

การพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา

Development of a Compound Parabolic Concentrating Solar Collector

สรวิศ สอนสารี¹, วิสุทธิ แซ่มสะอาด^{2*}, สุขฤดี สุขใจ², ไพฑูรย์ เหล่าดี² และฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์²

Sorawit Sonsaree¹, Wisut Chramsard^{2*}, Sukruedee Sukchai², Paitoon Laodee²

and Chatchai Sirisamphanwong²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

²วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University.

²School of Renewable Energy Technology, Naresuan University.

*Corresponding author. E-mail : wisutc@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา โดยการออกแบบสร้าง และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806 - 1 พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 78% สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 3.55 และ 0.0600 W/m²-°C ตามลำดับ ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นำมาหาค่าพลังงานที่ผลิตได้ โดยใช้ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมของ จ.พิษณุโลก พบว่า พลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ฯ ผลิตได้ในแต่ละเดือนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 113.28 kWh/m² หรือเท่ากับ 1,359.32 kWh/m² ต่อปี และเมื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์อื่นๆ ที่ทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ทดสอบ พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลา สามารถผลิตพลังงานรายปีได้สูงกว่า 1,200 kWh/m² ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนได้สูง

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ประสิทธิภาพเชิงความร้อน มาตรฐาน ISO 9806 - 1

*Corresponding author. E-mail : wisutc@nu.ac.th

Abstract

This research has developed a compound parabolic concentrating solar collector (CPC) by design, fabricate and test thermal efficiency of the CPC according to ISO 9806 – 1. It was found that thermal efficiency, heat loss coefficient a_1 and heat loss coefficient a_2 of the CPC are equal to 78%, 3.55 and 0.0600 $W/m^2\text{-}^\circ C$ respectively. The mathematical model was developed to determine the energy production from the CPC by using solar radiation and ambient temperature data of Phitsanulok province. From the mathematical model, it was found that the average monthly energy of the CPC is equal to 113.28 kWh/m² or equal to 1,359.32 kWh/m² per year. The energy production from the CPC by mathematical model was compared to other solar collectors which were tested by School of Renewable Energy Technology (SERT), Naresuan University. It is found that the CPC has an annual energy production more than 1,200 kWh/m² which is categorized into the high performance solar collectors group.

Keywords: Solar Energy, Compound Parabolic Concentrator (CPC), Thermal Performance, Standard ISO 9806 – 1

บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านพลังงานทดแทนที่นิยมนำมาใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์มาอยู่ในรูปของความร้อน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) โดยทั่วไปตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ (1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่รวมแสงหรืออยู่กับที่ (Non - Concentrating / Stationary Solar Collector) ได้แก่ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Collector) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated Tube Collector) ซึ่งสามารถผลิตความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (2) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating Solar Collector) ได้แก่ Linear Fresnel Reflector, Parabolic Trough Collector, Parabolic Dish Reflector และ Heliostat Field Collector โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงต้องมีการเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะออกแบบแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาที่มีความเหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้กับท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ทั้งนี้ นอกจากจะช่วยให้ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวันโดยไม่ต้องปรับทิศทางตามดวงอาทิตย์แล้วยังส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้น วิสุทธิ แซ่มสะอาด (Chramsasard *et al.*, 2012; วิสุทธิ แซ่มสะอาด และคณะ, 2555) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของฮีทไปป์ชนิดท่อสุญญากาศ โดยการศึกษาได้ทำการออกแบบแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่มีครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) 11.5° เพื่อใช้ทดสอบท่อสุญญากาศ 1 ท่อ โดยทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนที่มีความแตกต่างกัน 3 ระบบ (ก) ความสูงของรางสะท้อน (H) 7.76 cm (ข) ความสูงของรางสะท้อน (H) 4.25 cm และ (ค) ไม่มีรางสะท้อน ผลการศึกษาพบว่า ที่ความสูงของรางสะท้อน (H) 7.76 cm จะสามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสุดท้ายได้สูงที่สุด โดยจะมีค่าเท่ากับ 51.9 °C เมื่ออุณหภูมิน้ำเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 °C โดยคิดเป็นปริมาณการถ่ายเทความร้อน 1,830 kJ ที่ปริมาณน้ำ 20 L ธีรเดช ชีวนันทชัย (ธีรเดช ชีวนันทชัย และสำลี ลายลักษณ์, 2549) ทำการศึกษาการกลั่นเอทานอลโดยใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ 2.1 m² จำนวน 2 ชุด แผ่นโค้ง

สแตนเลสแบบพาราโบลาสะท้อนแสงไปยังท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m จากการทดลองต่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบอนุกรม พบว่า อุณหภูมิเอทานอลที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 80 °C

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่า แผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลามีเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะช่วยให้สมรรถนะเชิงความร้อนของระบบเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะประยุกต์ใช้แผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ โดยทำการออกแบบแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลามีความเหมาะสมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด และทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ดังกล่าว ซึ่งสามารถนำผลจากการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

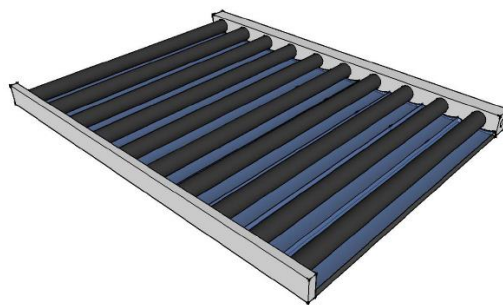
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์

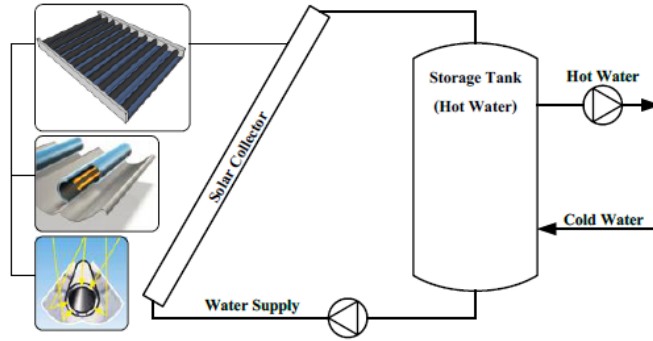
ฮีทไปป์ (Heat Pipe) เป็นท่อทองแดงบรรจุของเหลวที่มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้ และมีประสิทธิภาพสูงฮีทไปป์จะถูกบรรจุ / ติดตั้งภายในหลอดแก้วสุญญากาศ โดยหลอดแก้วสุญญากาศเป็นหลอดแก้วทรงกระบอกสองชั้นซึ่งภายในจะเป็นช่องว่างตรงกลางที่มีลักษณะเป็นสุญญากาศ และบริเวณท่อแก้วด้านในจะมีการเคลือบด้วยสารดูดกลืนรังสีอาทิตย์

แผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบล่า (Compound Parabolic Concentrator, CPC)

แผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบล่าเป็นตัวเพิ่มความเข้มข้นรังสีอาทิตย์แบบอยู่กับที่ (Fixed Concentrator) ที่มีอุณหภูมิใช้งานปานกลาง (100 – 300 °C) โดยมีรางสะท้อนรังสีให้มีความเข้มข้นไปประมาณ 2 – 10 เท่า โดยไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ นอกจากนี้แผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบล่ายังมีพื้นที่ผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์มากกว่าแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (Tracking Concentrator) จึงสามารถยอมให้มีการผิดพลาดของรูปแบบผิวสะท้อนรังสีได้มากขึ้น จึงไม่ต้องการความพิถีพิถันในการสร้างมากเท่ากับแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ ภาพที่ 1 และ 2 แสดงตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบล่า และระบบผลิตน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบล่า



ภาพที่ 1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบล่า



ภาพที่ 2 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลา

การออกแบบแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลา (CPC)

แผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลา (CPC) มีอัตราส่วนการรวมรังสีตามทฤษฎี (CR) ขึ้นอยู่กับตัวกลาง (Medium) ระหว่างตัวดูดรังสีผิวสะท้อน และมุมรับรังสี แสดงดังสมการที่ 1

$$CR_{2-Diamention} = \frac{n}{\sin\theta_c} \tag{1}$$

ความสัมพันธ์ของความสูงทั้งหมดของรางสะท้อนรังสี (H) ความยาวโฟกัส (f) กับครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) และเส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี) (a) แบบท่อ (Tubular Tube) ที่ทำการศึกษสามารถแสดงได้ดังนี้ (คัมภีร์ เทียมแย้ม และ โชคทวี ขอบดี, 2548)

ความสูงทั้งหมด (H):

$$H = \frac{a}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi \sin\theta_c} + \frac{1}{\sin\theta_c \tan\theta_c} \right) \tag{2}$$

ความยาวโฟกัส (f):

$$f = \frac{a}{r} \tag{3}$$

สมการส่วนโค้งรูปพาราโบลา (BC):

$$BC = \beta \left(\frac{d}{2} \right) \quad \text{สำหรับ } \beta \leq \theta_c + \frac{\pi}{2} \tag{4n}$$

$$BC = \frac{\left(\frac{d}{2} \right) \left[\left(\beta + \theta_c + \frac{\pi}{2} \right) - \cos(\beta - \theta_c) \right]}{1 + \sin(\beta - \theta_c)} \quad \text{สำหรับ } \theta_c + \frac{\pi}{2} \leq \beta \leq 3\frac{\pi}{2} - \theta_c \tag{4n1}$$

ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

พิจารณาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector): ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อน โดยถ่ายเทให้กับของไหลที่ไหลภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำให้ของไหลดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_u = A_c F_R \left[s - \frac{U_L}{CR} (T_{f,i} - T_a) \right] = ICR \times \rho \gamma (\tau \alpha)_e - U_L (T_s - T_a) \quad (5)$$

ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ในทางทฤษฎีการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั้น สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งต้องทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ และทำการแปรค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นตามมาตรฐานที่เลือกใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้แล้วยังต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ความหนาของแผ่นดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ จำนวนชั้นและชนิดของแผ่นปิดใส ด้านบน ขนาดของฉนวนด้านข้างและด้านหลังของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เมื่อให้ F_R เป็นแฟคเตอร์ในการดึงความร้อนมาใช้งานพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือ

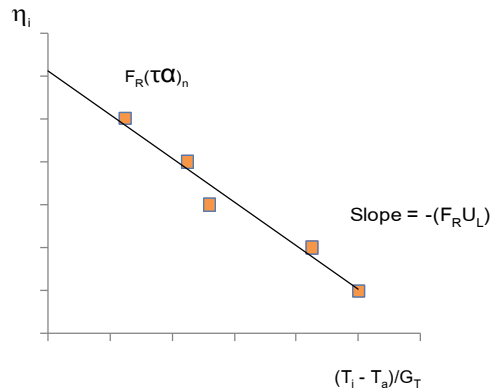
$$Q_u = A_c F_R [(\tau \alpha) G_T - U_L (T_i - T_a)] \quad (6)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง จึงสามารถหาได้จาก

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R (\tau \alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{A_c G_T} \quad (7)$$

$$\eta_i = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (8)$$

ถ้า F_R และ U_L มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากในช่วงของการใช้งาน $F_R (\tau \alpha)_e$ และ $F_R U_L$ จะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายว่าตัวเก็บรังสีนั้นทำงานอย่างไร $F_R (\tau \alpha)_e$ จะเป็นตัวชี้ถึงพลังงานที่ถูกดูดกลืน และ $F_R U_L$ จะเป็นเทอมที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียถ้า U_L , F_R และ $(\tau \alpha)_e$ คงที่ การเขียนกราฟของ $F_R (\tau \alpha)_e$ กับ $\frac{(T_i - T_a)}{G_T}$ จะเป็นเส้นตรงตัดแกน y ที่ $F_R (\tau \alpha)_e$ และมีความชันเท่ากับ $-F_R U_L$ สำหรับ U_L เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเร็วลม และจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนแผ่นปิดใสเพิ่มขึ้น F_R จะขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้แล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของรังสีตรงรังสีกระจายและรังสีจากการสะท้อนจากพื้นดิน ข้อมูลจะมีการกระจายเนื่องจากอุณหภูมิ ความเร็วลม และมุมตกกระทบที่เปลี่ยนไปแม้ว่าจะค่อนข้างยุ่งยากแต่การทำนายสมรรถนะในระยะยาวสามารถกำหนดได้จากจุดตัดแกนและความชัน



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_i กับ $(T_i - T_a)/G_T$

ในกรณีที่ต้องการหาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ สมรรถนะทางความร้อนขณะใดขณะหนึ่งสามารถหาได้จากสมการ (John A. Duffie and William A. Beckman, 1991)

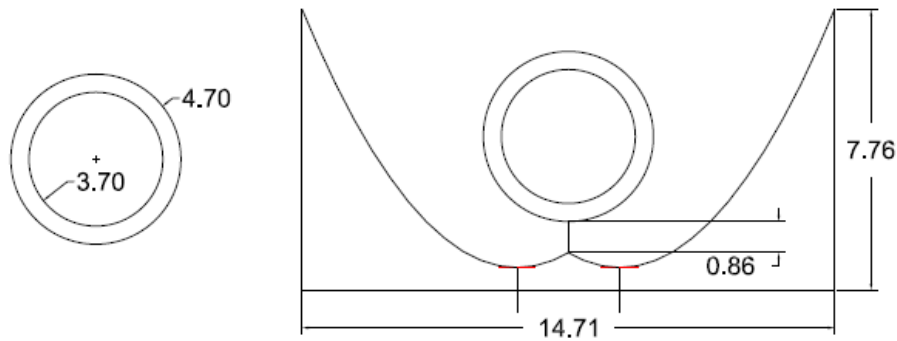
$$\eta_i = F_R(\tau\alpha) - a \frac{(T_m - T_a)}{G_T} - b \left[\frac{(T_m - T_a)}{G_T} \right]^2 \quad (9)$$

$$T_m = \frac{(T_i + T_o)}{2} \quad (10)$$

เมื่อ

รายละเอียดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลา

- พื้นที่ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (Gross Area) : 2.61 m²
- ฮีทไปป์แบบท่อสุญญากาศ : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 47 mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 37 mm
- ค่าครึ่งมุมรับรังสี (Acceptance Angle, θ_c) : 11.5° (วิสุทธิ์ แซ่มสะอาด และคณะ, 2555)
- มุมที่จุดศูนย์กลางที่ดูดแสง (β) : 120° (วิสุทธิ์ แซ่มสะอาด และคณะ, 2555)
- ความสูงของรางสะท้อนรังสี (H) : 7.76 cm แสดงดังภาพที่ 4 (วิสุทธิ์ แซ่มสะอาด และคณะ, 2555)



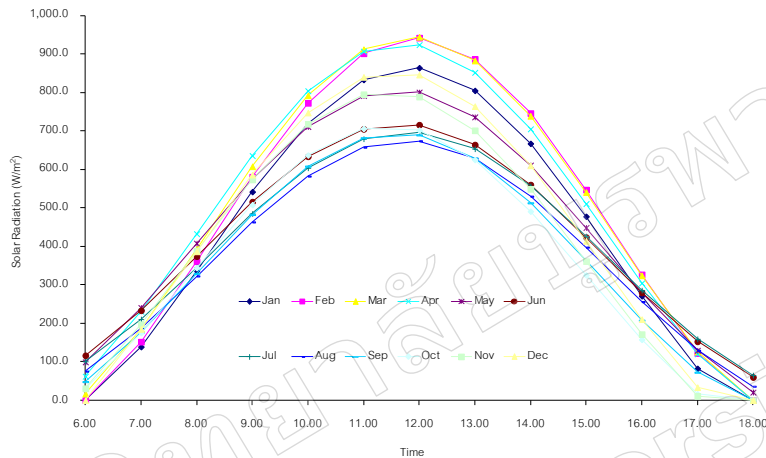
ภาพที่ 4 แสดงขนาดแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลา

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ และสร้างแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาที่มีขนาดพื้นที่ตัวเก็บรังสี (Gross Area) 2.61 m^2 และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาตามมาตรฐาน ISO 9806 – 1 (INTERNATIONAL STANDARD, 1995a, 1995b) ผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพลังงานที่ผลิตได้ โดยจะใช้ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมของ จ.พิษณุโลก (ตารางที่ 1 และภาพที่ 5) จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ค่าพลังงานรายปีที่ระบบผลิตได้เทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์อื่นๆ ที่ทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน ม.นเรศวร ได้ทำการทดสอบ (ตารางที่ 2) เพื่อจะได้ทราบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาแบบท่อสุญญากาศชนิดนี้ไปพร้อมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาสามารถผลิตพลังงานรายปีได้มากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยในแต่ละเดือนของ จ.พิษณุโลก (NASA, 2013)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Solar Radiation (kWh/m ² /day)	4.95	5.66	6.04	6.3	5.67	5.05	4.87	4.66	4.71	4.63	4.74	4.81
Air temperature (°C)	25.2	28.3	30.3	30.1	28.8	27.2	26.8	26.4	26.1	24.7	23.2	22.7



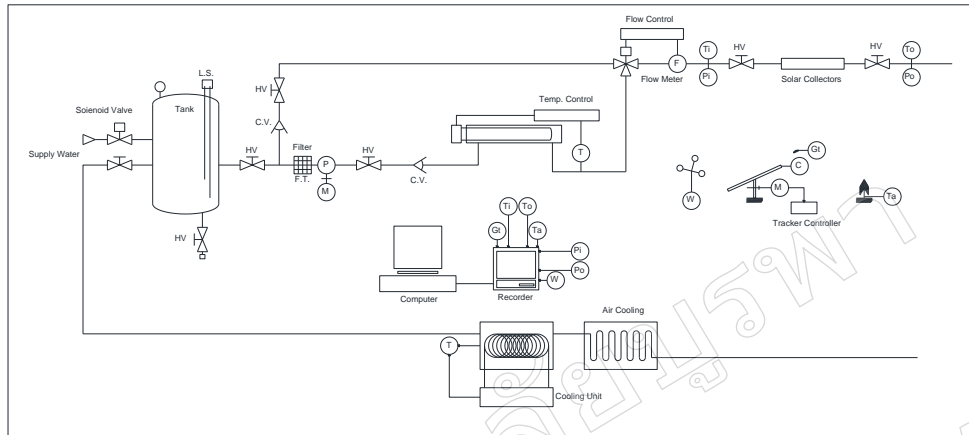
ภาพที่ 5 ปริมาณรังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปีของ จ.พิษณุโลก (W/m²) (NASA, 2013)

การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์

การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งทำการทดสอบแบบกลางแจ้ง (แสดงดังรูปที่ 6) เพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9806 – 1 (INTERNATIONAL STANDARD, 1995a, 1995b) (ยกเว้นเงื่อนไขของอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ซึ่งตามมาตรฐาน ISO 9806 – 1 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต้องไม่เกิน 30.0 °C แต่เนื่องจากประเทศไทยมีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมค่อนข้างสูง ดังนั้นในช่วงเวลาการทดสอบที่ไม่ใช่ฤดูหนาวอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะเกิน 30.0 °C) โดยให้รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในแนวตั้งจากตลอดเวลาการทดสอบ โดยทำการทดสอบแบบระบบปิดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. อัตราการไหลของของไหลมีค่าคงที่เท่ากับ 0.02 kg/s ต่อ 1 ตารางเมตรของพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ (สำหรับการทดสอบนี้ใช้อัตราการไหลที่ 0.04 kg/s)
2. ทดสอบที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ไม่น้อยกว่า 800.00 W/m² (กรณีมาตรฐาน ASHRAE 93-86 ทดสอบที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ไม่น้อยกว่า 790.00 W/m²)
3. อุณหภูมิอากาศแวดล้อมไม่เกิน 30.0 °C (สำหรับการทดสอบนี้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมอยู่ระหว่าง 28.0 – 32.0 °C)
4. อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (สำหรับการทดสอบนี้ อุณหภูมิน้ำเข้ามีค่าอยู่ระหว่าง 30.0 – 50.0 °C)

มีการทำความสะอาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ก่อนการทดสอบทุกครั้ง แล้วเริ่มดำเนินการทดสอบ บันทึกผลและเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a), อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_i), อุณหภูมิน้ำออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_o), ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (G) และอัตราการไหลของน้ำ (\dot{m}) โดยเก็บข้อมูลช่วงเวลาประมาณ 10.00 น. – 14.00 น. ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์



C: Solar Collector, C.V.: Check Valve, F: Flow Transducer, F.T.: Water Filter, Gt: Solar radiation on collector plane, HV: Hand Valve, L.S.: Level switch control, M: AC motor drive pump, P: Water pump, Pi: Pressure transducer inlet, Po: Pressure transducer outlet, T: Temperature heating control, Ta: Ambient temperature, Ti: Inlet temperature, To: Outlet temperature, W: Wind speed

ภาพที่ 6 การติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับแทนทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบกลางแจ้ง

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

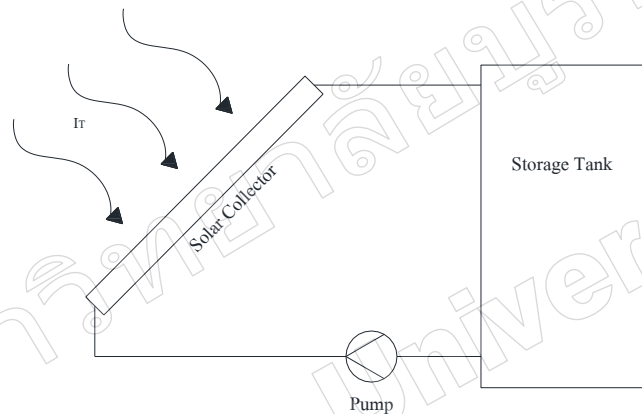
การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการจำลองการทำงานของระบบดังรูปที่ 7 เพื่อหาค่าพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ตลอดทั้งปีโดยมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้คือ ใช้ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม ของจังหวัดพิษณุโลก การทำงานของระบบ 8 ชั่วโมงต่อวัน (8.00 - 16.00 น.) ถังน้ำร้อนขนาด 600 ลิตร และอุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้น 31.00 °C

โดยข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5 ข้อมูลสมการแสดงค่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 2 และขั้นตอนการคำนวณแสดงดังภาพที่ 8

ขั้นตอนการจำลองสภาพการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การจำลองสภาพการทำงานของระบบ เริ่มต้นจากการกำหนดข้อมูลที่จะป้อนเข้าระบบ คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (A_C), ปริมาณรังสีอาทิตย์ (I_T), สัมประสิทธิ์การดูดกลืน ($F_R(\tau\alpha)$), สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($F_R U_L$), อุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}), อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m_w), เวลาเปลี่ยนแปลง (Δt), ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (M_S) และอุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (T_S^t)

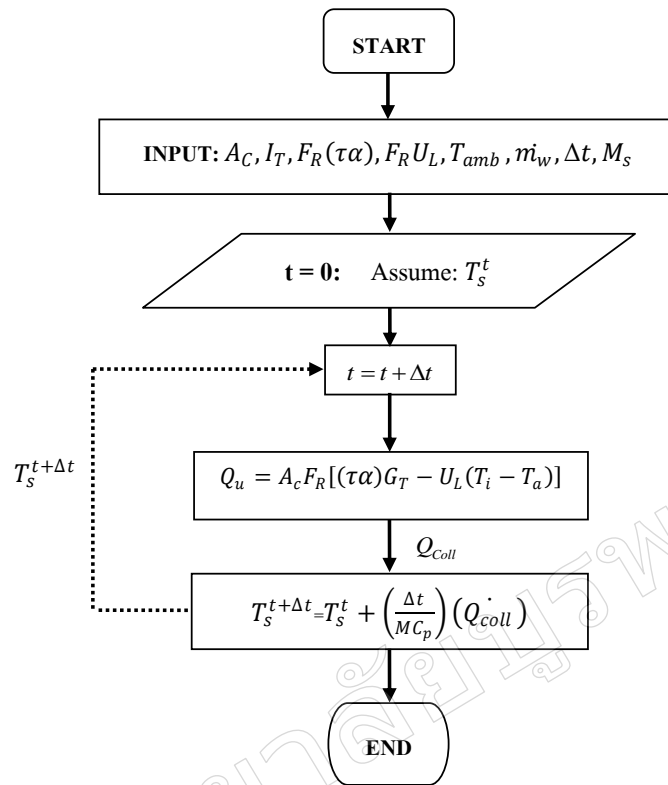
โดยข้อมูลที่กำหนดสามารถนำมาคำนวณในการจำลองสถานการณ์ตามขั้นตอนดังนี้ ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) กำหนดอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นในถัง จากนั้นคำนวณหาอัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (\dot{Q}_{coll}) นำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อน ซึ่งจะทำให้ทราบอุณหภูมิของน้ำในถังที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ($T_S^{t+\Delta t}$) จากนั้นระบบจะย้อนกลับไปคำนวณที่เวลา $t = t + \Delta t$



ภาพที่ 7 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 2 ข้อมูลสมการแสดงค่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทดสอบโดยวิทยาลัยพลังงานทดแทน สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (รัฐพร เงินมีศรี และคณะ, 2012)

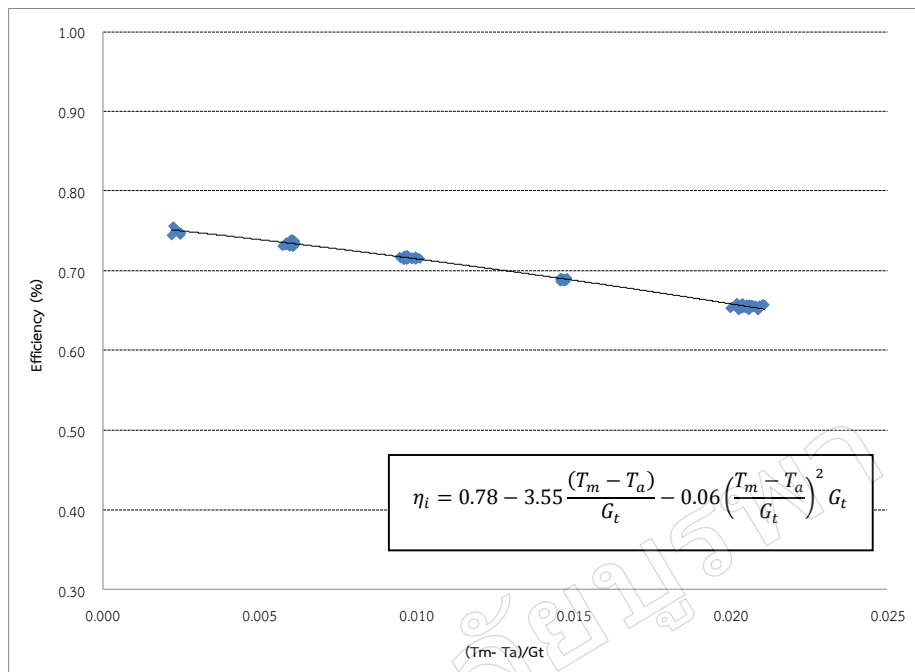
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ		
Company A	$\eta = 0.57 - 21.91 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.94$
Company B	$\eta = 0.62 - 10.37 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.91$
Company C	$\eta = 0.64 - 16.24 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.99$
Company D	$\eta = 0.45 - 3.60 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.94$
Company E	$\eta = 0.65 - 21.81 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.90$
Company F	$\eta = 0.65 - 9.23 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.91$
Company G	$\eta = 0.66 - 8.40 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.96$
Company H	$\eta = 0.88 - 8.84 (T_i - T_a)/G_t$	$R^2 = 0.90$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe		
Company I	$\eta = 0.57 - 0.54(T_m^*) - 0.0036G_t(T_m^*)^2$	$R^2 = 0.97$
Company J	$\eta = 0.80 - 2.77(T_m^*) - 0.0200G_t(T_m^*)^2$	$R^2 = 0.96$



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการศึกษา

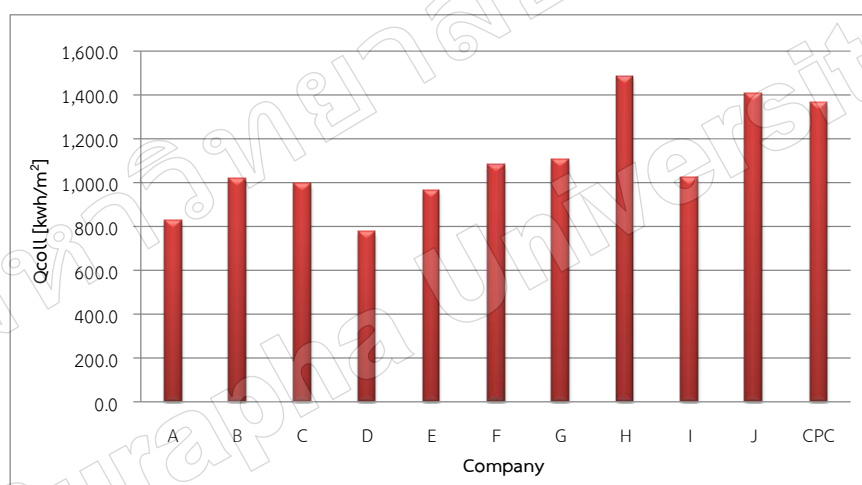
ผลที่ได้จากการศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาแบบสี่ทไปป์ ชนิดท่อสุญญากาศตามมาตรฐาน ISO 9806 – 1 แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 78% การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 3.55 และ 0.06 W/m²-°C ตามลำดับ



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบ CPC

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานที่ผลิตได้ในแต่ละเดือน (kWh/m²) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ

Company	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	AVG.	Total
A	70.24	87.32	108.07	100.83	82.05	61.39	59.89	54.79	51.98	47.48	47.64	53.53	68.77	825.20
B	89.22	97.15	113.74	107.51	92.97	76.33	75.80	71.24	68.56	67.49	71.24	79.39	84.22	1,010.65
C	86.40	99.01	118.58	111.46	94.03	74.48	73.49	68.38	65.46	62.60	65.06	72.54	82.62	991.49
D	69.11	71.59	81.88	77.86	69.07	58.71	58.65	55.63	53.81	54.49	58.47	64.90	64.51	774.16
E	82.44	99.36	121.46	113.60	93.67	71.64	70.22	64.66	61.54	57.32	58.35	65.39	79.97	959.65
F	95.11	102.06	118.68	112.36	97.88	81.18	80.77	76.12	73.36	72.82	77.26	86.01	89.47	1,073.60
G	97.55	103.80	120.23	113.94	99.67	83.16	82.82	78.18	75.40	75.22	80.03	89.03	91.59	1,099.04
H	131.71	138.05	158.71	150.62	132.79	111.99	111.77	105.79	102.15	102.73	109.83	122.07	123.18	1,478.20
I	91.49	91.18	102.23	97.66	88.47	77.28	77.57	74.08	71.88	74.26	80.58	89.21	84.66	1,015.92
J	126.00	127.31	143.74	137.07	123.23	106.62	106.86	101.80	98.65	101.21	109.40	121.24	116.93	1,403.14
CPC	121.91	123.91	140.33	133.72	119.83	103.24	103.40	98.41	95.31	97.47	105.18	116.61	113.28	1,359.32



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบค่าพลังงานรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดต่างๆผลิตได้(kWh/m²)

ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 10 พบว่า ค่าพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาแบบฮีทไปป์ ชนิดท่อสุญญากาศ ผลิตได้ในแต่ละเดือนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 113.28 kWh/m² หรือเท่ากับ 1,359.32 kWh/m² ต่อปีโดยมีค่าพลังงานสูงสุด และต่ำสุดในเดือนมีนาคม และกันยายน ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 140.33 และ 95.31 kWh/m²ตามลำดับและเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าพลังงานรายปีกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ได้ทำการทดสอบ พบว่า ความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนได้ต่ำกว่า $1,199 \text{ kWh/m}^2$ ต่อปีพบว่า มีจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์อยู่ 8 บริษัท โดยแบ่งเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 7 บริษัท คือ บริษัท A, B, C, D, E, F และ G และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบฮีทไปป์ 1 บริษัท คือ บริษัท I

2. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนได้สูงกว่า $1,200 \text{ kWh/m}^2$ ต่อปีพบว่า มีจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์อยู่ 2 บริษัท โดยแบ่งเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 1 บริษัท คือ บริษัท H, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบฮีทไปป์ 1 บริษัท คือ บริษัท J และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวรออกแบบ คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาแบบฮีทไปป์ชนิดท่อสุญญากาศ (CPC)

จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาจัดอยู่ในกลุ่มของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สามารถผลิตพลังงานรายปีได้สูงกว่า $1,200 \text{ kWh/m}^2$ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในกลุ่มดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง ประกอบกับมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

สรุปผลการศึกษา

การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาตามมาตรฐาน ISO 9806 – 1 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 78% การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 3.55 และ $0.0600 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพลังงานที่ผลิตได้ โดยใช้ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมของ จ.พิษณุโลก พบว่า ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ฯ ผลิตได้ในแต่ละเดือนมีค่าเท่ากับ 113.28 kWh/m^2 หรือเท่ากับ $1,359.32 \text{ kWh/m}^2$ ต่อปี และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ทดสอบจำนวน 10 แผง โดยแบ่งเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบจำนวน 8 แผง และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบฮีทไปป์จำนวน 2 แผง พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดฮีทไปป์ร่วมกับแผ่นสะท้อนรูปประกอบพาราโบลาสามารถผลิตพลังงานรายปีได้สูงกว่า $1,200 \text{ kWh/m}^2$ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนได้สูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับสถานที่ทำวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- คัมภีร์ เทียมแย้ม และโชคทวี ขอบดี. (2548). ระบบผสมผสานระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบรวมแสงรูปประกอบพาราโบลา CPC. ปรินานพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต, สาขาวิชาครุศาสตร์เครื่องกล, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรเดช ชีวนันทชัย และสำลี ลายลักษณ์. (2549). การกลั่นเอทานอลโดยใช้ตัวรวมรังสีแบบรูปประกอบพาราโบลา. ใน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20. (หน้า 65 - 70).

- รัฐพร เงินมีศรี, ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงษ์ และนิพนธ์ เกตุจ้อย. (2556). การประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตได้. *วารสารมหาวิทยาลัยนครสวรรค์*, 20(1), 16 -23.
- วิสุทธิ แซ่มสะอาด, สรวิต สอนสารี, สุขฤดี สุขใจ และไพฑูริย์ เหล่าดี. (2555). ผลกระทบของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสุญญากาศ. ใน. การประชุมวิชาการ (Proceedings) พะเยาวิจัย ครั้งที่ 1. (หน้า 592 - 599).
- John A. Duffie and William A. Beckman. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (2nd ed). New York: JOHN WILEY & SONS, INC.
- METHODS OF TESTING TO DETERMINE THE THERMAL PERFORMANCE OF SOLAR COLECTORS, ASHRAE STANDARD AN AN AMERICAN NATIONAL STANDARD. ANSI/ASHRAE 93-1986.
- NASA Surface meteorology and Solar Energy – Location (Online). (2013). สืบค้นจาก : <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> ,วันที่ค้นข้อมูล 10 มกราคม 2556
- Wisut Chramsard, Sukruedee Sukchai, Sorawit Sonsaree, Paitoon Laodee, Anan Pongtornkulpanich. (2012). *Thermal Efficiency of Evacuated Tube Solar Hot Water System with Compound*. In Tagungsband Proceedings. (pp 166-172). Germany.

รายการสัญลักษณ์

a	:	เส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี)
a_1, a_2	:	การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
A_C	:	พื้นที่รับรังสี (Aperture Area, m^2)
BC	:	เส้นโค้งรูปพาราโบลา
CR	:	อัตราส่วนรวมรังสี
C_P	:	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K)
d	:	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
f	:	ความยาวโฟกัส (m)
F_R	:	ตัวประกอบการนำความร้อนมาใช้ (Heat Removal Factor)
H	:	ความสูงทั้งหมด (m)
I_T	:	ความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (W/m^2)
\dot{Q}_u	:	พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (W)
γ	:	อัตราส่วนการตกกระทบเป้ารับรังสี
\dot{m}	:	อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
n	:	สัมประสิทธิ์การหักเหแสง (Index of Refraction) ของตัวกลางที่อยู่ระหว่างตัวรับรังสีกับรางสะท้อนรังสี
r	:	รัศมีของท่อ (m)
s	:	อัตราการรับความร้อนต่อพื้นที่ของแผงรับรังสี (W/m^2) ($s = \tau\gamma\rho G_T$)
T_a	:	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}C$)
T_i	:	อุณหภูมิของไหลขาเข้า ($^{\circ}C$)
T_o	:	อุณหภูมิของไหลขาออก ($^{\circ}C$)
T_m	:	อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}C$)
U_L	:	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m^2-K)
θ_C	:	ครึ่งมุมรับรังสี (Acceptance half Angle)
$(\tau\alpha)_e$:	ค่าผลคูณประสิทธิภาพของสภาพส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (τ) และสภาพดูดกลืนรังสีของตัวรับรังสี (α)
β	:	มุมที่จุดศูนย์กลางท่อดูดแสง (องศา)