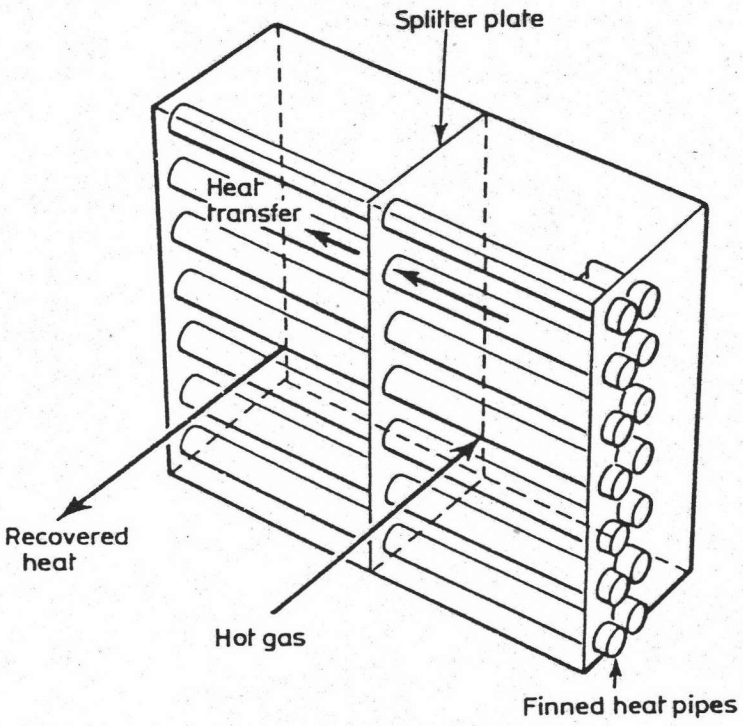
บทที่ 9

การคำนวณออกแบบ เครื่องแลก เปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

9.1 เครื่องแลก เปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

เครื่องแลก เปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่าย เทความร้อนระหว่างของไหลร้อน (hot fluid) กับของไหล เย็น (cold fluid) เนื่องจากฮีทไปป์มีประสิทธิภาพในการถ่าย เทความร้อนสูง จึงได้มีการนำมาประยุกต์สร้าง เป็น เครื่องแลก เปลี่ยนความร้อน เรียกว่า เครื่องแลก เปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ (heat-pipe heat - exchanger) ซึ่งนิยมใช้กับการถ่าย เทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซ เย็น (gas/gas heat recovery system)

ลักษณะโครงสร้างทั่ว ๆ ไป[19]



รูปที่ 9.1 โครงสร้าง เครื่องแลก เปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

ประกอบด้วยท่อฮีทไปป์เรียงกันเป็นแถวอยู่ในตัวเครื่อง ซึ่งมีแผ่นกั้น (splitter plate) ทำหน้าที่แยกช่วงการระเหยซึ่งเป็นส่วนที่ให้ของไหลร้อนไหลผ่านและช่วงการควบแน่นซึ่งเป็นส่วนที่ของไหลเย็นไหลผ่าน และยึดตัวท่อฮีทไปป์ไว้ ลักษณะการวางท่อฮีทไปป์จะให้ท่อฮีทไปป์อยู่ในแนวระดับหรือเอียงทำมุมเล็กน้อย โดยที่ให้ช่วงการระเหยอยู่ต่ำกว่าช่วงการควบแน่น โดยทั่ว ๆ ไป จำนวนแถวของฮีทไปป์จะมีประมาณ 4 ถึง 8 แถว แต่อาจมีถึง 10 แถวได้

9.1.1 <u>วิธีคำนวณขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์</u>

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ คือการหาจำนวนท่อของฮีทไปป์ที่ต้องใช้ทั้งหมดจากพื้นที่ถ่ายเทความร้อนรวมที่ต้องใช้ ในการคำนวณต่อไปนี้จะถือว่าคุณสมบัติและขนาดของท่อฮีทไปป์แต่ละท่อได้ถูกกำหนดให้เรียบร้อยแล้ว สมการที่ใช้ในการคำนวณ เป็นดังนี้[24]

$$Q = K_i A_i (\Delta T_{lm}) \qquad (9.1)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ต้องการถ่ายเท (kcal/hr)

K_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient) ระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น (kcal/m^2hr ^oC)

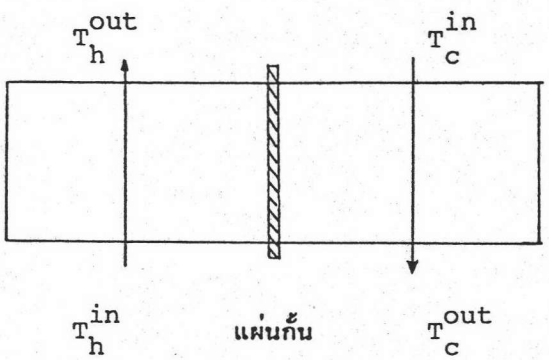
A_i = พื้นผิวด้านในรวมของฮีทไปป์ที่ต้องใช้ (m^2)

ΔT_{lm} = ผลต่างของอุณหภูมิเชิงลอกการิทึม (^oC)

โดยที่

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_h^{in} - T_c^{out}) - (T_h^{out} - T_c^{in})}{\ln \dfrac{(T_h^{in} - T_c^{out})}{(T_h^{out} - T_c^{in})}} \qquad (9.2)$$

กรณีที่ของไหลไหลสวนทางกัน ดังรูปข้างล่าง



โดยที่

T_h^{in} = อุณหภูมิขา เข้าของของไหลร้อน

T_h^{out} = อุณหภูมิขาออกของของไหลร้อน

T_c^{in} = อุณหภูมิขา เข้าของของไหล เย็น

T_c^{out} = อุณหภูมิขาออกของของไหล เย็น

อนึ่ง ค่าของ Q ยังสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = W_h(T_h^{in} - T_h^{out}) = W_c(T_c^{out} - T_c^{in}) \qquad (9.3)$$

เมื่อ $W = C_p \rho V$ (kcal/hr^{o}C) (9.4)

C_p = ค่าความร้อนจำ เพาะ เฉลี่ยที่ความดันคงที่ของของไหล (kcal/kg.^{o}C)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

V = อัตราการไหล เชิงปริมาตรของของไหล (m^3/hr)

ถ้ากำหนดให้

ϕ_c = ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน (thermal efficiency) ทางด้านอุณหภูมิต่ำ

จะได้

$$\phi_c = \frac{T_c^{out} - T_c^{in}}{T_h^{in} - T_h^{in}} \qquad (9.5)$$

จากสมการ (๙.๑) ถึง (๙.๕) จะได้

$$\phi_c = \frac{1 - \exp\left[(R - 1)K_i A_i / W_c\right]}{1 - R.\exp\left[(R - 1)K_i A_i / W_c\right]} \qquad (9.6)$$

เมื่อ $$R = \frac{K_i A_i / W_c}{1 + K_i A_i / W_c} \qquad (9.7)$$

ในการคำนวณหาค่า K_i ซึ่งใช้พื้นผิวด้านในรวมของท่อฮีทไปป์เป็นฐานอ้างอิง สามารถใช้สมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_i A_i} = \frac{1}{h_g^c A_o^c} + \frac{1}{h_g^h A_o^h} + \frac{1}{h_{HP}^c A_i^c} + \frac{1}{h_{HP}^h A_i^h} + \frac{r_m}{A_i} + \frac{r_y}{A_i}$$

นั่นคือ

$$\frac{1}{K_i} = \frac{A_i}{h_g^c A_o^c} + \frac{A_i}{h_g^h A_o^h} + \frac{A_i}{h_{HP}^c A_i^c} + \frac{A_i}{h_{HP}^h A_i^h} + r_m + r_y \qquad (9.8$$

โดยที่

K_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อฮีทไปป์ (kcal/m^2hr ^oC) (ใช้พื้นผิวด้านในของท่อเป็นฐานอ้างอิง)

h_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิมล์ของของไหลนอกท่อฮีทไปป์ (kcal/m^2hr ^oC)

h_{HP} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในตัวท่อฮีทไปป์ (kcal/m^2hr ^oC)

r_m = ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของผนังท่อฮีทไปป์ (m^2hr ^oC/kcal)

r_y = เพาว์ลิ่งแฟคเตอร์ (fouling factor) (m^2hr ^oC / kcal)

A_i = พื้นผิวด้านในของท่อฮีทไปป์ (m^2)

A_o = พื้นผิวด้านนอกของท่อฮีทไปป์ (m^2)

ตัว superscript "c " และ " h" หมายถึงของของไหลเย็นและของของไหลร้อนตามลำดับ

ในกรณีที่ท่อฮีทไปป์ไม่มีฟิน (fin) ติดอยู่ภายนอก

$$A_o = N\pi d_o l \qquad (9.9)$$

โดยที่ d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อฮีทไปป์ (m)

l = ความยาวของท่อฮีทไปป์ (m)

N = จำนวนท่อฮีทไปป์ที่ใช้

ส่วนในกรณีที่ท่อฮีทไปป์มีฟินติดอยู่ภายนอก

$$A_o = N\pi d_o l(1 + f)\, a \qquad (9.10)$$

โดยที่ f = พื้นผิวภายนอกของท่อที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการติดฟิน ($f = 0$ ในกรณีของท่อไร้ฟิน)

a = สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวภายนอกของท่อที่ติดฟิน ($a = 1$) ในกรณีของท่อไร้ฟินโดยทั่วไป $0 \leq a \leq 1$)

ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของก๊าซนอกท่อฮีทไปป์ ย่อมขึ้นกับรูปร่างของฟิน, อุณหภูมิของก๊าซ, ความเร็วของก๊าซ เป็นต้น โดยทั่วไปจะมีค่าในช่วงหลายสิบ ($kcal/m^2 hr\,^oC$) ในทางตรงข้าม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อฮีทไปป์ย่อมขึ้นกับประเภทของของเหลวใช้งานและอุณหภูมิ และมีค่าอยู่ในช่วงหลายพันถึงหนึ่งหมื่น ($kcal/m^2\, hr\,^oC$) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของก๊าซนอกท่อมาก ส่วนความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของผนังโลหะของท่อฮีทไปป์โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยจนไม่ต้องคำนึงถึง อนึ่งค่าของ fouling factor ย่อมแตกต่างได้มากขึ้นกับสภาวะที่ใช้งาน ดังนั้นจึงไม่สามารถพูดสรุปทั่วไปได้ อย่างไรก็ดีค่านี้จะมีไม่มากจนเป็นปัญหา ถ้าสภาวะการใช้งานค่อนข้างสะอาด

ในการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนรวม (A_i) เริ่มโดย

1. หาค่า $\emptyset_c$ จากสมการที่ (9.5)
2. หาค่า W_c และ W_h จากสมการที่ (9.4) แล้วนำมาหาค่า R
3. หาค่า K_i จากสมการที่ (9.8)
4. ตรวจดูว่าค่า R มีค่าใกล้เคียง 1 มากเพียงไร ถ้าค่า R มีค่าใกล้เคียง 1 มาก ก็ใช้สมการที่ (9.7) ในการหาค่า A_i แต่ถ้า R มีค่าไม่ใกล้ 1 ก็ใช้สมการที่ (9.1) ถึง (9.3) ในการคำนวณหาค่า A_i
5. เมื่อได้ค่า A_i แล้ว ก็สามารถคำนวณหาจำนวนท่อฮีทไปป์ที่ต้องใช้ทั้งหมดได้ โดยใช้สมการ

$$N = \frac{A_i}{\pi d_i l} \qquad (9.11)$$

เมื่อ N = จำนวนท่อฮีทไปป์ที่ต้องใช้ทั้งหมด

d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อฮีทไปป์ (m)

l = ความยาวของท่อฮีทไปป์ (m)

9.1.2 <u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

ต้องการคำนวณหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ ซึ่งจะใช้ในการเก็บความร้อนทิ้งจากก๊าซที่ปล่อยออกจากเตาเผา เพื่อไปใช้ในการอุ่นอากาศที่จะส่งเข้าไปสันดาปเชื้อเพลิงในเตาเผา ก๊าซร้อนที่ออกจากเตามีอุณหภูมิ 185 ^{o}ซ และถูกปล่อยออกมาด้วยอัตรา 3600 ม^3 (o^{o}C, 1 atm)/ชม. ส่วนอากาศที่จะปล่อยเข้าเตาเผาจะถูกป้อนด้วยอัตรา 3000 ม^3 (o^{o}C, 1 atm)/ชม. ที่อุณหภูมิ 25^{o}ซ และต้องให้อากาศนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 85^{o}ซ ก่อนเข้าเตาเผา โดยกำหนดให้ก๊าซร้อนและอากาศมีคุณสมบัติดังนี้

	ก๊าซร้อน	อากาศ
ความหนาแน่น (kg/m^3) (o^{o}C, 1 atm)	1.35	1.29
ความจุความร้อน (kcal/kg ^{o}C)	0.28	0.25
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_g (kcal/m^{2}hr^{o}C)	70.00	25.00

สำหรับตัวท่อฮีทไปป์ที่จะใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวท่อและวิกค์ทำด้วยทองแดง มีน้ำเป็นของเหลวใช้งาน ตัวท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.0191 ม. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.0166 ม. ด้านนอกของท่อมีฟินรูปจานกลมติดอยู่ โดยที่พื้นที่ผิวเฉพาะของฟินมีเป็น 5 เท่าของพื้นที่ผิวนอกของท่อไร้ฟิน และมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของฟิน (a) มีค่าเท่ากับ 0.8 ท่อฮีทไปป์ยาว 4.0 ม. เวลาติดตั้งจะให้ส่วนที่อยู่ในช่วงที่ก๊าซร้อนไหลผ่านยาว 110 ซม. และตัวท่อมีคุณสมบัติดังนี้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ = 8000 kcal/m^{2}hr^{o}C ที่ 185^{o}C

= 6500 kcal/m^{2}hr^{o}C ที่ 25^{o}C

r_m = 0.0001 m^{2}hr^{o}C /kcal

r_y = 0.0001 m^{2}hr^{o}C /kcal

<u>วิธีการคำนวณ</u>

1. หาค่า ϕ_c จากสมการ (๙.5)

$$\phi_c = \frac{85 - 25}{185 - 25}$$

$$= 0.375$$

2. หาค่า W_c และ W_h โดยใช้สมการ (๙.4)

$$W_c = (0.25)(1.29)(3000)$$

$$= 967.5 \text{ kcal/hr } ^oC$$

$$W_h = (0.28)(1.35)(3600)$$

$$= 1360.8 \text{ kcal/hr } ^oC$$

ดังนั้น $R = W_c / W_h = 967.5/1360.8$

$$= 0.7109$$

3. หาค่า K_i จากสมการ (๙.8) ดังต่อไปนี้

$$\frac{A_o^c}{A_i} = \frac{N.\pi d_o l_c (1 + f)a}{N.\pi d_i l} = \frac{d_o l_c (1 + f)a}{d_i l}$$

$$= \frac{(0.0191)(2.90)(1 + 5)(0.8)}{(0.0166)(4.0)}$$

$$= 4.00$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\frac{A_o^h}{A_i} = \frac{d_o l_h (1 + f)a}{d_i l}$$

$$= \frac{(0.0191)(1.10)(1 + 5)(0.8)}{(0.0166)(4.0)}$$

$$= 1.52$$

อนึ่ง $\frac{A_i^c}{A_i} = \frac{2.90}{4.0} = 0.725$

และ $\frac{A_i^h}{A_i} = \frac{1.10}{4.0} = 0.275$

จากสมการ (9.8)

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{(25)(4.00)} + \frac{1}{(70)(1.25)} + \frac{1}{(6500)(0.725)} + \frac{1}{(8000)(0.275)} + 0.0001 + 0.0001$$

$$= 0.0100 + 0.0094 + 0.0002 + 0.0005 + 0.0002$$

$$= 0.0203$$

$$K_i = \frac{1}{0.0203}$$

$$= 49.3 \text{ kcal/m}^2\text{hr }^{\circ}\text{C}$$

4. จากสมการ (9.3)

$$Q = 1360.8(185 - T_h^{out}) = 967.5(85 - 25)$$

$$= 58050 \text{ kcal/hr}$$

$$T_h^{out} = 142.3 \ ^{\circ}\text{C}$$

5. จากสมการ (9.1)

$$58050 = (49.3)A_i \frac{(185 - 85) - (142.3 - 25)}{\ln \frac{185 - 85}{142.3 - 25}}$$

$$A_i = 10.9 \text{ m}^2$$

6. จากสมการ (9.6)

$$\emptyset_c = \frac{1 - \exp[(0.7109 - 1)(49.3)(10.9)/ 967.5]}{1 - 0.7109\exp[(0.7109 - 1)(49.3)(10.9)/ 967.5]}$$

$$= 0.375$$

จะเห็นได้ว่าค่าของ ϕ_c ที่คำนวณได้ในที่นี้ เท่ากับของที่คำนวณได้ใน 1. นี่แสดงว่าผลการคำนวณไม่มีอะไรผิดพลาด

7. จำนวนท่อฮีทไปป์ทั้งหมดที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ (9.11) ดังนี้

$$N = \frac{10.9}{\pi(0.0166)(4.0)}$$

$$= 52.3 \text{ ท่อ}$$

นั่นคือ ต้องใช้จำนวนท่อฮีทไปป์ประมาณ 54 ท่อ (6 แถว ๆ ละ 9 ท่อ)

นอกเหนือจากการนำฮีทไปป์ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ฮีทไปป์ยังถูกนำไปใช้ประโยชน์มากมายในแทบทุกสาขาของงาน เนื่องจากฮีทไปป์มีค่าความนำความร้อนสูง มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้าง (อุณหภูมิสูงถึง 3000°ซ) และมีข้อได้เปรียบหลายประการ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบอื่น

9.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

ก. ฮีทไปป์อุณหภูมิสูง ซึ่งใช้โลหะเหลว (เช่น โซเดียม, เงิน) เป็นของเหลวใช้งาน

- ใช้ในการเก็บความร้อนทิ้ง (waste heat) มาใช้อีก เช่น ในเตาเผาขยะ (incinerator), หม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง (waste heat boiler) เตาเผาด้วยก๊าซ (gas - fired funace) และในเตาถลุง
- ควบคุมอุณหภูมิในการหล่อแบบ (die - casting)
- ควบคุมอุณหภูมิในการทำแบบพิมพ์ (injection moulding)

ข. ควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เคมี

ค. ควบคุมอุณหภูมิภายในยานอวกาศให้มีค่าสม่ำเสมอทั่วทุกแห่ง

ฆ. ระบายความร้อนจากเบรคของล้อเครื่องบิน

ง. ระบายความร้อนออกจากเครื่องมือตัด (cutting - tool) และแบตเตอรี่

จ. ในการกระจายความร้อนในกล้องส่องดูดาว (OAO - C; Orbital Astronomical Observatory) เพื่อให้อุณหภูมิมีค่าสม่ำเสมอ

ฉ. ระบายความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเลคโตรนิคประเภททรานซิสเตอร์, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและวงจรไอซี

ช. ป้องกันการจับเกาะของน้ำแข็งและหิมะบริเวณผิวท่อในเขตอากาศหนาวจัด

ช. ฮีทไปป์แบบหมุนใช้ในการหล่อเย็นเพลา (shaft - cooling)

ฌ. ใช้เป็นท่อรับรังสีแสงอาทิตย์ในแผงรับรังสี

ญ. ใช้ทำเป็นมีดผ่าตัดที่คมมีดมีอุณหภูมิเย็นจัด เพื่อป้องกันความรู้สึกเจ็บปวดของคนไข้ในขณะที่ผ่าตัด

ฏ. ป้องกันการจับเกาะของหิมะบนถนนหรือไฮเวย์