

การพัฒนาแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ

เรวัตน์ เต็มกล้า¹, อนิรุตต์ มัทธูจาร์¹ และธนรัฐ ศรีวีระกุล^{1*}

rewat.term@muti.ac.th¹, A.Matthujak@ubu.ac.th¹, thanarat.s@ubu.ac.th^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Received : 9-Oct-2020
Revised : 19-Oct-2020
Accepted : 2-Nov-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ โดยออกแบบแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบ ขนาดพื้นที่ 1.5 ตารางเมตร ใช้ท่อความร้อนทองแดง (Heat Pipe) จำนวน 12 ท่อ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในท่อรวมน้ำ (Manifold) ทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-77 โดยมีเงื่อนไข คือ การเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเข้าแผง 3 ระดับ ได้แก่ อัตราการไหล 40 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผง และประสิทธิภาพของแผงขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์และอัตราการไหลของน้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่แผงผลิตได้เท่ากับ 53 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรวม 6 ชั่วโมงต่อวัน เท่ากับ 3.95 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร และที่อัตราการไหล 80 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรวมต่อวัน 3.39 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร แผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 55.61 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าการสูญเสียพลังงานความร้อนของแผง ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.40 วัตต์ต่อตารางเมตร รองลงมาคือที่อัตราการไหล 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 2.60 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 1.63 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าแผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำมีระยะเวลาคืนทุน 1.35 ปี ในขณะที่แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและแบบสุญญากาศที่ขายตามท้องตลาดมีระยะเวลาคืนทุนที่ 2.25 ปี และ 1.54 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ: ท่อความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน รังสีแสงอาทิตย์ แผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

Development of a Low-Cost Heat Pipe Solar Thermal Collector

Rewat Termkla¹, Anirut Matthujak¹ and Thanarath Sriveerakul^{1*}
rewat.term@rmuti.ac.th¹, A.Matthujak@ubu.ac.th¹, thanarat.s@ubu.ac.th^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

Received	: 9-Oct-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 2-Nov-2020

Abstract

The objective of this research is to develop a low-cost heat pipe solar thermal collector. A 1.5 m² flat-plate solar thermal collector equipped with 12 heat pipes as heat transfer elements to the water manifold was designed and tested. The performance of the solar thermal collector was tested following the ASHRAE standard 93-77. The following water flow rates in the manifold were adjusted; 40, 60, and 80 L/hr. The current results show that the water outlet temperature greatly depends on solar radiation intensity and the water flow rate in the manifold. The maximum water outlet temperature of 53°C can be achieved when the water flow rate of 40 L/hr. and average solar radiation of 3.95 kW/m² were applied. A maximum thermal efficiency of 55.61% can be reached when the water flow rate of 80 L/hr. and the average solar radiation of 3.39 kW/m² were applied. From the analysis, the maximum total heat loss of the collector of 3.40 W/m² can be found at the water flow rate of 40 L/hr. followed by the total heat loss of 2.60 W/m² at a water flow rate of 60 L/hr. and 1.63 W/m² at a water flow rate of 80 L/hr., respectively. From the simple economic analysis, a payback period of 1.35 years was obtained for this low-cost heat pipe-solar thermal collector. This is found to be a shorter payback period compared with that of the conventional commercial flat plate solar collector (2.25 years) and the vacuum solar collector (1.54 years).

Keywords: heat pipe, thermal efficiency, solar radiation, solar thermal collector

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากแสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ใหญ่ที่สุดและไม่มีวันหมดสิ้น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ [1] สำหรับประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตใกล้เส้นศูนย์สูตรหรืออยู่ในแถบร้อน มีพื้นที่รวมประมาณ 500,000 ตารางกิโลเมตร จะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยค่อนข้างสูงประมาณ 5.05 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ซึ่งสามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานในรูปแบบความร้อนได้ [2] การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบผลิตน้ำร้อนปัจจุบันเป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้โดยตรง โดยใช้อุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและสามารถลดปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในอาคาร[3] สำหรับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ 1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งประสิทธิภาพในการผลิตน้ำร้อนจะขึ้นอยู่กับ การเลือกชนิดและขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2) ถังเก็บน้ำร้อน (Storage Tank) ซึ่งต้องมีขนาดที่เหมาะสมโดยจะถูกกำหนดให้เพียงพอต่อการใช้น้ำที่ความจุ น้อยที่สุดที่ประเมินได้ต่อวัน 3) บั๊มหุ่นเวียนน้ำร้อน ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการไหลรวมของระบบ ค่าความดันสูญเสียรวมของระบบท่อและค่าสมรรถภาพการดูดของปั๊ม 4) ระบบท่อน้ำร้อนและอุปกรณ์ ต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับอัตราการไหลและความดันสูญเสียภายในระบบท่อ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปความร้อนโดยใช้อุปกรณ์หลักที่เรียกว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector)

ปัจจุบันนิยมใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์ 2 แบบ [4] คือ 1) ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีราคาไม่แพงมากนัก สามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำถึงปานกลางหรืออุณหภูมิประมาณ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส และ 2) ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบแต่มีราคาสูงกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้ผลิตน้ำร้อนที่มี

อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ มีประสิทธิภาพสูงกว่าคือมีอัตราการสูญเสียความร้อนที่น้อยกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบและภายในหลอดแก้วสุญญากาศยังประกอบไปด้วยท่อความร้อน (Heat pipe) ที่มีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า การใช้ท่อความร้อน (Heat pipe) มาสร้างเป็นแผงทำน้ำร้อนได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า มีประสิทธิภาพสูงและไวต่อความชื้นแสงอาทิตย์ แต่ที่ผ่านมาในอดีตพบว่าผู้ใช้งานขาดความรู้และความเข้าใจในพื้นฐานการทำงานของระบบนี้ จึงทำให้การใช้งานระบบดังกล่าวเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่ยั่งยืน

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความนิยมใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศคือราคาลงทุนเบื้องต้นสูง การบำรุงรักษารวมถึงระยะเวลาคุ้มทุนภายหลังจากติดตั้งมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นหากสามารถลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือใช้วัสดุทดแทนได้ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีราคาถูกแต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่สูงลดการสูญเสียความร้อนในระบบเพื่อเพิ่มความสามารถผลิตน้ำร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงได้อันจะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมใช้มากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

ส่วนประกอบสำคัญในการผลิตน้ำร้อนคือแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ 2 ชนิดได้แก่ แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบและแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดท่อสุญญากาศ [5]

2.1.1 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิด

แผ่นเรียบ

แผงเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบส่วนใหญ่ประกอบด้วยแผ่นรับรังสีอาทิตย์ซึ่งใช้แผ่นอลูมิเนียม ด้านบนฉาบหรือพันทับด้วยวัสดุที่มีความสามารถดูดกลืนรังสี ด้านบนแผ่นรับรังสีจะเป็นกระจกชนิดโปร่งแสงให้รังสีอาทิตย์ผ่านเข้าไปและยังช่วยลดอัตราการสูญเสียความร้อน

ให้กับสิ่งแวดล้อม บริเวณด้านข้างและด้านล่างจะด้วย
 ฉนวนกันความร้อนโดยปิดด้วยกรอบอลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่ง
 ท่อน้ำสำหรับรับความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ
 ส่วนมากนิยมใช้ท่อทองแดงซึ่งมีการเชื่อมต่อกันทั้งด้านบน
 และด้านล่าง

2.1.2 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดท่อ สูญญากาศ

แผงเก็บ รังสี อาทิตย ชนิดท่อ สูญญากาศ
 ประกอบด้วยท่อแก้วใสเรียงเป็นแถวหลายๆ แถว ภายในท่อ
 แก้วใสจะมีท่ออีกท่อหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ซึ่งจะถูก
 เคลือบด้วยวัสดุพิเศษที่มีคุณลักษณะดูดซับพลังงาน
 แสงอาทิตย์ได้ดี และมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี
 น้อย สำหรับช่องว่างระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอก จะมี
 ลักษณะเป็นสูญญากาศ นอกจากนี้จะมีการใช้งานร่วมกับ
 ท่อความร้อน (Heat pipe) เพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อนที่
 ได้จากแสงอาทิตย์

โดยแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดท่อสูญญากาศ
 จะมี ประสิทธิภาพสูงกว่าแผงเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบซึ่ง
 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสูญญากาศ มี
 ประสิทธิภาพสูงกว่าคือมีอัตราการสูญเสียความร้อนที่น้อย
 กว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ

2.2 ค่าประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector Efficiency)

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำ
 ร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เราจำเป็นต้องคำนวณประสิทธิภาพ
 ของแผงเก็บรังสีอาทิตย์คืออัตราส่วนระหว่างอัตราของควม
 ร้อนที่มีประโยชน์ (Q_u) ที่ถ่ายโอนโดยการแผ่รังสีแสงอาทิตย์
 บนแผง ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้ [6]

$$\eta_{coll} = \frac{\text{Heat energy out}}{\text{Heat energy in}} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (1)$$

เมื่ออัตราการความร้อนของแผงเก็บรังสีอาทิตย์

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_f C_{cp} (T_{fo} - T_{fi}) \quad (2)$$

จากสมการ (2) แสดงค่าความร้อนถูกดึงออกมา
 จากแผงเก็บรังสีอาทิตย์ในอัตราที่สามารถวัดได้โดยใช้
 ปริมาณความร้อนที่ส่งไปยังของเหลวที่ไหลผ่านแผงเก็บรังสี

อาทิตย์และมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับความร้อนที่
 แผงเก็บรังสีได้รับ Q_{in} สามารถทำได้จากสมการที่ (3)

$$Q_{in} = G_T A_c \quad (3)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพแผงเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{out}}{G_T A_c} \quad (4)$$

2.3 ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor)

ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal
 Factor, F_R) เป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่มี
 ประโยชน์จากตัวเก็บรังสีต่อพลังงานความร้อนที่ถ่ายโอน
 และถูกดึงโดยของไหลใช้งานในตัวเก็บรังสี ค่า F_R สามารถ
 คำนวณได้ดังนี้ [7]

$$F_R = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c (G_T \tau \alpha - U_L (T_{fi} - T_a))} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของไหลขาเข้าแผง พลังงาน
 ที่เป็นไปได้ในแผงเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เกิดขึ้นเมื่อได้รับ
 การถ่ายเทความร้อน (Q_u) เพื่อให้ได้พลังงานที่มีประโยชน์ที่
 เป็นไปได้สูงสุด โดยมีค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (F_R) ซึ่ง
 เขียนอยู่ในรูปของอุณหภูมิของของไหลเข้าแผงเก็บรังสี
 อาทิตย์ สามารถเขียนสมการที่ (2) ใหม่ดังนี้

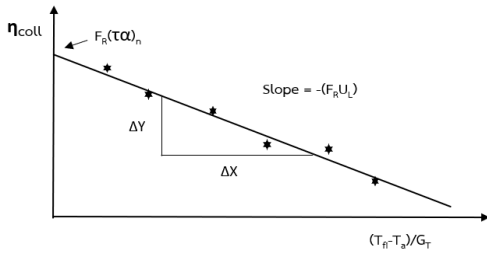
$$\dot{Q}_{out} = A_c F_R [G_T \tau \alpha - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (6)$$

สมการ (6) เป็นความสัมพันธ์ที่เข้มงวดที่สุดในการ
 คำนวณพลังงานที่สะสมในตัวแผงเก็บรังสีอาทิตย์โดยการ
 พิจารณาจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นค่า
 ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์สามารถคำนวณจาก

$$\eta_{coll} = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} \quad (7)$$

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{fo} - T_{fi})}{G_T A_c} \quad (8)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง η_{coll} และ $(T_f - T_a) / G_T$ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยที่ค่า $-F_R U_L$ คือความชันซึ่งเป็นเทอมที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียและ $F_R(\alpha)_e$ คือค่าจุดตัดแกน y เป็นตัวชี้ถึงพลังงานที่ถูกดูดกลืน



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ $(T_f - T_a) / G_T$

แผงเก็บรังสีที่มีค่า $F_R(\alpha)_e$ สูงแสดงว่าการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีมีค่าสูง ส่วนเทอม $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าตัวเก็บรังสีดังกล่าวป้องกันความร้อนสูญเสียไม่เพียงพอ

- Q_u คือ พลังงานที่แผงรับรังสีอาทิตย์ดูดซับได้ (W/m^2)
- F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน
- U_L คือ อัตราการสูญเสียความร้อนรวม (W/m^2)
- A_c คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของแผงรับรังสีอาทิตย์ ($1.5 m^2$)

- G_T คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รวม W/m^2
- T_{fi} คือ อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าแผงเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}C$)
- T_{fo} คือ อุณหภูมิน้ำออกจากแผงเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}C$)
- C_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ เท่ากับ $4.18 \text{ kJ/kg}^{\circ}C$

- \dot{m}_f คือ อัตราการไหลของน้ำเข้าแผง (kg/s)
- τ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของฝาครอบกระจก
- α คือ ค่าการดูดซับความร้อนของแผ่นดูดซับ
- 2.4 ต้นทุนการสร้างแผงเก็บรังสีอาทิตย์

ตารางที่ 1 ตารางต้นทุนตัวเก็บรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนต้นทุนต่ำ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคารวม (บาท)
1	ท่อความร้อน	12	250	3,000
2	ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	1	1,500	1,500
3	กรอบอลูมิเนียม	1	450	450
4	แผ่นอลูมิเนียม	1	1,350	1,350
5	ฉนวนใยแก้วกันความร้อน	1	400	400
6	กระจกนิรภัยเทมเปอร์	1	1,200	1,200
7	วัสดุประกอบอื่นๆ	-	300	300
รวม				8,200

2.5 ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การเปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์แบบระยะเวลาคืนทุน ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ กับการทำน้ำร้อนด้วยแผงทำความร้อนชนิดอื่นๆ ได้แก่แผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบ และแผงทำความร้อนแบบท่อสุญญากาศจากผู้ผลิตดังตารางที่ 2 [8]

ตารางที่ 2 ต้นทุนและประสิทธิภาพแผงทำความร้อนของผู้ผลิต

ประเภท	ผลิตภัณฑ์	ประสิทธิภาพ	มาตรฐานการทดสอบ	(kwh/m ² /ปี)	บาท/ตร.ม.	น้ำร้อนผลิตได้ ลิตร/ตร.ม.-ปี	ต้นทุนการผลิต บาท/ลิตร	ประเทศ
Flat	Bermuda	0.38	ASH-REA 93-77	679	10,500	NA	NA	ไทย
Flat	Chromagen	0.71	EN 12975	1,271	11,985	42,359	0.39	อิสราเอล
Flat	G(Forefont)	0.76	EN 12975	1,370	12,160	20,305.85	0.599	เดนมาร์ค/เวียดนาม
Flat	Infratech	0.65	EN 12975	1,301	16,429	34,590	0.498	ออสเตรเลีย
Flat	Solar Hart	0.55	ASH-REA 93-77	981	16,432	46,315.96	0.355	นิวซีแลนด์
Flat	Solar Ultra	0.51	ASH-REA 93-77	909	15,360	53,296	0.3	อิสราเอล/อเมริกา
Flat	TSUS	0.51	ASH-REA 93-77	909	11,375	18,994	0.658	ไทย
Vacuum	EnergyOne	0.52	ASH-REA 93-77	938	4,733.14	26,194.12	0.181	ไทย
Vacuum	Heritage	NA	NA	NA	12,000	NA	NA	ไทย
Vacuum	Power Solar	NA	NA	900	9,000	174,383	0.046	ไทย
Vacuum	Prosolar	0.63	EN 12975	1,153	11,000	NA	NA	จีน
Vacuum	Ravotec	0.56	ASH-REA 93-77	1,013	7,500	28,976.57	0.259	ไทย

2.6 ค่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเก็บรังสี

จากประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์โดยทั่วไป จะอยู่ประมาณ 60% ที่ความเข้มเฉลี่ยรังสีของประเทศไทย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m²-day หรือ 5.05 kWh/m²-day ดังนั้นคำนวณพลังงานไฟฟ้า จจริงที่ความเข้มรังสีเท่ากับ 10.92 MJ/m²-day หรือ 3 kWh/m²-day จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าพลังงานไฟฟ้าแผงเก็บรังสี} = \text{พลังงานไฟฟ้าที่แผงเก็บรังสี} \times \text{อัตราค่าไฟฟ้า} \times \text{จำนวนวันใช้งานต่อปี} \quad (9)$$

2.7 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)

ระยะเวลาคืนทุน (PB) คือจำนวนปีที่กิจการจะได้รับ เงินที่ลงทุนเริ่มแรกของโครงการกลับมา กล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะเวลาที่กระแสเงินสดสะสม (Cumulative cash flows) ของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์โดยคำนวณจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก/ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี} \quad (10)$$

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

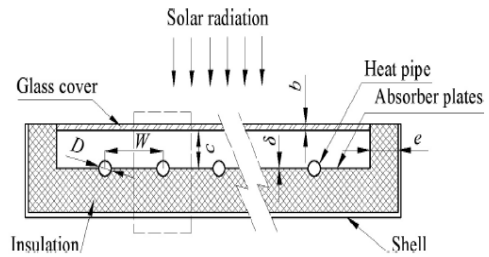
การออกแบบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำและชุดทดลอง จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน (2 Parts) โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ (Part 1)

แผงเก็บรังสีอาทิตย์ ออกแบบให้เป็นแบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อน (Flat plate heat pipe solar collector) มีขนาดพื้นที่ดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ 1.5 ตารางเมตร แผ่นดูดรังสีอาทิตย์ (Absorber Plate) เป็นครีบอลูมิเนียมเคลือบด้วยสารดูดซับความร้อน บริเวณกลางครีบบีท่อความร้อน (Heat pipe) เป็นท่อทองแดง จำนวน 12 แห่ง (ดังรูปที่ 2) สวมอยู่กับท่อรวมน้ำเข้าสู่แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ด้านล่างและด้านข้างของแผงมีฉนวนกันความร้อน ส่วนด้านบนของแผงมีฝาปิดโปร่งแสงซึ่งเลือกใช้กระจกใส (Glass cover)

เมื่อแผงได้รับรังสีจากแสงอาทิตย์ เกิดความร้อนถ่ายเทให้กับสารทำงานภายในท่อความร้อน ส่งผลให้สาร

ทำงานเดือดเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนบริเวณส่วนควบแน่นที่ต่อเข้ากับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (Manifold) และกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวตกลงสู่ด้านล่างของท่อเพื่อรับความร้อนอีกครั้ง มิติของขนาดพื้นที่ของต้นแบบแผงเก็บรังสีอาทิตย์แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 2 ขนาดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

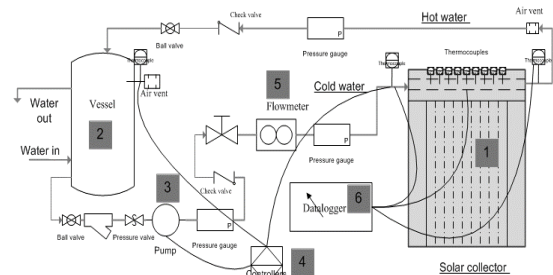
ตารางที่ 3 Detailed specifications fabricated solar collector

Description	Symbol	Size (mm)
Length of the heat pipe	L	1,700
Tube center to center distance	W	75
Diameter of the heat pipe	D	8
Heat pipe wall thickness	S	1
Thickness of the insulate	e	50
Thickness of the absorber plate	δ	0.9
Thickness of the glass cover	b	5
Distance of absorber plat to glass cover	c	45

3.1.2 ชุดทดสอบประสิทธิภาพเชิง

ความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Part 2)

1) ส่วนประกอบของชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ส่วนประกอบชุดทดลองระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ตำแหน่งที่ 1 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อน

ตำแหน่งที่ 2 ถังเก็บน้ำร้อน

ตำแหน่งที่ 3 บั๊มน้ำ

ตำแหน่งที่ 4 ชุดควบคุมระบบการทำงาน

ตำแหน่งที่ 5 ระบบวาล์ว เกจและอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ

ตำแหน่งที่ 6 เครื่องวัดอุณหภูมิและบันทึกข้อมูล

3.2 การทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

3.2.1 มาตรฐานและเงื่อนไขการ

ทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ใช้มาตรฐาน ASHARE (American Society of Heating Refrigerating and Air - conditioning Engineers) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบของแผงรับรังสีอาทิตย์และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบตามตารางที่ 4 [9]

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ

รายการทดสอบ	มาตรฐานทดสอบ		
	EN 12975	ASHRAE 93-77	ISO 9806
ความเข้มแสงเฉลี่ย (w/m^2)	≥ 700	≥ 790	≥ 800
ความเข้มแสงสามารถแกว่งได้ ในช่วง (w/m^2)	50	32	50
อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$)	-	30	-
ความเร็วลม (m/s)	3 ± 1	2.0-4.5	2-4
อัตราการไหล ($kg/s\cdot m^2$)	0.02	0.02	0.02

ทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบกลางแจ้งและทำการบันทึกผลและเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a), อุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีอาทิตย์ (T_{in}), อุณหภูมิน้ำออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ (T_{out}), ค่ารังสีอาทิตย์ (G_g) และอัตราการไหลของน้ำ (\dot{m}_p) นำผลข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนและการสูญเสียความร้อนรวมของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ดังสมการที่ 5

3.3 วิธีการทดสอบ

ทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เป็นการทดสอบ

กลางแจ้ง ตั้งแต่เวลา 09.00-15.00 น. โดยปรับให้แผงเก็บรังสีอาทิตย์ทำมุมเอียง 15 องศา และหันด้านรับแสงไปทางทิศใต้ เมื่อน้ำเข้าระบบปรับอัตราการไหลที่อัตรา 40 60 และ 80 L/hr. โดยอ่านค่าจากเครื่องวัดอัตราการไหลจนกระทั่งมีอัตราการไหลของน้ำคงที่ บันทึกข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ทุกๆ 30 นาที ตลอดการทดลอง นำผลการทดลองมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามสมการที่ 8

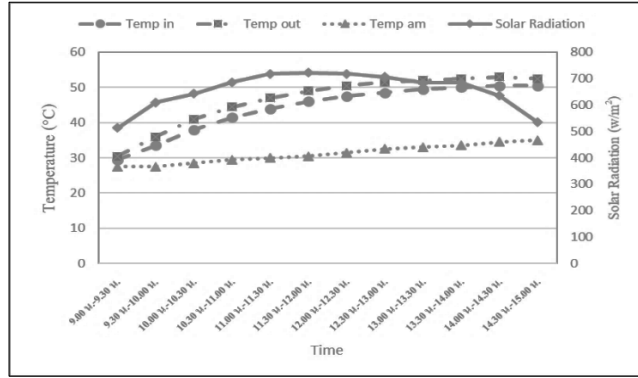


รูปที่ 4 ชุดทดสอบแผงเก็บรังสีอาทิตย์

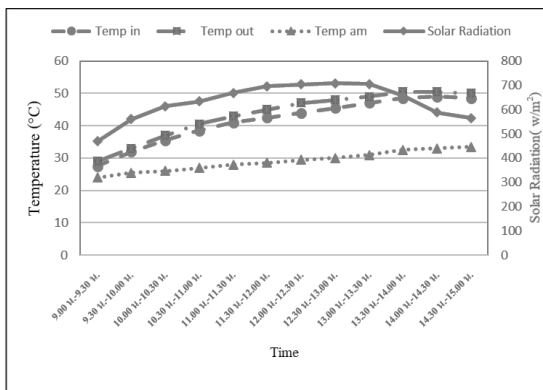
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิน้ำที่ผลิตได้จากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

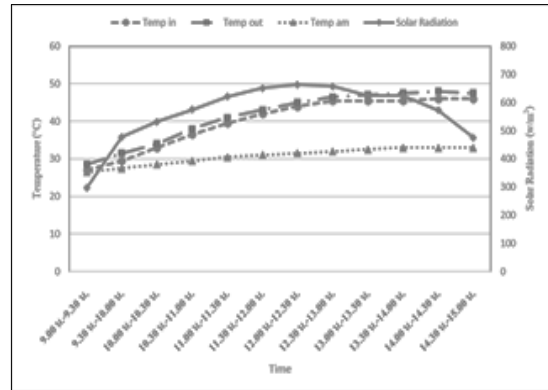
การทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์โดยการผลิตน้ำร้อนจากชุดทดลองระบบปิดโดยใช้ปั๊มหมุนเวียนขนาดเล็ก ได้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้ตามจุดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดกับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ที่ช่วงเวลา 09.00 น. - 15.00 น. และอัตราการไหลของน้ำ 40 60 และ 80 L/hr. แสดงดังรูปที่ 3



(a) น้ำที่อัตราการไหล 40 L/hr.



(b) น้ำที่อัตราการไหล 60 L/hr.



(c) น้ำที่อัตราการไหล 80 L/hr.

รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์กับอุณหภูมิที่จุดวัด

จากรูปที่ 5 (a) ที่อัตราการไหล 40 L/hr. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 658 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (T_{am}) $31 \text{ }^\circ\text{C}$ มีอุณหภูมิน้ำเข้าในระบบเริ่มต้น (T_{in}) $29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ และมีอุณหภูมิน้ำออกจากแผงสูงสุด (T_{out}) เท่ากับ $53 \text{ }^\circ\text{C}$ รูปที่ 5 (b) ที่อัตราการไหล 60 L/hr. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 620 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (T_{am}) $29 \text{ }^\circ\text{C}$ มีอุณหภูมิน้ำเข้าในระบบเริ่มต้น (T_{in}) $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ และมีอุณหภูมิ น้ำออกจากแผงสูงสุด (T_{out}) เท่ากับ $50.5 \text{ }^\circ\text{C}$ และ รูปที่ 5 (c) ที่อัตราการไหล 80 L/hr. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอด การทดสอบเท่ากับ 564 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อม เฉลี่ย (T_{am}) $31 \text{ }^\circ\text{C}$ มีอุณหภูมิ น้ำเข้าในระบบเริ่มต้น (T_{in}) $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ และมีอุณหภูมิ น้ำออกจากแผงสูงสุด (T_{out}) เท่ากับ $48 \text{ }^\circ\text{C}$

จากข้อมูลพบว่า ตลอดช่วงเวลาระหว่างวันของ การทดลอง อุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิที่วัดได้อยู่ในช่วงประมาณ $24\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$ และเนื่องจาก แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ได้รับพลังงานจากความเข้มรังสี อาทิตย์ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำที่อัตราการไหล 40 L/hr. มีอุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่ทางออกของแผงเก็บรังสี แสงอาทิตย์ เท่ากับ $53 \text{ }^\circ\text{C}$ ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย ตลอดการทดสอบเท่ากับ 658 W/m^2

4.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงเก็บ รังสีแสงอาทิตย์

4.2.1 ประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสี แสงอาทิตย์

การประเมินประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสี แสงอาทิตย์สามารถคำนวณจากสมการที่ 8 โดยใช้สูตรการ คำนวณดังนี้

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{coll}}{G_T A_c} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{fi} - T_{fo})}{G_T A_c}$$

โดยที่

A_c คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของแผงรับรังสีอาทิตย์ (1.5 m²)

G_T คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรวม W/m²-day ทดสอบ 6 ชั่วโมงต่อวัน

T_{fi} คือ อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าแผงเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

T_{fo} คือ อุณหภูมิน้ำออกจากแผงเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ เท่ากับ 4.18 kJ/kg·°C

\dot{m}_f คือ อัตราการไหลของน้ำเข้าแผง (kg/s)

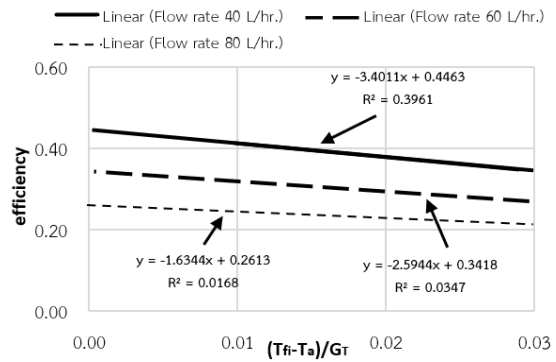
ทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 40 60 และ 80 L/hr. เวลาทดสอบทั้งหมด 6 ชั่วโมง มีข้อมูลดังตารางที่ 5 ได้ผลประสิทธิภาพดังนี้

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์

อัตราการไหล (m _f)		ความเข้มรังสี (G _T) (kWh/m ² -day)	อุณหภูมิน้ำ (°C)		ประสิทธิภาพ (%)
(L/hr.)	(kg/s)		(T _{fi})	(T _{fo})	
40	0.017	3.95	29.5	53	28.33
60	0.025	3.79	27.5	50.5	42.33
80	0.033	3.39	27.5	48	55.61

ผลการคำนวณประสิทธิภาพแผงเก็บรังสีอาทิตย์พบว่า ที่อัตราการไหล 80 L/hr. แผงเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.61% รองลงมา คือที่อัตราการไหล 60 และ 40 L/hr. คำนวณได้ประสิทธิภาพ 42.33% และ 28.33% จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพของแผงทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สอดคล้องกับสมการที่ 4

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง η_{coll} และ $(T_{fi} - T_a) / G_T$ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการเส้นตรงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ $(T_{fi} - T_a) / G_T$ ที่อัตราการไหล 40,60,80 L/hr.

โดยที่ค่า $-F_R U_L$ และ $F_R (\tau\alpha)_e$ จากผลการทดสอบทั้ง 3 อัตราการไหลแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่า $-F_R U_L$ และ $F_R (\tau\alpha)_e$ จากผลการทดสอบ

อัตราการไหล (m _f)		$-F_R U_L$	$F_R (\tau\alpha)_e$	R ²
(L/hr.)	(kg/s)			
40	0.017	3.4011	0.45	0.3961
60	0.025	2.5944	0.34	0.0347
80	0.033	1.6344	0.26	0.0168

จากตารางที่ 6 อัตราการไหล 40 L/hr. มีค่าการส่งผ่านค่าดูกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีสูงที่สุด โดยที่อัตราการไหล 80 L/hr. มีค่าการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด

4.3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

4.3.1 ระยะเวลาคืนทุน

ค่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเก็บรังสีจากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าจริงที่ความเข้มรังสีเท่ากับ 10.92 MJ/m²-day หรือ 3 kWh/m²-day ตามสมการที่ 9 จากพื้นที่แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์เท่ากับ 1.5 m² ดังนั้น อัตราค่าไฟฟ้า 3.7171 บาท/kWh และจำนวนวันใช้งานต่อปี เท่ากับ 365 d/y ค่าพลังงานไฟฟ้าตัวเก็บรังสีเท่ากับ 6,105.34 บาท/ปี

ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนของแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบแบบต้นทุนต่ำ จากต้นทุนแผงทำความร้อนในตารางที่ 1 เท่ากับ

ระยะเวลาคืนทุน = (8,200 บาท)/(6,105.34 บาท/ปี) เท่ากับ 1.35 ปี หรือ 1 ปี 4 เดือน

4.3.2 เปรียบเทียบแผงทำความร้อน

จากรูปที่ 2 แสดงราคาแผงทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ของบริษัทต่างๆ ทั้งแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศ เมื่อเฉลี่ยราคาแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบ พบว่า ราคาต้นทุนของแผงเฉลี่ยทั้ง 7 บริษัท เท่ากับ 13,463 บาท/ตารางเมตร และแผงทำความร้อนแบบท่อสุญญากาศ 5 บริษัท มีราคาเฉลี่ย 8,847 บาท/ตารางเมตร จากข้อมูลดังกล่าวนำมาคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน ได้ดังนี้

ระยะเวลาคืนทุนแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ = (13,463 บาท)/(6,105.34 บาท/ปี) เท่ากับ 2.25 ปี หรือ 2 ปี 3 เดือน

ระยะเวลาคืนทุนแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ = (8,847 บาท)/(6,105.34 บาท/ปี) เท่ากับ 1.54 ปี หรือ 1 ปี 6 เดือน

ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าแผงทำความร้อนที่สร้างขึ้นมีต้นทุนเท่ากับ 7,900 บาทต่อตารางเมตร ถูกกว่าแผงทำความร้อนเดิมที่อยู่ในท้องตลาด สามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนได้ที่ 1 ปี 4 เดือน ระยะเวลาสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบและแบบสุญญากาศที่มีระยะเวลาคืนทุนได้ที่ 2 ปี 3 เดือน และ 1 ปี 6 เดือน ตามลำดับ

5. สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาแผงทำความร้อนออกแบบให้เป็นแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อน (Flat plate heat pipe solar collector) มีขนาดพื้นที่ ดูดซับ รังสีแสงอาทิตย์ 1.5 ตารางเมตร การทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์เป็นการทดสอบแบบกลางแจ้งตั้งแต่เวลา 09.00-15.00 น. โดยปรับให้แผงเก็บรังสีอาทิตย์ทำมุมเอียง 15 องศา และหันด้านรับแสงไปทางทิศใต้ เมื่อน้ำเข้าระบบปรับอัตราการไหลที่อัตรา 40 60 และ 80 L/hr.

ผลการทดสอบตลอดช่วงเวลาระหว่างวันของการทดลอง อุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิแวดล้อมที่วัดได้อยู่ในช่วงประมาณ 24-35 °C เนื่องจากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ได้รับพลังงานจากความเข้มรังสีอาทิตย์

ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำที่อัตราการไหล 40 L/hr. มีอุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่ทางออกของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เท่ากับ 53 °C ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 658 W/m² และที่อัตราการไหล 80 L/hr. แผงเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.61% รองลงมา คือที่อัตราการไหล 60 และ 40 L/hr. ค่ารวมได้ประสิทธิภาพ 42.33% และ 28.33% โดยค่าการสูญเสียพลังงานความร้อนของแผงเก็บรังสีอาทิตย์ ที่อัตราการไหล 40 L/hr. มีความมากที่สุดเท่ากับ 3.40 W/m² รองลงมาคือที่อัตราการไหล 60 และ 80 L/hr. มีค่าเท่ากับ 2.60 W/m² และ 1.63 W/m²ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าแผงทำความร้อนพลังงานอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.35 ปี ในขณะที่แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและแบบสุญญากาศที่ขายตามท้องตลาดมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยที่ 2.25 ปีและ 1.54 ปี ตามลำดับ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ประสิทธิภาพของแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพแผงทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ของบริษัทผู้จัดจำหน่ายอื่นๆ พบว่าแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.61% ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพดีกว่าบางบริษัทที่มีประสิทธิภาพสูงสุด 76% (ดังตารางที่ 2) แต่หากเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนและระยะเวลาคืนทุนแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น มีราคาถูกและมีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่าแผงทำความร้อนของบริษัทอื่น ซึ่งแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในครัวเรือนหรือที่อยู่อาศัยรวมถึงความสะดวกในการบำรุงรักษาและชิ้นส่วนอะไหล่ที่สามารถหาได้ทั่วไปโดยไม่ต้องลงทุนซื้ออุปกรณ์ เช่น หลอดแก้วสุญญากาศ ที่มีราคาแพงดังเช่นในปัจจุบัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ที่คอยให้คำปรึกษาและสนับสนุนให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Promnamchum S, Nuanplub K, Plangklang B, Biansoongnem S. Measurement and display system for solar radiation. Journal of Engineering RMUTT.2007;10(2):87-92. (in Thai)
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Solar water heater (Hybrid Solar water heater system) Ministry of Energy. [Internet]. 2013 [cited 2020 Jan 25]. Available from: <http://www.tsus.co.th/download/d4.pdf>. (in Thai)
- [3] O'Hegarty R, Kinnane O, McCormack S. Parametric analysis of concrete solar collectors. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry. Energy Procedia. 2016;91:954-62.
- [4] Sukchai S, Suriwong T, Chamsa-ard W, Sonsaree S, Laodee P. The development of flat plate solar collector integrated with compound parabolic concentrator (CPC). [Research]. School of Renewable Energy Technology: Naresuan University; 2013. (in Thai)
- [5] Sirisamphanwong C, Ngoenmeesri R, Ketjoy N, Chamsa-ard W. Determination of annual energy yield of solar collector. Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST). 2013;20(1):16-23. (in Thai)
- [6] Nshimyumuremyi E, Junqi W. Thermal efficiency and cost analysis of solar water heater made in Rwanda. Energy Exploration & Exploitation 2019;37(3):1147-61
- [7] Struckmann F. Analysis of a flat-plate solar collector. Project Report 2008-MVK160. Heat and Mass Transport. [Internet]. Lund, Sweden. [cited 2020 May 25]. Available from: http://www.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/Project_08/Fabio.pdf
- [8] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Project to promote the use of hot water from solar energy with an integrated system, 3rd. Ministry of Energy. [Internet]. 2012. [cited 2020 Jan 15]. Available from: <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files>. (in Thai)
- [9] Ashrea Standard 93-77. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. New York: The American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 1978.