

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสะสมพลังงานความร้อน สำหรับโรงผลิตไฟฟ้า
แบบรางพาราโบลิกขนาด 10 kW โดยใช้ NaCl เป็นตัวกลาง
MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR
PARABOLIC TROUGH POWER PLANT 10 kW BY NaCl MEDIA

พิเศษ ตู้กลาง*, ศรายุทธ วัลย์วุฒิ **, วัฒนพงษ์ รัชนีวิเชียร **, สุขฤดี สุขใจ**

*ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 30000 โทร 044-254000-1303

โทรสาร E-mail: tpsiate@hotmail.com

**วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร 65000

Asst. Pro. Pisate Tooklang*, Asst. Pro. Dr. Sarayooth Vaivudh**, Asso. Pro. Dr. Wattanapong Rakwichian**, Dr. Sukruedee Sukchai**.

*Physics and General Science Department , Faculty of Science and Technology , Nakhonratchasima Rajabhat University,
Nakhonratchasima 30000,Thailand. Tel: 044-254000-1303 Fax: E-mail: tpsiate@hotmail.com

**School of Renewable Energy Technology (SERT), Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

บทคัดย่อ

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสะสมพลังงานความร้อนสำหรับโรงผลิตไฟฟ้า แบบรางพาราโบลิกขนาด 10 kW โดยใช้เกลือแกง NaCl เป็นตัวกลาง มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและคำนวณการสะสมพลังงานความร้อนแบบสัมผัสของตัวกลาง NaCl ในสถานะของแข็ง โดยมีการออกแบบจำลองให้สอดคล้องกับโรงผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ชนิดรางพาราโบลิกขนาด 10 kW ระบบสะสมพลังงานประกอบด้วย ถังสเตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 cm สูง 120 cm ภายในบรรจุ NaCl ปริมาณ 150 kg และมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 cm ผ่านกลางถึงภายในท่อมีของเหลว thermia oil เป็น HTF สำหรับเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนกับ NaCl ในถังสะสมพลังงาน และสามารถส่งพลังงานให้โรงผลิตไฟฟ้าได้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 การสะสมพลังงาน(charging) HTF ไหลวนรับความร้อนจากเครื่องทำความร้อนขนาด 3 kW_{th} และถ่ายเทความร้อนให้กับ NaCl และสะสมพลังงาน ตอนที่ 2 ศึกษาการถ่ายเทพลังงาน (discharging) HTF ไหลวนรับความร้อนจากถังสะสมพลังงานและถ่ายเทให้กับโหลดขนาด 10 kW ผลการศึกษาพบว่า จากการคำนวณการสะสมพลังงานพบว่า HTF ไหลในอัตรา 0.1 kg/s ใช้เวลา 130 นาที สำหรับจากอุณหภูมิ 27 °C เป็น 250 °C และเมื่อถ่ายเทความร้อนให้กับโหลดขนาด 10 kW จะใช้เวลา 70 นาที อุณหภูมิลดลงจาก 250 °C เป็น 100 °C .

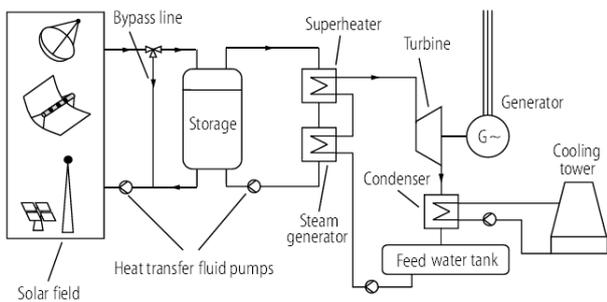
Abstract

Studying Mathematical model determine of the thermal energy storage system for parabolic trough power plant 10kW by the salt media aimed to estimate the storage thermal energy of a solid phase of NaCl in sensible storage. The model was designed to conform with parabolic trough power plant 10kW .The thermal energy storage system consisted of stainless steel cylindrical tank, diameter 24 cm and 120 cm high within a tube containing HTF size 1.27 diameter through the center tank. Between the HTF pipes and the surface of the cylinder surface tank contain NaCl medium, 150 kg and HTF direct contacted with the medium. The HTF was Thermia oil . Heat exchanger between HTF and NaCl used the pump to the flow of heat and heat transfer within the tank. This experiment was divided into two sections. The first section: Charging;The heater 3 kW was used to heat the HTF. The HTF transferred heat to NaCl and stored energy in it. The second section : Discharging; The HTF passed through the pipe inside the storage tank and received heat to transfer to load;10 kW . Calculations showed that the HTF flowed rate of 0.1 kg/s time 130 minutes for the storage energy from the temperature 27 °C to 250 °C and the heat transferred to the load size 10

kW that took 70 minutes, temperature decreased from 250 °C to 100 °C .

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญปลดปล่อยพลังงานตกลงสู่พื้นโลก โดยเฉพาะประเทศไทยอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตรของโลก พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเฉลี่ยประมาณ 5 kW-hr/m² ต่อวัน จึงถือว่าเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และเป็นพลังงานสะอาด การผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับโรงผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ โดยความร้อนจากตัวเก็บความร้อนความเข้มสูง ได้แก่ Solar power towers system, Dish/stirling system และ Parabolic Trough Power Plants แต่ปัญหาสำคัญของการใช้แหล่งพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ เนื่องจากค่าความเข้มของพลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามสภาพของอากาศ ฤดูกาล ตำแหน่ง และช่วงเวลา เมื่อนำมาใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานความร้อนโดยเฉพาะระบบที่ต้องการพลังงานความร้อนสูงและใช้พลังงานในระบบอย่างต่อเนื่อง เช่น โรงผลิตกระแสไฟฟ้าโดยพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในระบบรางพาราโบลิก (Parabolic Trough Power Plants) จะต้องใช้สารทำงานหมุนเทอร์ไบน์ (turbine) ที่อุณหภูมิระหว่าง 100 – 250 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยให้ระบบการผลิตไฟฟ้าทำงานได้อย่างต่อเนื่อง สม่่าเสมอและขยายเวลาในช่วงไม่มีแสงจากดวงอาทิตย์ จึงจำเป็นต้องมีระบบพลังงานสำรองร่วมอยู่ในระบบด้วย เช่น ใช้ความร้อนจากพลังงานจากก๊าซธรรมชาติ หรือ มีระบบสะสมพลังงานความร้อน แสดงดังรูปที่ 1.



รูปที่ 1 . ไอโซแกรมโรงผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์

ที่มา : A. Neumann,(2006)

ระบบสะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์ในส่วนเกินไหลดจะช่วยลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งระบบพลังงานส่วนใหญ่จะเป็นแบบความร้อนสัมผัสของตัวกลางในสถานะของเหลว ปัญหาที่อุณหภูมิสูงของเหลวจะเปลี่ยนเฟส และมีปัญหาความดันมาเกี่ยวข้อง ผู้วิจัยสนใจระบบที่ไม่ซับซ้อน และใช้ NaCl ตัวกลาง ซึ่งมีความจุความร้อนสูง และราคาถูก ไม่เปลี่ยนเฟส

ในการศึกษานี้จะศึกษาการสะสมพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูงโดยใช้ NaCl เป็นตัวกลาง แบบความร้อนสัมผัส (sensible storage) ในสถานะของแข็ง ที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 100 - 250 °C สำหรับโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 10 kW

2. สมการทางคณิตศาสตร์

พลังงานความร้อนที่สะสมในตัวกลางของแข็งไม่เปลี่ยนเฟส สะสมพลังงานแบบความร้อนสัมผัส ค่าพลังงานความร้อนที่สะสม q ในสสารมวล m และมีความจุความร้อนจำเพาะเป็น c_p เมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้นจาก T_1 เป็น T_2 ค่าพลังงานที่สะสม จะหาได้จากสมการ

$$q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT \quad (1)$$

หรือ

$$q = \int_{T_1}^{T_2} \rho V c_p dT \quad (2)$$

เมื่อ ρ เป็น ความหนาแน่น (kg/m^3) V เป็น ปริมาตรของสสาร (m^3) และ dT เป็น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (K) ตามลำดับ

เมื่อ HTF ไหลในท่อและแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านระหว่างผนังท่อกับตัวกลาง NaCl และสะสมพลังงานของตัวกลางภายในถัง ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม ระหว่าง HTF ผ่านผนังท่อกับตัวกลาง NaCl เมื่อไม่เกิดการสูญเสียพลังงานของผนังท่อ สมการจะเขียนได้เป็น

$$q_r = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_{c1} 2\pi r_1 L} + \frac{1}{2\pi k L}} \quad (3)$$

เมื่อ T_1 เป็น อุณหภูมิของของไหลในท่อ (K) , T_2 เป็น อุณหภูมิของตัวกลางในท่อ (K) , h_{c1} เป็น สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล , L เป็น ความยาวของท่อ (m) , r_1 เป็นรัศมีของท่อของไหล (m) และ r_2 เป็นรัศมีของท่อของถัง (m) ตามลำดับ

จากสมการ (3) เขียนในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างของไหล HTF กับการนำความร้อนของแข็งของตัวกลาง NaCl การแลกเปลี่ยนพลังงาน หาได้จากสมการ

$$q_r = UA(T_1 - T_2) \quad (4)$$

เมื่อ q_r เป็นพลังงานความร้อน (J) , U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m^2K) และ A เป็น พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)

การถ่ายเทความร้อนของของไหล จะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และขึ้นกับการไหลผ่านผิวด้านในของท่อของของไหล นั้น ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Re , Nu และ Pr สมการการไหลของ HTF ความเร็วของ การไหลจะเป็นตัวแยกการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน สมการพิจารณาการไหลแบบราบเรียบภายในท่อในรูปความสัมพันธ์เอ็มไพริคัล เสนอโดย Sieder และ Tate จะหาได้จากสมการ

$$Nu = 1.86(RePr)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (5)$$

เมื่อ Re เป็นค่า Reynolds number , Pr เป็นค่า Prandtl number , L เป็นความยาวของท่อ และ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตามลำดับ

สมการแสดงการไหลภายในท่อเรียบแบบปั่นป่วนของ Petukhov หาได้จากสมการ

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3}-1)} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^n \quad (6)$$

เมื่อ $n = 0.11$ สำหรับ $T_w > T_b$, $n = 0.25$ สำหรับ $T_w < T_b$ และ $n = 0$ สำหรับค่า ฟลักซ์ความร้อนคงที่ คุณสมบัติต่างๆ ทั้งหมดประเมินที่ $T_f = (T_w + T_b)/2$ สำหรับ μ_b และ μ_w แพกเตอร์ของความเสียดทาน หรือ ค่าแรงเสียดทานสำหรับการไหลผ่านผิวเรียบหาได้

$$f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (7)$$

การสะสมพลังงานของถังสะสมพลังงานพิจารณาได้จากสมการพลังงาน จากตัวรับพลังงาน โหลดและพลังงานที่สูญเสียไป จากสมการ

$$(MC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_L - (UA)_s(T_s - T_a) \quad (8)$$

เมื่อ M เป็น มวลของตัวกลางในถังสะสมพลังงาน (kg), \dot{Q}_c เป็นอัตราพลังงานที่ได้รับของตัวรับพลังงาน (J/s), \dot{Q}_L เป็น อัตราพลังงานที่ให้กับโหลด (J/s), U เป็น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของตัวกลางในถัง (W/m^2K), T_s เป็นอุณหภูมิถังสะสมพลังงาน (K), T_a เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K) และ A เป็น พื้นที่ผิวของถังสะสมพลังงาน (m^2)

ถ้าพลังงานที่สะสมในถังสะสมพลังงานมีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา Δt จากสมการ (8) จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$T_{s,new} = T_{s,old} + T_t \quad (9)$$

$$T_t = \frac{\Delta t}{(MC_p)_s} [\dot{Q}_c - \dot{Q}_L - (UA)_s(T_{s,old} - T_a)]$$

เมื่อ $T_{s,new}$ เป็น อุณหภูมิของถังสะสมพลังงาน (K), $T_{s,old}$ เป็น อุณหภูมิของถังสะสมพลังงาน (K), M เป็น มวลของตัวกลาง (kg), C_p เป็น ความจุความร้อนจำเพาะของสารตัวกลาง ($J/kg \cdot K$), \dot{Q}_c เป็น อัตราพลังงานของตัวรับความร้อน (J), \dot{Q}_L เป็น อัตราพลังงานของโหลด (J) และ Δt เป็น เวลาการสะสมพลังงาน (s) ตามลำดับ

เมื่อของไหลในตัวรับพลังงานรับความร้อนจากแหล่งผลิตพลังงาน จะรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือ แหล่งพลังงานความร้อนอื่น (heater) ค่าพลังงานที่เกิดขึ้นกับของไหลในท่อจะเป็นตามสมการ

$$\dot{Q}_c = (\dot{m}C_{ps})_c(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (10)$$

เมื่อ \dot{m} เป็น อัตราของมวลของของไหล (kg/s), C_{ps} เป็น ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ($J/kg \cdot K$) และ $(T_{c,o} - T_{c,i})$ เป็น ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหล ออกจากท่อ กับอุณหภูมิเริ่มต้นเข้าสู่ท่อ

เมื่อท่อ HTF รับความร้อนจาก heater และ การถ่ายเทพลังงาน ความร้อนของ HTF ผ่านผนังท่อให้กับตัวกลาง $NaCl$ และพลังงานจะหยุดถ่ายเทเมื่ออุณหภูมิระหว่าง ผนังท่อกับอุณหภูมิภายในถังเท่ากัน

$$q_s = \frac{(T_b - T_s)}{\left(\frac{1}{h} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k}\right)} \quad (11)$$

เมื่อ q_s เป็นพลังงานความร้อน (J), T_b เป็นอุณหภูมิของผนังท่อ (K), T_s เป็นอุณหภูมิของสารในถัง (K), h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, k เป็นค่าสภาพการนำความร้อน r_1 เป็นรัศมีของท่อของไหล และ r_2 เป็นรัศมีของถังสะสมพลังงาน ตามลำดับ

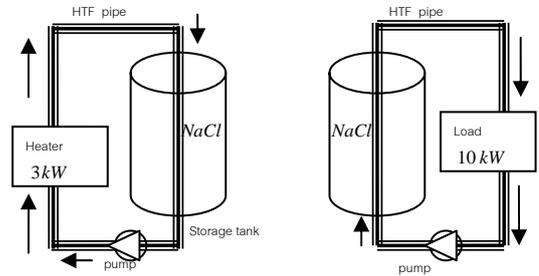
ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในถังสะสมพลังงาน เป็นพลังงานที่มาจาก HTF โหลดรับความร้อนจากตัวให้ความร้อนและถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับตัวกลาง ($NaCl$) ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของถังสะสมพลังงาน หาได้จากสมการ

$$T_s = T_a + \left[\left(T_s^{old} + \frac{q_s A}{MC_p} \right) + T_a \right] \exp \left[- \frac{(UA)_t}{(MC_p)_T} t \right] \quad (12)$$

ค่าอุณหภูมิที่ลดลงในถังสะสมพลังงาน เป็นพลังงานที่ HTF รับความร้อนจากถังและโหลดถ่ายเทพลังงานให้กับโหลด ดังนั้น ค่าอุณหภูมิที่ลดลงของถังสะสมพลังงาน หาได้จากสมการ

$$T_s = T_a + \left[\left(T_s^{old} - \frac{q_s A}{MC_p} \right) - T_a \right] \exp \left[- \frac{(UA)_t}{(MC_p)_T} t \right] \quad (13)$$

3. โมเดลและการคำนวณ



รูปที่ 2 แสดงระบบศึกษาการสะสมพลังงาน

โมเดลประกอบด้วยทรงกระบอกของถังสะสมพลังงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 cm สูง 120 cm และท่อ HTF ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0127 m ระหว่างท่อทั้งสองบรรจุ $NaCl$ ปริมาณ 150 kg ความหนาแน่น 2160 kg/m^3 ความจุความร้อนจำเพาะ $0.85 \times 10^3 \text{ J/kgK}$ มีฉนวนเป็นใยแก้วหนา 2 cm หุ้มถึงป้องกันการสูญเสียความร้อน ถึงและท่อทำจากอลูมิเนียม ความหนาแน่น 2707 kg/m^3 ความจุความร้อนจำเพาะ 897 kg/m^3 และ HTF เป็นน้ำมันสังเคราะห์ Therminol oil ที่ อุณหภูมิ $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าสภาพการนำความร้อน เป็น $0.118 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ ความหนาแน่น 714.11 kg/m^3 ค่าความจุความร้อน 2715.425 J/kgK ค่าความหนืดไดนามิก เท่ากับ $8.54 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ และ ค่าความหนืดพลวัต เท่ากับ $0.00061 \text{ m}^2/\text{s}$ และ $Pr = 14$

การถ่ายเทความร้อนโดยการ charging ให้ HTF รับความร้อนจากตัวสร้างความร้อน (Heater) ขนาด 3 kW และถ่ายเทให้กับถังสะสมพลังงาน และการ discharging ให้ HTF รับความร้อนจากถังสะสมพลังงานและถ่ายเทให้กับโหลดขนาด 10 kW การไหลวนของ HTF รับและถ่ายเทพลังงานใช้ปั๊ม (pump)

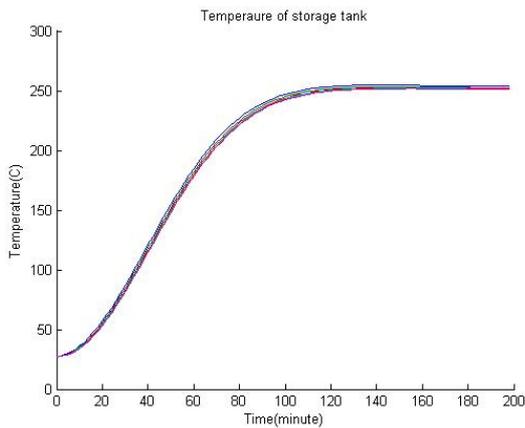
4. ผลลัพธ์

ในการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ กำหนดให้ถังสะสมพลังงาน

รับพลังงานความร้อน และ ถ่ายเทความร้อนให้กับไหลผ่านของไหล HTF ท่อและไม่ได้การสูญเสียพลังงานที่ผิวท่อ

Charge mode

เริ่มจากให้ของไหล HTF ที่อุณหภูมิ 27°C ไหลในท่อที่มีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.1,0.5,1,1.5 และ 2 kg/s ไหลผ่าน heater 3 kW เพื่อรับความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับตัวกลาง NaCl อยู่ในถังโดยความร้อนจาก HTF ที่ผิวท่อถ่ายเทจากผนังท่อให้กับตัวกลาง จนอุณหภูมิของผิวท่อเท่ากับอุณหภูมิภายในถังสะสมพลังงานเท่ากันที่ 250°C จะหยุดถ่ายเท ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา

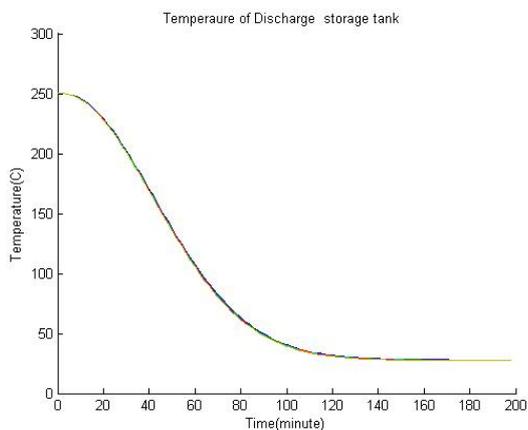


การถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิในถังสะสมพลังงาน แสดงได้ดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 แสดงอุณหภูมิในถังสะสมพลังงานเมื่อให้ความร้อน 3 kW

Discharge mode

ของไหลจาก HTF ที่อุณหภูมิ 27°C ไหลในท่อที่มีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0.1,0.5,1,1.5 และ 2 kg/s รับพลังงานความร้อนจาก ตัวกลางในถังสะสมพลังงานและถ่ายเทให้กับไหลขนาด 10 kW และ HTF จะไหลวนเพื่อรับความร้อนและถ่ายเทให้กับไหลในรูปถัดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง ผลลัพธ์แสดงการถ่ายเทความร้อนจากถังสะสมพลังงาน ให้กับ HTF แสดงดังรูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ลดลงกับเวลา



รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิลดลงในถังสะสมพลังงานให้กับไหล 10 kW

5. สรุปและอภิปรายผล

จากการประมาณค่าการสะสมพลังงานของถังสะสมพลังงานแบบความร้อนสัมผัสของ NaCl ปริมาณ 150 kg ในถังอุณหภูมิเยือกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.24 m สูง 1.2 m และมีท่อ HTF รับและถ่ายเทความร้อนผ่านกึ่งกลางถังแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกลางกับ HTF พบว่าเมื่ออัตราการไหลของ HTF 0.1,0.5,1,1.5 และ 2 kg/s รับความร้อนจาก heater และถ่ายเทให้กับถังสะสมพลังงานจะใช้เวลา 130 นาที ในการสะสมพลังงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 27°C เป็น 250°C และ เมื่อถึงมีอุณหภูมิสูงสุด 250°C HTF รับความร้อนถ่ายเทให้กับไหลด้วยอัตราการไหลค่าต่าง ๆ พบว่า จะใช้เวลา 70 นาที อุณหภูมิในถังสะสมพลังงานลดลงเหลือ 100°C และอัตราการไหลค่าต่าง ๆ มีผลต่อเวลาการแลกเปลี่ยนพลังงานน้อยมาก และถ้าเพิ่มปริมาณถังและปริมาณตัวกลางในถังพลังงานที่สะสมในถังจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

- B. S Magal. **Solar Power Engineering**. New Delhi: TataMcGraw-Hill Publishing. 208-211.
- D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Jan F. Kreider. **Principles of Solar Engineering**. 2nd ed. George H. Buchanan Co., Philadelphia, PA, 173-176.
- H P Garg & J Prakash. (1997) **Solar Energy Fundamentals and Applications**. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing. 351-355.
- H.P. garg. et al. (1985). **Solar Thermal Energy Storage**. Netherland: D.Reidel Publishing. 86-88.
- Horst Michels and Robert Pitz-Paal. **Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants**
- Ibrahim Dincer, Sadik Dost. (1996) **A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications**. International Journal of Energy Research, 20, 547-557.
- J.P Holman (1997), **Heat transfer**. United States of America: McGraw-Hill, 640-641.
- John A. Duffie and William A. Beckman. (1991). **Solar Engineering of Thermal Processes**, 2nd ed. The United State of America: John Wiley & Sons Inc.
- K.A.R Ismail, M.M. Goncalves. (1999) **Thermal performance of a pcm storage unit**, (Energy Conversion & Management 40 ,pp. 115-138.
- Kamil Kaygusuz. (1999). **The viability of thermal energy storage**, 21, 745-755.
- Kreith F, Kreider JF. (1978). **Principles of solar engineering**. New York: McGraw -Hill;
- M.A. Hamdan and F.A. Elwerr. (1996). **Thermal energy storage unit using a phase change material**, Solar Energy Vol. 56, No.2, pp. 183 – 189.

- Neumann, A., **Renewable Energy** ,(2006) ,Springer Berlin Heidelberg p246 - 279 .
- Pilkington Solar International.(1996). **Status Report on Solar Thermal Power plants**.;Report ISBN 3-9804901-0-6
- Rainer Tamme, Doerte Laing, Wolf –Dieter Steinmann.
(2003) **Advance Thermal Energy Storage Technology For Parabolic Trough** , (Proceeding of ISEC)
- Sarayooth Vaivudh, (2006) , **System design of high thermal energy storage for solar thermal power plants** ,Naresuan University.
- Soteris A. Kalogirou. (2004) **Solar thermal collectors and applications Progress in Energy and Combustion: Science** 30 231–295.
- Ulf Herrmann and David W. Kearney. (2002), **Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants**, Journal of Solar Energy Engineering Vol. 124.
- Ulf Herrmann, Bruce Kelly and Henry Price.**Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants** ,(DTD v4.3.1/Energy1121.
- Ulf Herrmann, Michael Geyer, David Kearney. (2002) **Overview on Thermal Storage Systems** ,*FLABEG Solar International GmbH*.
- William S. Janna, (1986). **Engineering Heat Transfer**, PWS Publishers.