พลังงานที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้นไม่มากนัก การเพิ่มขึ้นของขนาดถังน้ำเย็นช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น และขนาดถังน้ำเย็น 200 ลิตรขึ้นไป ส่งผลน้อยมากต่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้า โดยที่จังหวัด

เชียงใหม่ และสงขลา มีค่าประหยัดพลังงานใกล้เคียงกัน และพลังงานที่ประหยัดได้ต่ำที่สุด จังหวัดขอนแก่น และกรุงเทพฯ มีค่าประหยัดพลังงานใกล้เคียงกัน และพลังงานที่ประหยัดได้สูงที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุน พบว่าการผลิตน้ำร้อนขนาดถังน้ำร้อน 500 ลิตร พบว่าที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ สงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยทั้ง 4 จังหวัด มีระยะเวลาคืนทุน 3.97, 3.80, 3.82, 3.98 ปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 13



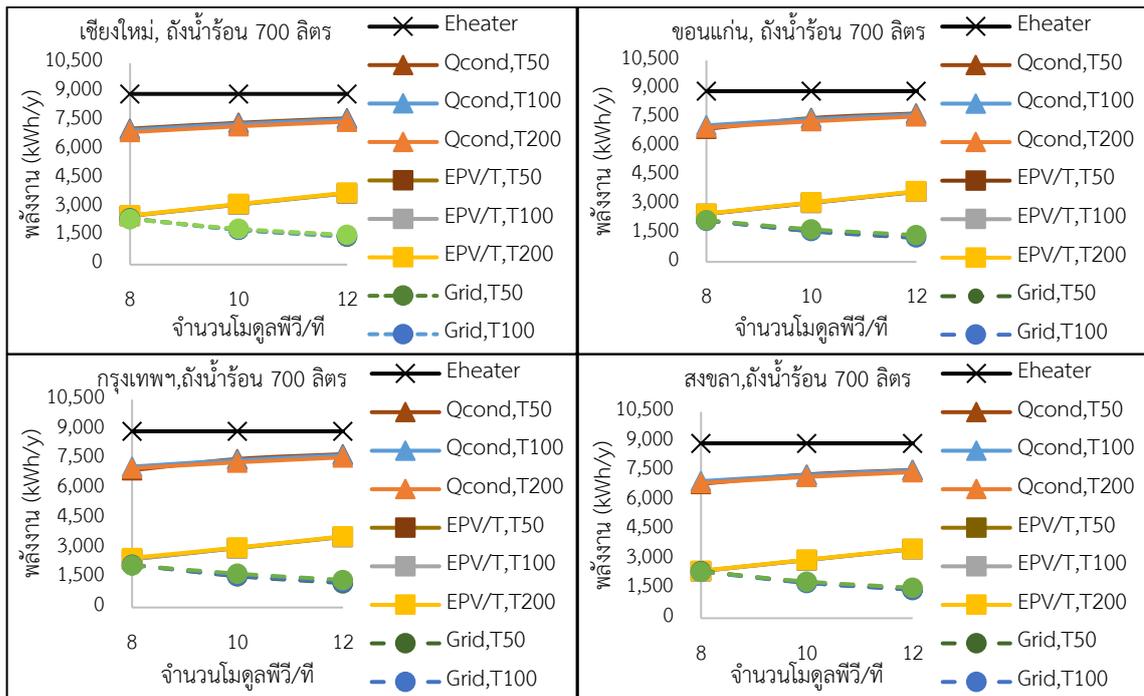
รูปที่ 12 : พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ES) ของถังน้ำร้อน 500 ลิตร ในแต่ละจังหวัด



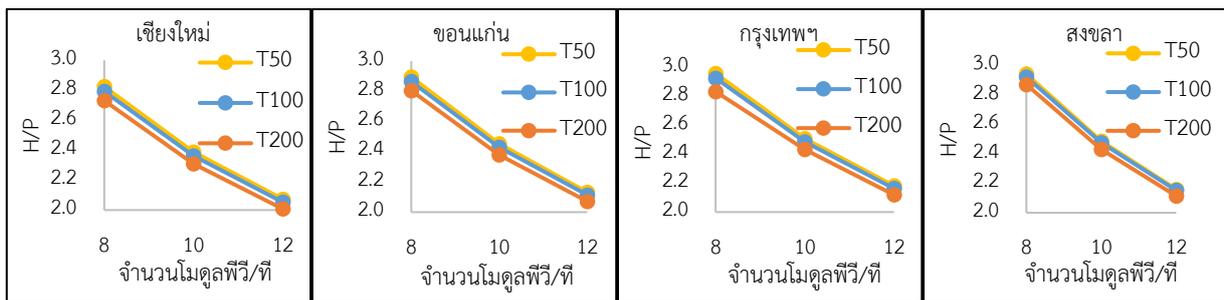
รูปที่ 13 : ระยะเวลาคืนทุนเทียบของขนาดถังน้ำร้อน 500 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

เมื่อเพิ่มการผลิตน้ำร้อนเป็น 700 ลิตร จะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมดูลพีวี/ที 8-12 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 50-200 ลิตร (T50-T200) แสดงผลในรูปที่ 14 จะสังเกตได้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลพีวี/ทีมีค่าเพิ่มขึ้น และพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบจำหน่ายจะลดลงตามจำนวนโมดูลที่เพิ่มขึ้น และเมื่อจำนวนโมดูลพีวี/ทีมากกว่า 8 ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายในการดำเนินการมากกว่าร้อยละ 70

อีกทั้งยังพบว่าพลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งทำให้อัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลมีค่าลดลงตามจำนวนโมดูลแสดงผลในรูปที่ 15 แต่พลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์น้อยกว่าพลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปั๊มความร้อนที่ใช้งานไม่สามารถผลิตน้ำร้อนขนาด 700 ลิตร ให้มีอุณหภูมิ 60 °C ก่อนสิ้นสุดวัน



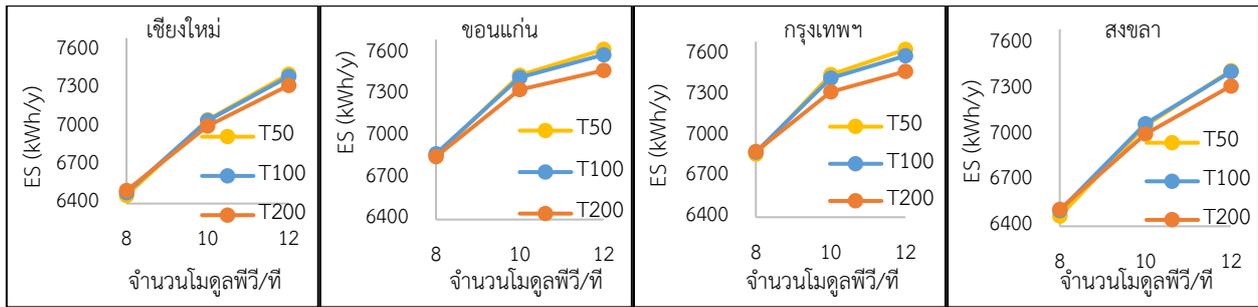
รูปที่ 14 : ข้อมูลแสดงค่าพลังงานต่าง ๆ ใน 1 ปี ของการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 700 ลิตรต่อวัน แต่ละจังหวัด



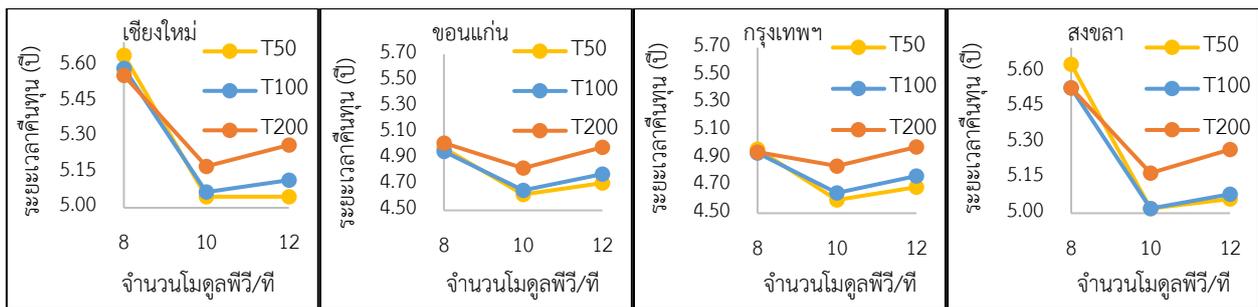
รูปที่ 15 : อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (H/P) ของขนาดถังน้ำร้อน 700 ลิตร แต่ละจังหวัด

รูปที่ 16 แสดงพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ใน 1 ปี (ES) ของจังหวัดต่าง ๆ เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้าสำหรับการผลิตน้ำร้อนในแต่ละวัน 700 ลิตร จะเห็นได้ว่าพลังงานจะประหยัดได้สูงขึ้นตามจำนวนโมดูลพีวี/ที

ที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของขนาดถังน้ำเย็นส่งผลให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสุดท้ายในถังน้ำร้อนเมื่อสิ้นสุดวันมีค่าต่ำลง จึงใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายเพิ่มขึ้นให้กับหลอดความร้อน



รูปที่ 16 : พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ES) ของถังน้ำร้อน 700 ลิตร แต่ละจังหวัด



รูปที่ 17 : ระยะเวลาคืนทุนของขนาดถังน้ำร้อน 700 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

เมื่อทำการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน พบว่าการผลิตน้ำร้อนขนาด 700 ลิตร ทั้ง 4 จังหวัด ที่จำนวน 10 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 50 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนเหมาะสมที่สุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 5.05, 4.62, 4.60, 5.03 ปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 17

จากรูป 9, 13, 17 จะเห็นได้ว่ากรุงเทพฯ และขอนแก่น มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ซึ่งผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ต่อระยะเวลาคืนทุนดังกล่าว มีลักษณะเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Y. Bai [9] และคณะ และถึงแม้ว่าเชียงใหม่จะมีความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับขอนแก่น แต่มีค่าอุณหภูมิแวดล้อมต่ำ ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณการใช้ความร้อนเสริมสูง ดังนั้นจึงมีระยะเวลาคืนทุนที่นาน

4) สรุปและอภิปรายผล

การพิจารณาจำนวนโมดูลพีวี/ที และขนาดของถังน้ำเย็นที่เหมาะสมกับปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ความสามารถในการทำความร้อนสูงสุดที่ 3,000 วัตต์ ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากโมดูลพีวี/ที ที่แต่ละโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 200 วัตต์ และมีพื้นที่รับรังสี 1.326 ม² โดยมีการต่อขนานกันเพื่อผลิตน้ำร้อนขนาดถัง 350, 500, 700 ลิตร ให้มีอุณหภูมิน้ำสูงสุดในตอนเย็นของแต่ละวันไม่ต่ำกว่า 60 °C หากสิ้นสุดวันอุณหภูมิน้ำต่ำกว่าจะ

ใช้ลวดไฟฟ้าเสริมเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในถังน้ำร้อน และสมมุติว่ามีการใช้น้ำร้อนทั้งหมดในตอนกลางวัน ผลการศึกษาโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา พบว่า

1. การผลิตน้ำร้อนขนาดถังน้ำร้อน 350 ลิตร ค่าอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะลดลงตามจำนวนโมดูล และขนาดถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 3.33–2.05 และเมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนจากลวดไฟฟ้าที่จำนวนโมดูลพีวี/ทีมากกว่า 8 โมดูล สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยทั้ง 4 จังหวัด มีระยะเวลาคืนทุน 5.75, 5.52, 5.57 และ 5.69 ปี ตามลำดับ ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างนาน เนื่องจากการผลิตน้ำร้อนขนาด 350 ลิตร ไม่เหมาะสมกับปั๊มความร้อนที่ใช้งาน ควรเลือกปั๊มความร้อนที่มีขนาดเล็กลง

2. เมื่อเพิ่มขนาดความต้องการน้ำร้อนเป็น 500 ลิตร ค่าอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะลดลงตามจำนวนโมดูลพีวี/ที และขนาดถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 3.43–2.17 และเมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนจากลวด

ไฟฟ้า ระบบพีวี/ที่ร่วมกับปั๊มความร้อนที่จำนวนโมดูลมากกว่า 8 โมดูล สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร เหมาะสมที่สุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 3.97, 3.80, 3.82 และ 3.98 ปี ตามลำดับ

3. เมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำร้อนเป็น 700 ลิตร มีค่าอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่จะลดลงเหลือ 2.96–2.01 และเมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนจากหลอดไฟฟ้าที่จำนวนโมดูลพีวี/ที่มากกว่า 8 โมดูล สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าร้อยละ 70 เมื่อขนาดถังน้ำเย็นเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ แต่ส่งผลให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนพบว่าที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ที่จำนวน 10 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 50 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 5.05, 4.62, 4.60 และ 5.03 ปี ตามลำดับ ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างนาน เนื่องจากระบบการผลิตน้ำร้อนขนาด 700 ลิตร ไม่เหมาะสมกับปั๊มความร้อนที่ใช้งาน ควรเลือกปั๊มความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย และอุปกรณ์ทดสอบจากห้องปฏิบัติการระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

REFERENCES

[1] A. N. Karakilic, A. Karafil, and N. Gene, "Effects of temperature and solar irradiation on performance of monocrystalline, polycrystalline and thin-film PV panels," *IJTPE*, vol. 14, no. 2, pp. 254–260, Jun. 2022.

[2] T. Lungkadee and A. Asanakham, "Evaluation of electrical power and temperature of solar rooftop module by air cooling with augmented fin," *Eng. J. Chiang Mai Univ.*, vol. 28, no. 3, pp. 130–141, 2016.

[3] E. Wilson, "Theoretical and operational thermal performance of a wet crystalline silicon PV module under Jamaican conditions," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1655–1660, Jun. 2009.

[4] T. Kim, B. Choi, Y. Han, and K. Do, "A comparative investigation of solar-assisted heat pumps with solar thermal collectors for a hot water supply system," *Energy Convers. Manage.*, vol. 172, pp. 472–484, Sep. 2018.

[5] M. A. Obalanlege, Y. Mahmoudi, R. Douglas, E. Ebrahimnia-Bajestan, J. Davidson, and D. Bailie, "Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 558–572, Apr. 2020.

[6] S. Vaishak and P. V. Bhale, "Photovoltaic/thermal-solar assisted heat pump system: Current status and future prospects," *Sol. Energy*, vol. 189, pp. 268–284, Sep. 2019.

[7] M. Kosan, M. Demirtas, M. Aktas, and E. Disli, "Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system," *Sol. Energy*, vol. 199, pp. 657–672, Mar. 2020.

[8] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, and K. A. Antonopoulos, "Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems," *Energy Convers. Manage.*, vol. 120, pp. 306–319, Jul. 2016.

[9] Y. Bai, T. T. Chow, C. Menezes, and P. Dupeyrat, "Analysis of a hybrid PV/Thermal solar-assisted heat pump system for sports center water heating application," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, Aug. 2012, Art. no. 265838, doi: 10.1155/2012/265838.

[10] European Commission. "Photovoltaic geographical information systems." EUROPA.eu. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (accessed Aug. 9, 2022).

[11] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, and T. Kiatsiriroat, "A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module," *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 1029–1042, Nov. 2020.

[12] K. Utama, "Performance analysis of photovoltaic/thermal module with heat pump for heat and power," M.S. thesis, Dept. Energy Eng., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2022.