

การศึกษาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงแรมไก่นคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว

An Optimization Study of Hot Water Generation from Solar PV/T Boosted Heat Pump; Case Study of Kai Nakorn Hotel, Vientiane Capital, Laos PDR

Piyaphone Mungkhaly¹ สราวุธ พลวงษ์ศรี¹ และสุลักษณา มงคล^{1*}

Piyaphone Mungkhaly¹ Sarawut Polvongsri¹ and Sulaksana Mongkon^{1*}

Received: March 22, 2022; Revised: May 10, 2022; Accepted: May 12, 2022

บทคัดย่อ

โรงแรมไก่นคร ประเทศลาว มีการใช้น้ำร้อน 2,000 ลิตรต่อวันที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 65 °C โดยใช้ขดลวดไฟฟ้า ขนาด 20 กิโลวัตต์ ใช้พลังงานไฟฟ้า 95.54 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมกับการใช้น้ำร้อนในโรงแรมไก่นคร โดยงานส่วนแรกทำการศึกษาและทดสอบสมรรถนะทางค่านไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ขนาด 330 วัตต์ ตามมาตรฐานการทดสอบ เพื่อสร้างสมการทำนายสมรรถนะของแผง จากการศึกษาพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และค่า F_{RUL} เท่ากับ 0.4018 และ 10.466 วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16 % และได้สมการทำนายสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump การศึกษาส่วนที่สองจะใช้สมการที่ได้จากส่วนที่ 1 มาทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบระบบและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อเลือกขนาดที่เหมาะสมของระบบเพื่อทดแทนการใช้ระบบเดิมที่มีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ผลิตน้ำร้อน

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

¹ School of Renewable Energy, Maejo University Chiangmai

* Corresponding Author; Tel. 08 1907 4067, E - mail: s_mongkon@hotmail.com

อุณหภูมิ 60 - 65 °C จำนวน 2,000 ลิตรต่อวัน จากการศึกษาพบว่า ระบบทำน้ำร้อนที่ใช้แผง Solar PV/T ขนาด 330 วัตต์ จำนวน 12 แผง ร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ เหมาะสมที่สุด การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลดลง 28,072.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานขดลวดไฟฟ้าเท่ากับ 84,779.58 บาทต่อปี ใช้เงินลงทุน 604,180 บาท และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.13 ปี

คำสำคัญ : สมรรถนะ; แผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์; น้ำร้อน; ปั๊มความร้อน; ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

Abstract

Kai Nakorn Hotel, Laos PDR has a demand for hot water with a temperature of 60 - 65 °C and an amount of 2,000 L/day for consumption. In the hot water production, a 20 kW heater coil was used resulting to 95.54 kWh/day of electricity consumption, which is a high energy use. Therefore, this research aimed to study an optimum size of the hot water production system from Solar PV/T Boosted Heat Pump for hot water use in the Kai Nakorn Hotel in order to reduce the amount of electricity consumption. The first part was testing the electrical and thermal performance of the Solar PV/T following Standard testing to simulate a performance prediction equation of a 330 W_p Solar PV/T. The results revealed that the thermal performance of Solar PV/T panels obtained $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ equal to 0.4018 and 10.466 W/m²•°C, respectively. The averaged power generation efficiency of solar PV/T panel was 16 % and an empirical equation for prediction performance of hot water generation with Solar PV/T Boosted Heat Pump was obtained. In the second part of the study, the equations that were obtained from the first part of the study were used to create a mathematical model to design an optimized system and analyze the cost-effectiveness for choosing the appropriate size of the hot water use in hotel. The conventional hot water production system used an electric heater of 20 kW to produce 2,000 L/day hot water at a temperature of 60 - 65 °C. The results showed that the optimized system used 330 W_p solar PV/T with 12 panels together with a 17.8 kW_{th} heat pump. The electricity consumption was able to reduce by 28,072.71 kWh/year, or equivalent to the electricity costs of 86,952.84 Baht/year. The investment was 604,180 Baht and the payback period was 7.13 years.

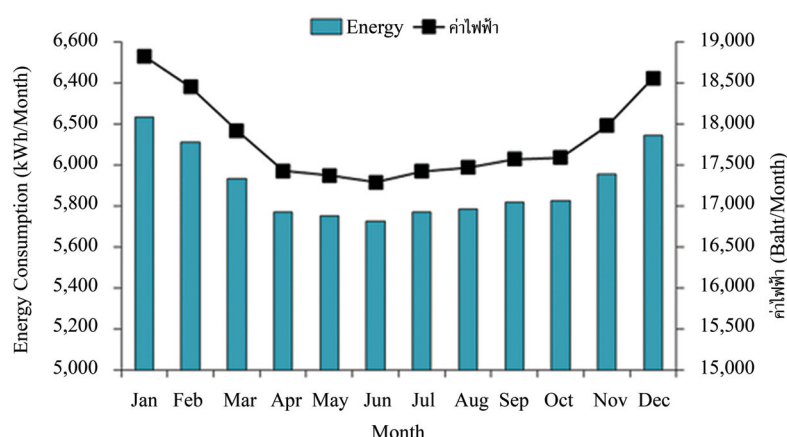
Keywords: Performance; Solar Panel; Hot Water; Heat Pump; Solar PV/T Boosted Heat Pump

บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำร้อนเพิ่มขึ้นทั้งในบ้านที่อยู่อาศัย โรงแรม โรงพยาบาล รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ การผลิตน้ำร้อนเดิมนิยมใช้เครื่องทำน้ำร้อนแบบขดลวดไฟฟ้าเนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อง่ายและมีการติดตั้งไม่ซับซ้อน แต่การใช้ขดลวดทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงตามไปด้วย ในการลดค่าใช้จ่ายในส่วนการผลิตน้ำร้อนมีหลากหลายวิธี เช่น การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [1] การใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [2] การใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อน [3] เป็นต้น โดยการใช้จะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยทั้งด้านต้นทุน และความเสถียรในการผลิตน้ำร้อนโดยเฉพาะกรณีใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ปัญหาที่พบคือ ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆบังหรือวันที่มีฝนตกจะไม่สามารถผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตามที่ต้องการ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น การใช้ระบบ

ผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน [4] ซึ่งก็สามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าลงไปได้ในระดับหนึ่ง นอกจากเทคโนโลยีข้างต้นแล้วยังมีอีกเทคโนโลยีที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้เป็นจำนวนมาก เช่น การใช้เทคโนโลยีที่นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้ามาติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้าไปด้านหลังแผงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผงไปสู่ น้ำทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีอุณหภูมิแผงลดลงช่วยให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [5] สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวเรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) [6] นอกจากนี้ยังมีการใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อนที่พบว่า ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าขดลวดความร้อนประมาณ 2 - 3 เท่า [3] และยังมีหลายงานวิจัยที่มีการนำเอาปั๊มความร้อนและแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [7] - [8] มาทำงานร่วมกันเรียกว่า ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวถูกพัฒนามาจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [9] ที่มีรูปแบบการทำงานของระบบคือ ใช้ความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน และเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ปั๊มความร้อนอีกด้วย งานวิจัยของ [10] ได้จำลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงแรมขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำนวน 1 - 5 แผง ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนคือ 300 - 1,200 ลิตร ปั๊มความร้อนใช้สารทำงานแบบผสม R22 20 % R124 57 % และ R152a 23 % เป็นสารทำงานพบว่าระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุดที่ 60 °C และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 4.1 - 4.6 [11] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน ทำการติดตั้งท่อที่บรรจุสารทำงานไว้ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 4.59 ตารางเมตร โดยใช้ปั๊มความร้อนขนาด 2.12 กิโลวัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) มีค่าประมาณ 3.8 - 8.4 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 % และทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

โรงแรมไก่นครในนครหลวงเวียงจันทน์ ขนาดจำนวนห้องพัก 30 ห้อง จากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า ข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้าของโรงแรมย้อนหลังตั้งแต่เดือนมกราคม - ธันวาคม ปี พ.ศ. 2563 ดังรูปที่ 1 พบว่าเดือนมกราคมมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุด 6,235 กิโลวัตต์ชั่วโมง ส่วนเดือนมิถุนายนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด 5,725 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยตลอดปี พ.ศ. 2563 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 70,823 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าไฟฟ้า 213,885.46 บาทต่อปี



รูปที่ 1 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2563

เมื่อแยกเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบพบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนมากที่สุด 2,961.74 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 34,812.10 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 49.15 % รองลงมาเป็นเครื่องปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2,276.96 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 27,323.51 กิโลวัตต์

ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 38.58 % และส่วนอื่น ๆ ใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 8,687.39 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 12.27 % ซึ่งจากข้อมูลจะพบว่ามีการใช้พลังงานในการผลิตน้ำร้อนค่อนข้างสูงเนื่องจากมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ เพื่อผลิตน้ำร้อนประมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน ที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 65 °C สำหรับใช้ในการอุปโภค โดยค่าใช้จ่ายส่วนนี้ทำให้ต้นทุนของโรงเรือนสูงตามไปด้วย ดังนั้นโรงเรือนจึงมีความต้องการนำเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว และจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบสมรรถนะของระบบรวมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการน้ำร้อนของโรงเรือน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบผลิตน้ำร้อนของโรงเรือนในนครหลวงเวียงจันทน์

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบอุปกรณ์ในระบบเพื่อสร้างสมการทำนายสมรรถนะแล้วนำสมการที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงเรือน โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยหลัก ๆ 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทำการทดสอบและสร้างสมการทำนายสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 300 W_p พื้นที่แผง 1.88 m² โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้านต่าง ๆ ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐานของการทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ปรับอัตราการไหลต่อพื้นที่ของน้ำที่ผ่านแผง 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที • ตารางเมตรควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงตั้งแต่ 35 - 65 °C โดยเพิ่มขั้นที่ละ 5 °C เก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากแผง Solar PV/T อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ค่ารังสีอาทิตย์ เพื่อคำนวณสมรรถนะทางความร้อนและไฟฟ้าของแผง Solar PV/T ตามสมการที่ (1) - (2) โดยมีรายละเอียดระบบที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2

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

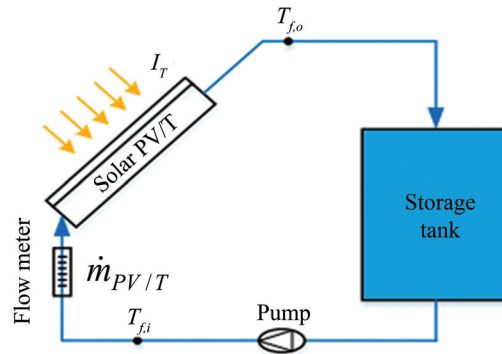
เมื่อ

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

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

เมื่อ

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



รูปที่ 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

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

ส่วนที่ 2 ใช้สมการสมรรถนะของระบบและอุปกรณ์จากส่วนที่ 1 นำมาหาขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนรวมถึงใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมที่นครหลวงเวียงจันทน์ เพื่อมาวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่สามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมและผลความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์จะทำการวิเคราะห์ตามสมการที่ (3) - (5) โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาดังรูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะป้อนให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ก็จะมีการดึงไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานเข้ามาช่วยในการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบดังกล่าว

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

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คำนวณจากสมการที่ (4)

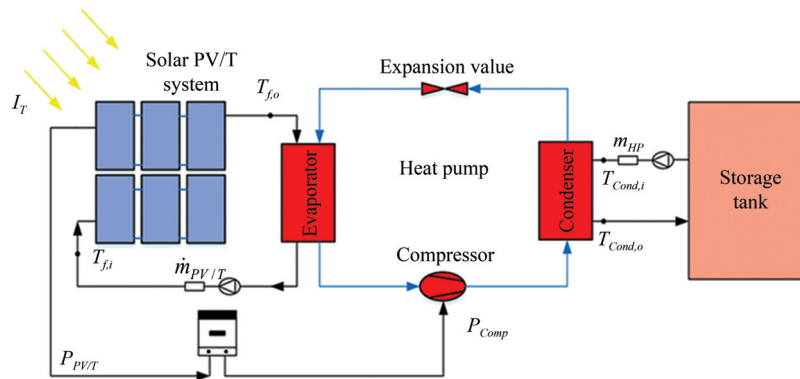
$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \quad (4)$$

เมื่อ

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

อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return: IRR) คือค่า i ที่ทำให้ NPV = 0 คำนวณจากสมการที่ (5)

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



รูปที่ 3 ระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการวิจัย

สมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะทางด้านความร้อนของแผง Solar PV/T ทดสอบตามมาตรฐาน ASHREA STANDARD 93-2003 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงตามมาตรฐานการทดสอบที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที•ตารางเมตร ผลการทดสอบดังรูปที่ 4 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิน้ำที่เข้าแผง Solar PV/T สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงลดลงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น สมรรถนะของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e = 0.4018$ และ $F_R U_L = 10.466$ วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้สมการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (6)

$$Q_{PV/T} = A_{PV/T} [(0.4018 I_T) - (10.466 (T_{f,i} - T_a))] \quad (6)$$

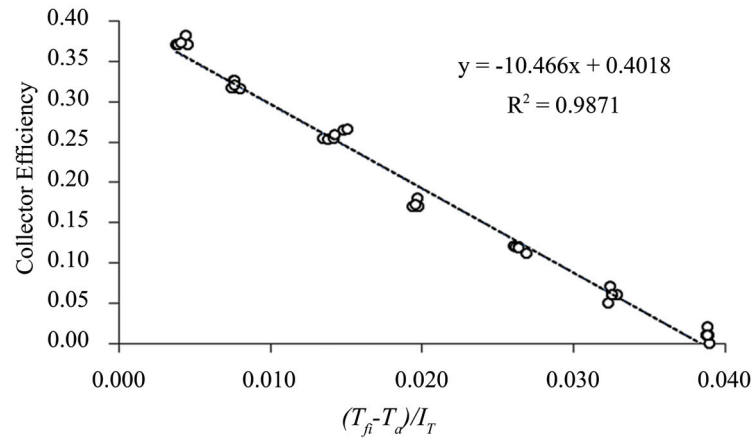
จากรูปที่ 5 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ขนาดกำลังการผลิต 330 วัตต์ ตั้งแต่เวลา 09.00 - 16.00 น. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุดที่ 235.40 วัตต์ ในช่วงเวลา 12.15 น. และมีค่าเฉลี่ย 186.60 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 16 % และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ตลอดทั้งวันพบว่ามีความเฉลี่ย 53.30 %

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง ค่ารังสีอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่าเมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จากการพิจารณาเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะพบว่าอุณหภูมิแผงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยที่อุณหภูมิแผงจะขึ้นกับความร้อนสะสมที่ได้จากค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้ามาระบายความร้อนของแผง Solar PV/T ดังนั้น ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของ Solar PV/T ก่อนอื่นต้องทราบอุณหภูมิแผง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

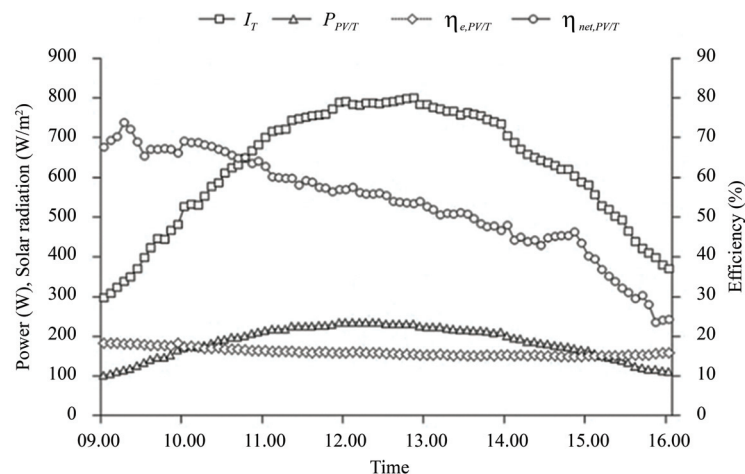
$$T_{PV/T,Sim} = 1.0234 \times (I_T^{0.09286}) \times (T_a^{-0.17333}) \times (T_{f,i}^{1.0357}) \quad (7)$$

การทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

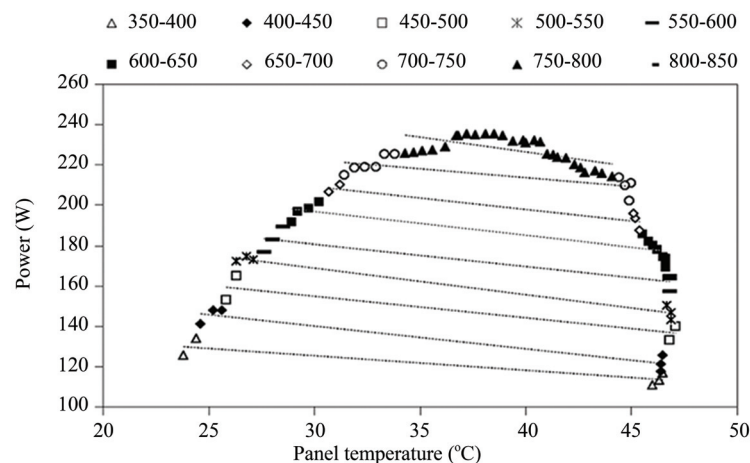
$$P_{PV/T,Sim} = 1.170 \times (I_T^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{f,i}^{0.17826}) \times (T_{PV/T}^{-0.38333}) \quad (8)$$



รูปที่ 4 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผง Solar PV/T



รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T

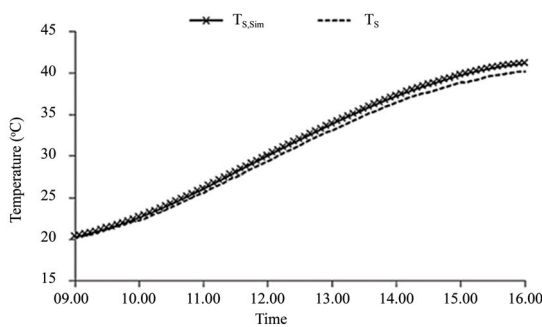


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์

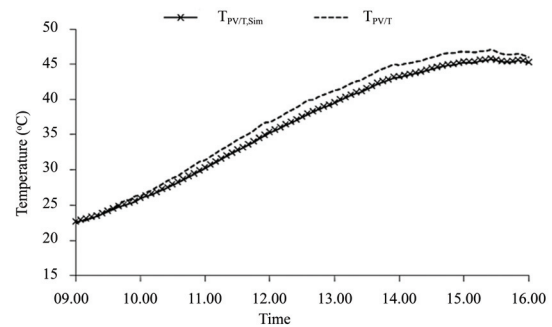
โดยเมื่อนำสมการที่ (6) - (8) คำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิน้ำร้อนในถังจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากสมการตามสมการที่ (6) 1.85 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สมการที่ (7) - (8) พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 3.33 และ 2.37 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 7 และในส่วนสมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊ม ความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (P_{Comp}) ของปั๊มความร้อนจากงานวิจัย [12] สามารถหาได้จากสมการที่ (9) - (10)

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

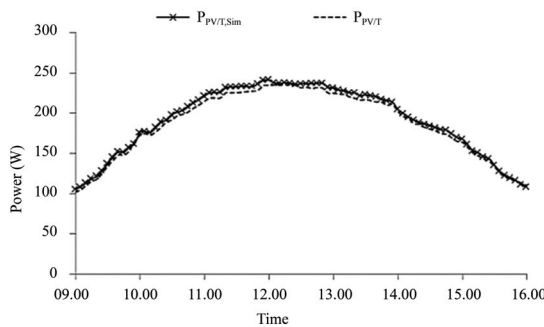
$$P_{Comp} = 267.31 \times (T_{f,o}^{0.20834}) \times (T_s^{0.56875}) \times (EER_{HP}^{-0.11192}) \quad (10)$$



(ก) อุณหภูมิน้ำในถังที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนาย



(ข) อุณหภูมิแผงที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนาย

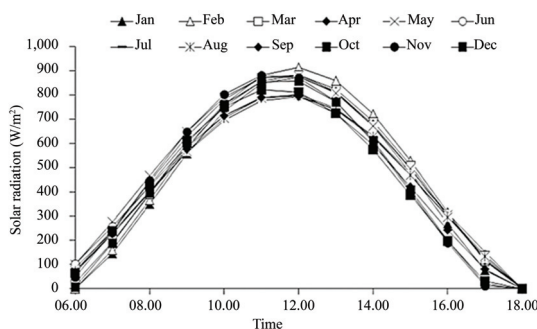


(ค) กำลังไฟฟ้าจากการทดลองและจากการทำนาย

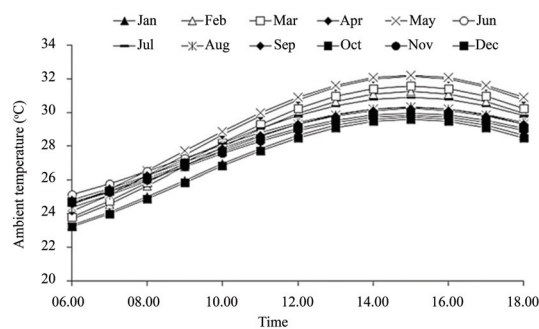
รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำในถังอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากสมการทำนายและจากการทดลอง

ขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทำนายขนาดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์ [13] ดังรูปที่ 8



(ก) ค่ารังสีอาทิตย์

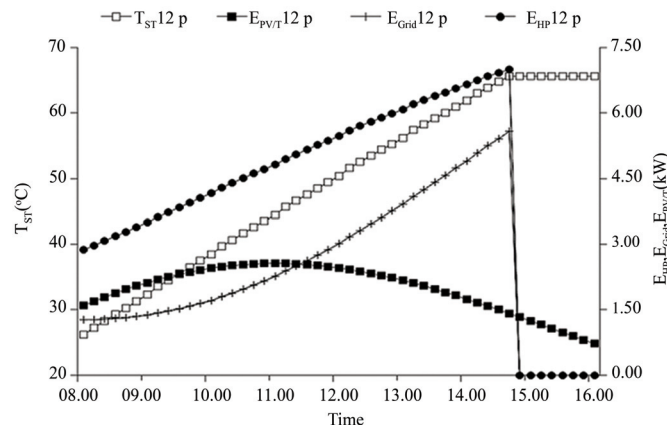


(ข) อุณหภูมิแวดล้อม

รูปที่ 8 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมรายเดือนของนครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว

จากการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบขดลวดไฟฟ้าของโรงแรม พบว่ามีการใช้พลังงาน 95.54 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน จากข้อมูลการผลิตน้ำร้อนของโรงแรมที่มีความต้องการใช้น้ำร้อนปริมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 65 °C จากการคำนวณจะต้องใช้ปั๊มความร้อนขนาดอย่างน้อย 17.45 กิโลวัตต์ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปั๊มขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ที่ใช้สารทำงาน R134a ที่มีขายตามท้องตลาดมาใช้ และใช้แผง Solar PV/T ขนาดกำลังการผลิต 330 วัตต์ต่อแผง ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ได้ทำการปรับจำนวนแผง Solar PV/T ตั้งแต่จำนวน 10 12 14 และ 16 แผง โดยค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์เดือนกันยายน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่ำสุด ซึ่งพบว่าโรงแรมแห่งนี้มีการใช้น้ำร้อนส่วนมากในช่วงเวลา 07.00 - 08.00 น. และ 18.00 - 19.00 น. ดังนั้นในการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกำหนดให้ระบบทำงาน 08.00 - 16.00 น. โดยใช้อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้นตามอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเวลานั้น ๆ เพื่อผลิตน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิที่ 65 °C และเพียงพอต่อการใช้น้ำในทั้ง 2 ช่วงเวลาดังกล่าว

จากรูปที่ 9 เป็นตัวอย่างผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump กรณีใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง และปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ พบว่าในช่วงระบบเริ่มทำงานในเวลา 08.00 น. อุณหภูมิน้ำร้อนในถัง 26.2 °C ปั๊มความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้า 2.87 กิโลวัตต์ และจะมีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 65 °C เมื่อเวลา 14.40 น. ปั๊มความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้า 7.00 กิโลวัตต์ โดยใช้เวลาทำงานของระบบในการผลิตน้ำร้อน 6.66 ชั่วโมง คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 34.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ในขณะที่เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2.56 กิโลวัตต์ ที่เวลา 11.00 น. ซึ่งกรณีใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ทำให้ปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 1.74 - 4.95 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [14] และ [12] ดังตารางที่ 1 พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน โดยในงานวิจัยของ [14] ระบบเดิมที่ใช้อากาศจ่ายให้ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Air Source Heat Pump) มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 2.6 - 4.4 ในขณะที่เมื่อใช้น้ำร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จ่ายให้ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Solar Boosted Heat Pump) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 - 11 % โดยมีค่าระหว่าง 2.5 - 5.0 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะก็ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เพียงแต่ในงานวิจัยนี้ระบบเป็น Solar PV/T Heat Pump ซึ่งนอกจากจะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นแล้วแผง Solar PV/T ยังสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับปั๊มความร้อน ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลดลงประมาณ 80.50 % เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ [12] ที่ใช้แผง Solar PV/T Boosted Heat Pump

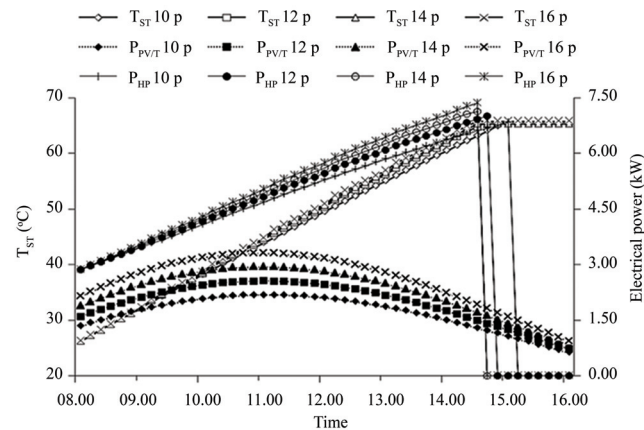


รูปที่ 9 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลในการเปรียบเทียบกับงานวิจัย

งานวิจัย	Air Source Heat Pump		Solar Boosted Heat Pump		COP เพิ่มขึ้น	
	สารทำงาน	COP	สารทำงาน	ระบบที่ใช้	COP	%
[14]	-	2.6 - 4.4	-	Solar Collector Boosted Heat Pump	2.5 - 5.0	10 - 11
[7]	R134a	2.79 - 4.09	R134a	Solar PV/T Boosted Heat Pump	2.79 - 4.37	6 - 7
งานวิจัยนี้	R134a	2.79 - 4.09	R134a	Solar PV/T Boosted Heat Pump	1.74 - 4.90	11 - 12

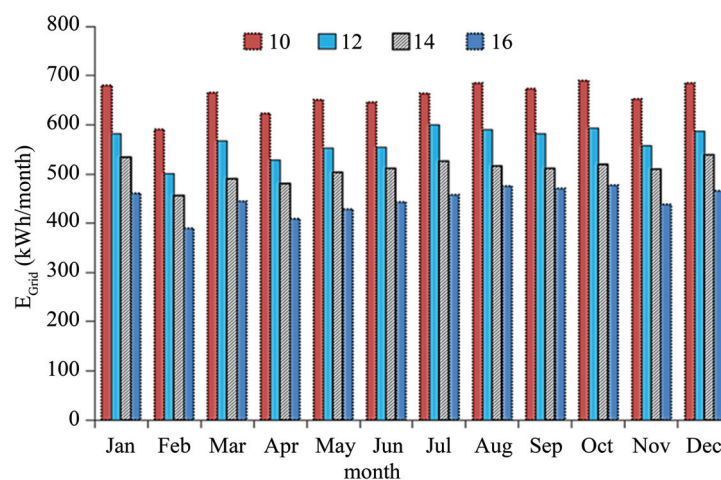
เมื่อพิจารณาจำนวนแผงทั้งกรณี 10 12 14 และ 16 แผง พบว่าทุกกรณีสามารถผลิตน้ำร้อนที่ 65 °C ได้ แต่จะใช้เวลาต่างกันส่งผลทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานแตกต่างกันไปด้วย โดยระบบที่ใช้จำนวนแผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง ใช้เวลาในการทำงานน้อยสุด 6.50 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 12 และ 10 แผง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



รูปที่ 10 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อน

ดังนั้น จากข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมจะประกอบด้วย ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a เสริมด้วยแผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ต่อขนานกันเพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,000 ลิตร

เมื่อใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปีมาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เข้าในระบบพบว่า เดือนกรกฎาคมเป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานสูงสุด 599.23 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน สำหรับเดือนกุมภาพันธ์เป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่ำสุด 501.76 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ดังรูปที่ 11 กรณีจำนวนแผง Solar PV/T เพิ่มขึ้นจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลง โดยพบว่า ระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผงใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลงมากที่สุด 5,364.21 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี รองลงมาเป็นจำนวน 14 12 และ 10 แผง ใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 6,113.79 6,799.39 และ 7,903.42 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ตามลำดับ เมื่อนำเอาค่าเหล่านี้ไปวิเคราะห์รวมกับเงินลงทุนสร้างระบบดังตารางที่ 2 เพื่อหาระยะคืนทุนโดยพบว่า ในกรณีแผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด 7.13 ปี ลำดับถัดไปคือ จำนวน 10 14 และ 16 แผง มีระยะคืนทุน 7.15 7.48 และ 7.86 ปี ตามลำดับ



รูปที่ 11 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในแต่ละเดือน

ตารางที่ 2 มูลค่าเงินลงทุนและพลังงานที่ประหยัดได้ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

รายละเอียด	ชดลดไฟฟ้า	Solar PV/T Boosted Heat Pump			
		จำนวนแผง			
		10	12	14	16
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)	34,872.10	7,903.42	6,799.39	6,113.79	5,364.21
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)		26,968.68	28,072.71	28,758.31	29,507.89
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ประหยัดได้ (เปอร์เซ็นต์)		77.34	80.50	82.47	84.62
คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (บาทต่อปี)		81,445.41	84,779.58	86,850.10	89,113.83
เงินลงทุน (บาท)		582,000	604,180	649,460	700,740
Solar PV/T (บาท)		200,000	220,000	240,000	260,000
Heat Pump			240,000		
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		7.15	7.13	7.48	7.86
NPV (บาท)		104,613.55	110,541.78	82,717.00	50,521.04
IRR		10.37	11.30	10.86	9.89

* ค่าไฟฟ้าประมาณ 3.02 บาท/หน่วย

* คิดอัตราดอกเบี้ย 8.25 % (ธนาคารการค้าต่างประเทศลาว, 2565)

อภิปรายผลการวิจัยและสรุป

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

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าในการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e = 0.4018$ และ $F_R U_L = 10.466$ วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่า 16 % และสามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (11) - (12)

สมการทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (11)

$$T_{PV/T,Sim} = 1.0234 \times (I_T^{0.09286}) \times (T_a^{-0.17333}) \times (T_{f,i}^{1.0357}) \quad (11)$$

สมการทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (12)

$$P_{PV/T,Sim} = 1.170 \times (I_T^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{f,i}^{0.17826}) \times (T_{PV/T}^{-0.38333}) \quad (12)$$

ส่วนที่ 2 เมื่อได้สมรรถนะและสมการที่ใช้ในการทำนายแล้วจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกกระบวนที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีการปรับเปลี่ยนจำนวนแผง Solar PV/T ตั้งแต่ 10 12 14 และ 16 แผง เพื่อเลือกจำนวนที่เหมาะสมโดยพิจารณาทั้งปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน สมรรถนะของระบบ และความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมกับการใช้ผลิตน้ำร้อนของโรงแรมไก่อันคร จะใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a และใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.74 - 4.90 ทำให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าลงได้ 28,072.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 84,779.58 บาทต่อปี โดยลงทุนทั้งสิ้น 604,180 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 7.13 ปี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนทุนและค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (SEEU) ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน และขอขอบคุณโรงแรมไก่อันคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว ที่เอื้อเฟื้อให้ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

References

- [1] Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguiree, H., and Tanaka, K. (2017). VCHP-ORC Power Generation from Low-Grade Industrial Waste Heat Combined with Solar Water Heating System: Power Generation and CO₂ Emission in Industrial Estate of Thailand. **Cogent Engineering**. Vol. 4, Issue 1, p. 1359397. DOI: 10.1080/23311916.2017.1359397
- [2] Suwanasang, N. and Tongsopit, S. (2015). An Assessment of the Technical and Economic Potential of Rooftop Solar Systems on Chulalongkorn University's Buildings. **Journal of Energy Research**. Vol. 12, No. 2, pp. 59-74. (in Thai)
- [3] Ministry of Energy (2009). **Technology of Using Heat Pumps for Heating**. Bangkok: In-depth Technology Demonstration Project for Energy Conservation. Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (in Thai)
- [4] Sun, X., Dai, Y., Novakovic, V., Wu, J., and Wang, R. (2015). Performance Comparison of Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump and Conventional Air Source Heat Pump for Domestic Hot Water. **Energy Procedia**. Vol. 70, pp. 394-401. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.140
- [5] Herrando, M., Ramos, A., Zabalza, L., and Markides, C. N. (2019). A Comprehensive Assessment of Alternative Absorber-Exchanger Designs for Hybrid PV/T-Water Collectors. **Applied Energy**. Vol. 235, pp. 1583-1602. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.024
- [6] Huide, F., Xuxin, Z., Lei, M., Tao, Z., Qixing, W., and Hongyuan, S. (2017). A Comparative Study on Three Types of Solar Utilization Technologies for Buildings: Photovoltaic, Solar Thermal and Hybrid Photovoltaic/Thermal Systems. **Energy Conversion and Management**. Vol. 140, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.059

- [7] Chanthaseng, S. and Mongkon, S. (2021). Experimental Performance of Hot Water Production by Solar PV/T Boosted Heat Pump System for Electricpower Costs Reduction in a Slaughterhouse. **Engineering Journal Chiang Mai University**. Vol. 28, No. 1, pp. 110-126. (in Thai)
- [8] Wanchupela, N. and Polvongsri, S. (2021). Size and Type Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Assisted Heat Pump in Slaughterhouse. **Engineering Journal Chiang Mai University**. Vol. 28, No. 1, pp. 127-140. (in Thai)
- [9] Chanthaboune, V. and Kiatsiriroat, T. (2007). Performance Testing of a Solar Assisted Heat Pump Water by using an Unglazed Flat-plate Solar Collector as an Evaporator. In **Conference on Thermal Energy and Mass Transfer in Thermal Devices**. Chiang Mai University, Chiang Mai Province. 15-16 Mar, Amora Chiang Mai, 2550. (in Thai)
- [10] Chaichana, C., Kiatsiriroat, T., and Nuntaphan, A. (2010). Comparison of Conventional Flat-Plate Solar Collector and Solar Boosted Heat Pump Using Unglazed Collector for Hot Water Production in Small Slaughterhouse. **Heat Transfer Engineering**. Vol. 31, Issue 5, pp. 419-429. DOI: 10.1080/01457630903375475
- [11] Jie, J., Keliang, L., Tin-tai, C., Gang, P., Wei, H., and Hanfeng, H. (2008). Performance Analysis of a Photovoltaic Heat Pump. **Applied Energy**. Vol. 85, Issue 8, pp. 680-693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.01.003
- [12] Saysana Chanthaseng. (2021). **Energy Cost Reduction of Slaughterhouse with Hot Water Generation from Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Booted Heat Pump**. Thesis, Master of Engineering in Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University. (in Thai)
- [13] NASA POWER Data Access Viewer. (2020). **Solar Radiation and Ambient Temperature**. Access (17 May 2021). Available (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/?fbclid=IwAR2lo8oBtosEgetYzfm0HfWGFM3G6XfJ_t1nFLLBFNv-ito6j6mN_iYavkk).
- [14] Anderson, T. N., Morrison, G. L., and Behnia, M. (2003). **An Experimental Evaluation of an Air Source and a Solar Boosted Heat Pump Water Heater**. Destination Renewables - ANZSES