

การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด

ชาญจิต วรรณหุรักษ์ *

สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chanchajit.w@dru.ac.th

วันที่รับบทความ: 2 พฤษภาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 17 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 6 สิงหาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 8 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะแตกต่างจากระบบพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เนื่องจากค่ารังสีแต่ละชั่วโมงมีค่าไม่คงที่และค่ารังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนก็แตกต่างกัน ดังนั้น จำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 4-6 h/d ในช่วงเวลาหลัง 10.00 น. เป็นต้นไป วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือเพื่อพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด ศึกษาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่นำไปใช้และศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่สร้างขึ้นจะใช้แผงรับรังสีอาทิตย์แบบ แผ่นเรียบ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ แผงรับรังสีอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดใช้การไหลเวียนของน้ำระหว่างแผงรับรังสีอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน แผงรับรังสีอาทิตย์มีขนาด 2×1 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 15 องศา และ ส่วนถังเก็บน้ำร้อนมีขนาด 40 ลิตร มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในการทดลอง 900 W/m^2 ติดตั้งใช้งานที่ชมรมผู้สูงอายุตำบลบางยอ องค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ ในกิจกรรมนันทนาการและการใช้เวลาว่างสำหรับผู้สูงอายุ (การแช่เท้าด้วยสมุนไพร) ทดลองในวันที่ 8 เดือนเมษายน 2568 และเริ่มสะสมความร้อนในเวลา 12.00 น. เมื่อเวลาผ่านไป 1 h (Δt) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่า 59.77°C กรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริมและกรณีมีแหล่งความร้อนเสริมสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้สูงสุด 154.06°C การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6.6 ปี

คำสำคัญ: เครื่องทำน้ำร้อน; ระบบไฮบริด; ถังเก็บรังสีอาทิตย์

Development of Hybrid Water Heaters

Chanchajit Wannurak*

Division of Electrical Technology, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: Chanchajit.w@dru.ac.th

Received: 2 May 2024; Revised: 17 July 2025; Accepted: 6 August 2025

Online Published: 8 December 2025

Abstract: Solar water heating systems differ from other renewable energy systems in that their monthly solar radiation values and hourly radiation values fluctuate. As a result, after 10:00 a.m., the solar water heating system's operating hours are restricted to roughly 4-6 hours per day. This research's primary goals are to create a hybrid water heater, investigate the temperature of the hot water used, and assess its financial worth. The flat-plate solar collector used in the developed hybrid water heater is made up of two primary parts: a hot water tank and a solar collector. Water is circulated between the hot water tank and the solar collector in the hybrid water heater. The 40-liter hot water tank and the 2x1-square-meter solar collector are angled 15 degrees. The experiment's solar radiation intensity is 900 W/m². It is set up for senior citizens' leisure and recreational activities in the Bang Yo Subdistrict Elderly Club, Bang Yo Subdistrict Administrative Organization, Samut Prakan Province (Herbal foot soaking). On April 8, 2025, the experiment was carried out, and at noon, it began to accumulate heat. After one hour (" Δt "), the water temperature in the hot water tank was 59.77 °C in the absence of an additional heat source, and it could reach a maximum of 154.06 °C in the presence of an extra heat source. According to the economic research used to calculate the hybrid water heater's payback period, it would take about 6.6 years.

Keywords: Water Heater; Hybrid System; Solar Collector

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานเป็นพลังงานทดแทนประสบความสำเร็จอย่างมากในการนำเอาความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) เป็นอุปกรณ์หลักของระบบ เพื่อผลิตน้ำร้อนเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อน (Hot Water Tank) เช่น R. Tang และ G. Li [1] ได้ศึกษาตัวเก็บรังสีอาทิตย์และระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นเรียบ ประการที่สองนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณรังสีสะสมบนหลอดเดียวของแผงโซลาร์เซลล์ และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์โครงสร้างและการติดตั้งต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ขั้นตอนสุดท้ายจะนำเสนอการออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการใช้งานในอาคารและเปรียบเทียบทางเศรษฐกิจระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า และเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการจ่ายน้ำร้อนในอาคารในคูหนิง S. Rahman และคณะวิจัย [2] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FPSC) โดยเน้นที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งแตกต่างจากนาโน ฟลูอิด Al_2O_3 และ TiO_2 ที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง Si_3N_4 มีค่าการนำความร้อนที่เหนือกว่า ($10-20\text{ W/m}\cdot\text{K}$) และความหนาแน่นต่ำกว่า ($2.6-3.2\text{ g/cm}^3$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่านาโนฟลูอิด Si_3N_4 ที่เศษส่วนปริมาตร 0.09% สามารถปรับปรุงค่าการนำความร้อนได้ 33% และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ 8% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ฐานน้ำทั่วไป การผสมผสาน Si_3N_4 ช่วยลดพื้นที่ตัวเก็บความ

ร้อนที่จำเป็นลง 6.1% ทำให้ประหยัดต้นทุนและออกแบบระบบได้ การวิเคราะห์วงจรชีวิตเผยให้เห็นว่าการปล่อยคาร์บอนลดลง 12% และระยะเวลาคืนทุนสั้นลง 15% (5.5 ปี) นอกจากนี้ K. Dumeedae และคณะวิจัย [3] S. Poomsawat และ W. Poomsawat [4] ได้ศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าใช้หลักการเทอร์โมไฮโฟน N.T. Alwan และคณะวิจัย [5] ได้ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์: การทดลองและการวิจัยเชิงทฤษฎี R. Chargui และคณะวิจัย [6] ได้ศึกษาระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดใหม่ที่ผสานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก: การวิเคราะห์เชิงทดลองและเชิงตัวเลข A. Faddouli และคณะวิจัย [7] ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบปกติกับระบบไฮบริดเทอร์มอล/เทอร์โมอิเล็กทริกอัจฉริยะ G. Li และ Y. Du [8] ได้ศึกษาการตรวจสอบประสิทธิภาพและผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจของกลยุทธ์การควบคุมใหม่สำหรับระบบไฮบริดเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนและก๊าซ

สำหรับการใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีลักษณะแตกต่างจากระบบพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เนื่องจากค่ารังสีแต่ละชั่วโมงมีค่าไม่คงที่และค่ารังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนก็แตกต่างกันอีกด้วย ดังนั้นจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 4-6 h/d ในช่วงเวลาหลัง 10.00 น. เป็นต้นไป ตามแนวโน้มค่ารังสีอาทิตย์ที่เพิ่มสูงขึ้นและสามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ระบบการผลิตน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นที่น่าสนใจรวมถึงการพัฒนาเพื่อผลิตออกมา

เชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานธรรมชาติ ดังนั้นการค้นคว้าและวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดจึงมีความจำเป็นเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนดังกล่าว จากงานวิจัยการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบของผู้วิจัยเอง [10] ที่ทำน้ำร้อนได้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวนั้น นำมาพัฒนาใหม่ให้ดีขึ้นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า (ติดตั้งฮีทเตอร์ไฟฟ้าที่ถังเก็บน้ำร้อน) จุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาสร้างเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด ศึกษาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่นำไปใช้และศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

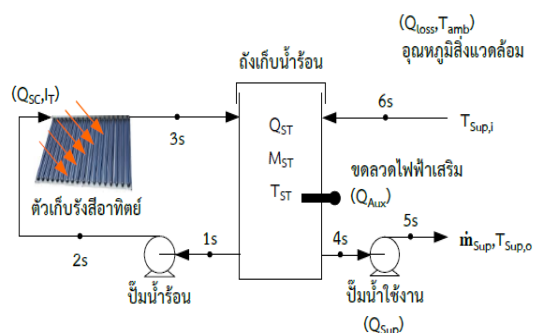
2.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

ในการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดผู้วิจัยได้นำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเรียบ (Flat Plate Collector) มาปรับปรุง โดยเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดเป็นแบบไหลบังคับ ดังแสดงรูปที่ 1 มีหลักการทำงาน คือ น้ำในถังเก็บน้ำร้อนถูกจ่ายไปยังตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยปั๊มน้ำจากจุด 1s ไปยังจุด 2s เพื่อรับพลังงานความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่จุด 3s จากนั้นจะถูกนำไปเก็บไว้ยังถังเก็บน้ำร้อนเพื่อสะสมความร้อน หรือเพิ่มอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนให้สูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิในถังเพียงพอต่อการใช้งาน จะถูกจ่ายออกจากถังเก็บน้ำร้อนที่จุด 4s โดยปั๊มน้ำ เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ที่จุด 5s น้ำร้อนเมื่อถูกนำไปใช้งานโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงและถูก

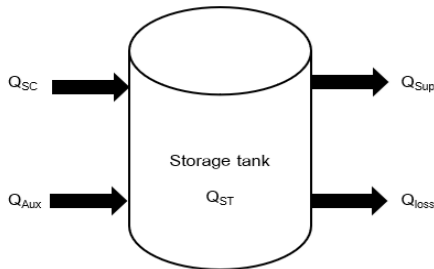
นำกลับมารับความร้อนอีกครั้งที่จุด 6s โดยจ่ายกลับไปยังถังเก็บน้ำร้อน ในกรณีที่น้ำร้อนถูกนำไปใช้งานโดยตรง จะทำการเติมน้ำเย็นเข้าสู่ถังเก็บน้ำร้อนที่จุด 6s ซึ่งทำให้น้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิลดลงค่อนข้างมาก เนื่องจากน้ำที่นำมาเติมมักจะมีอุณหภูมิต่ำ โดยตัวอย่างการใช้ความร้อนจากระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบสัมผัสตรง อาทิเช่น การนำไปใช้ในห้องอาบน้ำ เป็นต้น [9]

กรณีที่ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ตามความต้องการของการใช้งาน เช่น กรณีฤดูฝนที่มีฝนตกและมีเมฆปกคลุมค่อนข้างมาก หรือต้องการเพิ่มชั่วโมงการใช้งานของน้ำร้อน เป็นต้น ระบบผลิตความร้อนเสริม จะถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การเพิ่มขดลวดไฟฟ้า (Electrical Heater) เป็นต้น

เมื่อพิจารณาที่ถังเก็บน้ำร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำสามารถหาได้จากการสมดุลพลังงาน โดยสมมติให้ถังเก็บน้ำมีอุณหภูมิต่ำเสมอ ไม่มีการแยกชั้นของอุณหภูมิของของไหล และไม่มีการสะสมพลังงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงรูปที่ 2



รูปที่ 1 ผังการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด



รูปที่ 2 สมดุลพลังงานของถังเก็บน้ำระบบผลิตน้ำร้อน

จากรูปที่ 2 สมการทางคณิตศาสตร์ของถังเก็บน้ำระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จากการพิจารณาสมดุลพลังงานทางความร้อนของถังเก็บน้ำ โดยมีพลังงานความร้อนเข้าสู่ถังเก็บน้ำ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Q_{SC}) และอัตราการให้ความร้อนจากระบบผลิตความร้อนเสริม (Q_{AUX}) ซึ่งเท่ากับผลรวมของอัตราการสะสมความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (Q_{ST}) อัตราการสูญเสียของถังเก็บน้ำร้อน (Q_{LOSS}) และพลังงานความร้อนออกจากถังเก็บน้ำ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อนที่นำไปใช้งาน (Q_{SUP}) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) [9]

เมื่อพิจารณาการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ สามารถคำนวณหาอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำได้จากสมการ (3) และ (4)

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. หาค่ารังสีอาทิตย์ โดยทั่วไปนิยมใช้วันที่ที่เป็นตัวแทนของเดือนในการคำนวณ ซึ่งการหาวันที่ตัวแทนของเดือนนั้นทำได้โดยการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก (H_0) ในแต่ละวันของเดือนนั้น ๆ แล้วหาค่าเฉลี่ยของเดือนนั้นใกล้เคียงกับวันใดมากที่สุด วันนั้นก็จะเป็วันที่ตัวแทนของเดือน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

$$Q_{SC} + Q_{AUX} = Q_{ST} + Q_{LOSS} + Q_{SUP} \quad (1)$$

$$Q_{SC} + Q_{AUX} = \frac{M_{ST} C_{P_{ST}} T_{ST}^{t+\Delta t} - T_{ST}^t}{\Delta t} + (UA)_{ST} (T_{ST}^t - T_{amb}) + \dot{m}_{sup} C_{p_{bulk, Sup}} (T_{Sup, o} - T_{Sup, i}) \quad (2)$$

เมื่อ $T_{ST}^{t+\Delta t}$ = อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}C$)

T_{ST}^t = อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำในช่วงเวลาที่พิจารณา ($^{\circ}C$)

Δt = ผลต่างของเวลา (s)

M_{ST} = มวลของน้ำในถังเก็บน้ำ (kg)

$C_{P_{ST}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บน้ำ (kJ/kgK)

$\dot{m}_{sup}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่นำไปใช้งาน (kg/s)

$T_{Sup, o}$ = อุณหภูมิน้ำร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ ($^{\circ}C$)

$T_{Sup, i}$ = อุณหภูมิน้ำเย็นที่ไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำ ($^{\circ}C$)

$$T_{ST}^{t+\Delta t} = T_{ST}^t + (\Delta t / M_{ST} C_{P_{ST}}) [Q_{SC} + Q_{AUX} - Q_{LOSS} - Q_{SUP}] \quad (3)$$

$$\text{หรือ } T_{ST}^{t+\Delta t} = T_{ST}^t + (\Delta t / M_{ST} C_{P_{ST}}) [A_{SC} [F_R (\tau \alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f, i} - T_{amb})] + Q_{AUX} - (UA)_{ST} (T_{ST}^t - T_{amb}) - \dot{m}_{sup} C_{p_{bulk, Sup}} (T_{Sup, o} - T_{Sup, i})] \quad (4)$$

ตารางที่ 1 วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน [9]

เดือน	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย
วันที่	17	16	16	15	15	11
เดือน	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค
วันที่	17	16	15	15	14	10

2. ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลกในแต่ละวัน อันเป็นผลมาจากพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_0 = G_{SC} [24 \times 3,600 / \pi] [1 + 0.033 \cos(360n/365)]$$

$$\times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (2\pi \omega_s / 360) \sin \phi \sin \delta] \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } \delta = 23.45 \sin[(360(284+n))/365] \quad (6)$$

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan \phi \tan \delta] \quad (7)$$

เมื่อ H_0 = ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลก (MJ/m².d)

G_{SC} = ค่าคงที่สุริยะ (1,372 W/m²) [9]

ϕ = มุมละติจูด

δ = มุมเดคลิเนชัน

ω_s = มุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน

3. รังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นโลกจะประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจาย สำหรับประเทศไทยค่ารังสีอาทิตย์กระจายเฉลี่ย พิจารณาค่ารังสีอาทิตย์รายวันที่เฉลี่ยในแต่ละเดือน จากข้อมูลทางสถิติของประเทศไทยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_d/H_0 = -4.6408 + 26.5495(H/H_0) - 28.3422(H/H_0)^2 - 31.4546(H/H_0)^3 + 46.4421(H/H_0)^4 \quad (8)$$

เมื่อ H_0 = รังสีกระจายรายวันในแนวระดับ (MJ/m².d)

H = รังสีรวมรายวันในแนวระดับ (MJ/m².d)

4. ค่ารังสีรวมรายชั่วโมงในแนวระดับสามารถคำนวณได้ โดยค่าอัตราส่วนรังสีรวมรายชั่วโมงต่อรังสีรวมรายวัน ดังสมการ (9)

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} \times \frac{(a+b \cos \omega)(\cos \omega - \cos \omega_s)}{\sin \omega_s - \frac{2\pi \omega_s \cos \omega_s}{360}} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (10)$$

$$b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (11)$$

เมื่อ I = รังสีรวมรายชั่วโมงในแนวระดับ (MJ/m².h)

ω = มุมชั่วโมง กำหนดให้เที่ยงวันเวลาสุริยะมีค่าเป็นศูนย์และให้แต่ละชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 15° โดยในตอนเช้ามีค่าเป็นลบและตอนบ่ายมีค่าเป็นบวก

a, b = ค่าคงที่ที่สถานีต่างๆ ของประเทศไทย

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สถานีกรุงเทพ [11]

สถานี	a_1	a_2	b_1	b_2
กรุงเทพฯ	0.792	-0.250	0.189	0.471

5. คำนวณค่ารังสีอาทิตย์ เวลาที่ใช้ในการคำนวณต้องเป็นเวลาสุริยะ ซึ่งแตกต่างจากเวลามาตรฐานท้องถิ่น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลามาตรฐานท้องถิ่นและเวลาสุริยะ หาได้จากสมการ (12)

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = 4(L_{std} - L_{loc}) + E/60 \quad (12)$$

$$\text{โดยที่ } E = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (13)$$

$$B = 360(n-1) / 365 \quad (14)$$

เมื่อ L_{std} = ตำแหน่งเส้นลองจิจูดที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น

L_{loc} = ตำแหน่งเส้นลองจิจูดของบริเวณที่พิจารณา

E = สมการเวลา

n = วันที่ของปีหรือวันจูเลียน

6. ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในแนวระดับสามารถคำนวณได้ โดยค่าอัตราส่วนของรังสีกระจายรายชั่วโมงต่อค่ารังสีกระจายรายวัน ดังสมการ (15)

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{[\sin(\omega_s) - \frac{2\pi\omega_s \cos(\omega_s)}{360}]} \quad (15)$$

เมื่อทราบค่ารังสีรวมและรังสีกระจายรายชั่วโมงใน
แนวระดับจากสมการข้างต้น ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ารังสี
ตรงรายชั่วโมงในแนวระดับ (I_b) ได้ดังสมการ (16)

$$I_b = I - I_d \quad (16)$$

เมื่อ I_b = รังสีตรงรายชั่วโมงในแนวระดับ (MJ/m².h)

I_d = รังสีกระจายรายชั่วโมงในแนวระดับ
(MJ/m².h)

7. การใช้งานจริงต้องวางตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้ทำมุม
เอียงกับแนวระดับ เพื่อให้สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้ดีตลอด
ทั้งปี ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามุมเอียงดีที่สุดคือ เอียงเท่ากับมุม
ละติจูดของพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง ดังนั้นสามารถหาค่ารังสี
อาทิตย์ที่ตกบนระนาบในแนวเอียงได้ดังสมการ (17)

$$I_T = I_b R_b + I_d [1 + \cos(\beta)] / 2 \quad (17)$$

นอกจากนี้รังสีอาทิตย์ที่กระทบโดยตรงกับตัวเก็บรังสี
อาทิตย์ที่ทำมุมเอียงกับแนวระดับแล้ว ยังมีรังสีอาทิตย์
อีกส่วนหนึ่งที่สะท้อนมาจากสิ่งของต่างๆ โดยรอบของตัว
เก็บรังสีอาทิตย์ ดังนั้นค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนตัวเก็บ
รังสีอาทิตย์จะคำนวณได้จากสมการ (18)

$$I_T = I_b R_b + I_d [1 + \cos(\beta)] / 2 + \rho_g (I_b + I_d) [1 - \cos(\beta)] / 2 \quad (18)$$

โดยที่ $R_b = \cos(\theta) / \cos(\theta_z)$ (19)

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta)$$

$$- \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma)$$

$$+ \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \quad (20)$$

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (21)$$

เมื่อ I_T = รังสีรวมรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบน ระนาบ
เอียง (MJ/m².h)

β = มุมที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เอียงทำมุมกับแนวระดับ (°)

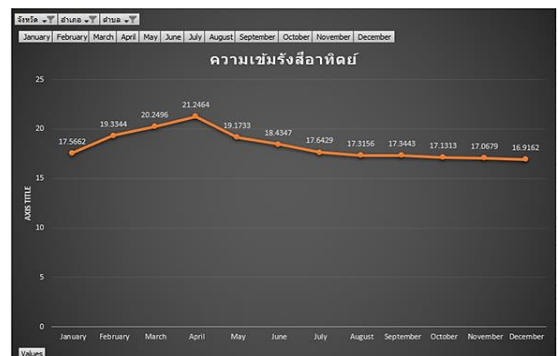
θ = มุมที่รังสีตรงตกกระทบกับแกนที่ตั้งฉากบนระนาบใน
แนวเอียง (°)

θ_z = มุมที่รังสีตรงตกกระทบกับแกนที่ตั้งฉากบนระนาบ
ในแนวระดับ (°)

ρ_g = ตัวประกอบการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ที่มาจาก
สิ่งแวดล้อม มีค่าประมาณ 0.8 เมื่อวางบนพื้นคอนกรีต

γ = มุมเอียงของระนาบเอียงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อตัวเก็บ
รังสีอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ มีค่าเป็นลบในทิศตะวันออก
และมีค่าเป็นบวกในทิศตะวันตก

การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่ตกบนระนาบ
เอียงของจังหวัดสมุทรปราการ ตำบลบางยอ ซึ่งคำนวณ
จากโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบผลิตน้ำ
ร้อนพลังงานแสงอาทิตย์[12] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่ารังสีรวมรายวันในแนวระดับตำบลบางยอ

8. เมื่อพิจารณาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สามารถคงตัวที่
ขณะใด ๆ จะพบว่าค่ารังสีที่ถูกดูดกลืนมีค่าเท่ากับ
ค่าอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์รวมกับค่าอัตรา
ความร้อนที่สูญเสียจากผิวดูดรังสี แสดงในสมการ
(22) และ (23)

$$Q_{\text{Solar}} = Q_{\text{sc}} + Q_{\text{loss}} \quad (22)$$

โดยที่

$$(\tau\alpha)_e I_T A_{\text{SC}} = \dot{m}_f C_p (T_{f,i} - T_{f,i}) + U_L A_{\text{SC}} (T_p - T_{\text{amb}}) \quad (23)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสี
อาทิตย์สามารถเขียนได้เป็น ดังแสดงในสมการที่ (24)

$$Q_{\text{SC}} = (\tau\alpha)_e I_T A_{\text{SC}} - U_L A_{\text{SC}} (T_p - T_{\text{amb}}) \quad (24)$$

เมื่อ Q_{SC} = อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)

$(\tau\alpha)_e$ = ประสิทธิภาพเชิงแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

I_T = รังสีรวมรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบน
ระนาบเอียง (W/m^2)

A_{SC} = พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

U_L = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมจาก
ผิวดูดรังสีอาทิตย์ ($\text{W/m}^2.\text{K}$)

T_p = อุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

$\dot{m}_f$ = อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s)

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg.K)

$T_{f,i}$ = อุณหภูมิของน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{f,o}$ = อุณหภูมิของน้ำออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

9. ในทางปฏิบัติอุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_p)
วัดได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงปรับค่าสมการดังกล่าวโดย
กำหนด ค่าตัวประกอบการดึงความร้อน (Heat
Removal Factor, F_R) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ

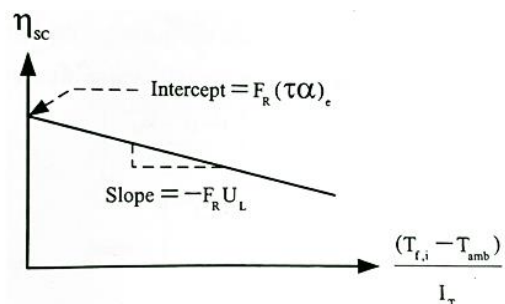
น้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในสมการที่ (25)

$$Q_{\text{SC}} = F_R (\tau\alpha)_e I_T A_{\text{SC}} - F_R U_L A_{\text{SC}} (T_{f,i} - T_{\text{amb}}) \quad (25)$$

เมื่อ F_R ค่าตัวประกอบการดึงความร้อนเป็นสัดส่วนของความ
ร้อนที่ได้จริงจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อพลังงานความร้อนที่
ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ค่า F_R มีลักษณะคล้ายกับ
ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เนื่องจากเป็นค่า
อัตราส่วนของพลังงานความร้อนจริงต่อพลังงานความร้อน
สูงสุดที่เป็นไปได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังนั้น
ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η_{SC}) ในการนำความ
ร้อนไปใช้ประโยชน์ ดังแสดงในสมการที่ (26)

$$\eta_{\text{SC}} = Q_{\text{SC}} / I_T A_{\text{SC}} = F_R (\tau\alpha)_e - [F_R U_L (T_{f,i} - T_{\text{amb}}) / I_T] \quad (26)$$

อนึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์
ระหว่างค่า η_{SC} และ $(T_{f,i} - T_{\text{amb}}) / I_T$ โดยการ
วิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์
ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการสมรรถนะเส้นตรง $Y = -aX + b$
โดยค่า $-a = -F_R U_L$ คือความชัน และ $b = F_R (\tau\alpha)_e$ คือ
ค่าจุดตัดแกน η_{SC} ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีค่า $F_R(T\alpha)_e$ สูง แสดงว่าการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูง ส่วนค่า $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ดังนั้นหากค่าดังกล่าวมีค่าสูง แสดงว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ป้องกันความร้อนสูญเสียได้ไม่ดี หนึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ถือเป็นตัวแปรสำคัญในการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงตัวอย่างของ ค่าตัวแปรทั้ง 2 ในตารางที่ 3

10. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (27) [12]

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดจ่ายเงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ}}{\text{เงินสดรับสุทธิรายเดือน}} \quad (27)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 0.15 เมตร ด้านล่างเป็นโฟมหนา 50 มิลลิเมตร ชั้นที่สองรองทับฉนวนกันความร้อนและแผ่นสังกะสี ท่อดูดรังสีภายในติดเชื่อมต่อกับท่อทองแดงขนาด 1/2 นิ้ว ยาว 2 เมตร กว้าง 1 เมตร จำนวน 30 ท่อ ต่อเข้ากับท่อทองแดงนำเข้าน้ำออกขนาด 7/8 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ ระยะห่าง 5 เซนติเมตร แบบขนานกัน ฟันสีดำด้านบนปิดด้วยกระจกใสหนา 5 มิลลิเมตร ระยะห่างท่อดูดรังสีกับกระจก 100 มิลลิเมตร ใช้ถังเก็บความร้อน 40 ลิตร 1 ใบ ภายในติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 2,200 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โครงสร้างฐานวางตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาดกว้าง 1.20 เมตร ยาว 2.50 เมตร สูง 1.27 เมตรทำมุม 15 องศา

ตารางที่ 3 คุณลักษณะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [9]

คุณลักษณะ	แบบแผ่นเรียบ
พื้นที่ (Gross area, m ²)	2.00
ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ	
$-F_R U_L \text{ W/m}^2\text{-K}$	10.370
$-F_R(T\alpha)_e$	0.802

ติดตั้งปั้มน้ำขนาด 450 W จำนวน 2 ตัวที่โครงสร้างสำหรับไหลวนระบบภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1 ตัว และทางออกของถังเก็บความร้อน 1 ตัว เพื่อนำน้ำร้อนไปใช้ ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลที่ทางออกของน้ำร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กำหนดตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 4 จุด คือ 1. ท่อน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{fi}), 2. ท่อน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{fo}), 3. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{amb}) และ 4. ที่ถังเก็บน้ำร้อน (T_{fw}) และติดตั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ โซลิดสเตตรีเลย์ และเบรกเกอร์ Mitsubishi MCCBs รุ่น NF30-CS การใช้งานสามารถตั้งอุณหภูมิควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ในการทำความร้อนได้ ทั้งนี้ รายละเอียดการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดแสดงดังรูปที่ 5-11



รูปที่ 5 ถังเก็บความร้อนภายในติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าและเทอร์โมคัปเปิลชนิด K



รูปที่ 6 ติดตั้งปั้มน้ำที่โครงสร้าง 2 ตัว



รูปที่ 9 เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด



รูปที่ 7 ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลที่ทางออกของ
น้ำร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์



รูปที่ 10 การเตรียมน้ำร้อน



รูปที่ 8 ติดตั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ โซลิดสเตตรีเลย์และ
เบรกเกอร์ภายในตู้ไฟ



รูปที่ 11 กิจกรรมการแช่เท้าด้วยน้ำร้อน

3.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิของน้ำในเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด

การทดลองโดยการคำนวณอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 8 ติดตั้งใช้งานที่ชมรมผู้สูงอายุตำบลบางยอ องค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ กิจกรรมนันทนาการและการใช้เวลาว่างสำหรับผู้สูงอายุ (การแช่เท้าด้วยสมุนไพร) ทดลองในวันที่ 8 เดือนเมษายน 2568 และเริ่มสะสมความร้อนในเวลา 12.00 น. เมื่อเวลาผ่านไป 1 h (Δt) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าเท่าไร

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานดังต่อไปนี้

1. รังสีรวมเฉลี่ยรายวันของเดือนเมษายน (H) เท่ากับ $21.25 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$
2. ค่าคงที่สุริยะ (G_{sc}) เท่ากับ $1,372 \text{ W/m}^2$
3. ละติจูดองค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ (ϕ) เท่ากับ 13.68° N หรือ 100.56° E
4. ค่าสัมประสิทธิ์ $a_1 = 0.792$, $a_2 = -0.250$, $b_1 = 0.189$, และ $b_2 = 0.471$ ของจังหวัดสมุทรปราการ (ใช้ค่าเทียบเคียงของจังหวัดกรุงเทพฯ)
5. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์หันไปทิศใต้ ($\gamma = 0$)
6. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำมุมกับพื้นดินเท่ากับมุมละติจูดขององค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ ($\beta = 13.68^\circ$)
7. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์วางอยู่บนพื้นคอนกรีต (ρ_g) เท่ากับ 0.8
8. ตัวเก็บ รังสีอาทิตย์ แบบ เรียบ มี ค่า F_R ($\tau\alpha$)_e เท่ากับ 0.802 และค่า $F_R U_L = 10.370 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

9. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($C_{p_{HW}}$) เท่ากับ $4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

10. ขนาดถังเก็บน้ำ (M_{st}) เท่ากับ 40 kg

11. อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m_{HW}) เท่ากับ 2.0 L/min

12. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของถังเก็บน้ำร้อน (UA_{ST}) เท่ากับ $16\text{--}20 \text{ W/}^\circ\text{C}$

13. ขดลวดไฟฟ้าเสริม (Auxiliary Electrical Heater) จำนวน 2 อันมีขนาด (Q_{AUX}) เท่ากับ 4.4 kW

14. อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (T_{HW}) เท่ากับ 30°C

15. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{amb}) เท่ากับ 28°C

แนวทางการวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 1) หาตัวแทนวันที่ของเดือนเมษายน (n) จากตารางที่ 1 พบว่า ตัวแทนเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ 15

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณหามุมเดคลิเนชัน (δ) ที่เป็นมุมระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เที่ยงสุริยะ กระทำกับ แนวระนาบเอคเควเตอร์ หาจากสมการ

$$\delta = 23.45 \sin[(360(284+n))/365]$$

แทนค่า $\delta = 23.45 \times \sin[(360 \times (284+15))/365]$

มุมเดคลิเนชัน - 21.27°

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณหามุมซัวโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน (ω_s) ที่เป็นมุมตกกระทบระหว่างค่ารังสีตรงกับพื้นในแนวระดับ

หาจากสมการ $\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(\phi)\tan(\delta)]$

แทนค่า $\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(13.68)\tan(-21.27)]$

มุมซัวโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน 84.52°



ขั้นตอนที่ 4) คำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลก (H_0) หาจากสมการ

$$H_0 = G_{sc} [24 \times 3,600 / \pi] [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \times [\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + (2\pi \omega_s / 360) \sin(\phi) \sin(\delta)]$$

แทนค่า

$$H_0 = 1372 \times [24 \times 3,600 / \pi] [1 + 0.033 \times \cos(360 \times 15 / 365)] \times [\cos(13.68) \cos(-21.27) \sin(84.56) + (2 \times \pi \times 84.56 / 360) \sin(13.68) \sin(-21.27)]$$

ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลก 29.11 MJ/m²·d

ขั้นตอนที่ 5) คำนวณหาค่ารังสีกระจายรายวัน (H_d) หาจากสมการ $H_d / H_0 = -4.6408 + 26.5495(H/H_0) - 28.3422(H/H_0)^2 - 31.4546(H/H_0)^3 + 46.4421(H/H_0)^4$
แทนค่า $H_d / 29.11 = -4.6408 + 26.5495 \times (21.25/29.11) - 28.3422 \times (21.25/29.11)^2 - 31.4546 \times (21.25/29.11)^3 + 46.4421 \times (21.25/29.11)^4$

ค่ารังสีกระจายรายวัน 17.15 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 6) คำนวณหาค่ารังสีตรงรายวัน (H_b)

หาจากสมการ $H_b = H - H_d$

แทนค่า $H_b = 21.25 - 17.15$

ค่ารังสีตรงรายวัน 4.1 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 7) คำนวณหาค่าคงที่ a และ b ที่สถานีต่าง ๆ

ของประเทศไทย หาจากสมการ $a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60^\circ)$

แทนค่า $a = 0.792 + [-0.250 \times \sin(84.56 - 60)]$

ค่าคงที่ $a = 0.69$

หาจากสมการ $b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60^\circ)$

แทนค่า $b = 0.189 + [0.471 \times \sin(84.56 - 60)]$

ค่าคงที่ $b = 0.39$

ขั้นตอนที่ 8) คำนวณหาเวลาสุริยะ หาจากสมการ

$$B = 360(n-1) / 365$$

แทนค่า $B = 360 \times (15 - 1) / 365$

ค่า $B = 13.81$

หาจากสมการ $E = 9.87 \sin(2B) - 753 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$

แทนค่า $E = [9.87 \times \sin(2 \times 13.81)] [7.53 \times \cos(13.81)] - [1.5 \times \sin(13.81)]$

ค่า $E = -3.09$ min

หาจากสมการ

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = (4[L_{\text{std}} - L_{\text{loc}}] + E) / 60$$

แทนค่า $\text{Solar time} - 12.00 = (4 \times [105 - 100.56] - 3.09) / 60$

เวลาสุริยะ = 12.24

ขั้นตอนที่ 9) คำนวณหา ω โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 ที่เวลาเที่ยงสุริยะ และแต่ละชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 15°

หาจากสมการ $\omega_{\text{Solar time}} = \omega_{12.00} \pm (15 \Delta t_{\text{Solar time}} / 60)$

แทนค่า $\omega_{\text{Solar time}} = 0 + [15 \times (24/60)]$

ค่า ω เท่ากับ 6°

ขั้นตอนที่ 10) คำนวณหาค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I)

$$\frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[(a+b) \cos(\omega)] [\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{\sin(\omega_s) - \frac{2\pi \omega_s \cos(\omega_s)}{360}}$$

แทนค่า

$$\frac{1}{21.25} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[(0.69 + 0.39) \times \cos(6)] [\cos(6) - \cos(84.56)]}{\left[\sin(84.56) - \frac{2\pi \times 84.56 \times \cos(84.56)}{360} \right]}$$

ค่ารังสีรวมรายชั่วโมง 3.12 MJ/m²·h



ขั้นตอนที่ 11) คำนวณหาค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง (I_d)

$$\text{หาจากสมการ} \quad \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[\cos(\omega)] - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) \frac{2\pi \omega_s \cos(\omega_s)}{360}}$$

$$\text{แทนค่า} \quad \frac{I_d}{17.15} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[\cos(6) - \cos(84.56)]}{\sin(84.56) \frac{2\pi \times 84.56 \times \cos(84.56)}{360}}$$

ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง 2.35 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 12) คำนวณหาค่ารังสีตรงรายชั่วโมง (I_b)

$$\text{หาจากสมการ} \quad I_b = I - I_d$$

$$\text{แทนค่า} \quad I_b = 3.12 - 2.35$$

ค่ารังสีตรงรายชั่วโมง 0.77 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 13) คำนวณหาค่า R_b หาจากสมการ

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(\beta)$$

$$- \sin(\delta)\cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)$$

$$+ \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta)\sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega)$$

$$\text{แทนค่า} \cos(\theta) = \sin(-21.27)\sin(13.68)\cos(13.68)$$

$$- \sin(-21.27) \cos(13.68) \sin(13.68) \cos(0)$$

$$+ \cos(-21.27) \cos(13.68) \cos(13.68) \cos(6)$$

$$+ \cos(-21.27) \sin(13.68)\sin(13.68)\cos(0)\cos(6)$$

$$+ \cos(-21.27) \sin(13.68) \sin(0) \sin(6)$$

$$\text{ค่า} \cos(\theta) \text{ เท่ากับ } 0.93$$

หาจากสมการ

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)$$

$$\text{แทนค่า} \cos(\theta_z) = (\sin(-21.27)\sin(13.68)$$

$$+ \cos(-21.27) \cos(13.68)\cos(6))$$

$$\text{ค่า} \cos(\theta_z) \text{ เท่ากับ } 0.81$$

$$\text{หาจากสมการ} \quad R_b = \cos(\theta) / \cos(\theta_z)$$

$$\text{แทนค่า} \quad R_b = 0.93 / 0.81$$

$$\text{ค่า } R_b \text{ เท่ากับ } 1.15$$

ขั้นตอนที่ 14) คำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง

ที่บนระนาบเอียง (I_T) หาจากสมการ

$$I_T = I_b R_b + I_d [I + \cos(\beta)]/2 + \rho_g (I_b + I_d) [(1 - \cos(\beta))/2]$$

$$\text{แทนค่า} \quad I_T = [0.77 \times 1.15] + [2.35 \times [(1 + \cos(13.68))/2]]$$

$$+ [0.8 \times (0.77 + 2.35) [(1 - \cos(13.68))/2]]$$

ค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่บนระนาบเอียง 3.24 MJ/m²·h

$$3.24 \times 10^6 / 3,600 \text{ W/m}^2 \text{ เท่ากับ } 900 \text{ W/m}^2$$

ขั้นตอนที่ 15) คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Q_{SC}) หาจากสมการ

$$Q_{SC} = F_R (\tau \alpha)_e I_T A_{SC} - F_R U_L A_{SC} (T_{fi} - T_{amb})$$

$$\text{แทนค่า} \quad Q_{SC} = 0.802 \times 900 \times 2 - 10.370 \times 2 \times (32 - 28)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1.36 kW

ขั้นตอนที่ 16) คำนวณหาอัตราการสูญเสียความ

ร้อนของถังเก็บน้ำ (Q_{Loss}) หาจากสมการ

$$Q_{Low} = U A_{ST} (T_{HW} - T_{amb})$$

$$\text{แทนค่า} \quad Q_{Low} = 16 \times (32 - 28)$$

อัตราการสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำ 64 W

$$\text{เท่ากับ } 0.064 \text{ kw}$$

ขั้นตอนที่ 17) คำนวณหาอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ

($T_{HW+\Delta t}$) กรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริม หาจากสมการ

$$T_{HW+\Delta t} = [(Q_{SC} - Q_{Loss}) \Delta t / (M_{ST} CP_{HW})] + T_{HW}$$

$$\text{แทนค่า} \quad T_{HW+\Delta t} = [(1.36 - 0.064) \times 3,600 / (40 \times 4.2)] + 32$$

อุณหภูมิน้ำในถังเก็บกรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริม
59.77 °C

ขั้นตอนที่ 18) คำนวณหาอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ
($T_{NW+\Delta t}$) กรณีมีแหล่งความร้อนเสริม หาจากสมการ
$$T_{HW+\Delta t} = [(Q_{SC} + Q_{AUX} - Q_{Loss}) \Delta t / (M_{ST} CP_{HW})] + T_{HW}$$

แทนค่า $T_{HW+\Delta t} = [(1.36 + 4.4 - 0.064) \times 3,600 / (40 \times 4.2)] + 32$

อุณหภูมิน้ำในถังเก็บกรณีมีแหล่งความร้อนเสริม
154.06 °C

3.3 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาคืนทุน จำเป็นต้องทราบจำนวนเงินที่ลงทุนสำหรับสร้างเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดและจำนวนเงินค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียไปสำหรับการใช้เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดรายปี [13] ซึ่งพบว่า ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานประมาณ 8,000 บาท (ปรับปรุงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โครงสร้าง บิมน้ำและฮีตเตอร์) จำนวนเงินค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียไปสำหรับการใช้เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดรายปีประมาณ 1,219 บาท จากการทำกิจกรรมเดือนละ 1 ครั้งตลอด 1 ปี โดยทำให้สามารถคำนวณหาระยะคืนทุนของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดได้ประมาณ 6.6 ปี

4. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่สร้างขึ้นเอง โดยใช้แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ แผงรับรังสีอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดใช้การไหลเวียนของน้ำระหว่างแผงรับรังสีอาทิตย์

และถังเก็บน้ำร้อน แผงรับรังสีอาทิตย์มีขนาด 2x1 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 15 องศาและส่วนถังเก็บน้ำร้อนมีขนาด 40 ลิตร ในการศึกษาครั้งนี้ จากการคำนวณความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในการทดลอง 900 W/m² ติดตั้งใช้งานเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่ชมรมผู้สูงอายุตำบลบางยอ องค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการในกิจกรรมนันทนาการและการใช้เวลาว่างสำหรับผู้สูงอายุ (การแช่เท้าด้วยสมุนไพร) ทดลองในวันที่ 8 เดือน เมษายน 2568 และเริ่มสะสมความร้อนในเวลา 12.00 น เมื่อเวลาผ่านไป 1 h (Δt) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่า 59.77 °C กรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริมและกรณีมีแหล่งความร้อนเสริมสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้สูงสุด 154.06 °C นำน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมได้ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6.6 ปี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชชัย สอนสนาม ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งและคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีที่ช่วยในการสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.Tang and G.Li, Handbook of energy systems in green buildings: Solar collectors and solar hot water systems, Springer-Verlag GmbH., BIN, Germany, 2018.

- [2] S. Rahman, S. Issa, Z. Said and A. Hachicha, Techno-economic and life cycle analysis of a nano-enhanced flat plate solar collector for improved thermal performance, *Energy Nexus*, 2025, 18, 100433.
- [3] K. Dumeedae, S. Sueyu and S. Kasor, Solar water heater hybrid with electric, *YRU Journal of Science and Technology*, 2017, 2(1), 65-75.
- [4] S. Poomsawat and W. Poomsawat, A study of the efficiency of a solar water heater, *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 2019, 14(1), 67-77.
- [5] N.T. Alwan, M.H. Majeed, I.M. Khudhur, S.E. Shcheklein, O.M. Ali, S.J. Yaqoob and R. Alayi, Assessment of the performance of solar water heater: an experimental and theoretical investigation, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2022, 17, 528-539.
- [6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622027081>. (Accessed on 10 April 2025)
- [7] A. Faddouli, S. Fadili, H. Labrim, B. Hartiti, M. Ertugrul, N. Belouaggadia and M. Stitou, Comparative study of a normal solar water heater and smart thermal/thermoelectric hybrid systems, *Materials Today, Proceeding*, 2020, 30 Part 4, 1039-1042.
- [8] G. Li and Y. Du, Performance investigation and economic benefits of new control strategies for heat pump-gas fired water heater hybrid system, *Applied Energy*, 2018, 232, 101-118.
- [9] N. Chaiyati, Thermal renewable energy technology and system design, Report, College of Renewable Energy Maejo University, Thailand, 2019.
- [10] C. Wannurak, Development of solar water heater with flat plate solar collector, *The 6th RMUTP Conference on Engineering and Technology, Proceeding*, 2022, 5-8. (in Thai)
- [11] S. Khlongboonchit, Principle of solar hot water system in industry, Thesis, Faculty of Engineering, Report, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. 2009.
- [12] https://eassess.su.ac.th/web1/solar_app/#. (Accessed on 10 April 2025)
- [13] T. Rudchapo and M. Punon, Development of solar water heater, *Local Research and Innovation Journal*, 2015, 11(Special), 68-74.