บทที่ 6

แบบจำลองเชิงทฤษฎีของฮีทไปป์

6.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน[5]

การถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ มีทั้งการนำความร้อน (heat conduction) การพาความร้อน (heat convection) แต่กลไกที่สำคัญคือ การนำความร้อน ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นของฮีทไปป์ เป็นดังนี้

1. การนำความร้อนผ่านผนังท่อและวิกค์ที่อิ่มตัวด้วยของเหลว ที่ช่วงการระเหย
2. การพาความร้อนแฝงการระเหยโดยไอ จากช่วงการระเหยไปยังช่วงการควบแน่น
3. การนำความร้อนผ่านวิกค์ที่อิ่มตัวด้วยของเหลวและผนังท่อ ที่ช่วงการควบแน่น

6.2 ลักษณะอุณหภูมิของฮีทไปป์

การทำงานของฮีทไปป์ที่สภาวะคงที่ (steady - state) ในขอบเขตของขีดจำกัดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, U)

$$Q = AU_{HP}(T_{p,e} - T_{p,c}) \qquad (6.1)$$

โดยที่

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน

$T_{p,e}$ = อุณหภูมิผิวนอกของท่อที่ช่วงการระเหย

$T_{p,c}$ = อุณหภูมิผิวนอกท่อที่ช่วงการควบแน่น

U_{HP} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งกับพื้นที่

A พื้นที่ที่ใช้ในการกำหนดค่าของ U เช่น พื้นที่ผิวหน้าตัดของท่อฮีทไปป์ A_p^{HP} หรือ พื้นที่ผิวของช่วงการระเหย A_e หรือ พื้นที่ผิวของช่วงการควบแน่น A_c เป็นต้น

โดยนิยาม

$$AU_{HP} = A_P U_{HP,P} = A_C U_{HP,C} = A_e U_{HP,e} \qquad (6.2)$$

6.3 <u>กฎของฟูเรียร์</u>(Fourier' s Law)

การนำความร้อนผ่านวิกค์ที่อิ่มตัวด้วยของ เหลวและผนังท่อของฮีทไปป์ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ ดังสมการ

$$Q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2) \qquad (6.3)$$

โดยที่ $T_1 - T_2$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1 และ 2

R คือ ความต้านทานการถ่าย เทความร้อน (thermal resistance)

ในกรณีของแผ่น เรียบ (flat plate)

$$R = \frac{\delta}{kA} \qquad (6.4)$$

ในกรณีของผนังท่อรูปทรงกระบอก (cylindrical wall)

$$R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \qquad (6.5)$$

โดยที่ δ คือ ความหนาของแผ่น เรียบ

k คือ ค่าความนำความร้อน

A คือ พื้นที่ของแผ่น เรียบ

L คือ ความยาวของทรงกระบอก

r_1, r_2 คือ รัศมีภายในและภายนอกของทรงกระบอก ตามลำดับ

6.4 <u>ความสัมพันธ์ของคลา เซียส - คลา เปย์รอน</u>(Clausius - Clapeyron relationships)

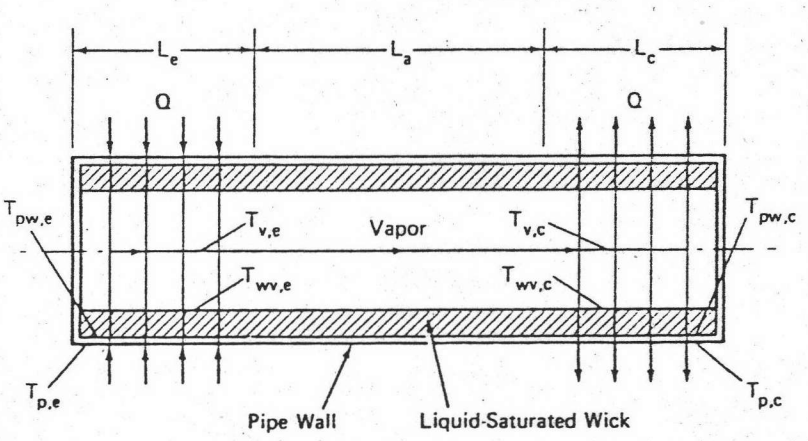
สมการของคลา เซียส - คลา เปย์รอน แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ของไอและความดัน ดังนี้

$$T_1 - T_2 = \frac{T_v(P_1 - P_2)}{\rho_v \lambda J} \qquad (6.6)$$

โดยที่

J คือ สมมูลย์กลความร้อน(mechanical equivalent of heat)

สมการที่กล่าวข้างต้นใช้อธิบายลักษณะการถ่าย เทความร้อนที่ เกิดขึ้นใน ฮีทไปป์แบบทั่วไป แสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ทิศทางการไหลของความร้อนในฮีทไปป์

ผลต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นดังนี้

ผนังท่อของฮีทไปป์ที่ช่วงการระ เหย

$$T_{p,e} - T_{pw,e} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L_e k_p} Q \qquad (6.7)$$

วิกค์ที่ช่วงการระ เหย

$$T_{pw,e} - T_{wv,e} = \frac{\ln(r_i/r_v)}{2\pi L_e k_{e,e}} Q \qquad (6.8)$$

บริ เวณไอไหลผ่าน

$$T_{v,e} - T_{v,c} = \frac{T_v(P_{v,e} - P_{v,c})}{\rho_v \lambda J Q} Q \qquad (6.9)$$

วิกค์ที่ช่วงการควบแน่น

$$T_{wv,c} - T_{pw,c} = \frac{\ln(r_i/r_v)}{2\pi L_c k_{e,c}} Q \qquad (6.10)$$

ผนังท่อที่ช่วงการควบแน่น

$$T_{pw,c} - T_{p,c} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L_c k_p} Q \qquad (6.11)$$

รวมสมการ(5.7) ถึง(5.11) ได้ว่า

$$T_{p,e} - T_{p,c} = Q\left[\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L_e k_p} + \frac{\ln(r_i/r_v)}{2\pi L_e k_{e,e}} + \frac{T_v(P_{v,e} - P_{v,c})}{\rho_v \lambda J Q} + \frac{\ln(r_i/r_v)}{2\pi L_c k_{e,c}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L_c k_p}\right] \qquad (6.12)$$

ดังนั้น

$$Q = A_p(T_{p,e} - T_{p,c})\left[\frac{\pi r_o^2 \ln(r_o/r_i)}{2\pi L_e k_p} + \frac{\pi r_o^2 \ln(r_i/r_v)}{2\pi L_e k_{e,e}} + \frac{\pi r_o^2 T_v(P_{v,e} - P_{v,c})}{\rho_v \lambda J Q} + \frac{\pi r_o^2 \ln(r_i/r_v)}{2\pi L_c k_{e,c}} + \frac{\pi r_o^2 \ln(r_o/r_i)}{2\pi L_c k_p}\right]^{-1} \qquad (6.13)$$

เพราะว่า $$Q = A_p U_{HP,p} (T_{p,e} - T_{p,c})$$

$$U_{HP,p} = \left[\frac{r_o^2 \ln(r_o/r_i)}{2 L_e k_p} + \frac{r_o^2 \ln(r_i/r_v)}{2 L_e k_{e,e}} + \frac{\pi r_o^2 T_v (P_{v,e} - P_{v,c})}{\rho_v \lambda J Q} + \frac{r_o^2 \ln(r_i/r_v)}{2 L_c k_{e,c}} + \frac{r_o^2 \ln(r_o/r_i)}{2 L_c k_p} \right]^{-1} \quad (6.14)$$

ในที่นี้สำหรับฮีทไปป์แบบทั่วไป (r_o/r_i) และ (r_i/r_v) มีค่ามากกว่า 0.6 ดังนั้น เขียนสมการ (6.14) เป็นดังนี้

$$U_{HP,p} = \left[\frac{r_o t_p}{2 L_e k_p} + \frac{r_o^2 t_w}{2 L_e r_i k_{e,e}} + \frac{\pi r_o^2 T_v (P_{v,e} - P_{v,c})}{\rho_v \lambda J Q} + \frac{r_o^2 t_w}{2 L_c r_i k_{e,c}} + \frac{r_o t_p}{2 L_c k_p} \right]^{-1} \quad (6.15)$$

ค่า $P_{v,e} - P_{v,c}$ คือ ผลลดของความดันไอรวม จากสมการข้างต้น ผลรวมของผลลดความดันของไอ ประกอบด้วย ผลลดเฉลี่ยความดันไอที่ช่วงการระเหย ผลลดของความดันไอที่ช่วงคั่นกลาง และผลลดเฉลี่ยความดันไอที่ช่วงการควบแน่น โดยถือว่าไอมีลักษณะดังนี้

1. การไหลของไอเป็นการไหลแบบชั้น ๆ
2. ไอมีคุณสมบัติไม่ยืดหดตัว
3. การกระจายของฟลักซ์ความร้อนมีค่าสม่ำเสมอตลอดแนวช่วงการระเหยและช่วงการควบแน่น

นั่นคือ ผลลด เฉลี่ยความดันไอที่ช่วงการระ เหย

$$\Delta P_v = \frac{F_v \int_0^{L_e} \int_0^x Q\,t\,dt\,dx}{L_e} \qquad (6.16)$$

$$= \frac{F_v L_e Q}{6}$$

ผลลดความดันของไอที่ช่วงคั่นกลาง

$$\Delta P_v = F_v L_a Q \qquad (6.17)$$

ผลลด เฉลี่ยความดันไอที่ช่วงการควบแน่น

$$\Delta P_v = \frac{F_v L_c Q}{6} \qquad (6.18)$$

รวบสมการ(6.16) ถึง(6.18) ได้ดังนี้

$$(P_{v,e} - P_{v,c}) = F_v Q \left(\frac{L_e}{6} + L_a + \frac{L_c}{6} \right) \qquad (6.19)$$

แทนค่าสมการ(6.19) ลงในสมการ(6.15) ได้เป็น

$$U_{HP,p} = \frac{1}{R_{p,e} + R_{w,e} + R_v + R_{w,c} + R_{p,c}} \qquad (6.20)$$

โดยที่

$R_{p,e}$ คือความต้านทานการถ่าย เทความร้อนของผนังท่อที่ช่วงการระ เหย

$R_{w,e}$ คือความต้านทานการถ่าย เทความร้อนของวิกค์ที่อิ่มตัวที่ช่วงการระ เหย

R_v คือความต้านทานการถ่าย เทความร้อน เนื่องจากการไหลของไอจากช่วงการระ เหยไปยังช่วงการควบแน่น

$R_{w,c}$ คือความต้านทานการถ่าย เทความร้อนของวิกค์ที่อิ่มตัวที่ช่วงการควบแน่น

$R_{p,c}$ คือความต้านทานการถ่าย เทความร้อนของผนังท่อที่ช่วงการควบแน่น

ในที่นี้

$$R_{p,e} = \frac{r_o t_p}{2 L_e k_p} \quad (6.21)$$

$$R_{w,e} = \frac{r_o^2 t_w}{2 L_e r_i k_{e,e}} \quad (6.22)$$

$$R_v = \frac{\pi r_o^2 F_v \left(\frac{1}{6} L_c + L_a + \frac{1}{6} L_e\right) T_v}{\rho_v \lambda J} \quad (6.23)$$

$$R_{w,c} = \frac{r_o^2 t_w}{2 L_c r_i k_{e,c}} \quad (6.24)$$

$$R_{p,c} = \frac{r_o t_p}{2 L_c k_p} \quad (6.25)$$

6.5 การจำลองแบบอุณหภูมิของฮีทไปป์

ในการนำฮีทไปป์ประยุกต์ใช้งาน ตัวแปรสำคัญเกี่ยวกับเงื่อนไขการใช้งานก็คือ เงื่อนไขของแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนภายนอก เพราะมีบทบาทสำคัญในการสรรหาแบบจำลองเชิงทฤษฎี เพื่ออธิบายลักษณะการทำงานของฮีทไปป์

ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์โดยทั่วไป เป็นลักษณะที่จุ่มตัวท่อ (immersed body) อยู่ในของไหลที่มีความเร็ว นั่นคือ เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาบังคับ (forced convection heat transfer) ดังนั้นโดยหลักการแล้ว อุณหภูมิของแหล่งให้(รับ)ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแหล่งให้(รับ)ความร้อนกับผิวท่อที่ช่วงการระเหย (ช่วงการควบแน่น)ของฮีทไปป์ สามารถใช้อธิบายลักษณะการทำงานของฮีทไปป์

<u>นิยาม</u> สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัส (interface heat transter, h_f)

$$Q = h_f A_f (T_f - T_p) \qquad (6.26)$$

โดยที่

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัส

h_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัส

A_f = พื้นที่ผิวสัมผัส

T_f = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนภายนอก

T_p = อุณหภูมิผิวท่อ

ในการกำหนดคุณสมบัติของของไหลโดยทั่ว ๆ ไป อาจใช้อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของของไหลกับอุณหภูมิผิวท่อ นั่นคือ $(T_\infty + T_p)/2$

6.5.1 <u>การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัส</u>

โดยทั่วไป เราอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$Nu = C(Re)^m (Pr)^{1/3} \qquad (6.27)$$

โดยที่

Nu = ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number)

$$= \frac{hd_o}{k} \qquad (6.28)$$

Pr = ตัวเลขแพรนด์เติล (Prandtl number)

$$= \frac{\mu C_p}{k} \qquad (6.29)$$

Re = ตัวเลขเรย์ไนลด์ (Reynold number)

$$= \frac{\rho V d_o}{\mu} \qquad (6.30)$$

C, m = ค่าคงที่ขึ้นกับรูปร่าง

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

V = ความเร็วของของไหล

k = ค่าความนำความร้อนของของไหล

สมการ (5.27) เขียนใหม่ได้เป็น

$$h_f = C\left(\frac{k_f}{d_o}\right)(Re_f)^m(Pr_f)^{1/3} \qquad (6.31)$$

สมการ (6.31) ใช้คำนวณหาค่า h_f ได้ เมื่อได้ค่า h_f แล้ว ก็คำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวท่อ, T_p ได้ จากนั้นคำนวณหาอุณหภูมิต่าง ๆ ตลอดแนวความยาวของฮีทไปป์ได้ โดยอาศัยสมการ (6.21), (6.22), (6.23), (6.24) และสมการ (6.25) ยกตัวอย่างเช่น ถ้ารู้อุณหภูมิด้านนอกของผิวท่อที่ช่วงการควบแน่น ก็สามารถคำนวณหา

ก. ผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวนอกและในของท่อ

ข. อุณหภูมิของวิกค์ที่อิ่มตัวด้วยของเหลวที่ช่วงการควบแน่น

ค. ผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกนซึ่งไอไหลผ่าน

ง. อุณหภูมิของวิกค์ที่อิ่มตัวด้วยของเหลวที่ช่วงการระเหย

จ. อุณหภูมิด้านนอกของผิวท่อที่ช่วงการระเหย

ใช้สมการ (6.21), (6.22), (6.23), (6.24) และสมการ (6.25) หาค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน R ซึ่งขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดของท่อ A_p แล้วคำนวณหาค่าผลลดอุณหภูมิของท่อฮีทไปป์ ΔT ดังต่อไปนี้

$$\Delta T = \frac{QR}{A_p} \qquad (6.32)$$

โดยที่ A_p = พื้นที่หน้าตัดของท่อ

$$= \frac{\pi}{4} d_o^2$$