

การศึกษาและจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อน แบบไม่เปลี่ยนเฟสในช่วงอุณหภูมิ 50 – 150 °C

Study and Simulation of Thermal – Energy Storage System
with Non-Phase Change Materials in the Range of 50 – 150 °C

ชนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ อติศักดิ์ ทองช่วย*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจำลองระบบเก็บสะสมความร้อน โดยใช้ น้ำมัน – ก้อนหินเป็นตัวกลางสะสมความร้อน มีความจุในถังขนาด 200 ลิตร แหล่งความร้อนใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวให้พลังงานความร้อน จากการศึกษาทางทฤษฎีได้ทำการวิเคราะห์ระบบด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ประกอบด้วยกรณีป้อนความร้อนเข้าและกรณีดึงความร้อนออก กรณีป้อนความร้อนเข้าอุณหภูมิที่จุดเข้าคอยล์เพื่อป้อนความร้อนเข้าควบคุมให้คงที่ 140 °C และอัตราการไหลของน้ำมันอยู่ในช่วง 10 – 18 l/min กรณีดึงความร้อนออกอุณหภูมิที่ทางเข้าคอยล์ดึงความร้อนที่ 30 °C และอัตราการไหลของน้ำในช่วง 6 – 14 l/min ผลการจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนนี้ พบว่าภายหลังที่ป้อนความร้อนเป็นเวลา 2 hr ด้วยอัตราการไหล 14 l/min สารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 60 °C คิดเป็นปริมาณของความร้อนสะสม 23 MJ และภายหลังดึงความร้อน เป็นเวลา 1 hr ด้วยอัตราการไหล 10 l/min สารตัวกลางสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ยลดลงประมาณ 58 °C ปริมาณความร้อนดึงออกทั้งหมด 23 MJ เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองกับแบบจำลองพบว่ามีค่าความแตกต่างกัน 3 – 5 %

คำสำคัญ : ระบบเก็บสะสมความร้อน, การจำลองระบบ, ไม่เปลี่ยนเฟส

Keywords : Thermal - energy storage, system simulation, Non-phase change

Abstract

This research presents a simulation study and testing on the thermal storage tank, which used river - water rocks in the used-engine oil test bed. An electric heater is used as the heat source. Beginning with the mathematic modeling for the theoretical analysis of the system, and by using the Newton – Raphson method in the simulation process during the energy charging and discharging processes. The temperature of the charging oil is held constant at 140 °C with the flow rate in the range of 10 to 18 l/min, whereas the inlet temperature of the discharge water is kept constant at 30 °C with the flow rate of 6 to 14 l/min. From the computer simulation with the charging time of 2 hours, and the oil flow rate of 14 l/min, The temperature of the storage medium is increased by 60 °C with the amount of heat gain by 23 MJ. By our further simulation on discharging for 1 hour period, with the oil flow rate of 10 l/min, the storage temperature is decreased by 58 °C, with the

* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

amount of heat removal of 23 MJ. It is found that results from the experiment are differed from the simulation by 3 – 5 %

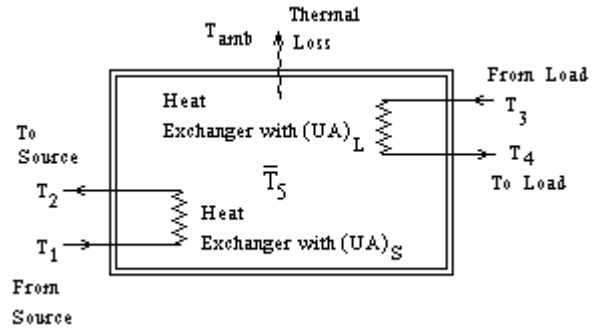
1. บทนำ

การนำพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ จะช่วยประหยัดพลังงานและยังทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมสูงขึ้น ดังนั้นระบบเก็บสะสมความร้อนแบบไม่เปลี่ยนเฟสโดยใช้สารตัวกลางที่เป็นน้ำมัน และก้อนหินรวมเข้าด้วยกันนี้ จะสามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงๆได้ การศึกษาระบบเก็บสะสมความร้อนนี้กำหนดอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 – 150 °C และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ กรณีป้อนความร้อนเข้าและกรณีดึงความร้อนออก เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อน และการจำลองระบบทางทฤษฎีด้วยวิธีนิวตัน – ราฟสัน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการไหลของน้ำมันภายในคอยล์แลกเปลี่ยนความร้อน (\dot{m}_s, \dot{m}_L), ขนาดและความยาวท่อทองแดงใช้ขดเป็นคอยล์ (l_{e_s}, l_{e_L}), อุณหภูมิที่ทางออกคอยล์ (T_2, T_4), อุณหภูมิเฉลี่ยสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อน (\bar{T}_5), ปริมาณความร้อนถ่ายโอนภายในระบบเก็บสะสมความร้อน (Q) ซึ่งทำการศึกษาและวิเคราะห์ ทั้งในกรณีป้อนความร้อนและดึงความร้อนออกจากระบบ

2. หลักการของระบบเก็บสะสมความร้อน

การศึกษาและจำลองระบบเก็บสะสมความร้อนได้ทำการสร้าง และทดสอบระบบดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย ถังสะสมความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 m สูง 0.88 m คอยล์ป้อนความร้อนและคอยล์ดึงความร้อน ทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.016 m ขดเป็นเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.48 m ซึ่งคอยล์ป้อนความร้อนติดตั้งอยู่ส่วนด้านล่าง และคอยล์ดึงความร้อนติดตั้งอยู่ด้านบนของถังเก็บสะสมความร้อน

ส่วนสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อน ใช้ น้ำมันเครื่องที่ผ่านการใช้งานแล้วและก้อนหินรวมเข้าด้วยกัน



รูปที่ 1 ระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อน

สมมติฐานการจำลองระบบ ทั้งกรณีป้อนความร้อนเข้าและดึงความร้อนออกประกอบด้วย

1. กำหนดการจำลองระบบทั้งกรณีป้อนความร้อนเข้าและดึงความร้อนออกที่ภาวะสม่ำเสมอ
2. กำหนดให้คุณสมบัติของก้อนหินที่ใช้เก็บสะสมความร้อน ไม่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในระบบเก็บสะสมความร้อน
3. กำหนดให้อุณหภูมิลิ่งแวดล้อมคงที่เท่ากับ 30 °C
4. กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของสารตัวกลางสะสมความร้อนในกรณีป้อนความร้อนเท่ากับ 30 °C
5. กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของสารตัวกลางสะสมความร้อนในกรณีดึงความร้อนออกเท่ากับ 110 °C
6. กำหนดอุณหภูมิของของไหลที่จุดเข้าคอยล์ป้อนความร้อน ให้เท่ากับ 140 °C
7. กำหนดอุณหภูมิของของไหลที่จุดเข้าคอยล์ดึงความร้อนออก ให้เท่ากับ 30 °C
8. กำหนดให้อุณหภูมิสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนสม่ำเสมอทั้งในกรณีป้อนความร้อนเข้าและดึงความร้อนออก (ไม่มีการแบ่งชั้นของอุณหภูมิในถังเก็บสะสมความร้อน)

9. เวลาใช้ในการจำลองกรณีป้อนความร้อนเท่ากับ 120 นาที

10. เวลาใช้ในการจำลองกรณีดึงความร้อนเท่ากับ 60 นาที

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

ระบบเก็บสะสมความร้อนที่แสดงในรูปที่ 1 สามารถนำสมการมาแสดงในกรณีป้อนความร้อนเข้าและกรณีดึงความร้อนออก ได้ดังนี้

3.1 กรณีป้อนความร้อนเข้าระบบ

การสูญเสียความร้อนในขณะที่ป้อนความร้อนเข้าระบบเก็บสะสม ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Sigma Q_{\text{loss}} = \frac{1}{R_T} (\bar{T}_5 - T_{\text{amb}}) \quad (1)$$

การสะสมความร้อนภายในระบบคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\Sigma Q_{\text{st}} = m \cdot c_m (\bar{T}_{5,\text{fi}} - \bar{T}_{5,\text{ini}}) \quad (2)$$

อุณหภูมิที่ออกจากคอยล์ป้อนความร้อน คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$T_2 = \exp\left(\frac{-(U.A)_S}{\dot{m}_s \cdot C_{f,s}}\right) (T_1 - \bar{T}_5) + \bar{T}_5 \quad (3)$$

อุณหภูมิสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนภายในระบบ โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\bar{T}_5(t) = C_1 + C_2 \cdot \exp(x_1 \cdot t) \quad (4)$$

3.2 กรณีดึงความร้อน

การสูญเสียความร้อนในขณะที่ดึงความร้อนออกจากระบบคำนวณ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Sigma Q_{\text{loss}} = \frac{1}{R_T} (\bar{T}_5 - T_{\text{amb}}) \quad (5)$$

การดึงความร้อนออกจากระบบ คำนวณที่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\Sigma Q_{\text{out}} = m \cdot c_m (\bar{T}_{5,\text{fi}} - \bar{T}_{5,\text{ini}}) \quad (6)$$

อุณหภูมิที่ออกจากคอยล์ป้อนความร้อน ซึ่งออกจากระบบคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$T_4 = \bar{T}_5 - \exp\left(\frac{-(U.A)_L}{\dot{m}_L \cdot C_{f,L}}\right) (\bar{T}_5 - T_3) \quad (7)$$

อุณหภูมิสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ ระหว่างที่มีการดึงเอาความร้อนออก คำนวณได้ดังนี้

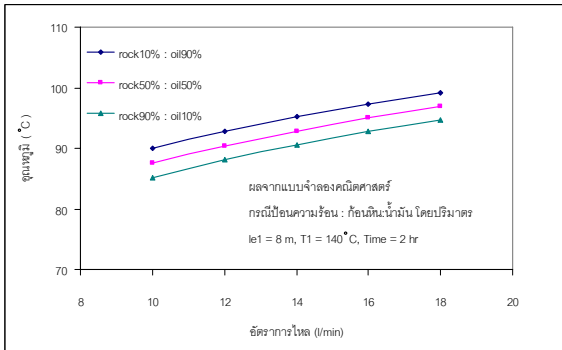
$$\bar{T}_5(t) = C_3 + C_4 \cdot \exp(x_2 \cdot t) \quad (8)$$

การจำลองระบบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร ในกรณีป้อนความร้อนเข้าและกรณีดึงความร้อนออก ดังแสดงในภาคผนวก

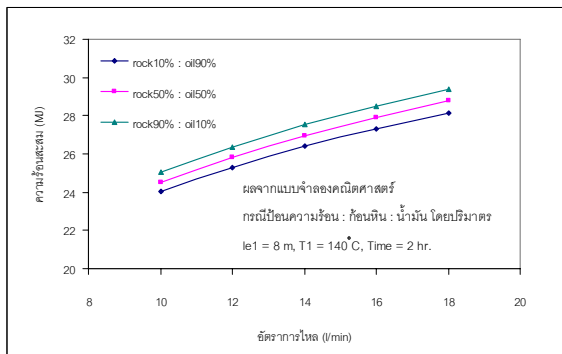
4. ผลการจำลองระบบ

ผลที่ได้จากการจำลองระบบทางทฤษฎีในกรณีป้อนความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และกรณีดึงความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารตัวกลางที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย, อุณหภูมิสารตัวกลางเฉลี่ยลดลง, ปริมาณความร้อนสะสม, ปริมาณความร้อนสูญเสีย ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลในคอยล์แลกเปลี่ยนความร้อนและอัตราส่วนโดยปริมาตรก๊อสน้ำมันกับน้ำมัน ภายในระบบเก็บสะสมความร้อน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ ระบบเก็บสะสมความร้อนด้วยสารตัวกลางชนิดที่ไม่เปลี่ยนเฟสในขณะเก็บสะสมความร้อนจำเป็นต้องเลือกสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนที่มีค่าความจุความร้อน (C_p) หรือค่าความหนาแน่น (ρ) สูงๆ จากรูปที่ 2 และรูป

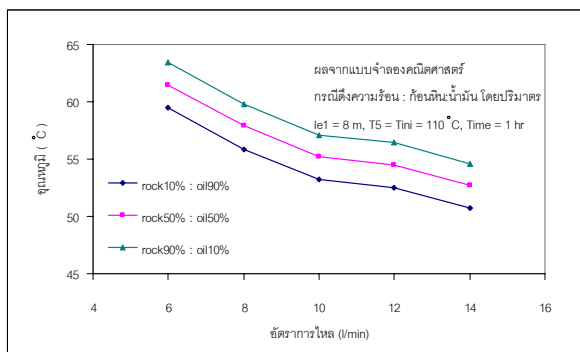
ที่ 3 พบว่าถ้าพิจารณาที่อัตราการไหลใดๆ การเพิ่มปริมาณ
ก้อนหินจะทำให้ความสามารถในการเก็บสะสมความร้อน
ในระบบสูงขึ้นประมาณ 4 % และจากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ก็
จะพบว่าถ้าระบบมีความจุความร้อนสูงแล้ว ปริมาณความ
ร้อนที่ถูกดึงออกจากระบบจะสูงขึ้นประมาณ 10 %



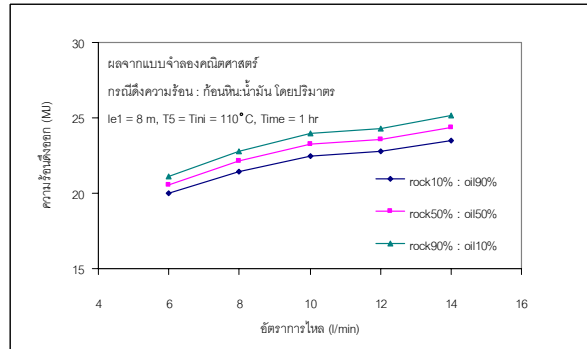
รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนกับอัตราการไหล ในกรณีเปลี่ยนความร้อน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3 แสดงปริมาณความร้อนสะสมกับอัตราการไหล ในกรณีเปลี่ยนความร้อน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนกับอัตราการไหล กรณีดึงความร้อน 1 ชั่วโมง



รูปที่ 5 แสดงปริมาณความร้อนดึงออกกับอัตราการไหล ในกรณีดึงความร้อน 1 ชั่วโมง

ผลการจำลองระบบด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน
ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดดังกล่าว พบว่าในกรณีเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลา 2 hr. สารตัวกลางมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ปริมาณความร้อนสะสม 23 MJ ที่อัตราการไหลของน้ำมันในคอยล์เปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 14 l/min และในกรณีดึงความร้อนเป็นเวลา 1 hr. สารตัวกลางมีอุณหภูมิลดลงประมาณ 58 °C ปริมาณความร้อนดึงออก 23 MJ ที่อัตราการไหลของน้ำในคอยล์ดึงความร้อนออกเท่ากับ 10 l/min การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างผลจากการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าทั้งในกรณีเปลี่ยนความร้อนและกรณีดึงความร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนกับอุณหภูมิที่ทางออกคอยล์เปลี่ยนและคอยล์ดึงความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 3 – 5 %

5. สรุปผล

จากผลการจำลองและผลการทดลองระบบเก็บสะสมความร้อนโดยใช้ก้อนหินและน้ำมันรวมเข้าด้วยกันเป็นสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อน ซึ่งปรับอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างก้อนหินกับน้ำมัน พบว่า ในกรณีเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการไหลใดๆ ถ้าใช้ก้อนหิน 90 % กับน้ำมัน 10 % แล้ว การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสารตัวกลาง T_5 ช้ากว่าที่อัตราส่วนโดยปริมาตรก้อนหิน 10 % กับน้ำมัน

90 % ซึ่งได้ผลต่างของอุณหภูมิประมาณ 5 °C ในขณะที่จำนวนของปริมาณก๊อหิน 90 % กับน้ำมัน 10 % แล้วความสามารถในการเก็บสะสมความร้อนของสารตัวกลางจะสูงขึ้นอีกประมาณ 1 MJ และในกรณีดึงความร้อนออกที่อัตราการไหลใดๆ ถ้าอัตราส่วนโดยปริมาตรก๊อหิน 90 % กับน้ำมัน 10 % อุณหภูมิของสารตัวกลางสะสมความร้อนจะลดลงช้ากว่าที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊อหิน 10 % กับน้ำมัน 90 % ผลต่างของอุณหภูมิประมาณ 5 °C ดังนั้นจากผลการศึกษาและวิจัยนี้แสดงว่าควรรีใช้ระบบเก็บสะสมความร้อนในกรณีป้อนความร้อนเข้าเป็นระยะเวลายาวนานหลายๆ ชั่วโมง เพราะทำให้สามารถใช้ปริมาณก๊อหินในอัตราส่วนที่มากกว่า 50 % โดยปริมาตรของถังเก็บสะสมความร้อนได้ ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายการลงทุนสร้างระบบลดลงและระบบมีความสามารถเก็บสะสมความร้อนสูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุน ทำให้งานวิจัยฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอีกครั้งหนึ่งมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สัญลักษณ์และหน่วย

- c_1, c_2, x_1 = แฟกเตอร์คำนวณกรณีป้อนความร้อน
 c_3, c_4, x_2 = แฟกเตอร์คำนวณกรณีดึงความร้อน
 c_f = ความร้อนจำเพาะของของไหลในคอยล์ (kJ/kg.K)
 c_m = ความร้อนจำเพาะสารตัวกลางสะสมความร้อน (kJ/kg.K)
 l_{e_s} = ความยาวท่อทองแดง คอยล์ป้อนความร้อน (m)
 l_{e_L} = ความยาวท่อทองแดง คอยล์ดึงความร้อน (m)
 m = มวลสารตัวกลางสะสมความร้อน (kg)
 \dot{m}_s = อัตราการไหลในคอยล์ป้อนความร้อน (l/min)
 \dot{m}_L = อัตราการไหลในคอยล์ดึงความร้อน (l/min)

- Q_{st} = ปริมาณความร้อนสะสม (J)
 Q_{out} = ปริมาณความร้อนดึงออก (J)
 Q_{loss} = ปริมาณความร้อนสูญเสีย (W)
 R_T = ความต้านทานความร้อนของระบบเก็บสะสมความร้อน (K/W)
 T_1 = อุณหภูมิที่ทางเข้าคอยล์ป้อนความร้อน (°C)
 T_2 = อุณหภูมิที่ทางออกคอยล์ป้อนความร้อน (°C)
 T_3 = อุณหภูมิที่ทางเข้าคอยล์ดึงความร้อน (°C)
 T_4 = อุณหภูมิที่ทางออกคอยล์ดึงความร้อน (°C)
 T_5 = อุณหภูมิเฉลี่ยสารตัวกลางสะสมความร้อน (°C)
 T_{amb} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)
 t = เวลา (sec)
 U = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (W/m²K)
 A = พื้นที่ผิวคอยล์ถ่ายโอนความร้อน (m²)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

- Loss = ความร้อนการสูญเสีย
amb = ลิ่งแวดล้อม
ini = ภาวะเริ่มต้น
out = ความร้อนดึงออก
fi = ภาวะสิ้นสุด
st = ความร้อนสะสม
L = คอยล์ดึงความร้อน
S = คอยล์ป้อนความร้อน
T = ผลรวม
f = ของไหลในท่อทองแดง
1 = ทางเข้าคอยล์ป้อนความร้อน
2 = ทางออกคอยล์ป้อนความร้อน
3 = ทางเข้าคอยล์ดึงความร้อน
4 = ทางออกคอยล์ดึงความร้อน
5 = ภายในระบบเก็บสะสมความร้อน

เอกสารอ้างอิง

1. ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ จำริญ ต้นติวังศ์วัฒน์. "การจำลองแบบระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนด้วยน้ำ." สรุปผลการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2539.
2. Stoecker, W. F. Design of Thermal System. New York : McGraw-Hill, 1989.
3. Somasundaram, S., et al. "Intergrate thermal energy storage in power plant." International Journal of Mechanical Engineering. (September 1993) : 84-90.
4. Ramachadra K. Patil "Design a helical – coil heat exchanger." International Journal of Chemical Engineering. (December 13, 1982) : 85-88.
5. Frank Kreith and Mark S. Bohn. Principle of Heat Transfer. Fifth Edition. New York : PWS Publishing Company, 1997.
6. Chapman Alan J. Heat Transfer. Fourth edition. Singapore : Macmillan Publishing Company, 1989.
7. Ozisik, M. Nacati. Heat transfer. Singapore : McGraw Hill, 1985.

ภาคผนวก

ผลที่ได้จากการจำลองระบบ นำมาจัดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อน, อัตราการไหลของมวลและความยาวท่อในกรณีป้อนความร้อนเข้าและดึงความร้อนออกจากระบบ ได้ดังต่อไปนี้

กรณีป้อนความร้อนเข้า

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน

$$\Sigma Q_{st} = f(\dot{m}_s, l_e_s) \text{ ในช่วง } 10 \leq \dot{m}_s \leq 18 \text{ l/min และ } 6 \leq l_e_s \leq 18 \text{ m}$$

$$\Sigma Q_{st} = (-2.40911 + 0.619475 \cdot \dot{m}_s - 1.80937 \times 10^{-2} \cdot \dot{m}_s^2) + (0.3167 + 0.250501 \cdot \dot{m}_s - 6.5729 \times 10^{-3} \cdot \dot{m}_s^2) \cdot l_e_s + (1.40767 \times 10^{-2} - 7.07643 \times 10^{-3} \cdot \dot{m}_s + 1.82293 \times 10^{-4} \cdot \dot{m}_s^2) \cdot l_e_s^2 \quad (9)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน

$$T_2 = f(\dot{m}_s, l_e_s) \text{ ในช่วง } 10 \leq \dot{m}_s \leq 18 \text{ l/min และ } 6 \leq l_e_s \leq 18 \text{ m}$$

$$T_2 = (140.4952 - 0.345516 \cdot \dot{m}_s + 1.32194 \times 10^{-2} \cdot \dot{m}_s^2) + (-1.63302 + 0.13554 \cdot \dot{m}_s - 3.59631 \times 10^{-3} \cdot \dot{m}_s^2) \cdot l_e_s + (4.23145 \times 10^{-2} - 3.22225 \times 10^{-3} \cdot \dot{m}_s + 8.81088 \times 10^{-5} \cdot \dot{m}_s^2) \cdot l_e_s^2 \quad (10)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน

$$\bar{T}_5 = f(\dot{m}_s, l_e_s) \text{ ในช่วง } 10 \leq \dot{m}_s \leq 18 \text{ l/min และ } 6 \leq l_e_s \leq 18 \text{ m}$$

$$\bar{T}_5 = (22.59805 + 1.962991 \cdot \dot{m}_s - 5.59996 \times 10^{-2} \cdot \dot{m}_s^2) + (1.46996 + 0.521499 \cdot \dot{m}_s - 0.013758 \cdot \dot{m}_s^2) \cdot l_e_s + (1.86577 \times 10^{-2} - 1.57083 \times 10^{-2} \cdot \dot{m}_s + 4.084199 \times 10^{-4} \cdot \dot{m}_s^2) \cdot l_e_s^2 \quad (11)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน

$$T_2 = f(l_e_s) \text{ ในช่วง } 6 \leq l_e_s \leq 18 \text{ m}$$

$$T_2 = 138.339 - 0.462839 \cdot l_e_s + 1.572249 \times 10^{-2} \cdot l_e_s^2 \quad (12)$$

ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $\bar{T}_5 = f(\dot{m}_s)$ ในช่วง
 $10 \leq \dot{m}_s \leq 18$ l/min

$$\bar{T}_5 = 39.0259 + 5.653996.\dot{m}_s - 0.153969.\dot{m}_s^2 \quad (13)$$

กรณีถึงความร้อนออก

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน
 $\Sigma Q_{out} = f(\dot{m}_L, le_L)$ ในช่วง $6 \leq \dot{m}_L \leq 14$ l/min และ
 $6 \leq le_L \leq 14$ m

$$\Sigma Q_{out} = (5.39174 + 0.87956.\dot{m}_L - 1.95858 \times 10^{-2}.\dot{m}_L^2) +$$

$$(1.2199 + 4.40627 \times 10^{-2}.\dot{m}_L - 1.63281 \times 10^{-3}.\dot{m}_L^2).le_L +$$

$$(-2.65389 \times 10^{-2} - 2.17189 \times 10^{-3}.\dot{m}_L +$$

$$6.44531 \times 10^{-5}.\dot{m}_L^2).le_L^2 \quad (14)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน
 $T_4 = f(\dot{m}_L, le_L)$ ในช่วง $6 \leq \dot{m}_L \leq 14$ l/min และ
 $6 \leq le_L \leq 14$ m

$$T_4 = (40.93443 - 0.909334.\dot{m}_L + 2.76517 \times 10^{-2}.\dot{m}_L^2) +$$

$$(0.858982 - 0.123129.\dot{m}_L + 4.258036 \times 10^{-3}.\dot{m}_L^2).le_L +$$

$$(-3.422337 \times 10^{-2} + 4.148632 \times 10^{-3}.\dot{m}_L -$$

$$1.357533 \times 10^{-4}.\dot{m}_L^2).le_L^2 \quad (15)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของ
ฟังก์ชัน
 $\bar{T}_5 = f(\dot{m}_L, le_L)$ ในช่วง $6 \leq \dot{m}_L \leq 14$ l/min และ
 $6 \leq le_L \leq 14$ m

$$\bar{T}_5 = (96.80378 - 2.188429.\dot{m}_L + 4.910517 \times 10^{-2}.\dot{m}_L^2) +$$

$$(-3.092187 - 0.111437.\dot{m}_L + 4.015572 \times 10^{-3}.\dot{m}_L^2).le_L +$$

$$(6.473016 \times 10^{-2} + 5.26567 \times 10^{-3}.\dot{m}_L -$$

$$1.513686 \times 10^{-4}.\dot{m}_L^2).le_L^2 \quad (16)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของ
ฟังก์ชัน
 $T_4 = f(le_L)$ ในช่วง $6 \leq le_L \leq 14$ m

$$T_4 = 34.60626 + 5.34973 \times 10^{-2}.le_L - 6.31237 \times 10^{-3}.le_L^2 \quad (17)$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะอยู่ในรูปของ
ฟังก์ชัน
 $\bar{T}_5 = f(\dot{m}_L)$ ในช่วง $6 \leq \dot{m}_L \leq 14$ l/min

$$\bar{T}_5 = 72.355 - 2.776249.\dot{m}_L + 7.412439 \times 10^{-2}.\dot{m}_L^2 \quad (18)$$