บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

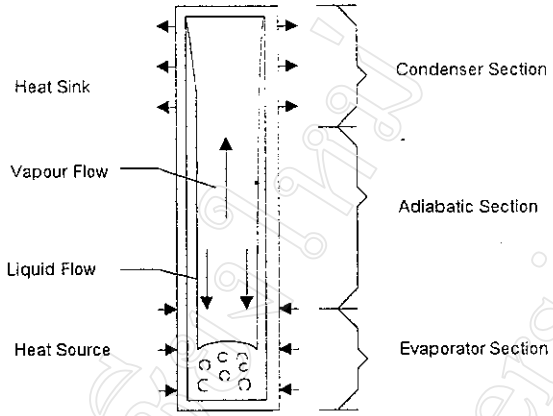
2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนแบบธรรมดา (Thermosyphon)

2.1.1 ท่อความร้อนแบบธรรมดา

ท่อความร้อนแบบธรรมดาหรือเทอร์โมไซฟอนนั้น จัดเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งสารทำงานจะระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนและถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความเย็น รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของท่อความร้อนแบบธรรมดาซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นท่อระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนฉนวนและส่วนควบแน่น

หลักการทำงาน คือ ความร้อนจากส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งมีสภาวะเป็นของเหลวอิ่มตัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเกิดการควบแน่นและไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน

ที่มา : Engineering Science Data Unit

2.1.2 การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบธรรมดา

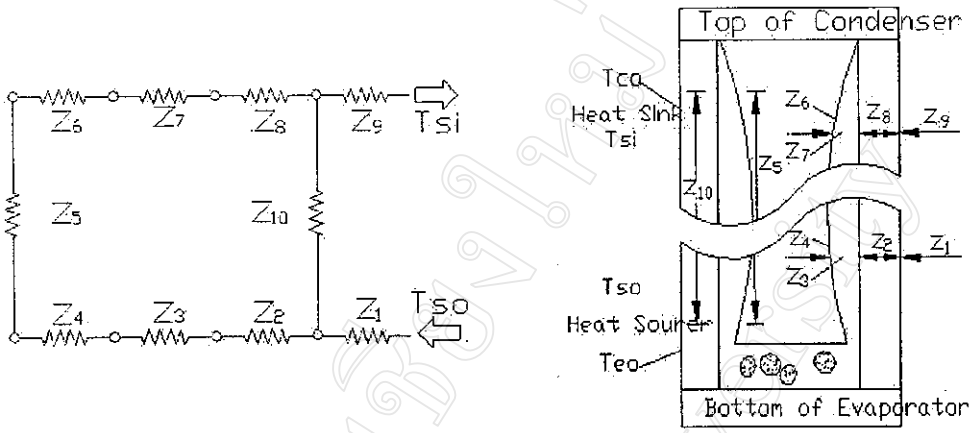
ค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งผ่านได้สามารถหาได้จากการหาค่าความต้านทานทั้งหมด (Z) ที่เกิดในระบบ โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2

เมื่อ Z_1, Z_9 คือ ความต้านทานที่เกิดจากการพาความร้อนโดยรอบผนังภายนอกท่อ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} A_{eo}} \tag{2.1}$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} A_{co}} \tag{2.2}$$

Z_2, Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อความร้อน ซึ่งหาได้จากสมการ



รูปที่ 2.2 ความต้านทานในส่วนต่างๆ ที่เกิดในท่อความร้อน

ที่มา : Engineering Science Data Unit

$$Z_2 = \frac{\ln\left(D_o/D_i\right)}{2\pi L_e k_x} \tag{2.3}$$

$$Z_8 = \frac{\ln\left(D_o/D_i\right)}{2\pi L_e k_x} \tag{2.4}$$

Z_3, Z_7 คือ ความต้านทานภายในเนื่องจากของเหลวที่เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อน โดยแยกเป็น

Z_{3p} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแอ่งของเหลวหาได้จากสมการ

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3\, g^{0.2} Q^{0.4} \left(\pi D_i L_e\right)^{0.6}} \tag{2.5}$$

เมื่อ

$$\Phi_3 = 0.325 \times \frac{\rho_l^{0.5} k_l^{0.3} C_{p_l}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu^{0.1}} \left[\frac{p_v}{p_a} \right]^{0.23} \quad (2.6)$$

Z_{3f} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ส่วนแอ่งของเหลวในส่วนรับความร้อน หาได้จากสมการ

$$Z_{3f} = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\Phi_2 = \left(\frac{L k_l^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (2.8)$$

และเงื่อนไขในการใช้ค่า Z_{3p} และ Z_{3f} เพื่อใช้เป็นค่า Z_3 คือ

ถ้า $Z_{3p} \rangle Z_{3f}$ แล้ว

$$Z_3 = Z_{3p} \quad (2.9)$$

ถ้า $Z_{3p} \langle Z_{3f}$ แล้ว

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f}(1 - F) \quad (2.10)$$

เมื่อ F คือ อัตราการเติมสารทำงาน โดย

$$F = \frac{V_l}{AL_e} \quad (2.11)$$

Z_7 คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนคายความร้อน หาได้จากสมการ

$$Z_7 = \frac{C\,Q^{1/3}}{D_i^{4/3}\,g^{1/3}\,L_c\,\Phi_2^{4/3}} \tag{2.12}$$

Z_4, Z_6 คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน ในส่วนรับความร้อนและในส่วนคายความร้อน

Z_5 คือ ค่าความต้านทานซึ่งเกิดจากความดันที่ลดลงในส่วนคายความร้อน

ซึ่ง Z_4, Z_5 และ Z_6 โดยปกติจะมีค่าน้อยมาก และไม่นำมาคิดในการคำนวณ

Z_{10} คือ ค่าการนำความร้อนของท่อความร้อนตามแนวความยาวท่อ ซึ่งหาค่าประมาณจากสมการ

$$Z_{10} = \frac{0.5L_e + L_a + 0.5L_c}{A_x \lambda_x} \tag{2.13}$$

โดยที่ A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อความร้อน

λ_x คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

เงื่อนไขการกำหนดค่าความร้อน คือ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} \rangle\ 20 \tag{2.14}$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ 2.14 ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \tag{2.15}$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (2.14) ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z = Z_1 + \left(\frac{1}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} \right)^{-1} + Z_9 \qquad (2.16)$$

หลังจากได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมแล้ว สามารถหาค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งถ่ายได้โดย

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} \qquad (2.17)$$

เมื่อ ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็น หาได้จากสมการ

$$\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h \qquad (2.18)$$

เมื่อ T_{so} คือ อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน

T_{si} คือ อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อน

ΔT_h คือ อุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องจากหัวน้ำ (Hydrostatic head)

2.2 หลักการทำงานของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบ (CLOHP)

ท่อความร้อนแบบสั่นจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเหมือนกับเทอร์โมไซฟอน มีลักษณะเป็นระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วน เหมือนกับเทอร์โมไซฟอน คือ ส่วนทำระเหย (L_e) ส่วนฉนวน (L_a) และส่วนควบแน่น (L_c) สามารถทำงานได้โดยเมื่อสารทำงานถูกบรรจุลงในท่อที่ทำมาจากท่อคาปิลลารี่ที่ขดไปมาภายในเป็นสภาวะสุญญากาศ เมื่อให้ความร้อนในส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลวอิ่มตัวเกิดการเดือดแบบฟองและรวมตัวเป็นก้อนไอ (Vapor slug) โดยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและลอยผ่านส่วนฉนวนไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ก้อนไอจะเกิดการควบแน่นและยุบตัวลงไปในที่สุด ดังนั้นสารทำงานที่เป็นก้อนไอจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ ถ้าอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าแตกต่างกัน

ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นนั้น อาจขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ลักษณะการทำงาน ชนิดของสาร อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ซึ่งในส่วนนี้ยังไม่มีนักวิจัยท่านใดสนใจศึกษา จึงจะทำการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.3.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CLOHP

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CLOHP เป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเมื่อท่อความร้อนทำงาน สารทำงานจะรับความร้อนจากส่วนทำระเหย และระเหยพาความร้อนไปคายให้กับส่วนควบแน่นโดยการควบแน่น จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ซึ่งจะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) ดังสมการที่ (2.19)

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \tag{2.19}$$

ในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนนั้น ยังมีคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่เป็นตัวควบคุมการส่งถ่ายความร้อนซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนด้วย คือค่าความต้านทานความร้อนรวม แสดงไว้ในสมการที่ (2.20) คือ

$$R = \frac{\left(T_{evap} - T_{cond}\right)}{Q} \tag{2.20}$$

โดยที่ค่า R คือ ค่าความต้านทานรวมของท่อ CLOHP ในที่นี้จะแตกต่างจากค่า Z ของท่อเทอร์โมไซฟอน คือ การทำงานของท่อ CLOHP นั้นในส่วนทำระเหยและควบแน่นไม่มีแอ่งของเหลวหรือฟิล์มของของเหลวอยู่จึงทำให้ไม่มีค่า Z_3 และ Z_7 จึงทำให้คิดค่าความต้านทานความร้อนในแบบของท่อเทอร์ไซฟอนไม่ได้

ในการหาค่าความร้อนที่น้ำร้อนให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหย หรือค่าความร้อนที่ของเหลวได้รับ คำนวณจากวิธี Calorific method โดยการวัดค่าอุณหภูมิขาเข้าและขาออกจากส่วนควบแน่น จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.21)

$$Q = \dot{m} C_p \left(T_{out} - T_{in} \right) \tag{2.21}$$

สำหรับคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CLOHP ยังไม่มีทฤษฎีเบื้องต้นมารองรับ เพราะยังไม่มีผู้ใดศึกษาวิจัยเอาไว้ จึงทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

2.3.2 ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless number)

ตัวแปรไร้มิติ คือ กลุ่มของตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล 2 สถานะและการเดือดภายใน ตัวอย่างของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญมีดังนี้

ก. ตัวเลขของบอนด์ (Bond number, Bo) เป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิวของของไหลใดๆ ซึ่งเป็นตัวเลขที่บอกถึงปรากฏการณ์ที่ของเหลวพยายามดึงไม่ให้ฟองอากาศหลุดลอยไปจากผนังท่อ (ปรากฏการณ์การเดือด) หากค่าตัวเลขของบอนด์มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเกิดการเดือดขึ้นภายในท่อความร้อน สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Bo = d\left[g\left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.22}$$

ข. ตัวเลขของคูทาเทลัดเซ (Kutateladze number, Ku) เป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ความร้อนที่ได้ต่อฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของสารทำงาน เป็นตัวเลขที่บอกถึงฟลักซ์ความร้อนที่ได้ว่าเกินค่าวิกฤตของสารทำงานหรือไม่ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Ku = \frac{q_e}{\rho_v h_{fg}' \left[\sigma g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}}} \tag{2.23}$$

นอกจากนี้อาจมีตัวแปรไร้มิติอื่นที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น ตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับความเร็วของสารทำงาน คือ ตัวเลขของเรย์โนลดส์ (Reynolds number, Re)