

การศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

A Study of Discharge Heads Affecting the Temperature and Amount of Hot Water Using Mathematical Modeling of a Solar Water Heating System

จิรวัดน์ สิตรานนท์^{1*} กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์² ณัฐพล รุ่งประแสง³

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี, 21110

²ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ, 10800

³กองกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

17 ถนนพระราม 1 แขวงรอบเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ, 10300

Jirawat Sitranon^{1*} Kittiwoot Sutthivirode²

¹School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bang Phra Sub-district, Siracha District, Chonburi 21110

²Department of Mechanical Education, Faculty of Industrial Education, King Mongkut's University
of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

³Bureau of Energy Regulation and Conservation, Department of Alternative Energy Development
and Efficiency, Ministry of Energy

17 Rama 1 Road, Rong Muang, Pathum Wan, Bangkok 10330

*Corresponding author Email: Jirawat_solar@hotmail.com

(Received: February 3, 2020; Accepted: April 7, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ และปริมาณน้ำร้อน ในถังเก็บน้ำร้อนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบที่ถูกรออกแบบประกอบไปด้วยแผงรับรังสีอาทิตย์ขนาด 1.58 m² ถึงเก็บน้ำด้านบน ท่อสามทาง และถังเก็บน้ำร้อน การจำลองระบบถูกดำเนินการในช่วงเวลา 8:00–17:00น. เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5, 1, 2 และ 3 m เมื่อมีค่ารังสีอาทิตย์ 20 MJ/m² d ระบบนี้ สามารถทำงานได้เมื่อความดัน (หน่วยความสูงของน้ำ) ภายในแผงมากกว่าระดับความสูงในการส่งน้ำของระบบ ถ้าเราเพิ่มระดับความสูงในการส่งน้ำ ผลที่ได้ อุณหภูมิของน้ำร้อนและความดันไอเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำร้อนที่ได้จะลดลงตามไปด้วย เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงในการส่งน้ำ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุดคือ 89.39 L/d และประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดคือ 40.71% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ต่ำสุดคือ 37.2 L/d และประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำสุดคือ 19.93% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m นอกจากนี้อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนสูงสุด 70.46°C ระดับความสูงในการ

ส่งน้ำ 3 m และต่ำสุดที่ 64.2 °C ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m จากงานวิจัยนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยอมรับได้กับผลการทดลองที่มีความแตกต่างระหว่างค่าการคำนวณและการวัดมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า $\pm 10\%$

คำสำคัญ: น้ำร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ABSTRACT

The aim of this research was to study the discharge heads affecting the temperature and hot water amount in the storage tank of a solar water heating system (SWHS). The designed system consisted of 1.58-m² flat plate solar collectors, an overhead tank, the T-vent tube and the hot water storage tank. The system simulation was done during 8:00 am–5:00 for 9 h for discharge head of 0.5, 1, 2 and 3 m when solar irradiation was 20 MJ/m² d. The system could work when the pressure head was slightly more than the discharge head of the system. If the discharge head was increased, the hot water temperature and vapor pressure increased. However, hot water production reduced accordingly. By varying the discharge head, the maximum produced hot water was 89.39 L/d and the maximum thermal efficiency was 40.71% at discharge head 0.5 m, the minimum produced hot water was 37.2 L/d and the minimum thermal efficiency was 19.93% at discharge head 3 m. Furthermore, the maximum water temperature in the storage tank was roughly 70.46°C at discharge head 3 m and the minimum was roughly 64.2°C at discharge head 0.5 m. From this research of the mathematical model gave a reasonable agreement with the experimental results when the difference between the calculated and measured values was less than $\pm 10\%$.

Keyword: Hot water, Mathematical model, Solar water heating system.

1. บทนำ

การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่นำไปสู่การปล่อยก๊าซขนาดใหญ่และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการผลิตพลังงานและเป็นความท้าทายในการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดและมีกระจายอยู่เกือบทุกที่ ปริมาณรังสีอาทิตย์ถูกกักเก็บโดยตัวดูดซับรังสีอาทิตย์ที่ขึ้นอยู่กับทิศทางและพื้นที่ตัวดูดซับ การพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีข้อจำกัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากต้นทุนทางความร้อนจากรังสีอาทิตย์ต่ำ การพัฒนาระบบความร้อนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพทางความร้อนขึ้นอยู่กับ

พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การออกแบบตัวดูดซับ วัสดุที่ใช้ทำฉนวน และตัวดูดซับ สารทำงานภายในระบบ หลักการหมุนเวียนของสารทำงานในระบบ การไม่ใช้แหล่งพลังงานจากภายนอกในการทำงานของระบบโดยอาศัย ความดันและการถ่ายเทความร้อน อัตราการไหลของสารทำงาน

ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (solar water heating system) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน ขึ้นอยู่กับวิธีการหมุนเวียนน้ำภายในระบบว่าเป็นแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Thermosyphon) หรือแบบไหลเวียนตามแรงดัน (Force-circulation) ซึ่งแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ ถึงเก็บเก็บน้ำร้อนจะหนักและมีแรงดันสูง ส่วนแบบไหลเวียนตามแรงดัน (Force-circulation) จะลดน้ำหนักของระบบ

ที่กระทำกับหลังคาของที่อยู่อาศัย แม้ว่าแบบไหลเวียนตามแรงดันจะไม่ประหยัดพลังงานไฟฟ้า [1-2] ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามแรงดันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [3] ประสิทธิภาพของแบบไหลเวียนตามแรงดันมีค่าประมาณ 50-60% ส่วนแบบไหลเวียนตามธรรมชาติมีค่าประมาณ 34-38% [4]

การปั้มน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ขนาดพื้นที่รับแสง 1 m² ประสิทธิภาพของระบบปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0.12 - 0.14% สำหรับความสูงในการจ่ายน้ำ 6 - 10 เมตร และระบบนี้สามารถปั้มน้ำได้ 12 - 23 รอบต่อวัน มวลน้ำที่สามารถขับเคลื่อนได้ในแต่ละรอบการทำงาน 15 กิโลกรัม [5] การศึกษาพัฒนาของระบบสูบน้ำชนิดลูกสูบโดยอาศัยพลังงานไอน้ำใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศร่วมกับ heat pipe ขนาดพื้นที่รับแสง 2 m² สามารถสามารถผลิตไอน้ำร้อนได้ 110 °C ประสิทธิภาพปั้มน้ำมีค่าต่ำมากประมาณ 0.05% ปริมาณน้ำที่ได้จากการขับเคลื่อน 10-20 L/h ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำระหว่าง 2 ถึง 8 m [6] การทดลองและทฤษฎีของการศึกษาการขับเคลื่อนน้ำโดยใช้พลังงานความร้อน (การปั้มน้ำแบบขยายตัวของกำลังไอน้ำ) ระบบปั้มน้ำใช้ไฟฟ้าแหล่งให้พลังงานความร้อน เพื่อผลิตไอน้ำเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิต่ำ (90-120 °C) จากการทดลองประสิทธิภาพปั้มน้ำมีค่าเท่ากับ 0.005-0.03% ปริมาณน้ำที่ได้จากการขับเคลื่อน 1-8 L/cycle และความสูงของด้านสูบน้ำ 1-2.5 m อย่างไรก็ตามระบบยังต้องใช้เวลาควบคุมการทำงานของระบบด้วยมือ [7]

การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS) ร่วมด้วยปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบใหม่โดยระบบประกอบด้วยตัวรับรังสีแบบแผ่นราบขนาดพื้นที่ 1.58 m² ถึงเก็บน้ำด้านบนถูกติดตั้งอยู่ด้านบน ถึงเก็บน้ำขนาดใหญ่โดยมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ภายในติดตั้งอยู่ด้านล่าง ระบบจะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใส่ให้ระบบต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 580, 600 และ 630 W/m² ที่ระดับความสูงในการจ่ายน้ำ

1, 1.5 และ 2 m อุณหภูมิในน้ำในตัวรับรังสีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 75-78 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน มีค่าประมาณ 46-61 °C การถ่ายโอนความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนโดยมีแลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งอยู่ภายใน ประสิทธิภาพปั้มน้ำเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.0014-0.0019% การหมุนเวียนน้ำภายในระบบ SWHS มีค่าระหว่าง 12 และ 59 L/d อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพทางความร้อนรายวันมีค่าประมาณ 7-13% สรุปได้ว่าการสูญเสียพลังงานความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน ระบบอาจจะทำงานสำหรับที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 1-3 m เท่านั้นขึ้นอยู่กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ป้อนให้กับระบบ อย่างไรก็ตามระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการหมุนเวียนน้ำและลดน้ำหนักของระบบทำน้ำร้อนที่กระทำกับหลังคาของที่อยู่อาศัย [8] การเก็บน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนโดยตรง ไม่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่า 17.4% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบเดิม แต่ยังพบการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการระบายไอน้ำ ในช่วงที่น้ำภายในแผงรับรังสีให้ไหลออกไปเก็บในถังเก็บน้ำร้อน [9] ต่อมาได้ปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยกำลังไอน้ำ โดยการต่อท่อสามทางเพื่อนำไอน้ำมาระบายในถังเก็บน้ำร้อนและเปิดสู่บรรยากาศภายในถังเก็บน้ำร้อน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนของไอน้ำที่ระบายสู่บรรยากาศ ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงถึง 41.2% [10]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS) เพื่อหาความเหมาะสมของระดับความสูงในการส่งน้ำ ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำร้อน และอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน โดยเทียบผลการทดลองที่ระดับความสูง 1 m และการออกแบบความสูงในการส่งน้ำ 0.5 ถึง 3 m สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พลังงานสะสมที่กักเก็บในถังเก็บน้ำร้อน

$$Q_s = m_w C_{pw} (T_{end} - T_{initia}) \quad (1)$$

เมื่อ Q_s คือพลังงานที่กักเก็บ (kJ) m_w คือมวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (kg) C_{pw} ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C) และ $(T_{end} - T_{initia})$ อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นภายในถังเก็บน้ำร้อน (°C) ประสิทธิภาพทางความร้อนรายวันของระบบในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ η_t คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ถูกกักเก็บภายในถังเก็บน้ำร้อนรายวันต่อผลรวมค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนตัวรับรังสี

$$\eta_t(\%) = \frac{\int \dot{Q}_s dt}{A_c \int I_T dt} \times 100 \quad (2)$$

หรือ
$$\eta_t(\%) = \frac{Q_s}{H_{tot}} \times 100 \quad (3)$$

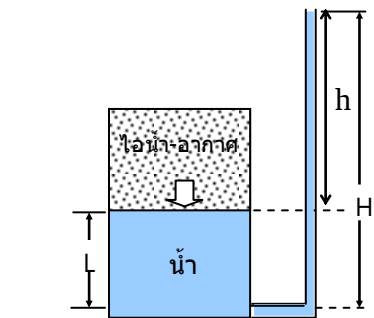
เมื่อ A_c คือพื้นที่ตัวรับรังสี (m^2) I_T ความเข้มค่ารังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2) และ H_{tot} ผลรวมค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนตัวรับรังสี (kJ)

นอกจากนั้นค่ารังสีดวงอาทิตย์วิกฤต (Critical Solar irradiance) ได้ถูกเพิ่มเข้ามา โดยที่ค่ารังสีดวงอาทิตย์วิกฤตเป็นค่าเริ่มต้นที่ใส่ให้แก่ปั๊มเพื่อที่จะให้ปั๊มสามารถเริ่มทำงานได้ การคำนวณความดันภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ความดันของไอน้ำ-อากาศภายในแผงรับรังสีอาทิตย์เกิดจากความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จาก Bernoulli equation และแปรตามระดับน้ำ h ดังรูปที่ 1

$$\frac{P_c}{\gamma} = h + (1 + k_d) \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

P_c คือความดันรวมในแผง (Pa) γ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m^2) h ระดับความสูงในการส่งน้ำที่เปลี่ยนแปลง (m) k_d สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน V ความเร็วของการไหล (m/s) g ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)



รูปที่ 1 ตัวรับรังสีอาทิตย์ขณะขับเคลื่อนน้ำด้วยความดันไอน้ำ-อากาศ

เมื่อ $L = \frac{(1-h)}{\sin 14^\circ}$ เมื่อ $H=1$ m (5)

เมื่อแผงรับรังสีอาทิตย์เอียง 14° กับแนวราบ หันไปทางทิศใต้ และ H คือระดับความสูงในการส่งน้ำ (m) จากสมมูลมวล ปริมาตรของน้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ลดลง = ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางท่อส่งน้ำ

เมื่อ $H=h$ ทำให้ $L=0$ ระดับความสูงของน้ำภายในแผงจึงเป็น 0 m แสดงว่าน้ำภายในแผงไหลออกจนหมด

$$A_o dL = A_T v dt \quad (6)$$

เมื่อ A_o คือพื้นที่หน้าตัดของท่อในแผงรับรังสีอาทิตย์ (m^2) A_T พื้นที่หน้าตัดของท่อส่งน้ำ (m^2) t เวลา (s) ดังนั้นจะสามารถประเมินปริมาตรไอน้ำ-อากาศที่เปลี่ยนแปลงในทอมของ h ได้ดังนี้

$$dV = A_o dh / \sin 14^\circ = A_T v dt \quad (7)$$

ค่า dV สามารถนำไปคำนวณความดันรวมของไอน้ำ-อากาศ ในแผงรับรังสีอาทิตย์ของสมการ 4

$$W = V_c \times \rho_w \times g \times h \quad (8)$$

เมื่อ W คือ พลังงานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำต่อรอบ
(J) V_c คือปริมาตรของน้ำที่สามารถส่งได้ต่อรอบ (m^3)
 ρ_w ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) g ความเร่งเนื่องจาก
แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) h ระดับความสูงในการส่งน้ำ
(m)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์
(ปั๊มพลังงานความร้อน) สมมติฐานในระบบประกอบด้วย

1. อุณหภูมิของของไหลทุกตัวในแผงเท่ากัน
2. มวลของอากาศในแผงของแต่ละวัฏจักรเปลี่ยนตามเวลา และมีค่าน้อยลง ถ้าอุณหภูมิในน้ำร้อนในแผงสูงขึ้น และมีค่ามากพอที่จะทำให้ความดันรวมมากกว่า 1 บรรยากาศ
3. สำหรับกระบวนการบีบอัดจากผลของความดันบรรยากาศและคอลัมน์น้ำในท่อส่ง ทำให้ความดันไอน้ำในแผงถึงจุดอิ่มตัวเสมอ
4. ปริมาตรอากาศเริ่มต้น 1.3 ลิตร ปริมาตรน้ำ 4.1 ลิตร และมีการปั๊มน้ำ 3.1 L/ cycle
5. ที่ heating stage ความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ เนื่องจากมีอากาศไหลเข้ามาในระบบ
6. ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ น้ำ และอากาศใช้ค่าเฉลี่ย
7. ความเร็วของการไหลน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่น ๆ

โดยใช้ Lumped model อุณหภูมิในน้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์ประเมินได้จากสมดุลพลังงาน

$$\frac{d(m_a C_{Pa} T)}{dt} + \frac{d(m C_p T)}{dt} + \frac{d(m_L C_{PL} T)}{dt} = \alpha \tau A_c I - \lambda \frac{dm}{dt} - \frac{dW}{dt} - U A_c (T - T_a) \quad (9)$$

พลังงานที่ อากาศ ไอน้ำ และ น้ำในแผงได้รับ = พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง - พลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำ - งานที่ใช้ในการปั๊มน้ำ - ความสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม

เมื่อ I พลังงานจากแสงอาทิตย์ (W/m^2) m_a มวลของอากาศในแผง (kg) m มวลของไอน้ำในแผง (kg) m_L มวลของน้ำในแผง (kg) C_p ความร้อนจำเพาะ ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$) T อุณหภูมิของของไหลในแผง ($^\circ C$) $\alpha \tau$ คือ สมบัติของแผง A_c พื้นที่รับแสงของท่อในแผง λ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (kJ/kg) $W = P_c V_c$ งานของการปั๊มน้ำ (kJ) U คือ top loss coefficient ($W/m^2 K$) T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ C$) a แทน อากาศ L แทน น้ำ

$$P = 133.32 \times 10^{\left(8.07131 - \frac{1730.63}{T+233.426}\right)} \quad (10)$$

$$P_a = \frac{m_a R_a T}{V}; \quad 8 \text{ kg} \quad (11)$$

$$V = V_o + \frac{A_o}{\sin 14} \Delta h \quad (12)$$

$$v = \frac{\Delta V}{A_T \Delta t} \quad (13)$$

$$A_T = \pi \left(\frac{0.006}{2}\right)^2; A_o = 64\pi \left(\frac{0.013}{2}\right)^2 \quad (14)$$

โดยความดันรวมของไอน้ำในแผง (P_c) จะต้องเป็นไปตามสมการ 4, 7, 9-12

$$h = h_o + \Delta h = \frac{P_c}{\gamma} - (1 + k_d) \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

เมื่อ P คือความดันไอน้ำ (kPa) V ปริมาตรใหม่ของไอน้ำในแผง (m^3) V_o ปริมาตรเดิมของไอน้ำในแผง (m^3) R_a gas constant ของอากาศ ($kJ/kg K$) P_a ความดันอากาศภายในแผง (kPa)

สมดุลพลังงานขณะเกิดสูญญากาศในแผงรับรังสีความร้อน พลังงานความร้อนไอน้ำ (T_c) ภายในแผงจะมีการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำเย็น ($30^\circ C$) ที่ไหลมาจากถังเติมน้ำด้านบน ทำให้ไอน้ำทั้งหมดกลั่นตัว อากาศและน้ำร้อนที่เหลือในแผงจากขั้นตอนก่อนจะลดอุณหภูมิลง ส่วนน้ำเย็นบางส่วนจะกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิผสม ดังนั้นสมดุลของพลังงานจะเกิดขึ้นดังนี้

พลังงานสูญเสียของไอน้ำร้อนที่กลั่นตัว + พลังงานของน้ำร้อนที่ลดลง + พลังงานของอากาศที่ลดลง = พลังงานของน้ำที่เย็น (30°C) ที่เพิ่มขึ้น + พลังงานที่ใช้ในการระเหยเป็นไอน้ำ ณ อุณหภูมิผสม (T_x)

$$m_v(hg_{T_c} - hf_{T_x}) + (m_w C_{pw} + m_a C_{pa})(T_c - T_x) = m_f(hf_{T_x} - hf_{30}) + m_e hf_{g_{T_x}} \quad (16)$$

เมื่อ m_v คือ มวลของไอน้ำ (kg) m_w มวลของน้ำ (kg) m_a มวลของอากาศ (kg) ที่ T_c m_f มวลของน้ำ (kg) ที่ 30°C h_g คือ enthalpy ของไอน้ำ (kJ/kg) h_f คือ enthalpy ของน้ำ (kJ/kg) h_{fg} ความร้อนแฝงของการเป็นไอของน้ำ (kJ/kg) C_{pa} ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$) m_e มวลของน้ำที่ระเหยเป็นไอ (kg) T_x อุณหภูมิผสม ($^{\circ}\text{C}$)

การวัดความแตกต่างจากผลการทดลอง และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการประเมินผลด้วย RMSE (Root Mean Squared Error) แสดงผลของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำนวณได้ดังสมการที่ 17

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_E - X_S)^2}{N}} \quad (17)$$

เมื่อ X_E คือ ค่าของผลการทดลอง X_S คือ ค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ N คือ จำนวนข้อมูล

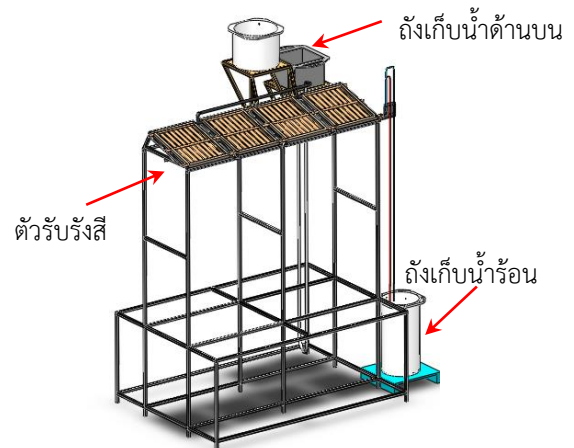
3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์

ตัวรับรังสี มีพื้นที่รับแสง 1.58 ตารางเมตร (จำนวน 4 แผง ขนาดแต่ละแผง 0.638 X 0.619 m) และติดตั้งท่ามกลาง 14 องศา กับพื้นราบ ภายในบรรจุน้ำจำนวน 4.1 L และอากาศจำนวน 1.3 L

ถังเก็บน้ำด้านบน เป็นตัวระบายความร้อนทำจากสแตนเลส ขนาด 40 x 40 cm สูง 30 cm มีรูระบาย (Air vent) ที่ด้านบนของถัง ถังนี้ติดตั้งอยู่ด้านบนและต่อเชื่อม

กับตัวรับรังสี โดยท่อ ระดับของ ถังเก็บน้ำด้านบนควรจะ มีระดับสูงเพียงพอเพื่อให้แน่ใจได้ว่าเฮดความสูงมีค่ามากกว่าการสูญเสียที่วาล์วควบคุมในระหว่างจังหวะการดูดน้ำ สำหรับในแต่ละรอบการทำงานวาล์วกลอย ขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในถังเก็บน้ำด้านบนกำหนดน้ำ 3.1 L ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS)

ถังเก็บน้ำร้อน รูปทรงกระบอก ความสูงของถัง 42 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน

วาล์วควบคุม เป็นวาล์วทางเดียว ทำจากสแตนเลส ขนาด 1/2" ยาวตามความสูงของแผงเป็นรูปตัวยู (ปลายตัวยูสัมผัสพื้น) ถูกติดตั้งระหว่างตัวรับรังสี และถังเก็บน้ำด้านบน น้ำสามารถไหลจากถังเก็บน้ำด้านบนสู่ตัวรับรังสี เนื่องจากว่าเฮดความสูงเพียงพอเมื่อแรงดันภายในตัวรับรังสีมีค่าเท่ากับ 1 ความดันบรรยากาศ ในทางกลับกันน้ำไม่สามารถไหลจากตัวรับรังสีสู่ถังเก็บน้ำด้านบนได้เพราะว่าแรงดันภายในตัวรับรังสีน้อยกว่าแรงดันตกคร่อมที่วาล์วและน้ำสามารถไหลจากตัวรับรังสีสู่ถังเก็บน้ำร้อนได้ง่ายกว่าไหลผ่านวาล์ว

3.2 การทดลอง

หลักการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS) ประกอบด้วย การให้ความร้อน (heating) การขับเคลื่อนน้ำ (pumping) การระบายไอ (vapor expansion) การเติมน้ำ (suction)

ช่วงการให้ความร้อน (Heating Stage) วาล์วควบคุม (CV) ปิดโดยอัตโนมัติในช่วงแรงดันตกคร่อมที่วาล์วสูงมาก จะปิดกันไม่ให้ให้น้ำภายในตัวรับรังสีออกสู่ถังเติมน้ำ ด้านบนได้เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันตกคร่อมต่ำในทางออกที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ

ช่วงการขับดันน้ำ (Pumping Stage) เมื่อแรงดันไอน้ำภายในตัวรับรังสีมีค่าสูงกว่าความสูงในการจ่ายน้ำของระบบเพียงเล็กน้อย น้ำร้อนภายในตัวรับรังสีจะถูกขับดันผ่านทางท่อต่อสามทางโดยแรงดันและไหลสู่ถังเก็บน้ำร้อนด้วยค่าแรงโน้มถ่วง

ช่วงการระบายไอ (Vapor Expansion Stage) เมื่อระดับน้ำภายในตัวรับรังสีไหลออกจนต่ำกว่าท่อทางออกไอน้ำภายในตัวรับรังสีสามารถไหลออกผ่านท่อสามทางและเปิดสู่บรรยากาศ สู่เพื่อเป็นการระบายไอน้ำให้แรงดันภายในตัวเก็บรังสี มีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ โดยไอน้ำที่ระบายจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อน

ช่วงการเติมน้ำ (Suction Stage) เมื่อแรงดันไอน้ำภายในตัวรับรังสีถูกระบายสู่ถังเก็บน้ำร้อนออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันภายในตัวรับรังสีเท่าใกล้เคียงกับความดันอากาศแวดล้อม (Surrounding air pressure) ดังนั้นเฮดความสูงของน้ำ (water head) ที่ถังเก็บน้ำด้านบนมีค่ามากกว่าเฮดการสูญเสีย (head loss) ที่วาล์วควบคุม ดังนั้นวาล์วควบคุมจะเปิดโดยอัตโนมัติ น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำจากถังเก็บน้ำด้านบนไหลลงสู่ตัวรับรังสีด้วยค่าแรงโน้มถ่วงและจะเกิดการดูดน้ำจากถังเก็บน้ำด้านบน น้ำจะหยุดไหลก็ต่อเมื่อแรงดันภายในตัวรับรังสีเพิ่มสูงพออีกครั้งเป็นการดำเนินการไหล จะครบ 1 รอบการทำงาน ระบบพร้อมที่จะทำงานในรอบต่อไปได้

วิธีการทดลอง ควบคุมการจ่ายน้ำเข้าแผงรับรังสี 3.1 L ตั้งค่าระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m เริ่มทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 8:00–17:00น. โดยบันทึกอุณหภูมิ ความดัน และค่ารังสีดวงอาทิตย์ วัดปริมาณน้ำสุดท้ายที่ผลิตได้ต่อวัน

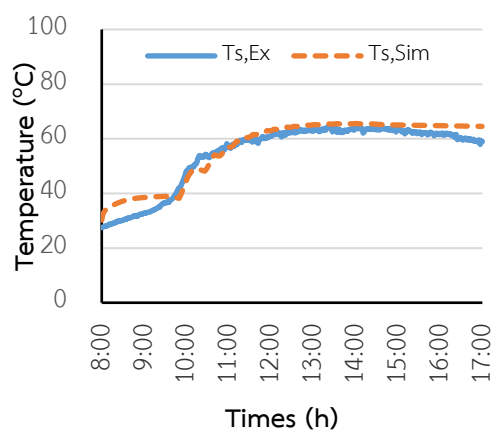
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C กำหนดค่ารังสีอาทิตย์ 20 MJ/m² d และกำหนด

ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5, 1, 2 และ 3 m ระยะเวลาในการทำงานของระบบตั้งแต่วันที่ 8:00–17:00น.

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

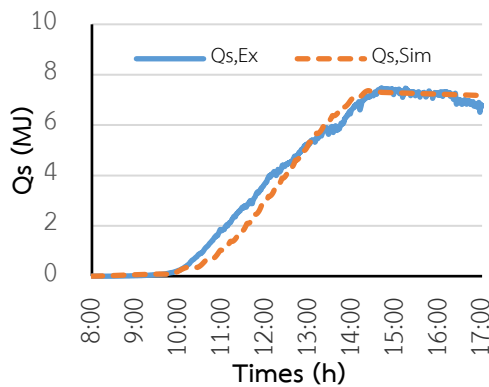
4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนและความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างการทดลองที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวัน 17.22 MJ/m² d (จากเครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์) ระดับความสูงในการส่งน้ำ 1 m เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อน จากรูปที่ 3 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีค่า *RMSE* เท่ากับ 2.6222 $\left(\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100\right)$ มีความคลาดเคลื่อน 4.7937% ลักษณะอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30°C เมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงจนระบบไม่สามารถขับดันน้ำไปเก็บที่ถังเก็บน้ำร้อนได้ อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนก็จะคงที่ และหลังจากนั้นจะลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำร้อน

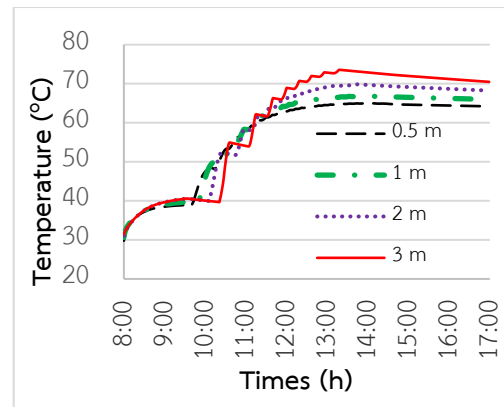


รูปที่ 4 ผลของความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4 ความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน เริ่มต้นที่ 0 MJ เนื่องจาก ความร้อนสะสมคำนวณได้จาก สมการที่ 1 ดังนั้นเมื่อระบบเริ่มทำงานปริมาตรน้ำในถัง เก็บน้ำร้อนจึงยังไม่มี ปริมาณความร้อนสะสมจะเริ่มขึ้นก็ ต่อเมื่อมีการขับดันน้ำจากแผงรับรังสี และสามารถ เอาชนะความสูงในการส่งน้ำได้ ดังสมการที่ 15 เมื่อระบบ หยุดทำงานปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำร้อนก็จะคงที่ ส่งผลให้ ปริมาณความร้อนสะสมมีแนวโน้มคงที่ตามไปด้วย และ เนื่องจากอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนสูงกว่า อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ปริมาณ ความร้อนสะสมลดลงไม่มาก เนื่องจากถังเก็บน้ำร้อนได้ถูก หุ้มฉนวนกันความร้อนโดยรอบ มีค่า $RMSE$ เท่ากับ 0.3082 มีความคลาดเคลื่อน $\left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100\right)$ 7.8070%

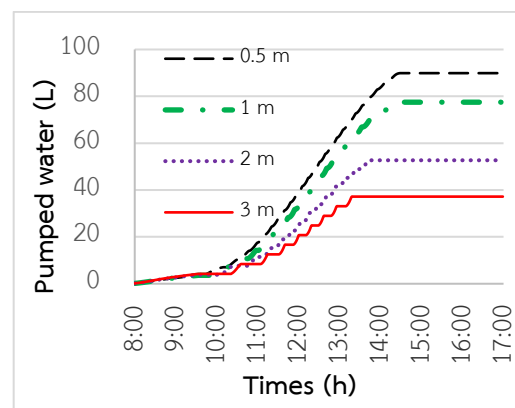
4.2 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระดับ ความสูง 0.5, 1, 2 และ 3 m

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เปรียบเทียบระดับ ความสูงในการส่งน้ำ 0.5, 1, 2 และ 3 m โดยใช้ค่ารังสี อาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีสูงสุด $20 \text{ MJ/m}^2 \text{ d}$ ประกอบการ คำนวณ (แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ฉบับใหม่ สำหรับประเทศไทย ปี 2560 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน)



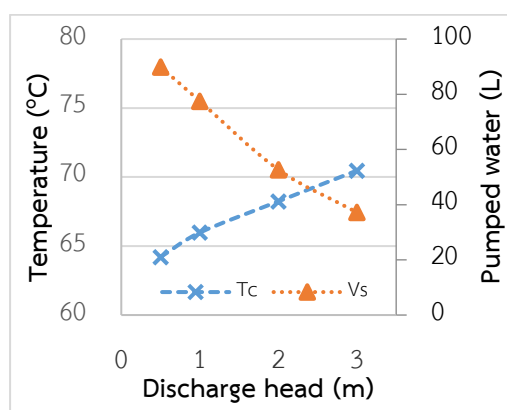
รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนที่ระดับความ สูงในการส่งน้ำต่างๆ

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละ ระดับความสูง จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระดับ ความสูงในการส่งน้ำ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำ ร้อนเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ น้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์ไหลออกได้ยากขึ้น ดังสมการที่ 4 เป็นการสูญเสียความดันจากความสูง ดังนั้นความดัน ภายในแผงจึงต้องมีค่ามากขึ้นตาม เพื่อที่จะสามารถขับดัน น้ำภายในแผงให้พ้นระดับความสูงที่ตั้งไว้ เมื่อน้ำอยู่ในแผง รับรังสีอาทิตย์เป็นเวลานาน จึงได้รับพลังงานจาก แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น น้ำจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับดัง สมการที่ 9



รูปที่ 6 ผลของปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนที่ ระดับความสูงในการส่งน้ำต่างๆ

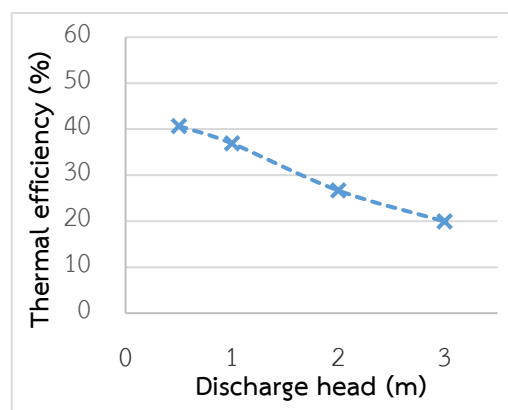
ระดับความสูงในการส่งน้ำต่ำจะทำให้น้ำในแผงรับรังสีสามารถไหลออกจากแผงได้ง่าย จึงทำให้ระบบสามารถขับเคลื่อนน้ำร้อนได้เร็วขึ้น และได้ปริมาณน้ำร้อนมากขึ้น ดังรูปที่ 6 กล่าวคือระดับความสูงยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ก็จะลดลง เป็นตัวแปรที่ส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามกัน เมื่อระดับค่ารังสีอาทิตย์ลดลงในช่วงบ่าย จนระบบไม่สามารถสร้างแรงดันภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ ให้เอาชนะระดับความสูงในการส่งน้ำได้ น้ำในแผงจึงไม่สามารถไหลออกไปเก็บที่ถังเก็บน้ำร้อนได้ ปริมาตรของน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนจึงคงที่ โดยแต่ละระดับความสูงในการส่งน้ำ ปริมาตรของน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนจะคงที่ในเวลาที่ไม่เท่ากันดังสมการที่ 15 โดยที่ระดับความสูงในการส่งน้ำมาก ระบบจะหยุดขับเคลื่อนน้ำก่อน ที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์เดียวกัน



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำต่างๆ

ระดับความสูงในการส่งน้ำส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน ดังรูปที่ 7 เมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิสูงขึ้นตาม แต่ปริมาณน้ำร้อนลดลง ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถที่จะเลือกผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m ได้ตามความต้องการในการใช้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูง หรือความต้องการน้ำร้อนในปริมาณที่มากกว่าที่อุณหภูมิสูงไม่มากตั้งแต่ 60-65 °C จะได้ปริมาณน้ำร้อน 75-90 L/day

จากแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนอยู่ในช่วง 60-70 °C และปริมาณน้ำร้อนอยู่ในช่วง 35-90 L/d ที่ระดับความสูง 0.5, 1, 2 และ 3 m อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10 °C แต่ปริมาณน้ำร้อนมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 55 L/d แสดงให้เห็นว่าระดับความสูงส่งผลกับปริมาณน้ำร้อน เป็นปัจจัยหลักเมื่อความสูงลดลงปริมาณน้ำร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระดับความสูงต่ำ ความดันภายในระบบที่ต่ำสามารถชนะระดับความสูงในการส่งน้ำ และขับเคลื่อนน้ำออกจากแผงได้ ดังสมการที่ 4 เมื่อระดับความสูงลดลง ความดันที่ใช้ขับเคลื่อนน้ำก็ลดลงตามความสูง



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพทางความร้อน ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำต่างๆ

เมื่อระดับความสูงในการส่งน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนลดลงตามปริมาณน้ำร้อน ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนจึงลดลง ดังสมการที่ 1 และ 3 เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 8 โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน คือปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ และอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อน ค่ารังสีสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายน จะทำให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นตาม

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความคลาดเคลื่อน $\left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100\right)$ ไม่เกิน 10% ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง ผลการศึกษาจากระดับความสูงในการส่งน้ำ ระบบผลิตน้ำร้อนได้สูงสุด 89.9 L/d ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 40.71% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m และผลิตน้ำร้อนได้ต่ำสุด 37.2 L/d ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุด 19.93% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่นำไปใช้งาน 70.46 °C ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m และต่ำสุดที่ 64.2 °C ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m

ผลจากระดับความสูงส่งผลต่อความดันที่ใช้การขับเคลื่อนน้ำร้อนออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ ที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ระบบต้องสร้างความดันเพิ่มขึ้นเพื่อเอาชนะระดับความสูงในการส่งน้ำ และเมื่อความดันภายในแผงรับรังสีอาทิตย์สูงขึ้น อุณหภูมิภายในแผงก็สูงขึ้นตาม ส่งผลให้ใช้เวลาขับเคลื่อนน้ำร้อนภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ ไปกักเก็บที่ถังเก็บน้ำร้อนนานขึ้น และน้ำร้อนที่ได้ก็มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามอุณหภูมิภายในแผง

เมื่อระดับสูงในการส่งน้ำเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของน้ำร้อนก็เพิ่มขึ้นตาม และเมื่อระดับสูงในการส่งน้ำลดลง ปริมาณน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิและปริมาณของน้ำร้อนจะแปรผกผันกัน โดยมีระดับความสูงในการส่งน้ำเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณของน้ำร้อน ดังนั้นการเลือกระดับความสูงในการส่งน้ำที่เหมาะสม จึงต้องพิจารณาอุณหภูมิและปริมาณของน้ำร้อนที่ต้องการ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] DW. Lee, A. Sharma, "Thermal performances of the active and passive water heating systems based on annual operation," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 207-215, Feb. 2007.
- [2] SV. Joshi, RS. Bokil, JK. Nayak, "Test standards for thermosyphon-type solar domestic hot water system: review and experimental evaluation", *Sol. Energy*, vol. 78, no. 6, pp. 781-798, Jun. 2005.
- [3] JA. Duffie, and WA. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4th ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2013.
- [4] AN. Khalifa, "Forced versus natural circulation solar water heaters: A comparative performance study," *Renewable Energy*, vol. 14, no. 1-4, pp. 77-82, May-Aug. 1998.
- [5] K. Sumathy, "Experimental studies on a solar thermal water pump," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 19, no. 5, pp. 449-459, May 1999.
- [6] DJ. Picken, KDR. Seare, F. Goto, "Design and development of a water piston solar powered steam pump," *Sol. Energy*, vol. 61, no. 3, pp. 219-227, Sep. 1997.
- [7] S. Liengjindathaworn, K. Kirtikara, P. Namprakai, T. Kiatsiriroat, "Parametric studies of a pulsating-steam water pump," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 23, no. 1, pp. 37-46, Jan. 2002.
- [8] N. Roonprasang, P. Namprakai, N. Pratinthong, "Experimental studies of a new solar water heater system using a solar water pump," *Int. J. Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 639-646, Apr. 2008.

- [9] K. Sutthivirode, P. Namprakai, N. Roonprasang, "A new version of a solar water heating system coupled with a solar water pump," *Appl. Energy*, vol. 86, no 9, pp. 1423-1430, Sep. 2009.
- [10] J. Sitranon, C. Lertsatitthanakorn, P. Namprakai, N. Namprakai, T. Suparos, N. Roonprasang, "Performance Enhancement of Solar Water Heater with a Thermal Water Pump," *J. Energy Eng. (ASCE)*, vol. 141, no.4, pp. 04014036-1 - 04014036-10, Sep. 2014.