# บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

### 3.1 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกันคือ การออกแบบในเชิงความร้อน และการออกแบบในเชิงกล (20), (21)

การออกแบบเชิงความร้อนจะเกี่ยวข้องกับสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. ทิศทางของการไหล ทิศทางการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่ 3 แบบคือไหลขนาน (parallel flow) , ไหลสวนทาง (counter-flow) และไหลตัดหรือตั้งฉาก (cross-flow)

2. พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต้องมีมากพอที่จะส่งผ่านปริมาณความร้อนในอัตราที่ต้องการโดยต้องคำนึงถึงชั้นของสิ่งสกปรกที่มาเกาะจับ (feuling factor) ซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงตามเวลาใช้งาน

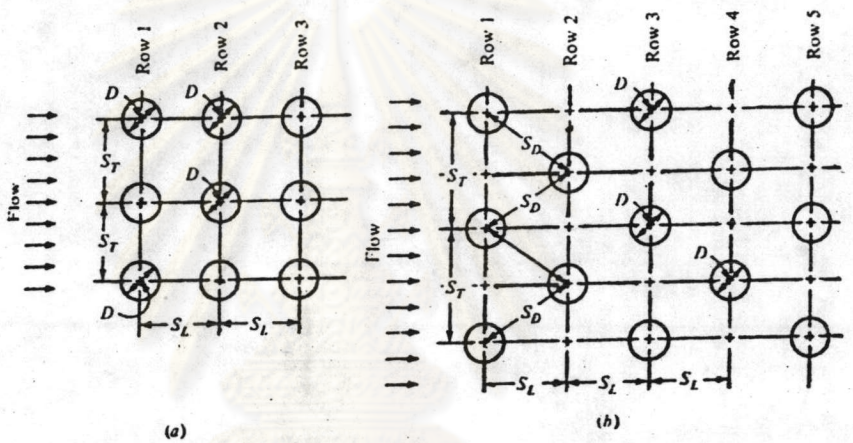
3. การกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตลอดจนอุณหภูมิเข้าออกและความเร็วของของไหล ลักษณะการวางเรียงท่อและการติดตั้งแผ่นกั้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนกัน (Log Mean Temperature difference , L.M.T.D.)

4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (U) โดยพิจารณากลไกและชั้นความต้านทานการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเชิงกล เกี่ยวข้องกับปัญหาความแข็งแกร่งและความ

ปลอดภัยในการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีปัจจัยพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ความดันที่ใช้งานและผลลดความดันที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การไหลผ่านกลุ่มท่อที่เรียงตัวในลักษณะต่างกัน คือ การวางในแนวเดียวกัน (in line) และวางเรียงเหลื่อมแนวกัน (staggered) ก็จะให้ผลลดความดันที่ต่างกันและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันด้วย




รูปที่ 3.1 a) การวางในแนวเดียวกัน (in line)
b) การวางเหลื่อมแนวกัน (staggered)

2. การเลือกใช้วัสดุให้มีความแข็งแกร่ง (yield strength) เพียงพอที่จะทนต่อความดันที่ใช้งาน , การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากความดันและอุณหภูมิ เช่น การเกิด creep , fatigue หรือการเปลี่ยนแปลงของ impact strength เป็นต้น การสึกกร่อน (erosion) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของของไหล เป็นต้น นั่นคือต้องเลือกประเภทและความหนาของวัสดุที่ใช้อย่างถูกต้อง

3. การเกิดการสั่นสะเทือน (vibration) ในขณะใช้งานอาจทำให้โครงสร้างบางส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการรั่วขึ้นได้ การออกแบบจึงต้องระวังตั้งแต่การวางเรียงกลุ่มท่อ , ขนาดของเครื่อง , ลักษณะการไหล เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้

4. การออกแบบรอยต่อและจุดเชื่อม เช่น หน้าแปลน ปะเก็น การปิดผนึก (seal) เพื่อป้องกันการรั่วไหล , ตำแหน่งของสกรู เป็นต้น

5. การคำนึงถึงขนาด , น้ำหนัก , การทำความสะอาด , การซ่อมแซม , การถอดเปลี่ยนชิ้นส่วนที่สึกหรอ , การติดตั้ง , การเคลื่อนย้าย , การบำรุงรักษา เป็นต้น

อนึ่ง นอกจากต้องออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยพิจารณาทั้งในเชิงความร้อนและเชิงกลแล้ว สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือ การคำนึงในเชิงเศรษฐศาสตร์ เช่น ค่าใช้จ่ายในการสร้าง , การขนส่ง , การติดตั้ง , การบำรุงรักษา , รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง เป็นต้น จะต้องน้อยที่สุดหรือให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าที่สุด

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์นั้น นอกจากต้องอาศัยหลักการออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาแล้ว ยังมีปัจจัยบางอย่างที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติม คือ

1. อัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อฮีทไปป์ อาจมีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนถ้ากำหนดขึ้นอย่างไม่เหมาะสม นอกจากนี้ความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อฮีทไปป์ที่เลือกใช้จะมีผลโดยตรงต่อขนาดของตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

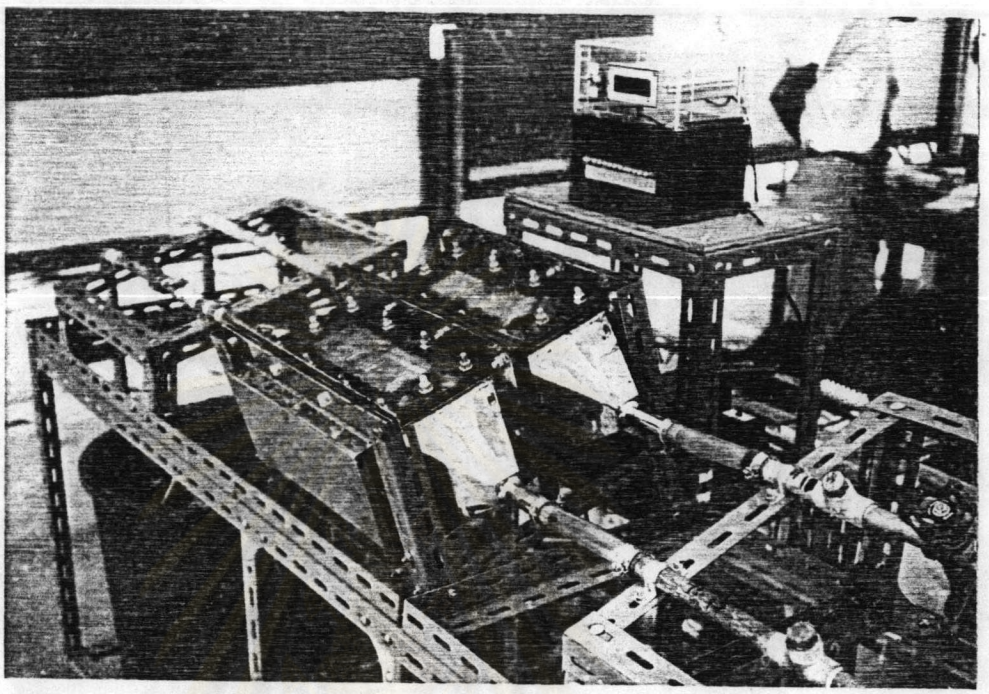
2. อุณหภูมิใช้งานและผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและเย็น จะมีผลต่อการทำงานของฮีทไปป์ เนื่องจากของไหลใช้งานในท่อฮีทไปป์มีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่จำกัด ดังนั้นจึงต้องเลือกของไหลใช้งานให้เหมาะสมกับอุณหภูมิใช้งาน

3.2 การสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นได้กำหนดเงื่อนไขในการทำงานไว้ดังนี้

1. ของไหลร้อนและของไหลเย็นที่ใช้คือน้ำร้อนและน้ำเย็น
2. อุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วงระหว่างจุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำ (10-90 ° C)
3. ลักษณะการไหลเป็นการไหลสวนทางกัน
4. ลักษณะการวางตำแหน่งท่อฮีทไปป์เป็นแบบเหลื่อมกัน (staggered)
5. ปรับมุมเอียงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำการทดลองที่มุมเอียงต่าง ๆ กันได้
6. สังเกตการทำงานภายในได้ (มีช่องมองบนผนังเครื่อง)
7. ใช้ฮีทไปป์แบบไร้วิกค์ ความยาว 37 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1 ซม.
8. ประกอบ , ติดตั้ง และถอดแยกได้ง่าย

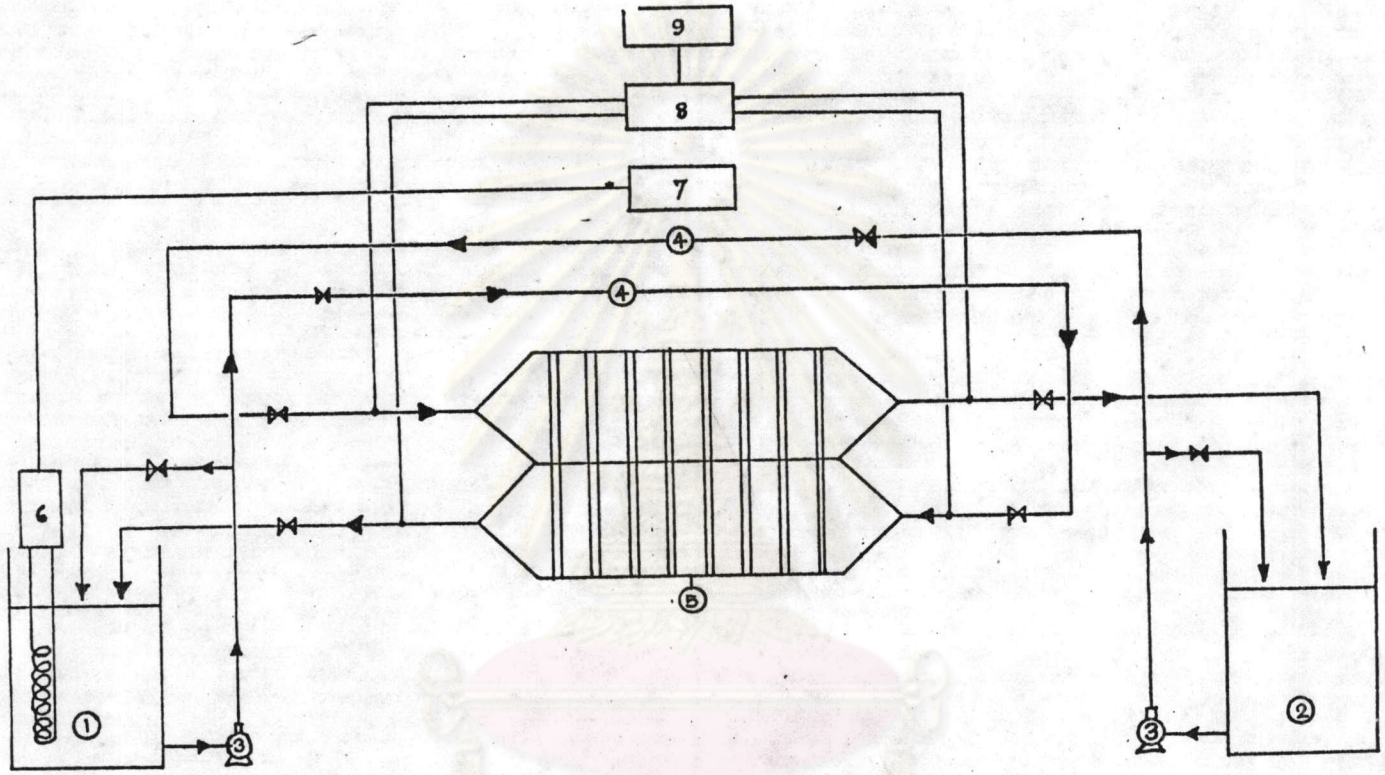
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องแรกมีฮีทไปป์ 27 แท่ง (เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1 ซม. , ความยาว 37 $\pm$ 0.5 ซม.) บรรจุอยู่ภายในโดยวางเรียงแบบเหลื่อมกัน (staggered) 7 แถว (แถวละ 4 แท่ง 4 แถว และแถวละ 5 แท่ง 3 แถว) มีระยะห่าง $S_1$ = 3.4 ซม. $S_2$ = 3 ซม. , $S_d$ = 4 ซม. ที่มุมทั้ง 4 ด้านจะใช้แท่งเหล็กตันตรึงไว้แทนฮีทไปป์ ท่อฮีทไปป์ยึดติดกับแผ่นกั้นกลางด้วยกาวซิลิโคนเพื่อกั้นของไหลทั้ง 2 ชนิด ไม่ให้ปนกัน แผ่นกั้นกลางนี้เป็นพลาสติกใสพวกกอะไคลิค (acrylic) หนา 1 ซม. ช่องมองทำด้วยพลาสติกใสหนา 4 มม. เพื่อให้มองเห็นแท่งฮีทไปป์และสภาวะภายในได้ โลหะที่ใช้ทำตัวเครื่องเป็นเหล็กธรรมดาหนา 1/8 นิ้ว (ชุบนิเกิล - โครเมียม) น็อตที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2/8 นิ้ว ส่วนประเก็น (gasket) เป็นยางสังเคราะห์พวก neoprene หนา 2 มม. ระบบวัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัพเบิล แบบ chromel-alumel ซึ่งต่อสายขึ้นเอง ส่วนการวัดอัตราการไหลอาศัยแผ่น orifice และ U-tube manometer รูปที่ 3.2 เป็นภาพถ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก



รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรกพร้อมระบบติดตั้ง

3.3 การทดลองสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก

รูปที่ 3.3 แสดงไดอะแกรมของระบบทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก ผลการทดสอบสมรรถนะมีแสดงไว้ในตาราง 3.1 ค่าของ $UA_{1,7}$ ที่วัดได้มีค่าเฉลี่ย 0.48 Watt/°C โดยมีช่องกว้าง $\pm$ 20 %




รูป 3.3 ไดอะแกรมของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ถังน้ำร้อน | 4 | FLOWRATE INDICATOR | 7 | TEMPERATURE CONTROLLER |
| 2 | ถังน้ำเย็น | 5 | HEAT EXCHANGER | 8 | TEMPERATURE SELECTOR |
| 3 | PUMP | 6 | HEATING COIL | 9 | TEMPERATURE INDICATOR |

ตาราง 3.1 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก

| การทดลอง | น้ำเย็น อัตราไหล (ลิตร/นาที) | น้ำเย็น อุณหภูมิทางเข้า ($^{o}C$) | น้ำเย็น อุณหภูมิทางออก ($^{o}C$) | น้ำร้อน อัตราไหล (ลิตร/นาที) | น้ำร้อน อุณหภูมิทางเข้า ($^{o}C$) | น้ำร้อน อุณหภูมิทางออก ($^{o}C$) | Qave (Watt/แท่ง) | $(\Delta T)_{ln}$ ($Watt/^{o}C$) | UA/แท่ง ($Watt/^{o}C$) | อุณหภูมิอากาศ ($^{o}C$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.8 | 9 | 12 | 2.8 | 52 | 50 | 18 | 40 | 0.45 | 29 |
| 2 | 5.25 | 29 | 30 | 3.2 | 66 | 63 | 19 | 35 | 0.55 | 32 |
| 3 | 3.9 | 30 | 31 | 3.1 | 65 | 63 | 13 | 33 | 0.39 | 31 |
| 4 | 2.55 | 29 | 31 | 3.4 | 66 | 63 | 20 | 34 | 0.58 | 32 |
| 5 | 5.85 | 30 | 31 | 2.8 | 63 | 61 | 15 | 31 | 0.48 | 31 |
| 6 | 6.2 | 30 | 31 | 2.6 | 62 | 66 | 15 | 31 | 0.47 | 31 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการวิเคราะห์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

ลองพิจารณาการทดลองที่ 5 ในตาราง 3.1

ด้านของไหลเย็น

อุณหภูมิทางเข้า 30 ° C
อุณหภูมิทางออก 31 ° C
อัตราการไหล 5.85 litres/min

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่อแท่ง $Q_c = \frac{J F_c C_{pc} T_c}{N}$

โดยที่ $F_c$ : อัตราการไหลของไหลเย็น (l/min)

$C_{pc}$ : ความร้อนจำเพาะของของไหลเย็น (cal/ml. °C)

$T_c$ : ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างทางเข้าและทางออกของของไหลเย็น ( °C)

N : จำนวนแท่งของฮีทไปป์ในเครื่อง

J : ตัวคูณแปลงหน่วย (69.67 $\frac{ml}{l}$ x $\frac{min}{cal}$ x Watt)

$Q_c$ : $\frac{69.67 \times 5.85 \times 1 \times 1}{27} = 15$ Watt/แท่ง

ในทำนองเดียวกัน

ด้านของไหลร้อน

อุณหภูมิทางเข้า 63 ° C
อุณหภูมิทางออก 61 ° C
อัตราการไหล 28 l/min

$Q_h = \frac{69.67 \times 2.8 \times 1 \times 2}{27} = 14.5$ Watt/แท่ง

ในกรณีที่พบว่าค่าของ $Q_c$ แตกต่างจาก $Q_h$ ค่อนข้างมากเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิมีค่าค่อนข้างน้อย (ประมาณ 1-3 ° C) และเครื่อง

แสดงค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ไม่มีจุดทศนิยมของอุณหภูมิ เราอาจถือว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกต้องคือ (1/2) ($Q_c + Q_h$)

สรุปผลการสร้างและการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรกได้ดังนี้ คือ

1. อัตราการถ่ายเทความร้อนของทั้งเครื่องมีไม่มาก เนื่องจากแท่งฮีทไปป์มีจำนวนน้อย

2. เครื่องแสดงค่าอุณหภูมิไม่ละเอียดเท่าที่ควร

3. มีปัญหาการรั่วออกจากตัวเครื่องเนื่องจากแผ่นเหล็กที่ใช้ไม่หนาพอและตำแหน่งที่ใส่น็อตก็อยู่ห่างเกินไป (ประมาณ 10 ซม.)

4. แผ่นพลาสติกที่ใช้ทำช่องมองไม่เหมาะสมเพราะเปราะและแตกร้าวได้ง่าย และขุ่นมัวเมื่อถูกความร้อนนาน ๆ

5. เมื่อเดินเครื่องไปนาน ๆ จะเกิดสนิมจับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและแท่งฮีทไปป์ ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคในการถ่ายเทความร้อน

6. สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องเฉลี่ยแล้วประมาณ 17 Watt ต่อแท่งฮีทไปป์ และมีค่า $UA_{1.7}$ เฉลี่ย 0.48 Watt/$^\circ$C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องทำงานในสภาวะที่ต่ำกว่าขีดความสามารถสูงสุดของฮีทไปป์มาก

3.4 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องที่สอง (เครื่องต้นแบบ)

เงื่อนไขที่ใช้ออกแบบเครื่องต้นแบบนั้นก็คล้ายกับของการออกแบบเครื่องแรก แต่ได้ปรับปรุงแก้ไขปัญหาบางจุดในขณะเดียวกันที่เพิ่มขนาดของเครื่องและจำนวนท่อฮีทไปป์ที่ใช้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ใช้ท่อฮีทไปป์แก้วทั้งหมด 243 แท่ง (เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1 ซม. ความยาว 36-37.5 ซม.) โดยวางเรียงแบบเหลื่อมกัน (staggered) จำนวน 28 แถว ( 9 แท่ง 15 แถว และ 8 แท่ง 14 แถว) มีระยะห่าง $S_1$ = 1.75 ซม. $S_2$ = 2 ซม. $S_d$ = 2.0 ซม. มุมทั้ง 4 ด้านยึดด้วยแท่งเหล็กตัน แผ่นกั้นกลางทำด้วยเหล็กสเตนเลสหนา 3/8 นิ้ว และใช้กาวซิลิโคนทายึดแท่งฮีทไปป์กับแผ่นกั้นกลาง

2. ช่องมองทำด้วยแผ่นแก้วหนา 1 ซม.

3. โลหะที่ใช้ทำตัวเครื่องทั้งหมดเป็นสเตนเลสแผ่นขอบที่ร้อยน๊อตหนา 2/8 นิ้ว ส่วนตัวกล่องและตำแหน่งอื่น ๆ หนา 1/16 นิ้ว

4. กำหนดระยะห่างของน๊อตโดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$B_{max} = 2 d_B + \frac{6 t}{m_g + 0.5}$$

$B_{max}$ = ระยะห่างสุดระหว่างใจกลางของน๊อต (ซม.)

$d_B$ = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของน๊อต (ซม.)

$t$ = ความหนาของแผ่นขอบ (ซม.)

$m$ = สัมประสิทธิ์ของปะเก็น (gasket coefficient)

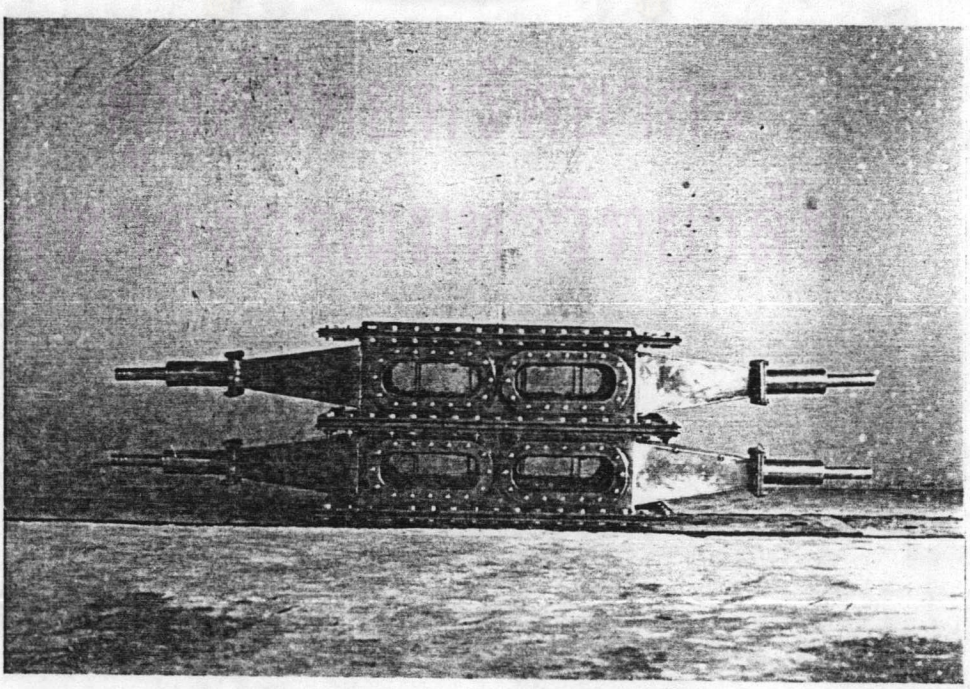
จากการคำนวณได้รูน๊อตโดยรอบทั้งสิ้น 44 รู

5. ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ 52 x 18 x 15 ซม.

6. ท่อทางเข้าออกของเครื่องมีกล่องใส่ลูกแก้วเพื่อทำให้น้ำเกิดการผสมอย่างดีก่อนเข้าและหลังออกจากเครื่อง

7. วัดทั้งอุณหภูมิทางเข้าออกของของไหลร้อนและเย็น และการกระจายของอุณหภูมิผิวของแท่งฮีทไปป์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเครื่อง โดยใช้เทอร์โมคัพเบิลแบบ chromel-alumel

8. ติดตั้งท่อไล่อากาศ (air vent) และท่อทิ้งของเหลว (drain duct)



รูปที่ 3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ

3.5 การประกอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ

1. เลือกตำแหน่งวางแท่งฮีทไปป์โดยวิธีสุ่มตัวแบบแรนด้อม (random sampling)
2. กำหนดตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคับเปิลบนแท่งฮีทไปป์บางแท่งและที่ตำแหน่งทางเข้าออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. ติดสายเทอร์โมคัพเปิลบนผิวแท่งฮีทไปป์
4. ทากาวแท่งฮีทไปป์ทีละแท่งเพื่อให้ติดแน่นกับแผ่นกั้นกลาง แล้วปิดฝาด้านล่างก่อนฝาด้านบน
5. เมื่อกาวแห้งดีแล้ว จึงรวมสายเทอร์โมคับเปิลทั้งหมดออกไปต่อเข้ากับกล่องวัดอุณหภูมิ แล้วจึงขันฝากล่องให้ปิดสนิท
6. ทดสอบการรั่วและแก้ไขให้เรียบร้อย
7. นำไปติดตั้งในระบบทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 3.4 เป็นภาพถ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบที่สร้างขึ้น

3.6 ระบบทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ

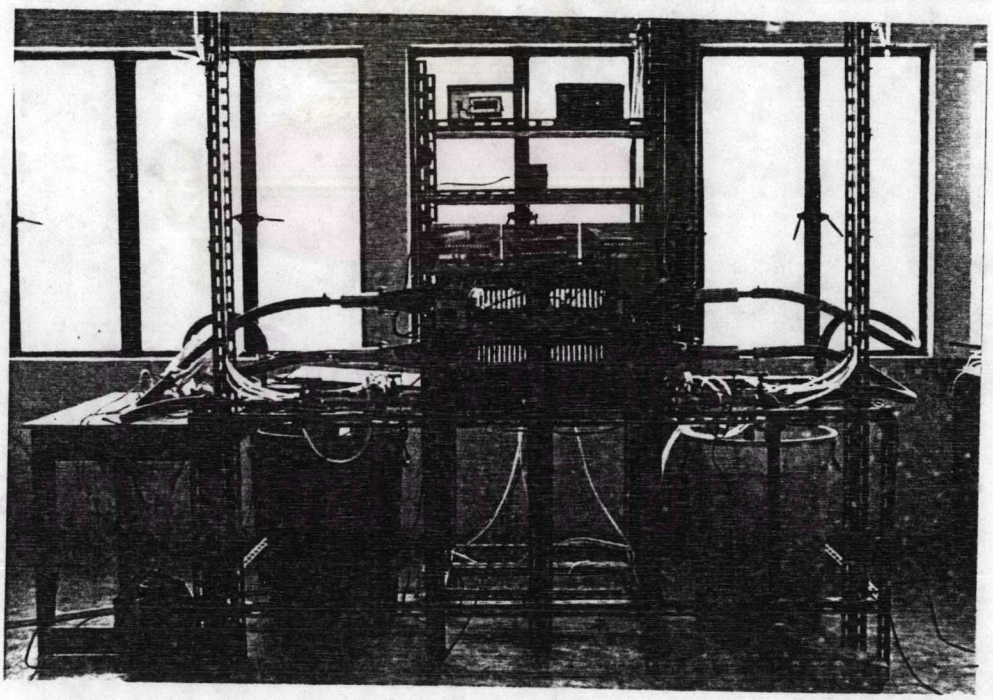
ระบบทดสอบที่สร้างขึ้นประกอบด้วยถังพลาสติก 2 ใบ ใบหนึ่งใส่น้ำร้อน อีกใบหนึ่งใส่น้ำเย็น จากถังแต่ละใบมีท่อต่อออกโดยผ่านวาล์วมายังเครื่องวัดอัตราการไหลแบบออริฟิสซึ่งต่อขนานกัน ชุดหนึ่งใช้วัดอัตราการไหลที่ความเร็วสูง อีกชุดหนึ่งใช้วัดอัตราการไหลที่ความเร็วต่ำ จากออริฟิสของเหลวจะไหลผ่านกล่องบรรจุลูกแก้วเพื่อผสมให้มีอุณหภูมิเท่ากันก่อนผ่านชุดวัดอุณหภูมิเข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ทางออกของเครื่อง ของไหลก็จะผ่านกล่องใส่ลูกแก้วและชุดวัดอุณหภูมิที่ทางออกเช่นกัน สายน้ำร้อนจะส่งกลับตัวถังเพื่อเพิ่มอุณหภูมิใหม่ ส่วนสายน้ำเย็นจะปล่อยทิ้งไป

สรุปแล้วระบบทดสอบประกอบด้วย

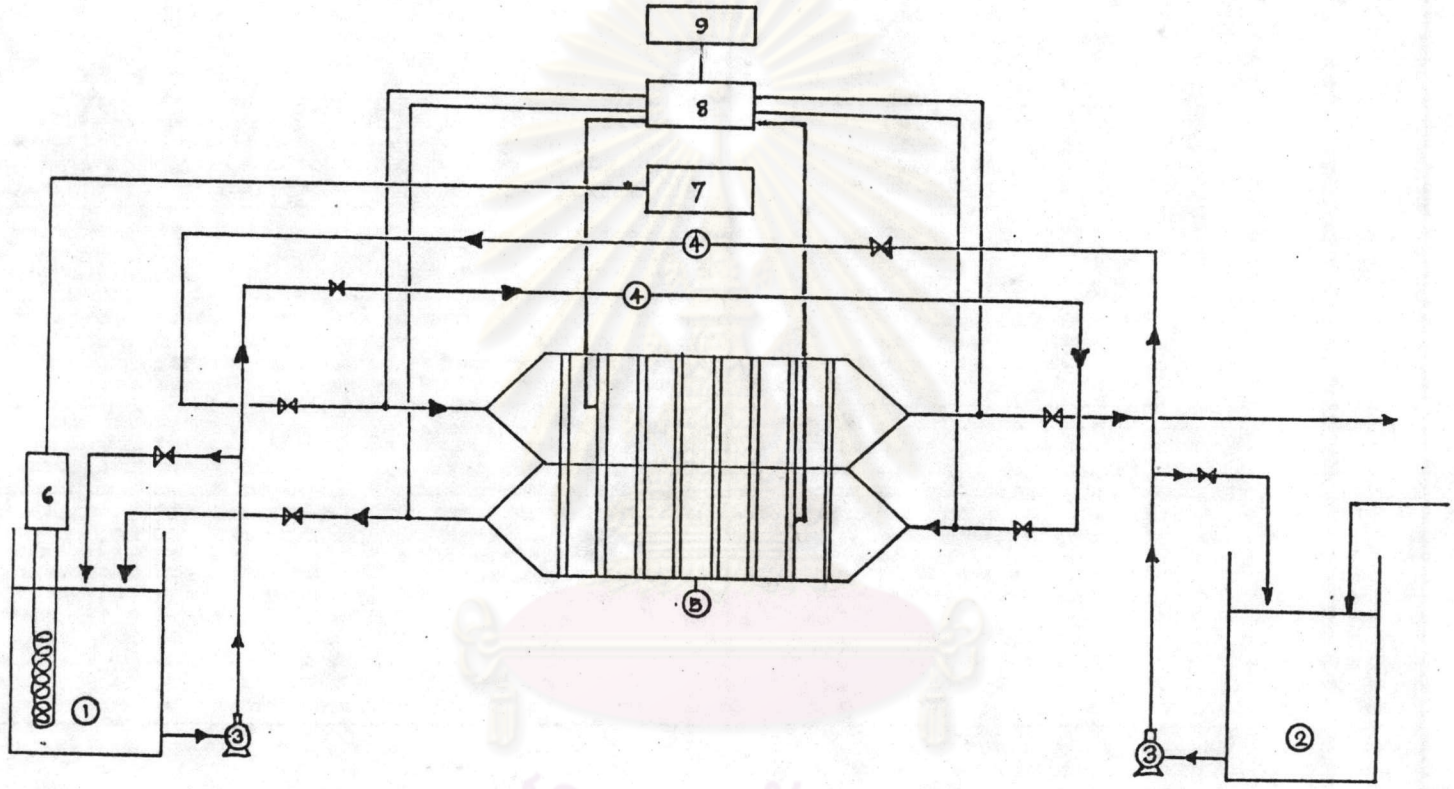
1. ถังพลาสติก 2 ใบ
2. ปั๊มน้ำ 2 เครื่อง (ขนาด 0.7 แรงม้า)

3. เครื่องวัดอัตราการไหล 4 ชุด (orifice 4 แผ่น , U-tube manometer 4 หลอด)
4. วาล์ว 1/2" 8 ตัว , วาล์ว 1" 2 ตัว
5. ท่อน้ำ 1/2" และ 1" ตลอดจนสายยางเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1"
6. เครื่องแสดงค่าอุณหภูมิ 1 เครื่อง และสายแหย่วัด 59 ชุด
7. กล่องเลือกจุดวัดอุณหภูมิ 2 กล่อง
8. ชุดควบคุมอุณหภูมิภายในถังน้ำร้อน พร้อมขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อน (ทั้งหมด 8,000 วัตต์)

รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบที่สร้างขึ้น ส่วนรูปที่ 3.6 เป็นไดอะแกรมของระบบดังกล่าว



รูปที่ 3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์พร้อมระบบติดตั้งอื่น ๆ




รูป3.4 ไดอะแกรมของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ถังน้ำร้อน | 4 | FLOWRATE INDICATOR | 7 | TEMPERATURE CONTROLLER |
| 2 | ถังน้ำเย็น | 5 | HEAT EXCHANGER | 8 | TEMPERATURE SELECTOR |
| 3 | PUMP | 6 | HEATING COIL | 9 | TEMPERATURE INDICATOR |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย