แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบเก็บรักษาความร้อนที่อาศัยความร้อนแฝง

สุวิทย์ แซ่เตีย*
ศักรินทร์ ภูมิรัตน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงระบบเก็บรักษาความร้อนที่อาศัยความร้อนแฝงที่อุณหภูมิปานกลาง (200 - 300°C) โดยใช้เกลือยูเทคติกของ $NaNO_3$- KNO_3 (54 : 46% โมล) เป็นตัวกลาง ระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาด 3 กิโลวัตต์-ชม. โดยมีลักษณะเป็นเครื่องถ่ายเทความร้อนซึ่งสารตัวกลางบรรจุอยู่ในท่อเหล็กไร้สนิมและวางเป็นชั้น ๆ ขวางกับทิศทางการไหลของของไหล ผลจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และประสิทธิภาพในการเก็บความร้อนของระบบมีค่าประมาณ 90% อย่างไรก็ดีบางส่วนของโมเดลยังต้องมีการปรับปรุงแก้ไข เช่น เพิ่มผลของการพาความร้อนโดยธรรมชาติในสารตัวกลาง การสูญเสียความร้อนของระบบ เป็นต้น รวมทั้งการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารตัวกลาง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจริง ๆ

* ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจ.ธ.

1. บทนำ

ในงานวิศวกรรมหลาย ๆ อย่าง จะมีปัญหาเกี่ยวข้องกับการหลอมเหลวและแข็งตัวของสาร เช่น การทำน้ำแข็ง, การแข็งตัวของโลหะในแบบหล่อ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำเอาการเปลี่ยนวัฏภาคของสารมาใช้ประโยชน์ในการเก็บรักษาความร้อน ซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนแฝง เพื่อใช้กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ หรือในแง่ประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่ง

การแก้ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนมีความยุ่งยาก เพราะมีการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลวเมื่อเวลาเปลี่ยนไป รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น, ความร้อนจำเพาะ จะมีการเปลี่ยนแปลงขณะที่สารเกิดการเปลี่ยนวัฏภาค การหาคำตอบที่ถูกต้อง (exact solution) จะซับซ้อนและลำบากจึงไม่ค่อยนิยมกัน ในทางปฏิบัติมักใช้วิธีการเชิงเลข(numerical method) เพราะสามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณได้

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองระบบเก็บรักษาความร้อนที่อาศัยความร้อนแฝงที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งมีสารตัวกลางคือ เกลือยูเทคติก KNO_3-$NaNO_3$ บรรจุอยู่ในกลุ่มท่อกลม วางเรียงเป็นชั้น ๆ ในถังรูปสี่เหลี่ยม โดยที่แนวแกนของท่อเหล่านี้ตั้งฉากกับทิศทาง

2. การถ่ายเทความร้อนขณะที่สารเกิดการเปลี่ยนสถานะ

การแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในที่นี้จะใช้วิธี enthalpy method[1],[2] ซึ่งมีข้อดีที่ว่า สามารถใช้ได้กับสารที่มีจุดหลอมเหลวเป็นช่วง เพราะจากการทดสอบสารตัวกลาง คือ เกลือยูเทคติก KNO_3-$NaNO_3$ พบว่าอุณหภูมิที่สารหลอมเหลวอยู่ในช่วง 210 - 225°C[3] (ที่เป็นเช่นนี้เพราะใช้สารเกรดการค้า ซึ่งมีสิ่งเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก แต่ราคาของสารจะถูก) โดยสมการควบคุมที่ได้จะใช้วิธีการเชิงเลขในการหาคำตอบ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

พิจารณาสารที่อยู่ในลักษณะทรงกระบอก ดังรูปที่ 1 ซึ่งแบ่งความยาวของรัศมีออกเป็น 5 ส่วน โดยจุดที่ 6 อยู่นอกสุด และจุดที่ 1 อยู่ที่จุดศูนย์กลาง แต่ละส่วนกว้าง S และ $S = \frac{r}{5}$

จากสมการ Fourier ในรูป 1 มิติ จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{k}\frac{\partial H}{\partial t} \qquad \text{.....(1)}$$

สมการ 1 เขียนในรูป Finite difference ได้เป็น

$$\frac{T_{K+1} + T_{K-1} - 2T_K}{S^2} + \frac{1}{(K-1)S}\frac{T_{K+1} - T_K}{S} = \frac{1}{k}\frac{H'_K - H_K}{t} \qquad \text{.....(2)}$$

เมื่อ K มีค่า 1, 2,...6 และ H'_K เป็นเอนทาลปีของชั้น K หลังจากที่เวลาผ่านไป t

$$H'_K = H_K + \frac{k\Delta t}{S^2}\left[T_{K+1} + T_{K-1} - 2T_K + \frac{1}{K-1}(T_{K+1} - T_K) \right] \qquad \text{.....(3)}$$

เนื่องจากเอนทาลปีแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นจากสมการ 3

$$\frac{\partial H'_K}{\partial T_K} = \frac{\partial H_K}{\partial T_K} + \frac{k\Delta t}{S^2}\left(-2 - \frac{1}{K-1}\right) > 0$$

$$\Delta t \leq \frac{(\partial H_K / T_K)S^2}{\left[2 + \frac{1}{K-1}\right]k} \qquad \text{.....(4)}$$

ถ้าสารถูกทำให้หลอมจาก T_1 ไปเป็น T_2 โดยที่ $T_1 < T_m < T_2$ และให้ H แปรผันตรงกับอุณหภูมิ T ดังนั้น H ในแต่ละช่วงอุณหภูมิมีค่าดังนี้

ช่วง T_1 ถึง T_m $H = \rho_s C_{ps}(T - T_1)$ .....(5a)

ที่ T_m $H = \rho_s C_{ps}(T_m - T_1) + \rho_m H_f$ .....(5b)

ช่วง T_m ถึง T_2 $H = \rho_s C_{ps}(T_m - T_1) + \rho_m H_f + \rho_L C_{pL}(T - T_m)$ ...(5c)

ในกรณีที่สารหลอมเหลวเป็นช่วงอุณหภูมิจาก T_{m1} ถึง T_{m2} สมการ (5b) และ (5c) เขียนได้ดังนี้

ช่วง T_{m1} ถึง T_{m2} $H = \rho_s C_{ps}(T_{m1} - T_1) + \frac{\rho_m H_f (T - T_{m1})}{T_{m2} - T_{m1}}$ ....(5d)

ช่วง T_{m2} ถึง T_2 $H = \rho_s C_{ps}(T_{m1} - T_1) + \rho_m H_f + \rho_L C_{pL}(T - T_{m2})$...(5e

ค่า $(\partial H_K/\partial T_K)$ ต่ำสุด สามารถหาได้จากสมการ (5a) ถึง (5e) เมื่อนำไปแทนในสมการ 4 ก็จะได้ค่า Δt

เมื่อเวลา $t = 0$ ค่าอุณหภูมิและเอนทาลปีของทั้ง 6 จุด เราทราบค่าพอ $t > 0$ T_6 มีค่าเปลี่ยนไป เราหาค่า H_6 ใหม่ โดยเลือกใช้สมการ(5a) ถึง (5c) ส่วนจุดที่ 5 ถึง 2 หาค่าเอนทาลปีใหม่ได้โดยใช้สมการที่ 3 และอุณหภูมิใหม่หาได้จากการเลือกใช้สมการ (5a) ถึง (5e) โดยใช้ค่าเอนทาลปีใหม่ที่หาได้เป็นหลัก ส่วนจุดที่ 1 เราหาค่า H'_K ได้จากสมการสมดุลย์พลังงานระหว่างจุด 1 และ 2 คือ

$$\frac{k(T_{K+1} - T_K).\pi(S)L}{S} \cdot \Delta t = \pi \left(\frac{S}{2}\right)^2 L (H'_K - H_K)$$

โดยที่ $K = 1$ และ L = ความยาวท่อที่บรรจุสารตัวกลาง

$$H'_K = H_K + \frac{4k \Delta t}{S^2} (T_{K+1} - T_K) \quad \text{.....(6)}$$

เมื่อได้ค่า H'_K เราก็หาอุณหภูมิค่าใหม่ของจุดที่ 1 ได้ในทำนองเดียวกับจุดอื่น ๆ

อนึ่งวิธีการที่กล่าวมานี้สามารถใช้ได้ทั้งการแข็งตัวและหลอมเหลวของสาร ส่วนภาชนะที่มีลักษณะทรงกลม ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน โดยเริ่มต้นจากสมการ 1

3. <u>การสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับหน่วยเก็บรักษาความร้อนที่อาศัยความร้อนแฝง</u>

สำหรับระบบเก็บรักษาความร้อนที่อาศัยความร้อนแฝง ซึ่งมีสารตัวกลางบรรจุอยู่ในกลุ่มท่อกลม วางเรียงเป็นชั้น ๆ ในถังรูปสี่เหลี่ยม โดยที่แนวแกนของท่อเหล่านี้จะตั้งฉากกับทิศทางการไหลของของไหลที่ใช้ถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ (รูปที่ 2) จากหลักการของระบบ เราอาจสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบได้ดังนี้

3.1 <u>ช่วงให้ความร้อนแก่ระบบ</u> ในช่วงนี้สารตัวกลางเริ่มตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึง M แต่ละชั้นมีท่อบรรจุสารตัวกลางอยู่ P ท่อ แล้วตั้งสมมติฐานดังนี้

1. เนื่องจากสารตัวกลางวางขวางกับทิศทางการไหลของ ๆ ไหลถ่ายเทความร้อนทำให้ของไหลเกิดการผสมกัน นอกจากนี้ของไหลร้อนซึ่งไหลเข้าทางด้านล่างของถังจะเกิดการลอยตัวสูงด้านบน เพราะว่ามีความหนาแน่นน้อยกว่า ทำให้เกิดการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ดังนั้นเราจึงสมมติให้ของไหลภายในถังมีการผสมกันเป็นอย่างดี และมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งถัง

2. สมมติให้ค่าการนำความร้อน, ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่นของสารตัวกลางมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

3. ในการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อผ่านสารตัวกลางในแต่ละชั้นนั้น เราสมมติให้มีแต่การนำเท่านั้น และเป็นแบบการถ่ายเทในทิศทางเดียว (ในทิศทางรัศมีของท่อ) ส่วนทิศทางตามความยาวของท่อนั้นไม่คิด เนื่องมาจากอัตราส่วนของความยาวท่อกับรัศมีมีค่ามากกว่าหนึ่งมาก และเพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานข้อ 1.

4. โลหะที่ใช้ทำท่อมีค่าการนำความร้อนสูงพอและผิวท่อบาง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อด้านนอกและใน มีค่าเท่ากัน

5. ขณะที่สารตัวกลางแข็งตัว หรือหลอมเหลว จะมีปริมาตรเต็มท่ออยู่เสมอ

6. หน่วยเก็บรักษาความร้อนมีการหุ้มฉนวนเป็นอย่างดี ทำให้การสูญเสียความร้อนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

จากรูปที่ 2 และข้อสมมติฐานเมื่อทำสมดุลย์พลังงานของระบบจะได้

พลังงานที่เข้า − พลังงานที่ออก = พลังงานสะสม + พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม

(7)

เนื่องจากเราสมมติให้ของไหลถ่ายเทความร้อนในถังเก็บรักษาความร้อนมีการผสมกันเป็นอย่างดี ดังนั้นจากสมการ (7) เขียนได้เป็น

$$m_f C_{pf}(T_i - T_o) = \rho_f V_f C_{pf} \frac{dT_o}{dt} + Q_{pcm} \quad \ldots\ldots(8)$$

อัตราความร้อนที่สารตัวกลางได้รับ $Q_{pcm} = h_w PAM(T_o - T_w)$ .....(9)

ในการคำนวณเราจะทราบค่า T_o, อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ และคุณสมบัติของของไหลถ่ายเทความร้อนที่เวลา $t = 0$ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น $t = t_1$ เราจะสมมติค่า T_o แล้วนำไปแทนในสมการ(8) ก็จะได้ค่า Q_{pcm} เมื่อแทน Q_{pcm} ในสมการ (9) ก็จะหาค่า T_w ได้ โดยที่ค่า h_w หาจากสมการของ Colburn[4] ที่ใช้ในกรณีของไหลไหลตั้งฉากกับท่อกลมที่มีขนาดตั้งแต่ 10 แถวขึ้นไป คือ

$$\frac{h_w}{C_{pf}G_{max}} \left(\frac{C_{pf}\mu_f}{k_f}\right)^{3/2} = \frac{a}{(D_t G_{max}/\mu_f)^b} \quad .....(10)$$

ค่า a และ b ขึ้นอยู่กับ Reynold's no.(Re) และการจัดเรียงท่อ[4]

จากค่า T_w ที่ได้เรานำไปหาค่าอุณหภูมิและเอนทาลปีของสารตัวกลางในท่อด้วยวิธีการเชิงเลขดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นปริมาณความร้อนที่สารตัวกลางได้รับมีค่า

$$Q'_{pcm} = MP \sum_{K=1}^{6} V_K(H'_K - H_K) \quad .....(11)$$

นำค่า Q'_{pcm} ที่ได้ไปแทนในสมการ (8) จะได้ค่า T_o (ใหม่) เปรียบเทียบค่า T_o (ใหม่) กับ T_o (เก่า) ถ้ายังไม่ใกล้เคียงกันก็สมมติค่า T_o แล้วทำการคำนวณเช่นเดิมจนกระทั่ง T_o (ใหม่) $\simeq$ T_o (เก่า)

เมื่อเวลาเป็น $t = t_2$ การคำนวณก็ทำเช่นเดียวกับ $t = t_1$ จนกระทั่งครบเวลาตามต้องการ ผลการคำนวณจะทำให้ทราบถึงผลการกระจายของอุณหภูมิของสารตัวกลางในท่อและอุณหภูมิของ ๆ ไหลที่ทางออก รวมทั้งปริมาณความร้อนที่สารตัวกลางและของไหลถ่ายเทความร้อนภายในถังได้รับ

3.2 <u>ช่วงดึงความร้อนออกจากระบบ</u> ในช่วงนี้ของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำจะไหลเข้าทางด้านล่างของถัง และมีความหนาแน่นมากกว่าส่วนที่อยู่ภายในถัง ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นผลของการพาความร้อนโดยธรรมชาติจึงมีน้อยมาก ทำให้ของเหลวในถังมีอุณหภูมิในลักษณะแยกชั้น เราจึงเปลี่ยนสมมติฐานข้อ 1. ในหัวข้อ 3.1 เป็นดังนี้ คือสมมติให้อุณหภูมิ

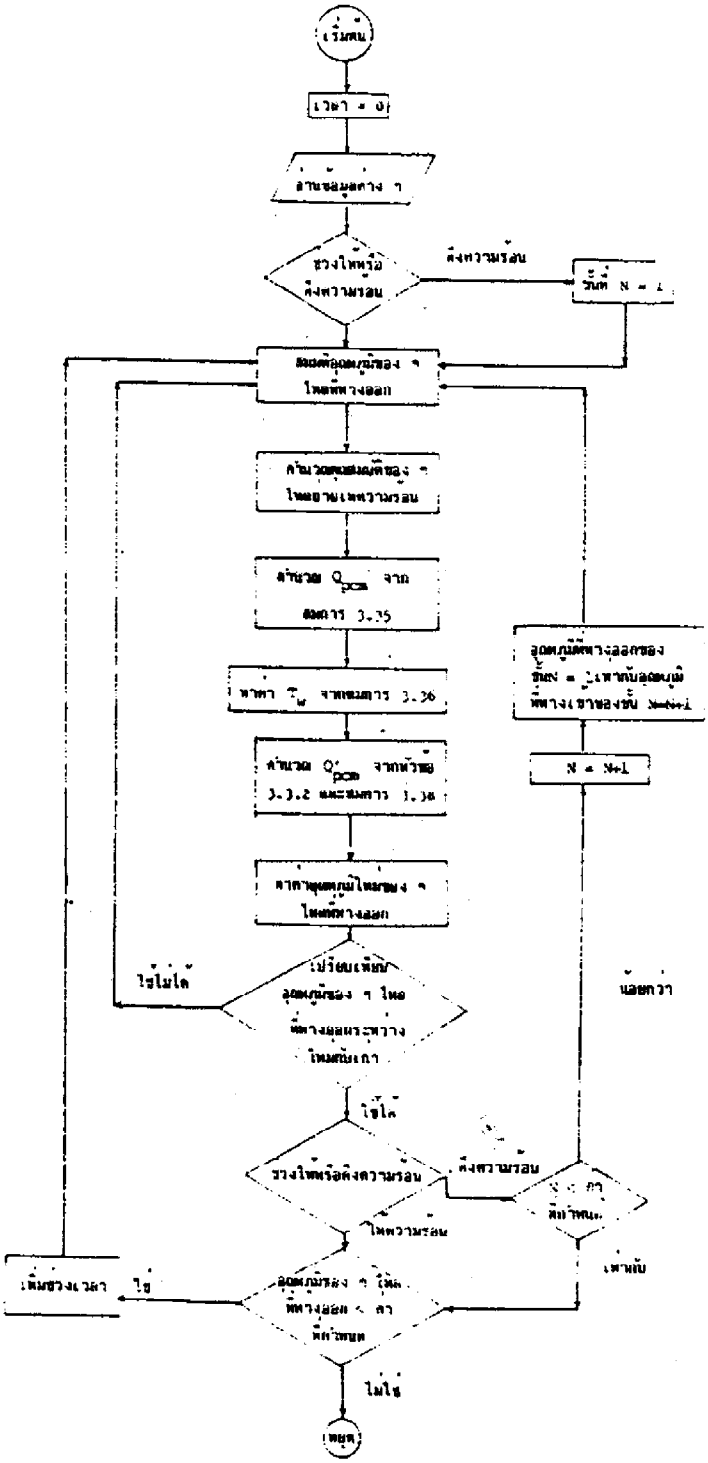
ของของไหลเปลี่ยนในทิศทาง x เท่านั้น ส่วนในทิศทาง y และ z นั้น $\frac{\partial T}{\partial y} \simeq \frac{\partial T}{\partial z} \simeq 0$ (รูปที่ 2) ทั้งนี้เนื่องมาจาก การเรียงท่อในลักษณะตั้งฉากกับทิศทางการไหลของของไหล จะทำให้ของไหลเกิดการผสมกันในทิศทาง y และ z ได้เป็นอย่างดี ส่วนสมมติฐานข้อ 2 - 6 ในหัวข้อ 3.1 ยังคงใช้ได้อยู่

ในการคำนวณเราจะแบ่งถังเก็บรักษาความร้อนเป็นชั้น ๆ จาก 1 ถึง N ดังรูปที่ 3 ในแต่ละชั้นจะมีแถวของท่อบรรจุสารตัวกลางอยู่ M แถว และของเหลวมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งชั้น เริ่มต้นที่ชั้นที่ N = 1 สมมติอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกของชั้นที่ N = 1 เป็น $T_{o,N}$ แล้วคำนวณในทำนองเดียวกับหัวข้อ 3.1 จนกระทั่ง $T_{o,N}$ (ใหม่) $\simeq$ $T_{o,N}$ (เก่า)

หลังจากนั้นให้ $T_{o,N} = T_i$ ของชั้นที่ N + 1 แล้วคำนวณโดยใช้วิธีเดียวกันจนกระทั่งครบ N ชั้น

เมื่อ $t = t_2$ การคำนวณก็ทำในลักษณะเดิม จนกระทั่งครบเวลาตามต้องการ ในกรณีนี้จะทำให้ทราบถึงการกระจายอุณหภูมิของสารตัวกลางในท่อและของของไหลตามความสูงของถัง รวมทั้งปริมาณความร้อนที่สารตัวกลางและของไหลถ่ายเทความร้อนภายในถังได้รับ

เนื่องจากการคำนวณทั้งในช่วงให้ความร้อนและดึงความร้อนออกจากระบบ มีขั้นตอนมาก จึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วย ซึ่งมีลำดับการคำนวณดังนี้



4. อุปกรณ์และวิธีทดลอง

หน่วยเก็บรักษาความร้อนที่อาศัยความร้อนแฝงขนาด 3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมี $NaNo_3$-KNO_3 เป็นตัวกลางได้ถูกออกแบบ และสร้างขึ้นดังรูปที่ 4[5] โดยใช้น้ำมัน Caltex texatherm เป็นของไหลถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัพเปิลชนิดโครเมล-อลูเมล และเครื่องบันทึกข้อมูล โดยทำการวัดอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางเข้าและออกจากระบบตามความสูงของถัง และวัดอุณหภูมิของสารตัวกลางในท่อที่อยู่ชั้นบนสุด ซึ่งอยู่ตรงกลางเพียงท่อเดียว

การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ก. การให้ความร้อนแก่หน่วยเก็บรักษาความร้อนซึ่งทำได้โดยให้น้ำมันร้อนอุณหภูมิคงที่ (ประมาณ 240°C) ไหลเข้าสู่ถังเก็บรักษาความร้อน ทางด้านล่างด้วยอัตราคงที่ ซึ่งอุณหภูมิของระบบตอนเริ่มต้นประมาณ 200°C บันทึกอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ทุก 2 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของสารตัวกลางที่วัดมีค่า 230°C จึงหยุด

ข. การดึงความร้อนออกจากหน่วยเก็บรักษาความร้อน ซึ่งจะทำต่อเนื่องกับข้อ ก. โดยปั๊มน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 190°C เข้าสู่ถังทางด้านล่างด้วยอัตราคงที่ บันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทุก 2 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางออกมีค่า 200°C จึงหยุด

5. ผลการทดลอง

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้น เมื่อคำนวณอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงกับเวลา แล้วนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะได้ดังรูปที่ 5 ก–ง ซึ่งเป็นช่วงให้ความร้อนแก่ระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำมัน 3.6648 กก./นาที และรูปที่ 6 ก–จ เป็นช่วงที่ดึงความร้อนออกจากระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำมัน 3.4 กก./นาที ส่วนรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนสะสม ขณะให้และดึงความร้อนระหว่างผลการคำนวณกับการทดลอง

นอกจากนี้ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ระบบเก็บรักษาไว้หรือดึงออกไปใช้งาน รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออก และประสิทธิภาพของระบบเก็บรักษาความร้อน เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและคำนวณจะได้ผลดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

6. สรุปผลและวิจารณ์

จากผลการทดลองและการคำนวณที่ได้พอสรุปได้ดังนี้

6.1 ช่วงให้ความร้อนแก่ระบบ

1. เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 5 ก. ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางออกกับเวลาพบว่า ผลการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลอง โดยที่ในช่วงแรกการทดลองจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อย (ประมาณ 2 - 5°C) เมื่อเวลามากขึ้น ค่าจะใกล้เคียงขึ้นจนถึงเวลาค่าหนึ่งอุณหภูมิจะเท่ากัน หลังจากนี้ผลการทดลองจะมีค่าสูงกว่าการคำนวณ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเนื่องมาจาก

ก) ในการคำนวณเราสมมติคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คือ ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความร้อนจำเพาะของสารตัวกลาง ให้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ข) ขณะที่สารเกิดการหลอมเหลว ในการคำนวณเราสมมติให้การถ่ายเทความร้อนในสารตัวกลางมีแต่การนำเท่านั้น แต่ในการทดลองจะมีทั้งการนำและการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริง ๆ มีค่ามากกว่าการคำนวณ เป็นเหตุให้อุณหภูมิของน้ำมันที่ออกมีค่าแตกต่างกัน

ค) ในการคำนวณจะสมมติให้อุณหภูมิของน้ำมันที่ทางเข้าคงที่ แต่ในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ง) ในการคำนวณระบบจะมีแต่น้ำมันและสารตัวกลางอยู่ในระบบเท่านั้น ไม่ได้นำโครงสร้างเหล็กที่อยู่ภายในมาคิดด้วย ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้สามารถเก็บความร้อนในรูปความร้อนสัมผัสได้ส่วนหนึ่ง เป็นผลให้อุณหภูมิน้ำมันที่ทางออกแตกต่างกัน

2. จากกราฟรูปที่ 5 ข-ง ซึ่งเป็นกราฟแสดงอุณหภูมิของสารตัวกลางภายในท่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา โดยที่ห่อบรรจุสารที่ทำการวัดอุณหภูมินี้จะวางอยู่ชั้นบนสุด ตรงกลางของถังเก็บรักษาความร้อน พบว่าผลการทดลองและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะที่แตกต่างไปจากการคำนวณจะมีลักษณะสอดคล้องกับอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางออกดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากเหตุผลเดียวกับที่ให้ไว้ในกรณีของอุณหภูมิน้ำมันที่ทางออก

6.2 <u>ช่วงดึงความร้อนออกจากระบบ</u>

1. พิจารณากราฟรูปที่ 6 ก. ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางออกกับเวลา พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าการทดลอง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก

ก) ในการคำนวณคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวกลางถูกสมมติให้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ข) ในการคำนวณ เราแบ่งถังเก็บรักษาความร้อนเป็นชั้น ๆ 4 ชั้น โดยสมมติให้น้ำมันในแต่ละชั้นมีการผสมกันเป็นอย่างดี ซึ่งอาจจะเป็นการแบ่งที่หยาบเกินไป

ค) ในการคำนวณไม่ได้นำความร้อนสัมผัสของโครงสร้างมาคิด แต่ในการทดลองความร้อนเหล่านี้จะถูกดึงออกไปใช้งานด้วย

2. จากกราฟรูปที่ 6 ข-ง แสดงอุณหภูมิของสารตัวกลางที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในท่อกับเวลา พบว่าในช่วงแรกผลการคำนวณและทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความแตกต่างจะมากขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น โดยเฉพาะอุณหภูมิของผนังท่อ (รูปที่ 6 ค) จะแตกต่างมากที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากข้อผิดพลาดที่ได้กล่าวมาแล้วในการพิจารณาอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางออก อย่างไรก็ดีผลที่ได้จะสอดคล้องกับรูปที่ 6 ก. กล่าวคือในการทดลองอุณหภูมิของสารจะต่ำกว่าการคำนวณ แสดงว่าความร้อนถูกดึงออกไปมากกว่าด้วย เป็นผลทำให้อุณหภูมิน้ำมันที่ทางออกมีค่ามากกว่าการคำนวณ

6.3 <u>การหาปริมาณความร้อนที่ให้และดึงออกจากระบบ รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบในการเก็บรักษาความร้อน</u>

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์จะได้ดังรูปที่ 7 พบว่าในช่วงให้ความร้อนผลการทดลองจะมีค่ามากกว่าการคำนวณ โดยที่ความแตกต่างในช่วงแรกจะน้อย และมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าที่ได้จะแตกต่างกันประมาณ 16% ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากในการคำนวณไม่ได้คิดถึงผลของความร้อนสัมผัสที่ภาชนะบรรจุและโครงสร้างภายในถังได้รับ ซึ่งจากการคำนวณคร่าว ๆ เฉพาะภาชนะบรรจุพบว่ามีค่าประมาณ 2 - 4 % ของความร้อนทั้งหมดที่ให้แก่ระบบ ดังนั้นความร้อนสัมผัสจากโครงสร้างต่าง ๆ ในถังจะประมาณ 7 - 12% ส่วนในช่วงคืงความร้อนออกจากระบบค่าที่ได้จากการทดลองจะสูงกว่าการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับช่วงให้ความร้อน กล่าวคือ ในช่วงให้ความร้อนการทดลองมีค่ามากกว่า ดังนั้นเวลาคืงความร้อนออกจากระบบก็จะคืงออกได้มากกว่าด้วย

ส่วนประสิทธิภาพในการเก็บรักษาความร้อนของระบบ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นว่าการคำนวณและทดลองให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 90% นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 ซึ่งเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาและคืงความร้อนออกจากระบบของการคำนวณและการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C พบว่าในช่วงให้ความร้อนจะใช้เวลาน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ 25% ที่เป็นเช่นนี้ เพราะในการทดลองจะมีผลของการพาความร้อนโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในสารตัวกลาง แต่ในการคำนวณเราสมมติให้ภายในสารตัวกลางเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการนำเท่านั้น ในช่วงคืงความร้อน ค่าการทดลองและคำนวณมีค่าแตกต่างกันเพียง 8% เท่านั้น แสดงว่าให้ผลที่ถูกต้องพอสมควร

อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าผลการทดลองและคำนวณจะเป็นที่น่าพอใจ แต่ก็ยังมีปัญหาที่ต้องวิจัยเพิ่มเติมคือ

1. ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของสารตัวกลาง $NaNO_3$-KNO_3 เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจริง ๆ

2. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนลักษณะของเครื่องถ่ายเทความร้อน เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ

3. พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ โดยคิดถึงผลของการสูญเสียความร้อนและการพาความร้อนโดยธรรมชาติในสารตัวกลาง เป็นต้น

4. ศึกษาถึงปัญหาในการขยายขนาดของระบบเพื่อนำไปใช้งานอย่างจริงจัง เช่น การซ่อมบำรุงถ้าเกิดการรั่วของสารตัวกลาง และปัญหาการกัดกร่อนของสารตัวกลางที่มีต่อภาชนะที่บรรจุ เป็นต้น

7. สัญญลักษณ์

a, b	=	ค่าคงที่
A	=	พื้นที่ผิว
C_p	=	ความร้อนจำเพาะ
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลาง
G_{max}	=	อัตราการไหลโดยน้ำหนัก ต่อพื้นที่สูงสุด
H	=	เอนทาลปี
H_f	=	ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว
H'	=	เอนทาลปีเมื่อเวลาผ่านไป Δt
h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
L	=	ความยาวท่อที่บรรจุสารตัวกลาง
M	=	จำนวนแถวของท่อ
P	=	จำนวนท่อบรรจุสารตัวกลางใน 1 แถว
Q	=	ปริมาณความร้อน
r	=	รัศมี
S	=	ระยะความกว้างที่แบ่งในแนวรัศมี
T	=	อุณหภูมิ
t	=	เวลา
V	=	ปริมาตร

η	=	ประสิทธิภาพทางความร้อน
ρ	=	ความหนาแน่น
μ	=	ความหนืด

<u>ตัวกำกับล่าง</u>

f	=	ของไหลถ่ายเทความร้อน
i	=	ทางเข้า
K	=	จุดที่แบ่งในแนวรัศมีของท่อบรรจุสารตัวกลาง
L	=	ของเหลว
$m; m_1, m_2$	=	จุดหลอมเหลว
o	=	ทางออก
pcm	=	สารตัวกลาง
t	=	ท่อ
w	=	ผนังท่อ
1	=	จุดเริ่มต้น
2	=	จุดสุดท้าย

<u>ตัวกำกับบน</u>

'	=	จากการคำนวณ

8. เอกสารอ้างอิง

1. Alberti, P. et.al, Energy Storage System for Solar Energy Plants, Part 2, Urbino, Italy, 1979.

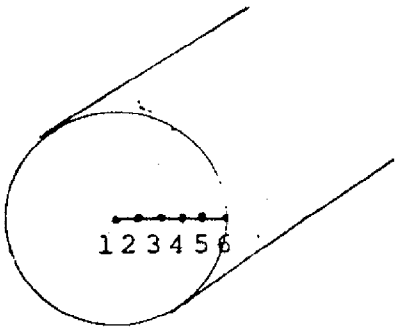
2. Voller, V. and Cross, M., Accurate Solutions of Moving Boundary Problems Using the Enthalpy Method, Int. J. Heat and Mass Transfer 24, P.545-556. 1981.

3. สุวิทย์ แซ่เตีย และศักรินทร์ ภูมิรัตน, การเลือกสารตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับเก็บสะสมพลังงานความร้อนโดยอาศัยความร้อนแฝงที่อุณหภูมิปานกลาง, เอกสารวิชาการสัมมนาเรื่อง Non-Conventional Energy & Application, สสท.ร่วมกับ สจ.ธ., 3 - 5 พ.ย. 2524

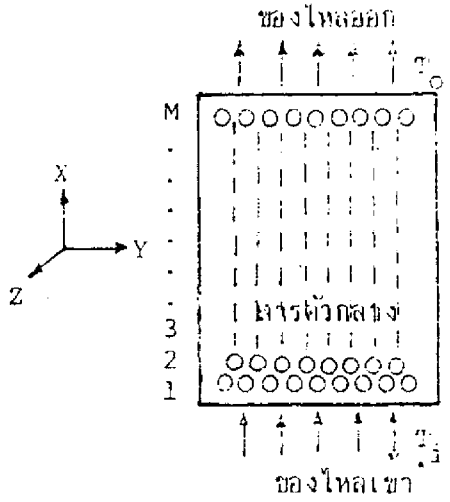
4. Perry, R.H. et.al., Chemical Engineers' Hand book, 5th ed., McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, P.(3-110)-(3-113), 1973.

5. สุวิทย์ แซ่เตียและศักรินทร์ ภูมิรัตน, การเก็บรักษาพลังงานความร้อนโดยอาศัยความร้อนแฝงซึ่งใช้ $NaNO_3$-KNO_3 เป็นตัวกลาง, เอกสารวิชาการสัมมนาเรื่อง พลังงานนอกแบบและการประยุกต์, สสท.ร่วมกับ สจ.ธ., 16-18 มีนาคม 2526

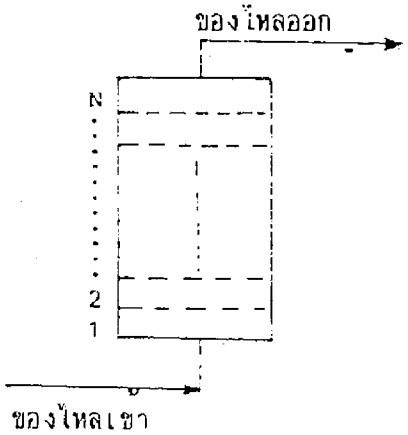
6. สุวิทย์ แซ่เตีย, การศึกษาระบบเก็บรักษาความร้อนโดยอาศัยความร้อนแฝงที่อุณหภูมิปานกลาง, วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, เทคโนโลยีพลังงาน, สจ.ธ.ม 2526



รูปที่ 1 การแบ่งระยะในแนวรัศมีของสาร
รูปทรงกระบอก



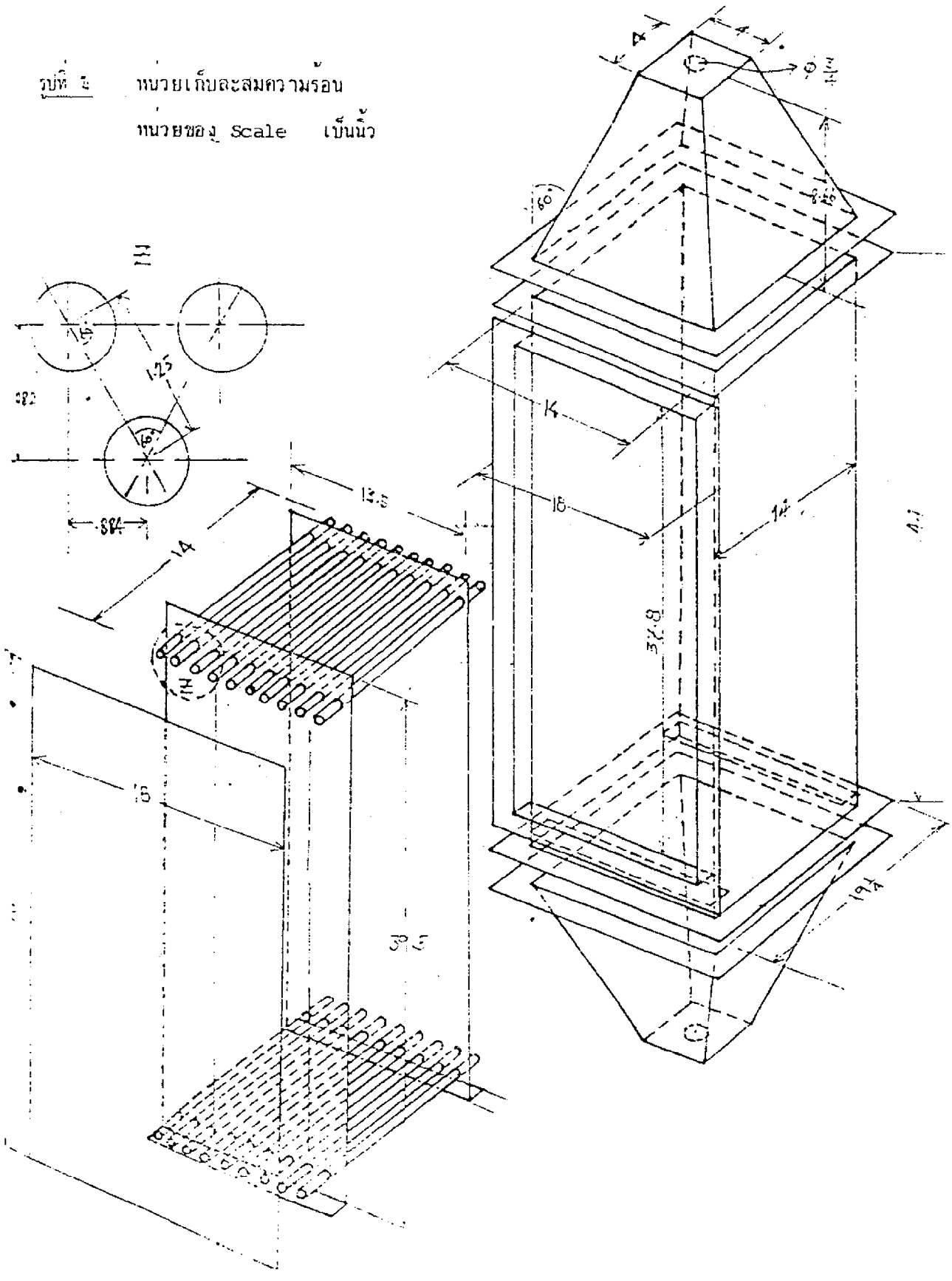
รูปที่ 2 หน่วยเก็บรักษาความร้อน
ที่อาศัยความร้อนแฝง

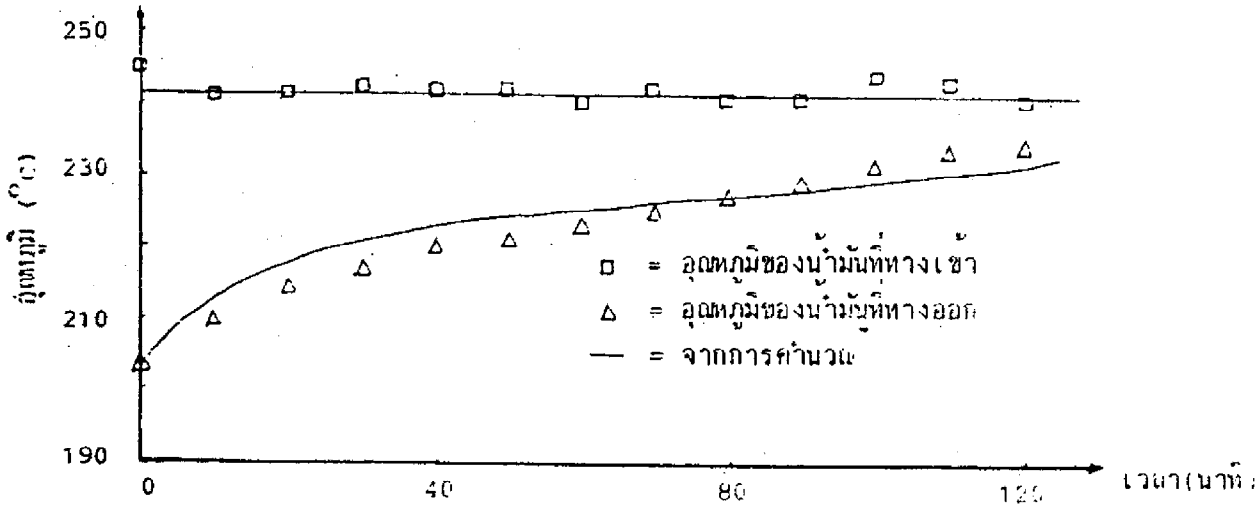


รูปที่ 3 แสดงการแบ่งถังเก็บรักษาความร้อนออกเป็นชั้น ๆ

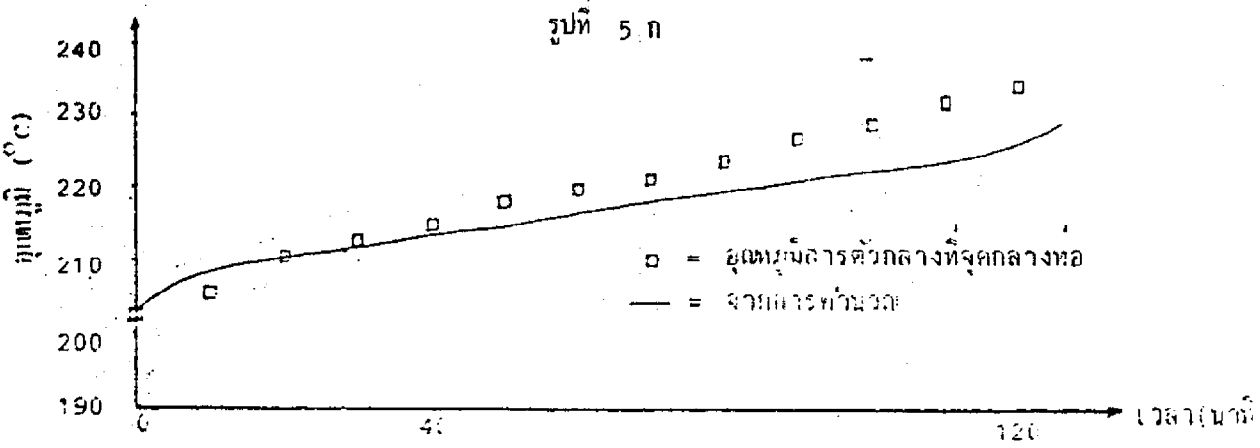
รูปที่ 5 หน่วยเก็บละสมความร้อน

หน่วยของ Scale เป็นนิ้ว

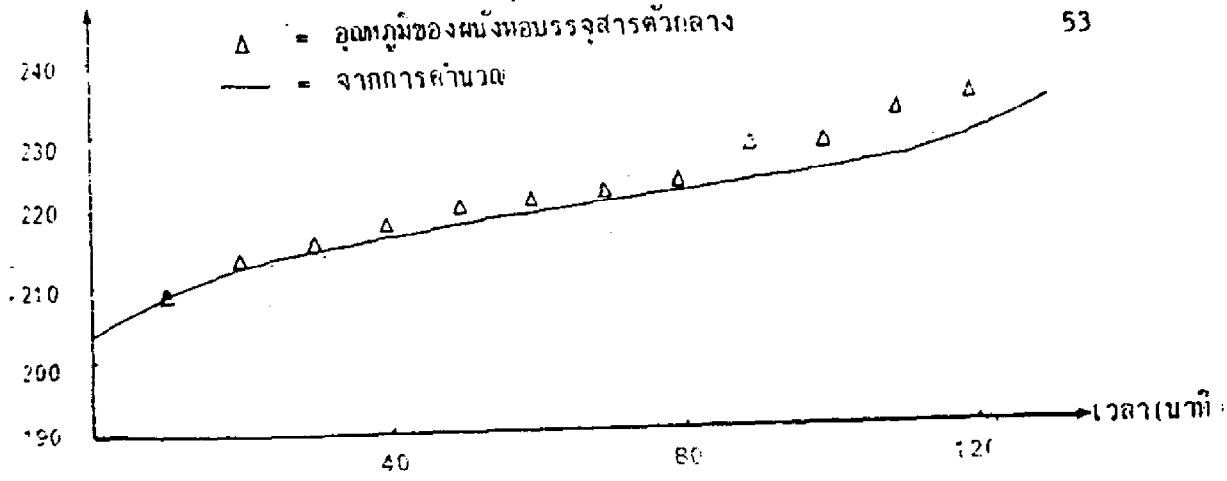



250
230
210
190
อุณหภูมิ (°C)
0
40
80
□ = อุณหภูมิของน้ำมันที่ทางเข้า
△ = อุณหภูมิของน้ำมันที่ทางออก
— = จากการคำนวณ

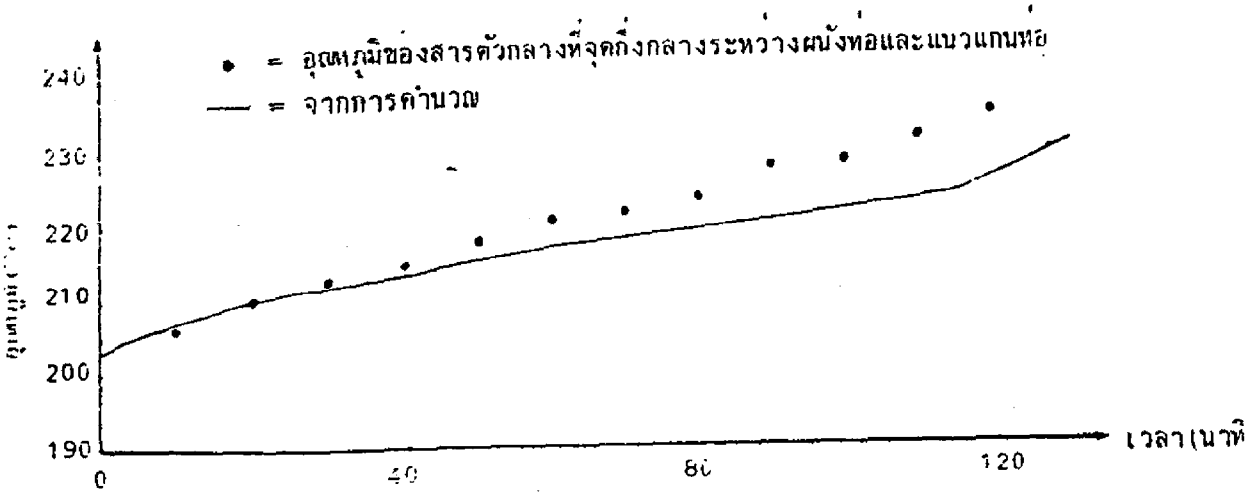
รูปที่ 5.ก


240
230
220
210
200
190
อุณหภูมิ (°C)
0
□ = อุณหภูมิสารตัวกลางที่จุดกลางท่อ
— = จากการคำนวณ

รูปที่ 5.ข

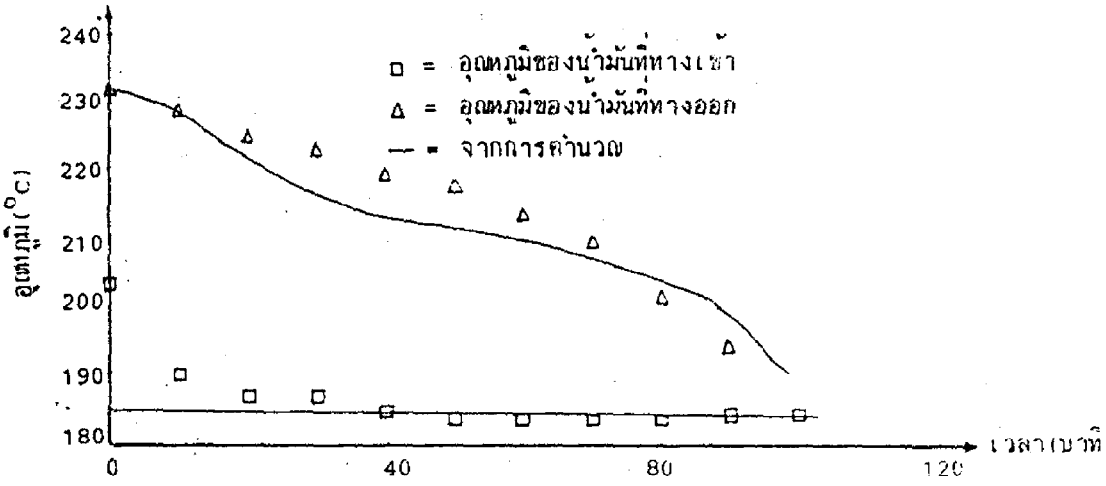


รูปที่ 5 ก

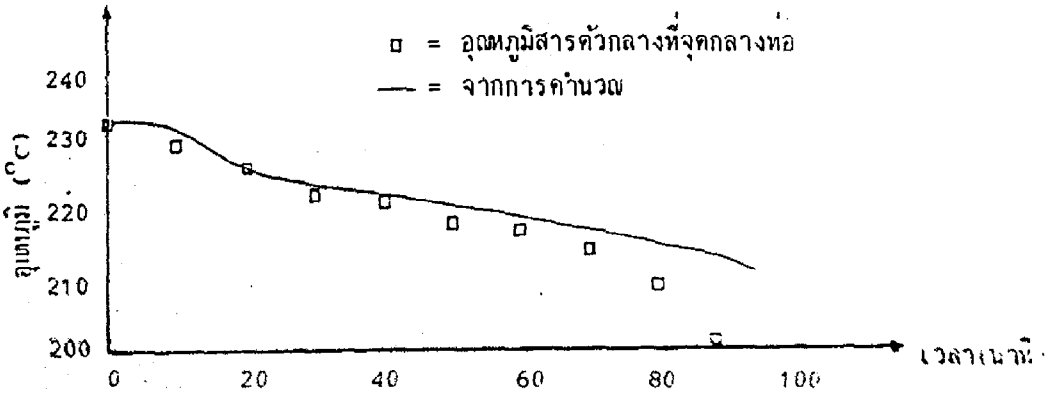


รูปที่ 5 ง

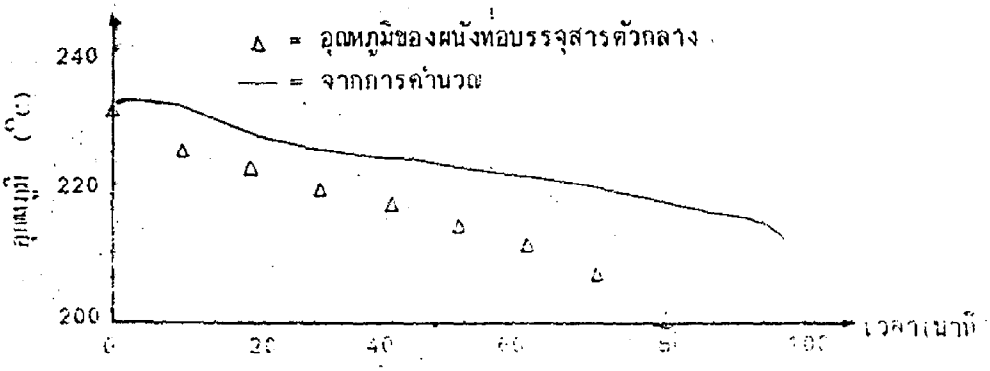
รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ กับเวลาขณะให้ความร้อนระหว่างผลการคำนวณกับการทดลอง (ก) อุณหภูมิของน้ำมันที่ทางเข้าและออก (ข) อุณหภูมิของสารตัวกลางที่จุดกึ่งกลางท่อ (ค) อุณหภูมิของผนังท่อบรรจุสารตัวกลาง (ง) อุณหภูมิของสารตัวกลางที่จุดกึ่งกลางระหว่างแนวแกนท่อกับผนังท่อ



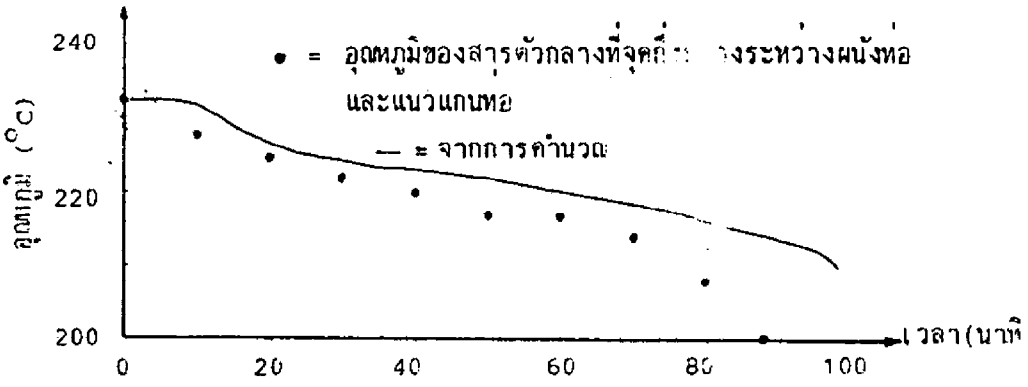
รูปที่ 6 ก



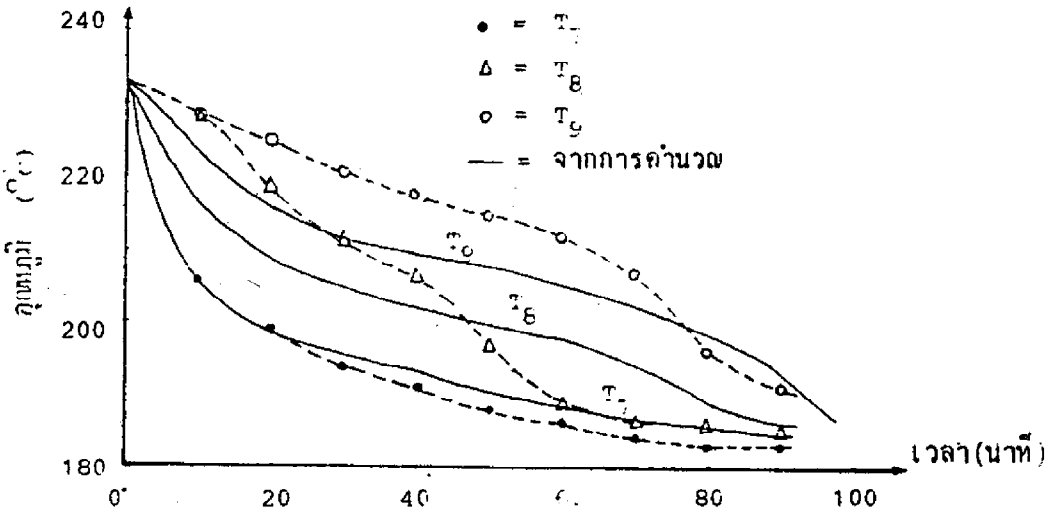
รูปที่ 6 ข



รูปที่ 6 ค

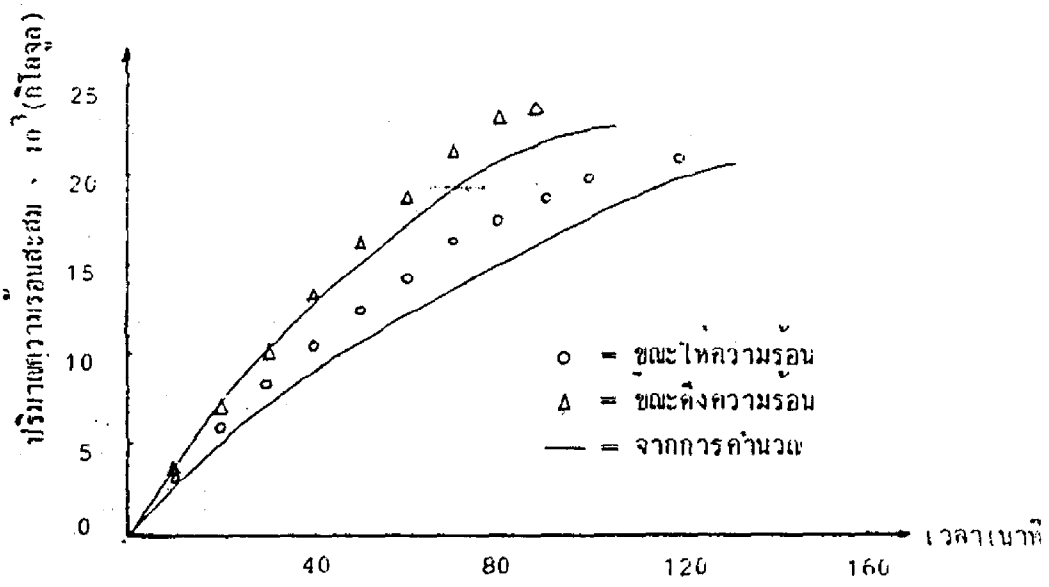


รูปที่ 6 ง



รูปที่ 6 จ

รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ กับเวลาซึ่งคือความร้อน (ก) อุณหภูมิของน้ำมันที่ทางเข้าและออก (ข) อุณหภูมิของสารตัวกลางที่จุดกึ่งกลางท่อ (ค) อุณหภูมิของผนังท่อบรรจุสารตัวกลาง (ง) อุณหภูมิของสารตัวกลางที่จุดกึ่งกลางระหว่างแนวแกนท่อกับผนังท่อ (จ) อุณหภูมิของน้ำมันตามความสูงของถัง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบปริมาณความร้อนสะสม ขณะให้และดึงความร้อน ระหว่างผลการคำนวณกับการทดลอง (การทดลองที่ 2)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่ระบบเก็บรักษาและคืงไปใช้รวมทั้งประสิทธิ-ภาพในการเก็บความร้อนของระบบ ระหว่างการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี

	Q_1 (กิโลจูล)	Q_2 (กิโลจูล)	Q_3 (กิโลจูล)	(%)
ทดลอง	20862.6	23566.37	19598.63	93.94
ทฤษฎี	20050	22100	19186.88	95.69

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาและคืงออกจากระบบของการทดลองและทฤษฎี ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C

	เวลา (นาที)	
	ทดลอง	ทฤษฎี
ช่วงให้ความร้อน	98	124
ช่วงคืงความร้อน	81	88