

การวิเคราะห์ความไวทางด้านประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ

Sensitivity Analysis in Efficiency of the Solar Water Heater System Self-Circulated by a Steam Power

ดุจฤดี ยูวานนท์¹ นริส ประทินทอง^{2*} และ พิชัย นามประกาย³

¹นักศึกษา ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์ความไวทางด้านประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบถูกพัฒนาขึ้นจากผลการทดลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณ น้ำที่สามารถหมุนเวียนได้ต่อวัน, อุณหภูมิและความดันในอุปกรณ์หลัก ระบบใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่มี ขนาดพื้นที่รับแสง 1.58 m² และถังกักเก็บน้ำร้อนความจุ 30 ลิตร ในการทำงาน โดยผลการจำลองสมรรถนะของ ระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าค่า $\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100$ เท่ากับ 5.876%, 3.583% และ 1.361% สำหรับความดันและอุณหภูมิภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและอุณหภูมิภายในถังกักเก็บน้ำ ร้อน ตามลำดับ ระบบสามารถทำงานได้เมื่อมีค่าพลังงานรังสีอาทิตย์มากกว่าหรือเท่ากับ 584 W/m², 607 W/m², 632 W/m² และ 662 W/m² ที่ระดับความสูง 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m ตามลำดับ จากการจำลองระบบ พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 2.94 – 11.47% ประสิทธิภาพการสูบน้ำเฉลี่ยต่อวัน 0.00057 – 0.0026% ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบและระดับความสูงการส่งน้ำของระบบ

Abstract

The sensitivity analysis in efficiency of solar water heater system self-circulated by a steam power was performed in this study. The mathematical model of the system was developed based on the experimental results to predict the available amount of water pumped, temperature and pressure in main devices. This system was operated by using a simple flat plate solar collector with an exposed area of 1.58 m², and a storage tank of 30 liters. The results of systematic performance which performed by math model was compared to the experimental results. It was found that the values of $\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100$ were 5.876%, 3.583% and 1.361% for vapor pressure and temperature in the flat plate solar collector and temperature in the storage tank, respectively. The system was workable when the solar energy input values were equal to or greater than 584 W/m², 607 W/m², 632 W/m² and 662 W/m² for discharge head 1 m, 1.5 m, 2 m and 2.5 m respectively. From system simulation, the system could have the daily average thermal efficiency was between 2.94 – 11.47% and the daily average pump efficiency 0.00057 – 0.0026% depending on the intensity of incident solar radiation and the discharge head of the system.

คำสำคัญ : การศึกษาตัวแปร เครื่องทำน้ำร้อน เครื่องสูบน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์ พลังงานรังสีอาทิตย์

Keywords : Parametric Study, Solar Water Pump, Solar Energy, Water Heater

*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ naris.pra@kmutt.ac.th โทร. 0 2470 8695-9 ต่อ 128

1. บทนำ

วิกฤตการณ์พลังงานที่กำลังเกิดขึ้นทั่วโลกเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก และการขยายตัวทางเศรษฐกิจเป็นผลทำให้มีการบริโภคพลังงานฟอสซิลสูงขึ้นตามไปด้วย นำมาซึ่งปัญหาการขาดแคลนพลังงาน เนื่องจากพลังงานฟอสซิลมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งผลจากการบริโภคพลังงานทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ส่งผลให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้นทุกปี ปัจจุบันนี้ทุกประเทศทั่วโลกจึงตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและตั้งเป้าหมายในการลดการใช้พลังงานฟอสซิล โดยส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานสะอาดกันอย่างแพร่หลาย

พลังงานรังสีอาทิตย์เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่สำคัญสำหรับพลังงานสะอาด เนื่องจากมีศักยภาพสูง ไม่ปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก เมื่อใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ปัจจุบันมีการนำพลังงานรังสีอาทิตย์มาใช้ใน 2 ลักษณะคือ 1. เพื่อผลิตไฟฟ้า 2. เพื่อผลิตความร้อน การใช้พลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีขั้นตอนการทำงานและอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งระบบมีประสิทธิภาพสูง ประเทศไทยเองเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมในการนำพลังงานรังสีอาทิตย์มาใช้งานด้านความร้อน เนื่องจากมีปริมาณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดปีเฉลี่ยวันละ 18.2 MJ/m^2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2544) ซึ่งเพียงพอในการนำไปใช้งานด้านความร้อน โดยความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์นี้สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสารทำงานเพื่อยกของเหลวขึ้นสู่ที่สูงได้ ในปี ค.ศ. 1984 Wakao, Tanisho (1984: 538-541) และ Liu ได้ศึกษาเครื่องสูบลูกสูบของเหลวที่อาศัยงานกลจากความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 แหล่ง ในการเคลื่อนที่ โดยไม่ต้องใช้ปั๊มไฟฟ้า ในระบบ ต่อมา Al-Haddad, Enaya และ Fahim (1996: 321-334) ได้ออกแบบและทดสอบระบบสูบน้ำโดยอาศัยหลักการความแตกต่างของอุณหภูมิในการสร้างงานกลพร้อมศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยใช้สาร CFC 11 เป็นสารทำงาน พบว่าสมรรถนะของเครื่องสูบลูกสูบในระบบผลิตกำลังได้ 0.8 W ที่ระดับความสูงการส่งน้ำ 2.5 m ส่วน Picken, Seare และ Goto (1997: 219-224) ศึกษาเครื่องสูบน้ำชนิดลูกสูบโดยใช้ผลต่างของอุณหภูมิในการยกของเหลว และใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นแหล่งให้พลังงาน สามารถผลิตน้ำร้อนได้ 110°C ระบบมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 0.05% ต่อมาในปี ค.ศ. 2001 Wong และ Sumathy (2001: 613-627) ได้ศึกษาปัจจัยการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องสูบน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ใช้เอทิลอีเธอร์เป็นสารทำงาน พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานคือมวลสารทำงานเริ่มต้นที่มีในระบบ และระยะเวลาการควบแน่นสารทำงาน ระบบนี้สามารถสูบน้ำได้ 1.4 และ 0.68 m^3 ที่เฮดการส่งน้ำ 6 และ 10 m ตามลำดับ ต่อมา ญัฐพล รุ่งประแสง (2551: 1-154) ได้สร้างระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำแบบใหม่ขึ้น โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนและหมุนเวียนน้ำได้โดยไม่ต้องอาศัยปั๊มน้ำไฟฟ้า สามารถหมุนเวียนน้ำได้สูงสุด 41.97 ลิตร/วัน มีประสิทธิภาพปั๊มเฉลี่ย $0.00075\% - 0.00266\%$

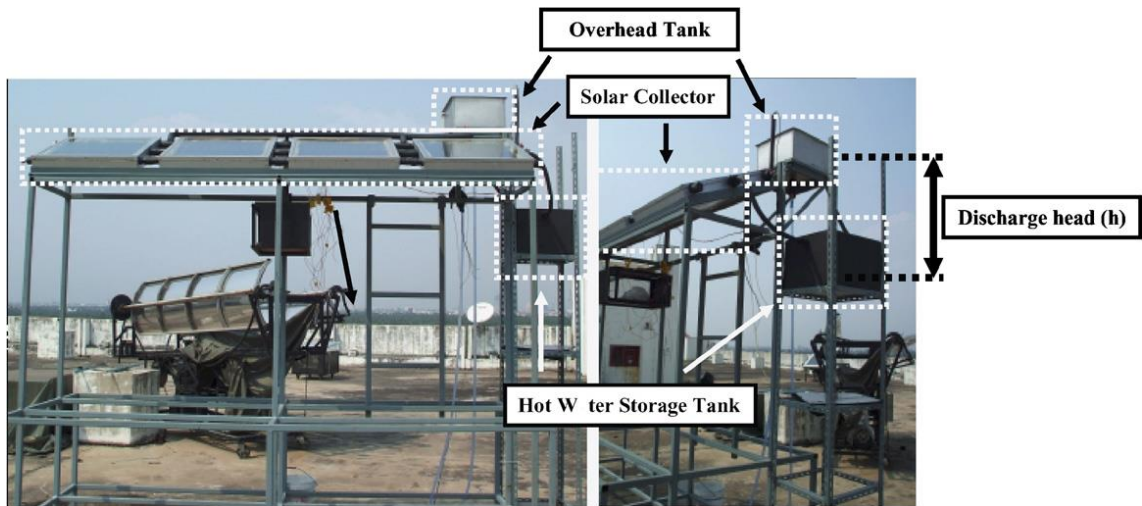
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายขั้นตอนและอธิบายกลไกการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำได้ พร้อมทั้งนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มาวิเคราะห์ความไวของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบให้เหมาะสมตามความต้องการภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดก่อนการสร้างระบบจริง

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

โครงสร้างและอุปกรณ์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ

โครงสร้างและอุปกรณ์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างและอุปกรณ์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ

จากรูปที่ 1 อุปกรณ์ในระบบประกอบไปด้วย

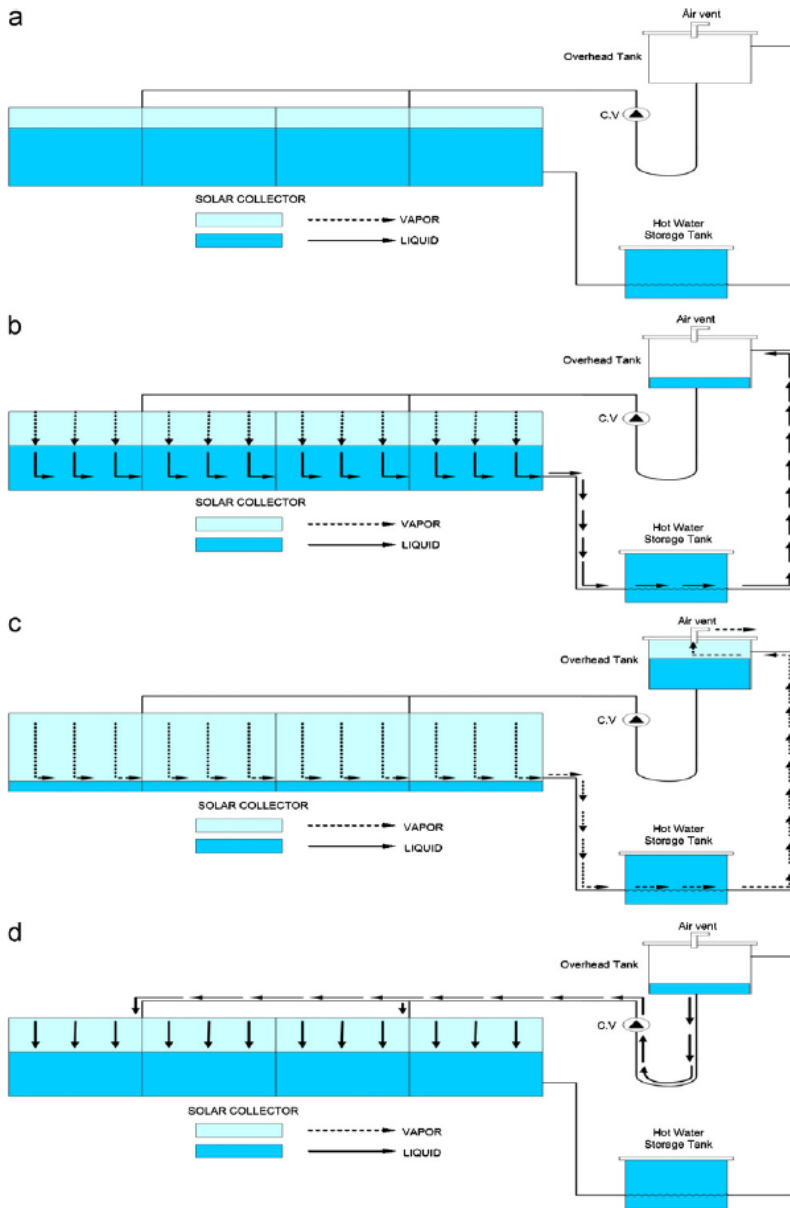
1. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat plate solar collector) ติดตั้งอยู่บนโครงเหล็กดังรูปที่ 1 มีพื้นที่รับรังสี 0.397 m^2 จำนวน 4 แผง รวม 1.58 m^2 ทิศหน้าไปทางทิศใต้ทำมุมเอียง 14 องศา กับพื้นราบ มีปริมาตรทั้งหมด 5.4 ลิตร ซึ่งภายในบรรจุน้ำ 4.1 ลิตร และอากาศ 1.3 ลิตร
2. ถังเติมน้ำด้านบน (Overhead tank) ติดตั้งด้านบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์และมีรูระบายไออยู่ด้านบน ทำหน้าที่รองรับน้ำที่หมุนเวียนในระบบและเติมน้ำเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถบรรจุน้ำได้ 48 ลิตร
3. ถังกักเก็บน้ำร้อน (Hot water storage tank) ติดตั้งด้านล่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์และมีชุดแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ภายใน ทำหน้าที่เก็บสะสมความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของน้ำร้อน โดยบรรจุน้ำไว้ทั้งหมด 30 ลิตร

2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำโดยละเอียด พร้อมทั้งศึกษาการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel
3. ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการทดลองที่เก็บค่าโดยตรงจากงานวิจัยระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการหาคำตอบ
4. ปรับเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้สมการที่ถูกต้องสมบูรณ์
5. ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซ้ำจนกว่าจะได้สมการที่ถูกต้องสมบูรณ์
6. หาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่ได้จากการทดลอง
7. นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพรวมของระบบ ที่ระดับความสูงการส่งน้ำ 1 m , 1.5 m , 2 m และ 2.5 m โดยใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของประเทศไทย
8. สรุปผลปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อประสิทธิภาพรวมของระบบ

2.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ตามกระบวนการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ

2.3.1 ขั้นตอนการให้ความร้อน (Heating Stage)

ขั้นตอนการให้ความร้อนระบบ แสดงในรูปที่ 2a เริ่มต้นความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าเฮดความสูงการสูบน้ำของระบบ ต่อมาเมื่อได้รับพลังงานจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เกิดการสะสมความร้อน ทำให้น้ำและอากาศภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่ามากกว่าเฮดความสูงการสูบน้ำ ใช้สมการ 1-3 ในการวิเคราะห์ ดังนี้

$$\alpha_p T_s A_p H_s - q_c - q_r - q_s = m_c C_{p,c} \frac{dT_c}{dt} \tag{1}$$

$$Q_{use} = m_c C_{p,c} \frac{dT_c}{dt} - m_o C_{p,o} \frac{dT_o}{dt} \tag{2}$$

$$Q_{use} - h_{comb} A_f (T_t - T_f) + q_{Dw} = m_t C_{p,t} \frac{dT_t}{dt} \tag{3}$$

2.3.2 ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำร้อนในระบบ (Water Circulating Stage)

ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำร้อนในระบบ แสดงในรูปที่ 2b เกิดขึ้นเมื่อความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่าเฮดการสูบน้ำ น้ำที่อยู่ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถูกดันและไหลออกไปยังท่อส่งผ่านน้ำร้อน แล้วแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำที่อยู่ภายในถังกักเก็บน้ำร้อน จากนั้นถูกดันขึ้นสู่ถังเติมน้ำด้านบน กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งระดับน้ำในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบลดลงต่ำกว่าท่อส่งผ่านน้ำร้อน ซึ่งสมการที่ใช้อธิบายขั้นตอนการทำงานในขั้นตอนนี้คือ

$$Q_{use} - h_{comb} A_f (T_t - T_f) + q_{Dw} - \dot{m}_{trans} C_{p,w} T_w = \frac{d}{dt} (m_t C_{p,t} T_t) \tag{4}$$

2.3.3 ขั้นตอนการหมุนเวียนไอน้ำในระบบ (Vapor Circulating Stage)

ขั้นตอนการหมุนเวียนไอน้ำในระบบแสดงในรูปที่ 2c เมื่อระดับน้ำภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบลดต่ำกว่าท่อส่งผ่านน้ำร้อน ไอน้ำความดันสูงที่อยู่ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะไหลผ่านขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนภายในถังกักเก็บน้ำร้อนแล้วถูกระบายออกด้วยช่องระบายไอที่ถังเติมน้ำด้านบน จนกระทั่งความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของขั้นตอนการหมุนเวียนไอน้ำในระบบใช้สมการดังนี้

$$Q_{use} - h_{comb} A_f (T_t - T_f) + q_{Dw} - \dot{m}_{ent} C_{p,a} T_a = \frac{d}{dt} (m_t C_{p,t} T_t) \tag{5}$$

2.3.4 ขั้นตอนการเติมน้ำเข้าสู่ระบบ (Filling Stage)

ขั้นตอนการเติมน้ำเข้าสู่ระบบแสดงในรูปที่ 2d เกิดขึ้นเมื่อความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ น้ำอุณหภูมิต่ำที่อยู่ในถังเติมน้ำด้านบน ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นน้ำอุณหภูมิต่ำจากถังเติมน้ำด้านบนไหลลงมาผสมกับน้ำและอากาศอุณหภูมิสูงในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จึงเกิดความดันสุญญากาศขึ้น ทำให้มีการดูดอากาศแวดล้อมเข้ามาในระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความดันในระบบมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ 2 ช่วง ดังนี้

1. ขั้นตอนการเติมน้ำระยะที่ 1 น้ำไหลจากถังเติมน้ำด้านบนสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยที่ยังไม่เกิดการดูดอากาศ สมมติให้เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการเติมน้ำระยะที่ 1 อุณหภูมิของระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล สามารถสร้างสมการได้ดังนี้

$$Q_{use} * Time + Time * \dot{m}_{win} C_{p,win} T_{win} + \dot{m}_{cond} \lambda_w A_{w-a} * Time + q_{Dw} * Time + m_w C_{p,w} T_w + m_a C_{p,a} T_a = (m_w C_{p,w} + m_a C_{p,a} + Time * \dot{m}_{win} C_{p,win}) T_2 \tag{6}$$

2. ขั้นตอนการเติมน้ำระยะที่ 2 อากาศถูกดูดเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ สร้างสมการได้ดังนี้

$$m_{a,in} C_{p,a,in} (T_{a,2} - T_{a,m}) = m_a C_{p,a} (T_{a,2} - T_{a,1}) \tag{7}$$

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเติมน้ำเข้าสู่ระบบจะสามารถหมุนเวียนน้ำได้ทั้งหมด 3.1 ลิตรต่อรอบ และระบบพร้อมทำงานในรอบต่อไป

2.3.5 การวิเคราะห์ระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ

การคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{Q_{\text{storage}}}{H_{\text{tot}}} \times 100 \tag{8}$$

สามารถหาประสิทธิภาพการสูบน้ำของระบบได้จากสมการ

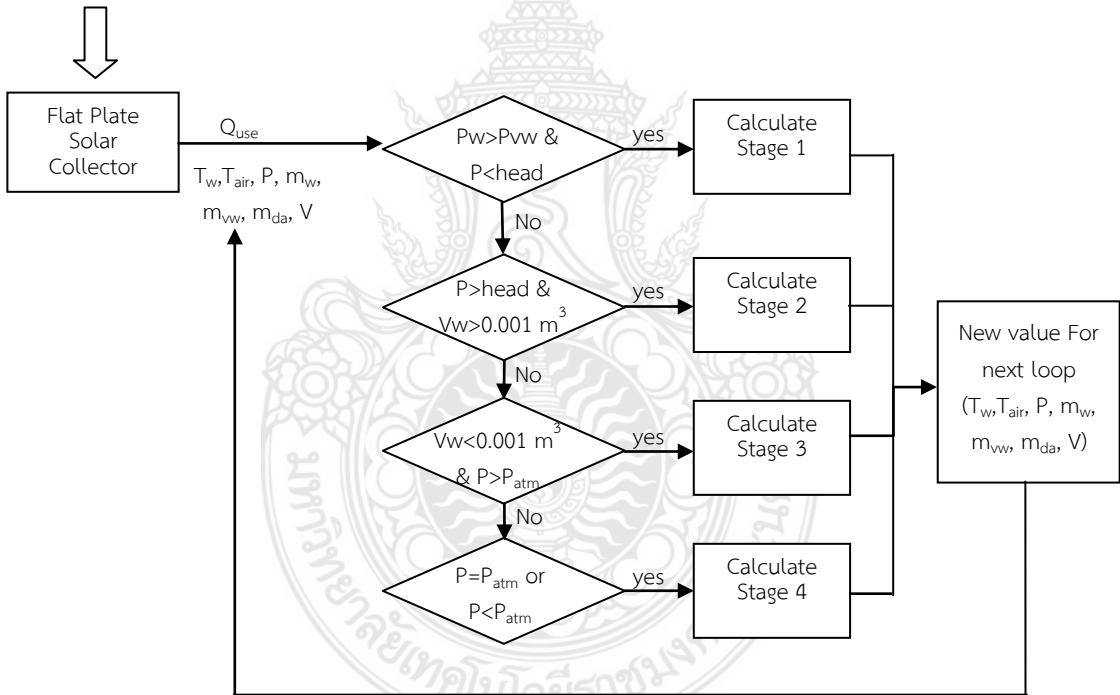
$$\eta_{\text{pump}} = \frac{NW_h}{H_{\text{tot}}} \times 100 \tag{9}$$

และหาอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังกักเก็บน้ำร้อนจากสมการ

$$T_{ws}^{t+1} = \frac{\dot{m}_{\text{trnw}} C_{p,\text{trnw}} T_{\text{cin}} - \text{loss} + \dot{m}_{\text{ws}} C_{p,\text{ws}} T_{\text{is}}}{(\dot{m}_{\text{ws}} C_{p,\text{ws}}) + (\dot{m}_{\text{trnw}} C_{p,\text{trnw}})} \tag{10}$$

โดยแผนภาพขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ แสดงไว้ในรูปที่ 3

Input Value H_s, T_{am}



รูปที่ 3 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รายการสัญลักษณ์

- A = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2
- C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, $J/kg^\circ C$
- h_{comb} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/m^2K
- H_s = ปริมาณรังสีอาทิตย์ตกกระทบ, W/m^2
- H_{tot} = พลังงานแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบตัว

เก็บรังสีใน 1 วัน, kJ

m = มวล, kg

\dot{m}_{cond} = อัตราการควบแน่นไอน้ำภายในตัวเก็บรังสี
อาทิตย์แบบแผ่นราบ, $kg/m^2 \cdot s$

\dot{m}_{ranw} = อัตราการไหลของน้ำจากตัวเก็บรังสี
อาทิตย์แบบแผ่นราบไปยังถังเก็บน้ำ
ด้านบน, kg/s

\dot{m}_{vent} = อัตราการไหลของไอน้ำจากตัวเก็บรังสี
อาทิตย์แบบแผ่นราบไปยังถังเก็บน้ำ
ด้านบน, kg/s

\dot{m}_{win} = อัตราการไหลของน้ำจากถังเก็บน้ำ
ด้านบนเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่น
ราบ, kg/s

N = จำนวนรอบการหมุนเวียนน้ำของระบบใน
1 วัน, รอบ

Q = อัตราการถ่ายโอนความร้อน, W

q = อัตราการถ่ายโอนความร้อน, W

q_c = อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยพาความร้อน
จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ
ไปสู่กระจก, W

q_r = อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยแผ่รังสี
ความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่น
ราบไปสู่กระจก, W

q_s = อัตราการสูญเสียความร้อนด้านข้างและ
ด้านล่างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่น
ราบ, W

$Q_{storage}$ = ปริมาณความร้อนที่สะสมภายในถังกัก
เก็บน้ำร้อน, kJ

Q_{use} = พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์, W

t = เวลา, s

T = อุณหภูมิ, K

T_{am} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °C

W_h = งานที่ใช้ในการส่งน้ำต่อรอบ, kJ

α = ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์

η = ประสิทธิภาพ, %

T = ค่าการส่งผ่านรังสีอาทิตย์

λ_w = ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำ,
kJ/kg

ตัวห้อย

A	= อากาศ
c	= ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ
g	= กระจก
in	= ขาเข้า
p	= แผ่นรับรังสีอาทิตย์
pump	= เครื่องสูบน้ำ
pw	= ความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นรับรังสีอาทิตย์ และน้ำภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่น ราบ
t	= สภาวะรวมของน้ำ, ไอน้ำในอากาศ และ อากาศแห้งภายในตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ
thermal	= สภาวะทางความร้อนของตัวเก็บรังสี อาทิตย์แบบแผ่นราบ
tranw	= น้ำที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ แผ่นราบไปยังถังกักเก็บน้ำร้อน
w	= น้ำ (ของเหลว)
wa	= ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำและอากาศ ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ
ws	= สภาวะของน้ำทั้งหมดภายในถังกักเก็บน้ำ ร้อน, kg
1	= สภาวะที่ 1
2	= สภาวะที่ 2

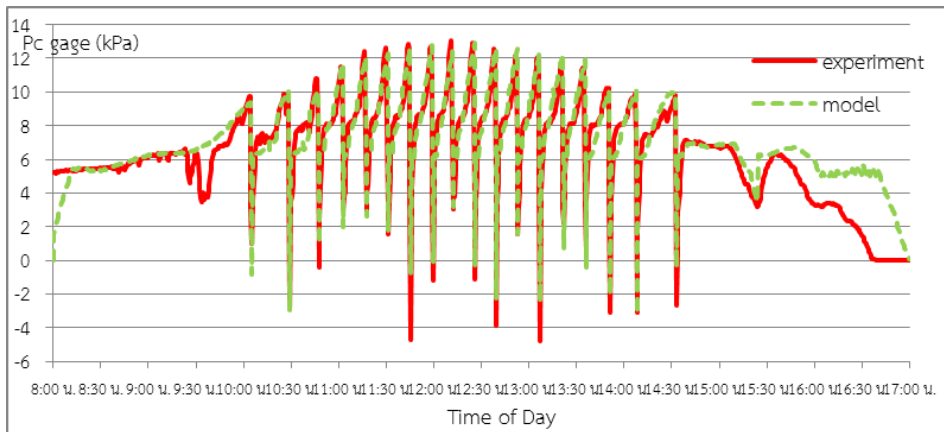
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการจำลองระบบและวิจารณ์ผล

ผลการสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะและขั้นตอนการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ พร้อมทั้งผลการทดสอบความไวของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ มีดังต่อไปนี้

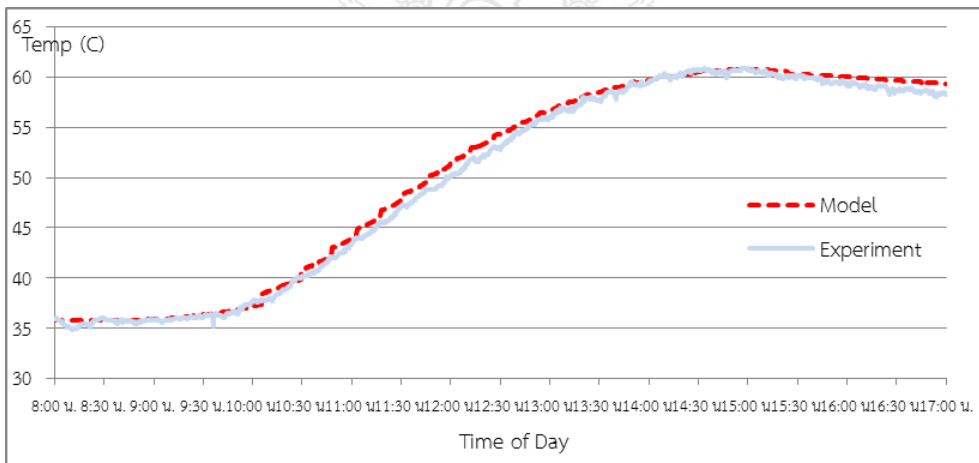
3.3.1 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างและพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างและพัฒนาขึ้นนั้นถูกนำมาทดสอบกับผลการทดลอง โดยใช้ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เดียวกัน ที่ระดับความสูง 1 m ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ ทำงานครบ 1 วัน ที่ระดับความสูง 1 m

จากรูปที่ 4 ทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมการทำงานของระบบมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลอง โดยกราฟมีลักษณะเป็นฟันเลื่อย ซึ่งฟัน 1 ซี่ แทนการทำงานของระบบครบ 1 รอบ ซึ่งสามารถหมุนเวียนน้ำได้ 3.1 ลิตร/รอบ และมีค่า $\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 = 5.876\%$



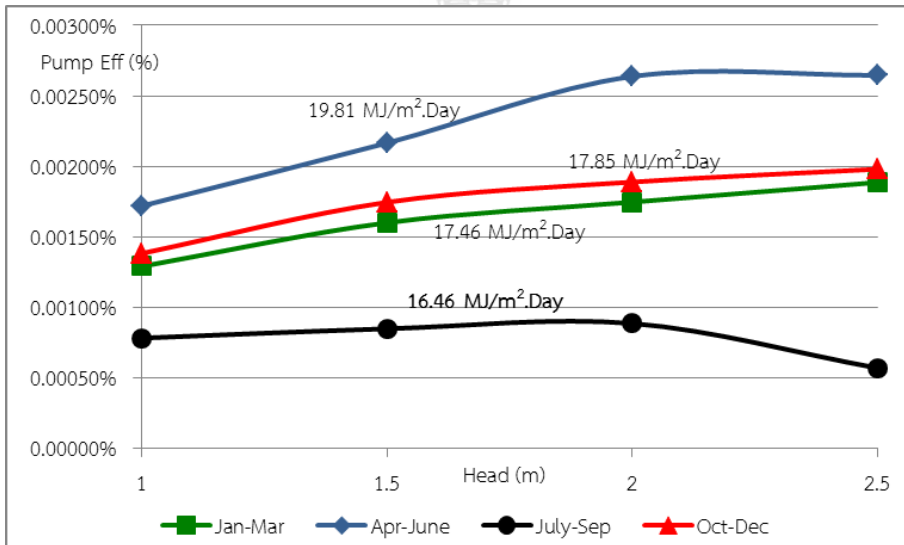
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ ทำงานครบ 1 วัน ที่ระดับความสูง 1 m

จากรูปที่ 5 พบว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่สะสมอยู่ในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อระบบทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง และมีค่า $\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 = 1.361\%$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีพฤติกรรมของการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิแบบเดียวกับผลการทดลองเช่นกัน โดยมีค่า $\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 = 3.583\%$

จากผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นพบว่ามีความผิดพลาดไม่เกิน 10% ซึ่งนำมาทดสอบความไวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ ได้ดังนี้

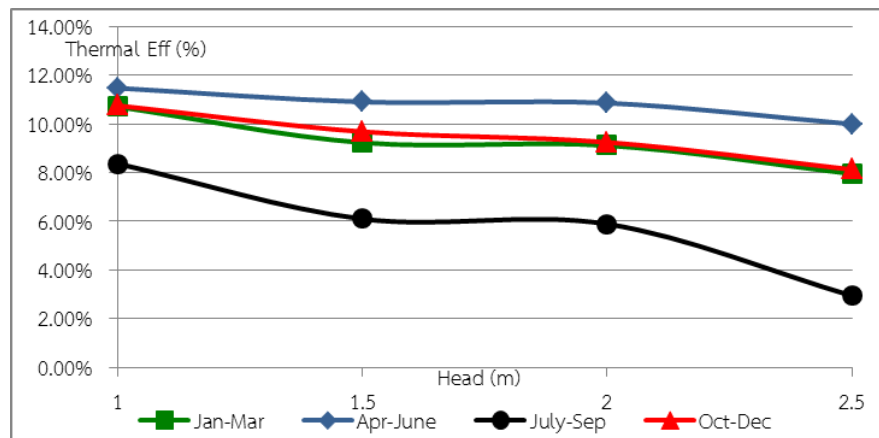
3.3.2 ผลการวิเคราะห์ความไวทางด้านประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ

ปัจจัยที่ทำการศึกษาศมรรถนะของระบบประกอบด้วยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, ระดับความสูงการส่งน้ำ และขนาดพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการสูบน้ำของระบบ เมื่อระบบทำงานครบ 1 วัน ตั้งแต่เวลา 08.00 – 17.00 น. โดยใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบเฉลี่ยต่อวัน ณ ประเทศไทย แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงเดือนมกราคม – เดือนมีนาคม, เดือนเมษายน – เดือนมิถุนายน, เดือนกรกฎาคม – เดือนกันยายน และเดือนตุลาคม – เดือนธันวาคม ซึ่งมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยวันละ 17.46 MJ/m², 19.81 MJ/m², 16.46 MJ/m² และ 17.85 MJ/m² ตามลำดับ ที่ระดับความสูง 1 m, 1.5 m, 2 m, และ 2.5 m เบื้องต้นทดสอบโดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำนวน 4 แผง มีพื้นที่รับแสงรวม 1.58 m² พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการสูบน้ำของระบบที่ระดับความสูงและค่ารังสีอาทิตย์ช่วงต่างๆ เป็นดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการสูบน้ำต่อวันและค่ารังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m จากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 6 พบว่าประสิทธิภาพการสูบน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความสูงการส่งน้ำ เนื่องจากที่ระดับความสูงการส่งน้ำต่ำๆ น้ำในระบบต้องการงานในการยกน้ำต่ำกว่าค่าเฮดสูงๆ ทำให้มีพลังงานส่วนเกินที่ระบบผลิตได้สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม แต่เมื่อเฮดการส่งมีค่าสูงเกินกว่า 2.5 m ประสิทธิภาพการสูบน้ำมีแนวโน้มลดลง เป็นไปตามปริมาณน้ำที่สามารถสูบได้ต่อวัน เพราะเมื่อเพิ่มระดับความสูงการสูบน้ำ ระบบสูบน้ำได้ปริมาณลดลงเนื่องจากต้องการงานในการยกน้ำที่เพิ่มขึ้น และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการสูบน้ำสูงขึ้น เนื่องจากระบบได้รับพลังงานมากขึ้น โดยระบบมีประสิทธิภาพการสูบน้ำสูงสุดในเดือนเมษายน – มิถุนายน ที่ระดับความสูง 2.5 m มีค่าประมาณ 0.00265% ต่ำสุดช่วงเดือนกรกฎาคม – กันยายน ที่ระดับความสูง 2.5 m มีค่าประมาณ 0.000569% เมื่อให้ระบบทำงานตลอดปีพบว่าประสิทธิภาพการสูบน้ำเฉลี่ยต่อวันเป็น 0.00129%, 0.00159%, 0.00179% และ 0.00177% ที่ระดับความสูงการสูบน้ำ 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m ตามลำดับ โดยในแต่ละวันระบบสามารถหมุนเวียนน้ำได้ 6 – 54.8 ลิตร/วัน ขึ้นอยู่กับความสูงการสูบน้ำและค่าความเข้มรังสีอาทิตย์



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยต่อวันและค่ารังสีอาทิตย์ที่ระดับความสูง 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m จากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 7 สรุปได้ว่าเมื่อระดับความสูงการส่งน้ำเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพทางความร้อนจะลดลง สืบเนื่องมาจากมีปริมาณน้ำไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงทำให้น้ำภายในถังกักเก็บน้ำร้อนได้รับพลังงานลดลง โดยเมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพทางความร้อนจะสูงขึ้นตามไปด้วย เพราะระบบได้รับพลังงานป้อนเข้ามากขึ้น ระบบมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดช่วงเดือนเมษายน - มิถุนายน มีค่าประมาณ 11.467% ที่ระดับความสูง 1 m ต่ำสุดช่วงเดือนกรกฎาคม - กันยายน มีค่าประมาณ 2.944% ที่ระดับความสูง 2.5 m และเมื่อให้ระบบทำงานตลอดปีพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยต่อวัน 10.32%, 8.97%, 8.77% และ 7.25% ที่ระดับความสูงการส่งน้ำ 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m ตามลำดับ การทำงานของระบบใน 1 วัน สามารถผลิตน้ำร้อนได้ 30 ลิตร ที่อุณหภูมิ 36 - 58.6 °C ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และระดับความสูงการสูบน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำจะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 584 W/m², 607 W/m², 632 W/m² และ 662 W/m² ที่ระดับความสูงการส่งน้ำ 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m ตามลำดับ

4. สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ทำนายการทำงานและสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำได้ โดยผลการเปรียบเทียบความดันภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิในถังกักเก็บน้ำร้อน และอุณหภูมิภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ระหว่างการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองพบว่ามีค่า $\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 = 5.876\%$, 1.361% และ 3.583% ตามลำดับ

นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทดสอบความไวที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, ระดับความสูงการส่งน้ำ และขนาดพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงเดือนมกราคม - เดือนมีนาคม, เดือนเมษายน - เดือนมิถุนายน, เดือนกรกฎาคม - เดือนกันยายน และเดือนตุลาคม - เดือนธันวาคม ซึ่งมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันเป็น 17.46 MJ/m², 19.81 MJ/m², 16.46 MJ/m² และ 17.85 MJ/m² ตามลำดับ และกำหนดขนาดพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็น 1.185 m², 1.58 m² และ 1.975 m² ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบที่ระดับความสูงการส่งน้ำ 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m พบว่าเมื่อความสูงการส่งน้ำและขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสูบน้ำสูงขึ้นแต่ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีอาทิตย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการสูบน้ำสูงขึ้น โดย

การทำงานตลอดทั้งปีของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ มีศักยภาพสูงสุดในฤดูร้อนระหว่างเดือนเมษายน - เดือนมิถุนายน เนื่องจากมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุด สามารถสูบน้ำได้เฉลี่ย 54.825 ลิตร/วัน มีประสิทธิภาพทางความร้อน 11.467% ที่ระดับความสูง 1 m ประสิทธิภาพการสูบน้ำสูงสุด 0.00264% ที่ระดับความสูง 2.5 m ระบบมีศักยภาพต่ำสุดในฤดูฝนช่วงเดือนกรกฎาคม - เดือนกันยายน ระบบจะสามารถเริ่มทำงานได้เมื่อมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบบมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 584 W/m^2 , 607 W/m^2 , 632 W/m^2 และ 662 W/m^2 ที่ระดับความสูงการส่งน้ำ 1 m, 1.5 m, 2 m และ 2.5 m ตามลำดับ

ผลการจำลองเมื่อให้ระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำทำงานตลอดทั้งปี พบว่าระบบสามารถสูบน้ำได้เฉลี่ย 6 - 54.8 ลิตร/วัน ประสิทธิภาพการสูบน้ำเฉลี่ยต่อวันเป็น 0.00056% - 0.0026% ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้วันละ 30 ลิตร ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 36 - 58.6 °C มีประสิทธิภาพทางความร้อน 2.9% - 11.4% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, เสดการส่งน้ำของระบบ, ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ, อุณหภูมิน้ำในถังเติมน้ำด้านบน, อุณหภูมิแวดล้อม และความเร็วลม ปัจจัยที่มีความไวต่อประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการสูบน้ำของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำมากที่สุดคือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2544. **โครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและสถานีติดตั้งเครื่องมีวัดภาคพื้นดิน.** 4 พฤศจิกายน 2553. from <http://www3.dede.go.th/dede/index.php?id=288>
- จงจิตร หิรัญลาภ. ม.ป.ป. **กระบวนการพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ดวงกมล (2520) จำกัด.
- ณัฐพล รุ่งประแสง. 2551. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทศึกษาศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Al-Haddad, A.A., Enaya, A. and Fahim, M.A. 1996. **Performance of a Thermodynamic Water Pump.** Applied Thermal Engineering. Vol. 16(No. 4): 321-334.
- Cengel, Y.A. 2006. **Heat and Mass Transfer.** 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Picken, D.J., Seare K.D.R. and Goto, F. 1997. **Design and Development of a Water Piston Solar Powered Steam Pump.** Solar Energy. Vol. 61(No.3): 219-224.
- Wakao, N., Tanisho S. and Liu, H.Z. 1984. **Liquid Pumps Driven by Temperature Difference Between Two Water or Temperature Variations in the Environment.** Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 17(No.5): 538-541.
- Wong, Y.W. and Sumathy, N. 2000. **Performance of a Solar Water Pump with n-Pentane and Ethyl Ether as Working Fluids.** Energy Conversion and Management. Vol. 41(No. 9): 915-927.
- Wong, Y.W. and Sumathy, N. 2001. **Thermodynamics Analysis and Optimization of a Solar Thermal Water Pump.** Applied Thermal Engineering. Vol. 21(No. 5): 613-627.