บทที่ 5

การออกแบบฮีทไปป์

หลังจากเลือกของไหลใช้งานวัสดุ ท่อและวิกค์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบฮีทไปป์ ที่จะสร้างขั้นตอนในการออกแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน (CHI, 1976) ดังนี้

1. กำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อฮีทไปป์ โดยคำนึงถึงว่าความเร็วของไอ จะไม่สูงเกินไป

2. เลือกและคำนวณออกแบบท่อฮีทไปป์ โดยคำนึงถึงลักษณะงานที่จะนำฮีทไปป์ไปใช้งาน

3. คำนวณออกแบบวิกค์ โดยคำนึงถึงขีดจำกัดท่อรูเข็ม

4. ตรวจสอบหาขีดจำกัดอื่น ๆ เพื่อให้ทราบว่าฮีทไปป์ที่สร้างขึ้นนี้ทำงานภายใต้ขีดจำกัดอะไรในเงื่อนไขใด

ตัวอย่างการออกแบบฮีทไปป์ที่เสนอในที่นี้เป็นการออกแบบฮีทไปป์ แบบใช้ลวดตาข่ายเป็นวิกค์

5.1 การกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อฮีทไปป์ (CHI, 1976)

ท่อฮีทไปป์สามารถทำท่อขนิดต่าง ๆ ขึ้นกับรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ท่อที่นิยมใช้ทั่วไปเป็นท่อทรงกระบอก เพราะหาซื้อได้ง่ายและเป็นท่อที่สามารถทนความดันได้ดีกว่าท่อรูปร่างอื่น ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมีความสำคัญต่อฮีทไปป์มาก เพราะเป็นตัวกำหนดความเร็วของไอ ถ้าตัวเลขแมคห์ของไอมีค่าสูงจะเกิดการอัดตัวของไอขึ้น และการกระจายของอุณหภูมิในแนวแกนของฮีทไปป์มาก ค่าตัวเลขแมคห์ของไอ ควรยึดหลักว่ามีค่าไม่เกิน 0.2 เพราะที่ค่านี้การอัดตัวของไอและผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกนมีน้อยจนสามารถละเหยได้ ถ้าต้องการออกแบบฮีทไปป์ให้ส่งผ่านความร้อนสูงสุดในแนวแกนเป็น Q_{max} เส้นผ่าศูนย์กลางของย่านไอผ่าน d_v ในกรณีตัวเลขแมคห์ ($M_v = 0.2$) คือ

$$d_v = \left(\frac{20\, Q_{max}}{\pi \rho_v \lambda (r_v R_v T_v)^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (5.1)$$

d_v = เส้นผ่าศูนย์กลางของย่านไอผ่าน

Q_{max} = ฟลักซ์ความร้อนที่ส่งผ่านในแนวแกน

ρ_v = ความหนาแน่นของไอ

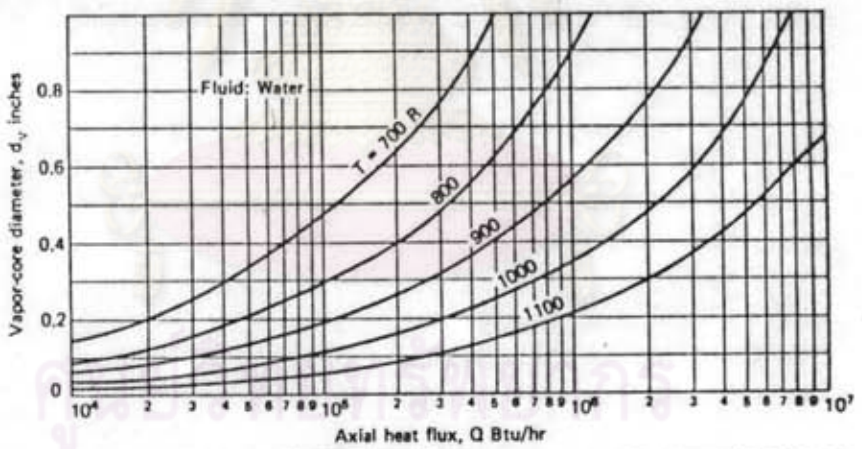
γ_v = อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะของไอ

λ = ความร้อนแฝงของการระเหย

R_v = ค่าคงที่ของก๊าซ

T_v = อุณหภูมิของไอ

สมการที่ (5.1) สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางของย่านไอผ่าน

5.2 การเลือกและคำนวณออกแบบท่ออีทไปป์ (CHI, 1976)

การเลือกประเภทของท่ออีทไปป์ต้องคำนึงถึงความทนทานต่อความดันไอที่เกิดขึ้นภายในท่ออีทไปป์ โดยทั่วไปนิยมใช้มาตรฐาน ASME โดยยึดถือหลักว่า ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้ (maximum allowable stress) จะเป็น 1/4 เท่า ของความทนต่อแรงดึงของวัสดุนั้น

(Ultimate tensile strengh, UTS, f_{tu}) คุณสมบัติความทนต่อแรงดึงของวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่นิยมใช้เป็นท่ออีทไปป์ แสดงไว้ในภาคผนวก ย. อนึ่ง การออกแบบโครงสร้างของท่อแบ่งออกได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. สำหรับท่อทรงกระบอกที่มีความหนาของผนังท่อน้อยกว่า 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2)

$$f_{max} = \frac{Pd_o}{2t} \qquad (5.2)$$

f_{max} = ความเค้นสูงสุดที่ผนังท่อรับได้

P = ผลต่างของความดันที่ 2 ด้านของผนังท่อ

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

t = ความหนาของผนังท่อ

2. สำหรับท่อทรงกระบอกที่มีผนังท่อหนา ความเค้นสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

$$f_{max} = P(d_o^2+d_i^2)/(d_o^2-d_i^2) \qquad (5.3)$$

f_{max} = ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้

P = ผลต่างของความดันที่ล่องด้านของผนัง

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

หมวกปิดท่ออีทไปป์ก็จัดอยู่ในประเภทวัสดุท่อเช่นกัน หมวกปิดท่อนี้มีรูปร่างหลายอย่าง เช่นเลี้ยวของทรงกลม กรวยหรือแผ่นแบน การคำนวณออกแบบก็สามารถทำได้ดังนี้

1. สำหรับหมวกปิดท่อเนื้อหนาแบบทรงกลมครึ่งเลี้ยว ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้คำนวณได้จากสมการที่ (5.4)

$$f_{max} = P(d_o^3+2d_i^3)/2(d_o^3-d_i^3) \qquad (5.4)$$

2. สำหรับหมวกปิดท่อแบบทรงกลมครึ่งเสี้ยวเนื้อบางน้อยกว่า 10 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ ความเค้นสูงสุดคำนวณได้จากสมการที่ (5.5)

$$f_{max} = \frac{Pd_o}{4t} \qquad (5.5)$$

3. สำหรับหมวกปิดท่อแบบแผ่นแบน ความเค้นสูงสุดคำนวณได้จากสมการที่ (5.6)

$$f_{max} = Pd_o^2/8t^2 \qquad (5.6)$$

f_{max} = ความเค้นสูงสุด

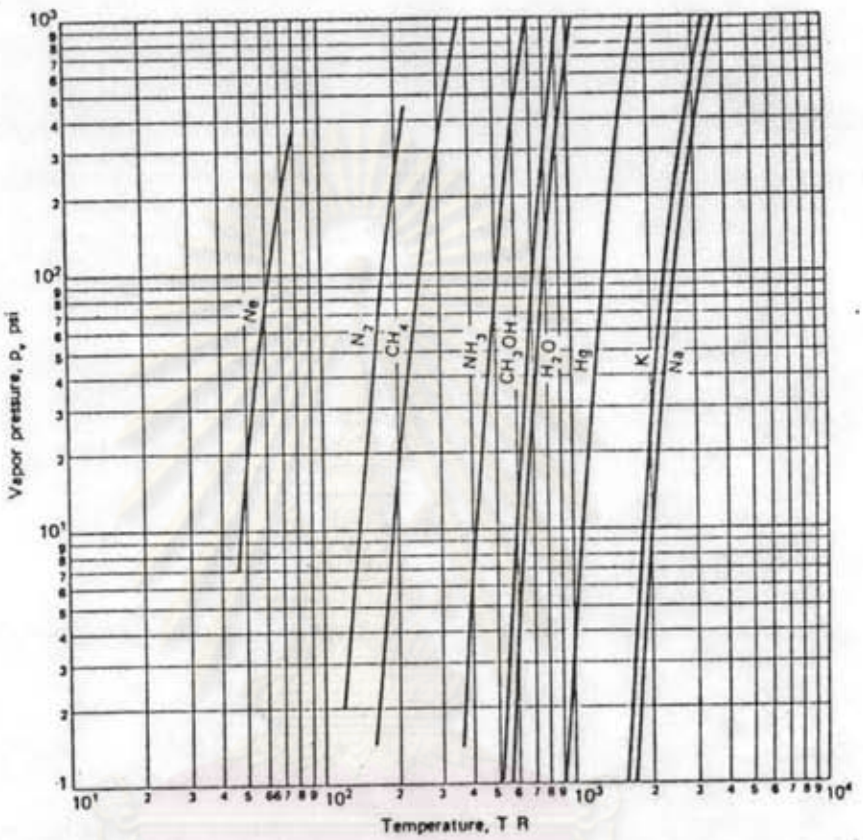
P = ผลต่างของความดันที่ส่องด้านของผนังหมวกปิดท่อ

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหมวกปิดท่อ

d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหมวกปิดท่อ

ผลต่างของความดันที่ส่องด้านของผนังท่อ/หมวกปิดท่อ P มีค่าเท่ากับความดันไอยองของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิใช้งานหักลบด้วยความดันบรรยากาศภายนอก อนึ่ง ค่าความดันไอยองของของไหลใช้งานนั้น สามารถเปิดดูได้จากหนังสือคู่มือต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างความดันไอยองน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



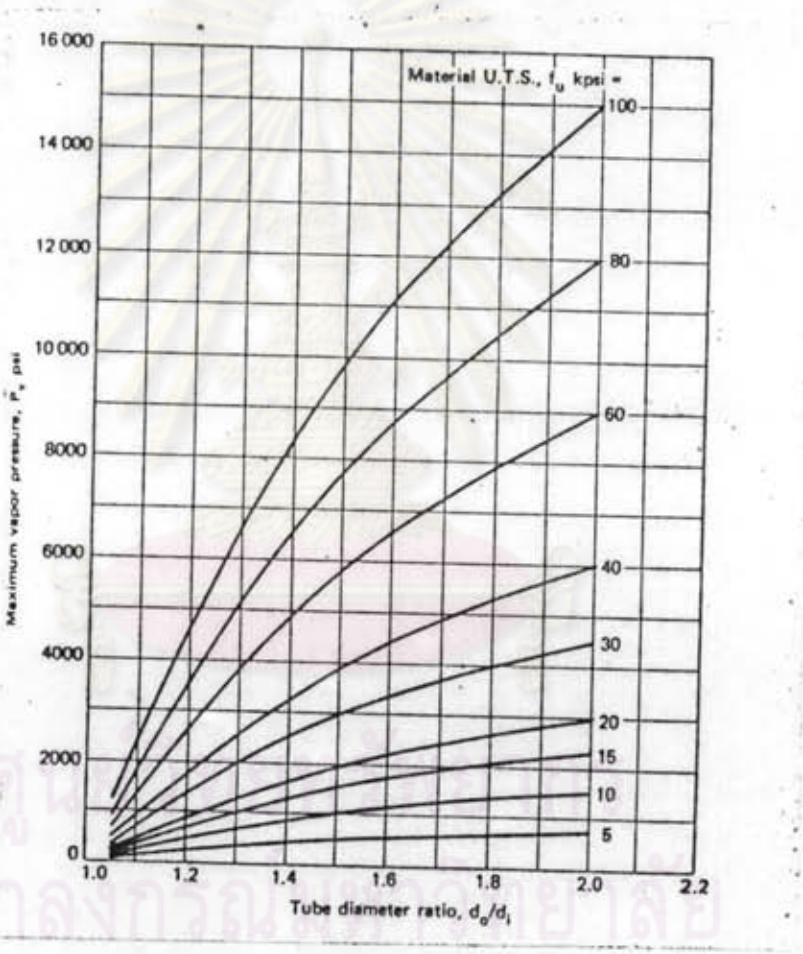
รูปที่ 5.2 ความดันไอที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของของไหลใช้งาน

เพื่อความสะดวกในการออกแบบ เราสามารถนำเอาสมการที่ (5.2) - (5.6) ไปเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อ (d_o/d_j) หรือขนาดหนวกปิดท่อ (t/d_o) กับความดันไอของของไหลใช้งาน (P_v) ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4

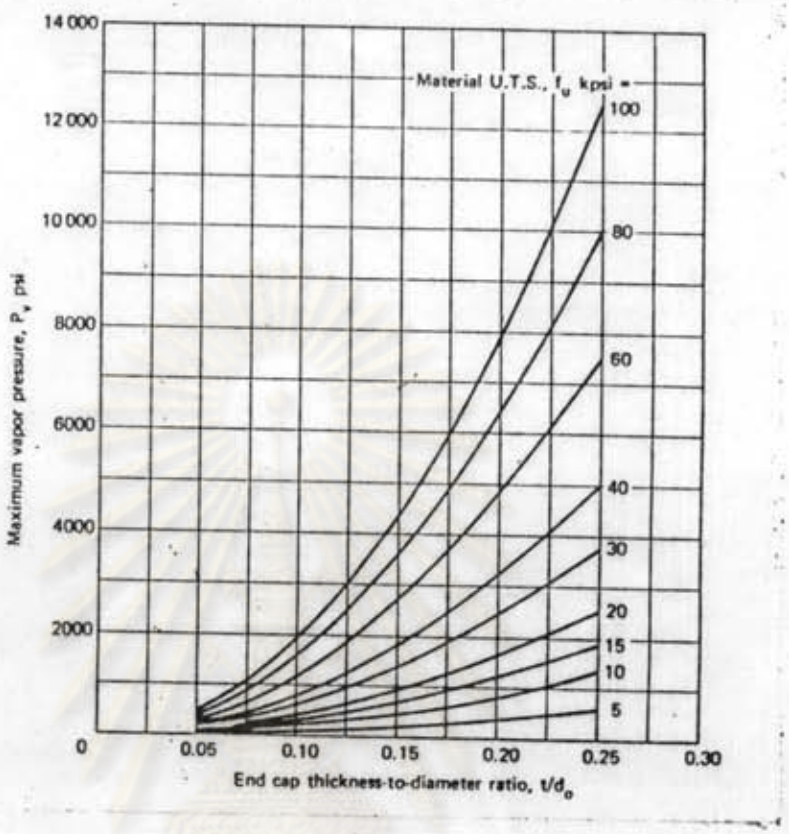
5.3 การคำนวณออกแบบวิกค์ (CHI, 1976)

บทที่ผ่านมาพอได้อธิบายแล้วว่าวิกค์มีอยู่หลายชนิด และได้แสดงรายละเอียดของวิกค์แต่ละชนิดไว้ ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบวิกค์มีดังนี้

1. กำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อฮีทไปป์ (d_i) ความยาวของฮีทไปป์ (L_t) และมุมวางใช้งานของฮีทไปป์ (φ) จากนั้นคำนวณหาความดันสถิตของของเหลว (Hydrostatic pressure, P_g)



รูปที่ 5.3 การออกแบบขนาดของท่อ



รูปที่ 5.4 การออกแบบขนาดของหมวกปิดท่อ

$$P_g = \rho_l g(d_i \cos\varphi + L_t \sin\varphi) \qquad (5.7)$$

2. เลือกชนิดของวิกค์ แล้วคำนวณหาความดันรูเข็ม (P_{cm}) ค่าความดันรูเข็มต้องไม่น้อยกว่า 2 เท่าของความดันสัมผัสของของเหลวมากนัก

3. สมมติค่าความหนาของวิกค์ที่ใช้ (tw) มาค่าหนึ่ง จากนั้นสามารถหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลของไอ (d_v) โดย

$$d_v = d_i - 2tw \qquad (5.8)$$

คำนวณหาค่าของ F_l, F_v โดยใช้สมการที่ (3.10) และ (3.17)

4. คำนวณหาค่ายึดจำกัดของฮีทไปป์เนื่องจากท่อรูเข็ม โดยใช้สมการที่ (3.24) หรือ

$$(QL)_{c,max} = (P_c - P_g)/(F_l + F_v) \qquad (5.9)$$

5. ตรวจสอบค่า $(QL)_{c,max}$ ที่ได้จากสมการที่ (5.9) ว่ามีค่ามากกว่าค่า (QL) ที่ต้องการหรือไม่ ? ถ้ามากกว่าแสดงว่าค่าที่ออกแบบไว้อาจใช้ได้ (ต้องไม่ลืมตรวจสอบค่ายึดจำกัดแบบอื่น ๆ ด้วย) แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า ต้องเริ่มคำนวณจากขั้นตอนที่ 3ใหม่ โดยลองเพิ่มความหนาของวิกค์ขึ้นอีก จนได้ค่า $(QL)_{c,max}$ มีค่ามากกว่าค่า (QL) ที่ต้องการ

<u>การตรวจสอบยึดจำกัด การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอและเนื่องจากการเดือด</u> เพื่อให้แน่ใจว่ามีค่ามากกว่ายึดจำกัด เนื่องจากท่อรูเข็มยึดจำกัดรูปแบบต่าง ๆ ที่มีค่าน้อยที่สุดในเงื่อนไขการใช้งานนั้นจะเป็นยึดจำกัดที่มีผลบังคับ และกำหนดอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดของฮีทไปป์

ก. ยึดจำกัดเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ ($Q_{e,max}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.22) หรือ

$$Q_{e,max}/A_v = \lambda \left[\frac{\sigma \rho_v}{2 r_{hs}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (5.10)$$

$Q_{e,max}$ = ยึดจำกัดเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ

A_v = พื้นที่หน้าตัดของช่องไอไหลผ่าน

λ = ความร้อนแฝงของการระเหย

σ = แรงตึงผิว

v = ความหนาแน่นของไอ

r_{hs} = รัศมีเชิงไฮดรอลิกของรูวิกค์ที่ผิว ($r_{h,s} = 2A_s/C_s$)

A_s, C_s = พื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบวงของรูวิกค์

ข. ขีดจำกัดเนื่องจากการเดือด ($Q_{b,max}$) สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.26) หรือ

$$Q_{b,max}/L_e = 2\pi k_e T_v \left(\frac{2\sigma}{r_n} - P_c\right)/(\lambda \rho_v \ln \frac{r_i}{r_v}) \qquad (5.11)$$

$Q_{b,max}/L_e$ = ขีดจำกัดเนื่องจากการเดือดต่อหน่วยความยาวของช่วงการเดือด

k_e = สภาพนำความร้อนของยื่นของเหลวและยื่นของวิกค์ที่อิ่มตัวด้วยของเหลว $\left[k_l (k_l+k_w)-(1-\epsilon)(k_l-k_w)\right] / \left[(k_l+k_w)+(1-\epsilon)(k_l-k_w)\right]$

ϵ = ความพรุนของวิกค์ ($\epsilon = 1-1.05\pi Nd/4$)

N = เบอร์เมย์ของตาข่าย

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดของวิกค์

k_l = สภาพนำความร้อนของของเหลว

k_w = สภาพนำความร้อนของวิกค์

T_v = อุณหภูมิของไอ

λ = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

v = ความหนาแน่นของไอ

σ = แรงตึงผิว

P_c = แรงดันรูเข็ม

r_i = รัศมีภายในของท่อ

r_v = รัศมีของช่องไอไหลผ่าน

r_n = รัศมีของฟองเดือด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีที่วิกค์เป็นลวดตาข่ายและของไหลใช้งานเป็นน้ำ สามารถใช้กราฟในภาคผนวก ค. เพื่อความสะดวกและรวดเร็ว

5.4 ตัวอย่างการออกแบบฮีทไปป์ (CHI,1976)

ปัญหา ต้องการออกแบบฮีทไปป์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ 3/4 นิ้ว (0.019 ม.) และวิกค์เป็นลวดตาข่าย เพื่อถ่ายเทความร้อนในอัตรา 100 บีทียู/ชม. (29.3 วัตต์) ที่อุณหภูมิ 400° ฟ (478 ค.) ความยาวทั้งหมด 4 ฟุต โดยครึ่งหนึ่งเป็นช่วงระเหยและอีกครึ่งหนึ่งเป็นช่วงควบแน่น และช่วงระเหยอยู่สูงกว่าช่วงควบแน่น 3 นิ้ว (0.0762 ม.)

คำตอบ แบ่งการออกแบบเป็นขั้นตอนดังนี้

1. การเลือกของไหลใช้งาน

สำหรับฮีทไปป์ที่ใช้งานที่ 400° ฟ หรือ 860° ร ของไหลใช้งานที่สามารถใช้ได้คือน้ำและเมธานอล (รูปที่ 4.2) แต่เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติการนำความร้อนแล้ว พบว่า (ดูรูปที่ 4.3, 4.4) น้ำมีคุณสมบัติการไหลและการนำความร้อนได้ดีกว่าเมธานอล ดังนั้นของไหลใช้งานที่เหมาะสมคือ น้ำ

2. การเลือกวัสดุวิกค์และท่อ

วัสดุที่ใช้ได้ดีกับของไหลใช้งาน ที่เป็นน้ำได้แก่ ทองแดง นิเกิลและทิเทเนียม (ตารางที่ 4.1) แต่ทองแดงมีสมภาพการนำความร้อนที่อุณหภูมิใช้งานนั้นดีกว่าวัสดุอื่น (รูปที่ 4.8) อีกทั้งทองแดงมีราคาถูกกว่าวัสดุอื่นทั้งสองมาก ดังนั้น วัสดุวิกค์และท่อจึงเลือก ทองแดง

ตรวจดูว่าฮีทไปป์น้ำ/ทองแดงที่เลือกมานั้น สามารถส่งผ่านความร้อนได้ถึง 100 บีทียู/ชม. หรือไม่? จากรูปที่ 5.1 ที่ตัวเลขเมฆ์เท่ากับ 0.2 ปริมาณความร้อนสูงสุดที่ส่งผ่านในแนวแกนสำหรับท่อขนาด 3/4 นิ้ว คือ 10^6 บีทียู/ชม. (2.93×10^5 วัตต์) ดังนั้น ปริมาณความร้อนแค่ 100 บีทียู/ชม. จึงไม่มีปัญหา

3. กำหนดขนาดของท่อและหมวกปิดท่อ

ที่อุณหภูมิ 400°ฟ น้ำมีความดันไอ 250 psi (1.72×10^6 N/m^2)(รูปที่ 5.2) และวัสดุทองแดงมี UTS เป็น 18 kpsi (1.24×10^8 N/m^2) (ภาคผนวก ย.) จากรูปที่ 5.3 พบว่าอัตราส่วน d_o/d_i เท่ากับ 1.15 ดังนั้น d_i เท่ากับ 0.652 นิ้ว (0.0166 ม.) และความหนาของท่อเท่ากับ 0.049 นิ้ว (1.24×10^{-3} ม.) จากรูปที่ 5.4 หา t/d_o ได้เท่ากับ 0.08 นั่นคือ t เท่ากับ 0.06 นิ้ว (1.52×10^{-3} ม.)

4. การคำนวณออกแบบวิกค์

อีกไปป์ถูกวางใช้งานในลักษณะช่วงระเหยอยู่สูงกว่าช่วงควบแน่น 3 นิ้ว ฉะนั้น วิกค์ที่ใช้ต้องมีแรงดันรูเข็มมากพอที่จะเอาชนะความดันสถิตของของเหลวจากสมการที่ (5.7)

$$h_s = P_g/\rho_l g = 3+0.652\ (48^2-3^2)^{\frac{1}{2}}/48$$

$$= P_g/\rho_l g = 3.647 \text{ นิ้ว}$$

$$= 0.304 \text{ ฟุต } (9.3 \times 10^{-2} \text{ ม.})$$

$$P_g = .304\ \rho_l g \text{ ปอนด์/ฟุต}^2$$

จากรูปภาคผนวก ค.3 $\rho_l g = 56\ lb_f/ft^2\text{-ft}$

$\therefore$ จะได้ $P_g = 17\ lb_f/ft^2$ (8.14×10^2 N/m^2)

$2P_g = 34\ lb_f/ft^2$

จากรูปภาคผนวก ค.2 วิกค์ลวดตาข่ายขนาด 250 เมช (9.84×10^3 m^{-1}) ให้ค่า P_{cm} เท่ากับ 32 lb_f/ft^2 (ซึ่งใกล้เคียงกับ $2P_g$)

วิธีกำหนดความหนาของวิกค์

จากสมการยึดจำกัดเนื่องจากรูเข็ม

$$(QL)_{c,max} = (P_{cm} - \Delta P_{\perp} - \rho_l g.L_t \sin\varphi)/(F_l + F_v)$$

สมมติค่า d_v = 0.5 นิ้ว ดังนั้น

$$A_w = 9.55 \times 10^{-4} \quad ft^2$$

จากรูปภาคผนวก ค. 4,5 จะได้

$$F_v = 4 \times 10^{-6} \ (lb_f/ft^2)/(Btu\text{-}ft/hr.)$$

$$F_l A_w = 4.6 \times 10^{-5} \ lb_f/(Btu\text{-}ft/hr.)$$

$$F_l = 0.0482 \ (lb_f/ft^2)/(Btu\text{-}ft/hr.)$$

$$(QL)_{c,max} = (32-17)/(0.0482+4X10^{-6})$$

$$= 311 \ Btu\text{-}ft/hr.$$

จากค่า QL ที่ต้องการ $QL = 0.5 \ (L_e + L_c)Q$

$$= 0.5(2+2)100$$

$$= 200 \ Btu\text{-}ft/hr.$$

$$(QL)_{c,max} > QL$$

∴ ค่า d_v = 0.5 นิ้วเป็นค่าที่ใช้ได้

ตรวจสอบยึดจำกัดเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอและหรือจากการเดือด

จากรูปภาคผนวก ค.6,7 อ่านค่าได้

$Q_{e,max}$ = $4.91X10^4$ Btu/hr.

$Q_{b,max}$ = 420 Btu/hr.

เนื่องจากค่ายึดจำกัดทั้ง 2 รูปแบบมีค่ามากกว่าค่าของยึดจำกัด เนื่องจากรูเข็ม ฮีทไปป์ที่ออกแบบนี้ทำงานภายใต้ยึดจำกัดเนื่องจากรูเข็ม

สรุปผลการออกแบบฮีทไปป์

ของไหลใช้งาน	น้ำ
ท่อ	ทองแดง ทรงกระบอก
	O.D = .75 นิ้ว I.D. = .652นิ้ว
วิกค์	ลวดตาข่ายขนาด 250 เมช (d = 0.0016 นิ้ว)
ความหนาของวิกค์	0.076 นิ้ว (24 ชั้น)
ช่องไอไหลผ่าน	d_v = 0.5 นิ้ว
ความหนาของหมวกปิดท่อ	0.060 นิ้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย