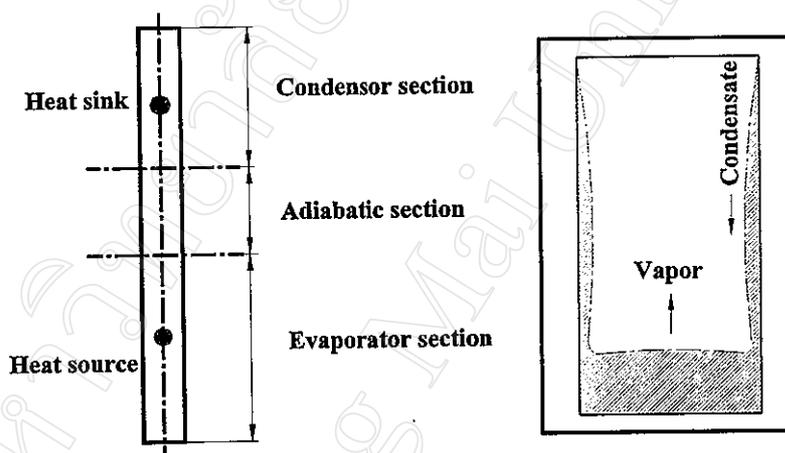


บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอน จัดเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก [3] ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานในท่อ ซึ่งระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อน โดยการควบแน่นหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความเย็น รูป 2.1 แสดงส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอนซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนฉนวน และส่วนควบแน่น



รูป 2.1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน [11]

หลักการทำงานคือ ความร้อนจากส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิมิดัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเกิดการควบแน่นและไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

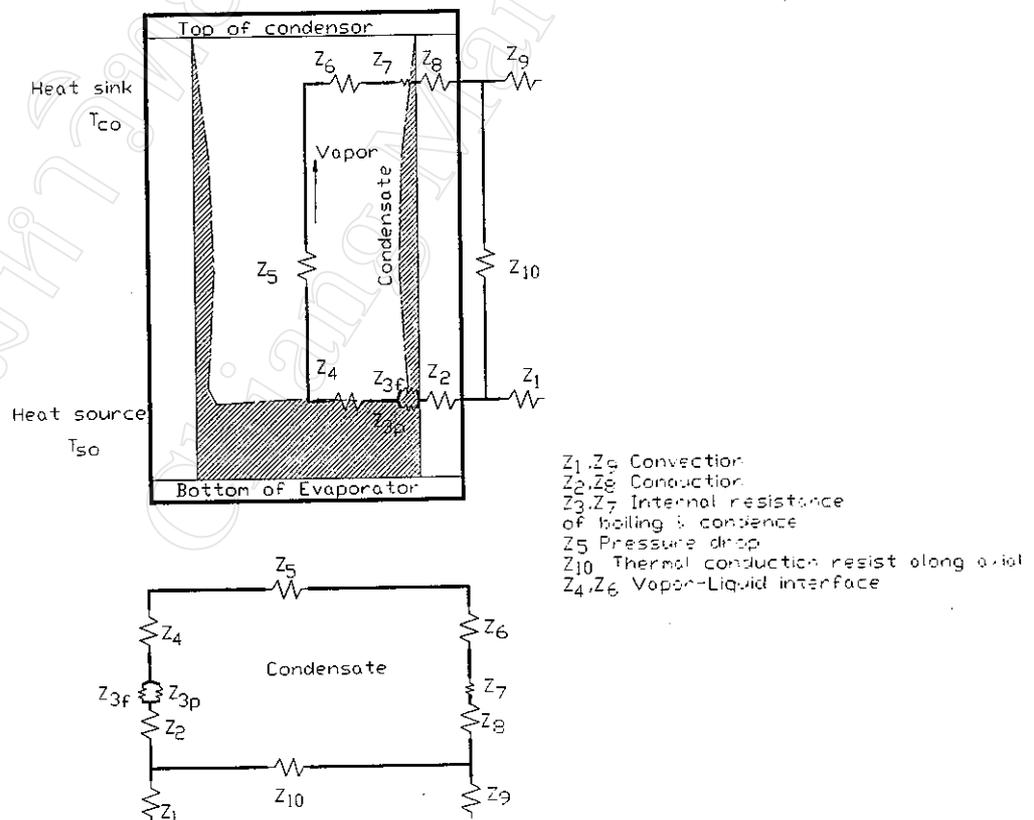
ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่ง

ความร้อนและแหล่งความเย็น เป็นต้น ซึ่งถ้ากล่าวถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้แล้ว ก็จะมีตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในขั้นตอนการคำนวณเกี่ยวกับ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ตัวแปรต่าง ๆ นั้น ได้แก่

- อัตราส่วนสันทัด คือ สัดส่วนความยาวของส่วนทำระเหยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
- อัตราส่วนการเติม คือ ปริมาณสารทำงานที่เติม พิจารณาจากปริมาตรของสารทำงานที่เติมในท่อเทียบกับปริมาตรของส่วนทำระเหย
- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน คือ ตัวเลขที่บอกถึงค่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ต่อหน่วยพื้นที่ ในช่วงอุณหภูมิแตกต่างกันหนึ่งค่า
- ตัวเลขของบอนด์ (Bond number) คือ ตัวเลขที่แสดงถึงอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิว

2.2 แบบจำลองทางความร้อน [11]

ค่าความร้อนที่ท่อความร้อน สามารถส่งผ่านได้สามารถหาได้จากค่าความต้านทานทั้งหมด (Z) ที่เกิดในระบบโดยพิจารณาจากรูป 2.2



รูป 2.2 แสดงความต้านทานในส่วนต่าง ๆ ที่เกิดในท่อความร้อน [11]

เมื่อ Z_1, Z_9 คือ ความต้านทานที่เกิดจากการพาความร้อนโดยรอบผนังภายนอกท่อ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} A_{eo}} \quad (2.1)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} A_{co}} \quad (2.2)$$

Z_2, Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อความร้อน ซึ่งหาได้จากสมการ

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

$$Z_8 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi L_c k_x} \quad (2.4)$$

Z_3, Z_7 คือ ความต้านทานภายในเนื่องจากของเหลวที่เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อน โดยแยกเป็น

Z_{3p} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแอ่งของเหลวหาได้จากสมการ

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

เมื่อ

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

Z_{3f} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ส่วนแอ่งของเหลวในส่วนรับความร้อนหาได้จากสมการ

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

เมื่อ

$$\Phi_2 = \left(\frac{Lk_i^3 \rho_i^2}{\mu_i} \right)^{1/4} \quad (2.8)$$

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

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ แล้ว

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

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ แล้ว

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

เมื่อ F คือ อัตราการเติมสารทำงาน โดย

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

Z_7 คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนคายความร้อน หาได้จากสมการ

$$Z_7 = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (2.12)$$

Z_4, Z_6 คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน ในส่วนรับความร้อน และในส่วนคายความร้อน

Z_5 คือ ค่าความต้านทานซึ่งเกิดจากความดันที่ลดลงในส่วนคายความร้อน

ซึ่งค่า Z_4, Z_5 และ Z_6 โดยปกติจะมีค่าน้อยมาก และไม่นำมาคิดในการคำนวณ

Z_{10} คือ ค่าการนำความร้อนของท่อความร้อนตามแนวความยาวท่อ (Axial) ซึ่งในเงื่อนไขข้อกำหนดที่จะทำการคำนวณในครั้งนี้จะไม่คิดค่าดังกล่าว ซึ่งจากเงื่อนไขที่กำหนด จะได้

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.13)$$

หลังจากได้ค่าความต้านทานของการส่งถ่ายความร้อนแล้ว สามารถหาค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งถ่ายได้โดย

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} \quad (2.14)$$

เมื่อ ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็น หาได้จากสมการ

$$\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h \quad (2.15)$$

$$\Delta T_h = \frac{(T_p - T_v) \times F}{2} \quad (2.16)$$

$$T_p = T_v + \left(L_c F \times \frac{dT_s}{dH} \right) \quad (2.17)$$

$$T_v = T_{si} + \frac{(Z_7 + Z_8 + Z_9)}{Z} (T_{so} - T_{si}) \quad (2.18)$$

$$\frac{dT_s}{dH} = \frac{T_s g}{L} \left[\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right] \quad (2.19)$$

หลังจากคำนวณค่า Q เริ่มต้นแล้วต้องทำการย้อนการคำนวณด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial & Error) จนกว่าค่าคำตอบที่ได้ออกมาจะเป็นค่าที่เป็นจริง (Exact) จึงใช้ค่า Q จากการคำนวณนั้นมาใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

2.3 แบบจำลองการทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน

Shiraishi et al. [17] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบปิด โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบควบคู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะเอ็มพิริคัล เพื่อศึกษาความสามารถของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ น้ำ เอทานอล และ R113 เป็นสารทำงาน และสร้างแบบจำลองของการทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอนโดยแยกพิจารณาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อน ในเทอร์โมไซฟอนเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนควบแน่น ส่วนที่เป็นแอ่งของเหลว และส่วนเหนือแอ่งของเหลว โดยที่ส่วนควบแน่นนั้น ใช้ทฤษฎีการควบแน่นที่ผนังส่วนควบแน่นของ Nusselt มาเป็นแบบจำลองดังแสดงในสมการที่ (2.20)

$$\tilde{h}_c \frac{(v^2/g)^{1/3}}{k} = (4/3)^{4/3} R_{ec}^{-1/3} \quad (2.20)$$

และนำสมการนี้มาวิเคราะห์ผลร่วมกับผลจากการทดสอบ ซึ่งทั้งสองวิธีมีผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี จากนั้นหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณแอ่งของเหลวในระบบปิดซึ่งมีลักษณะคล้ายกับระบบเปิดตามสมการที่ (2.21)

$$h_p(\text{close}) \propto h_p(\text{open}) \left(\frac{P}{P_a} \right)^n \quad (2.21)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเปิดแล้วได้ค่าคงที่จากผลของการทดสอบดังในสมการที่ (2.22)

$$h_p(\text{close}) = 0.32 \frac{\rho^{0.65} k^{0.3} C_p^{0.7} g^{0.2}}{\rho_v^{0.25} \lambda^{0.4} \mu^{0.1}} \left(\frac{P}{P_a} \right)^{0.23} q_c^{0.4} \quad (2.22)$$

ที่บริเวณฟิล์มเหนือแอ่งของเหลวนั้น Shiraishi ได้ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ทฤษฎีของ Nusselt มาเป็นพื้นฐานของแบบจำลองดังสมการที่ (2.23)

$$h_f \frac{\left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}}{k} = \left(\frac{4}{3}\right)^{1/3} \text{Re}^{-1/3} = h_f^*, \quad q_e < q_e^* \quad (2.23)$$

$$h_p = h_f, \quad q_e \geq q_e^* \quad (2.24)$$

และใช้สมการจากแบบจำลองร่วมกับข้อมูลการทดสอบ เพื่อทำนายค่าการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.25) และ (2.26)

$$T = f_3(P) \quad (2.25)$$

$$P(x) = P_v + \rho g(L_p - x) \quad (2.26)$$

ซึ่งเมื่อทราบอุณหภูมิไอ การกระจายอุณหภูมิภายในสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.27)

$$T_i(x) = f_3(P(x)), \quad 0 < x < L_p \quad (2.27)$$

$$T_i(x) = f_3(P_v) = T_v, \quad L_p < x \quad (2.28)$$

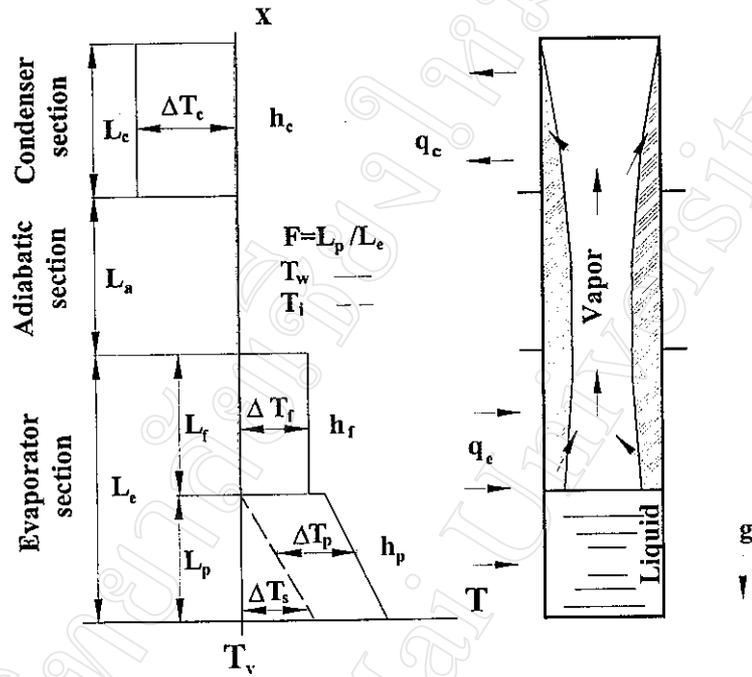
และเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนต่าง ๆ จากผลการทดสอบแล้ว การกระจายอุณหภูมิที่ผนังภายในดังแสดงในรูป 2.3 สามารถหาได้ดังสมการที่ (2.29) ถึง (2.32)

$$T_w(x) = T_i(x) + q_e/h_p, \quad 0 < x < L_p \quad (2.29)$$

$$T_w(x) = T_i(x) + q_e/h_p, \quad L_p < x < L_e \quad (2.30)$$

$$T_w(x) = T_i(x), \quad L_e < x < L_e + L_a \quad (2.31)$$

$$T_w(x) = T_i(x) - q_e/h_e, \quad L_e + L_a < x \quad (2.32)$$



รูป 2.3 แสดงแบบจำลองที่ใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายใน [17]