

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

เนื่องจากท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใหม่ และเป็นที่น่าสนใจในทางวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรมศาสตร์ เราจึงควรทราบถึงหลักการการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ โดยเริ่มจากหลักการพื้นฐานคือ

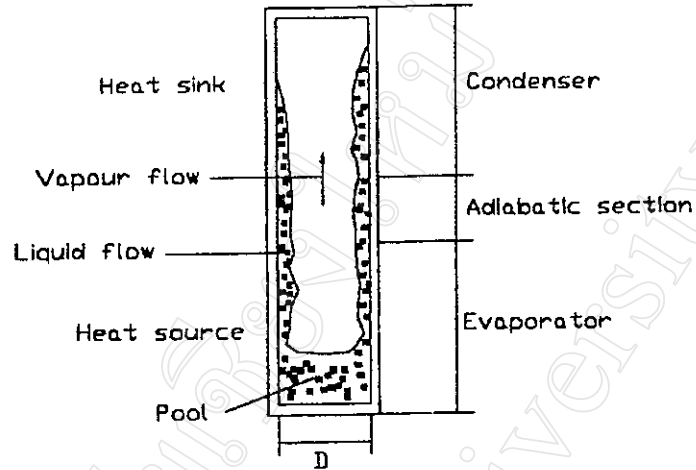
2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนแบบธรรมชาติ (Thermosyphon)

2.1.1 ท่อความร้อนแบบธรรมชาติ

ท่อความร้อนแบบธรรมชาติหรือเทอร์โมไซฟอนนั้น จัดเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งสารทำงานจะระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนและถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความเย็น รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของท่อความร้อนแบบธรรมชาติซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นท่อระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนฉนวน และส่วนควบแน่น

หลักการทำงานคือ ความร้อนจากส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเกิดการควบแน่นและไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน [8]

2.1.2 การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบธรรมชาติ

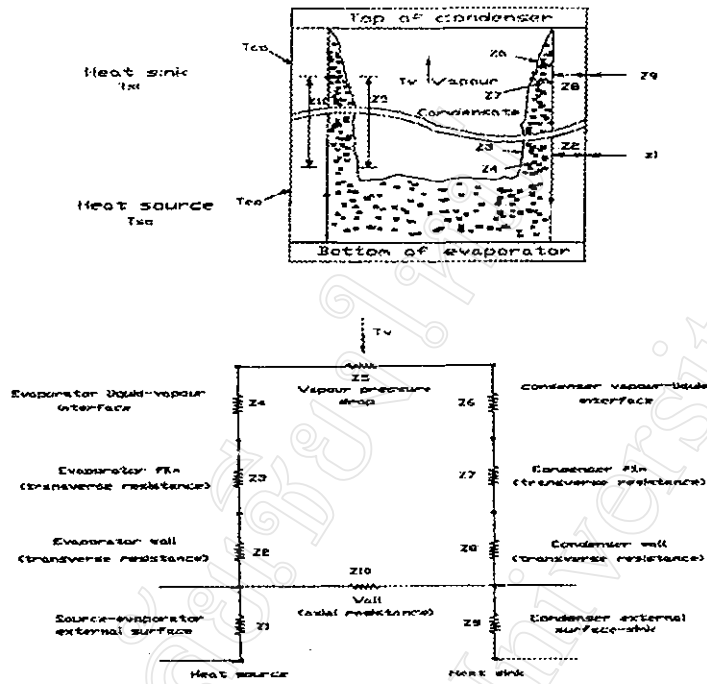
ค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งผ่านได้สามารถหาได้จากการหาค่าความต้านทานทั้งหมด (Z) ที่เกิดในระบบ โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2

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



รูปที่ 2.2 แสดงความต้านทานในส่วนต่างๆ ที่เกิดในท่อความร้อน [8]

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

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

Z_3, Z_7 คือ ความต้านทานภายในเนื่องจากของเหลวที่เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อน โดยแยกเป็น

Z_{3p} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแรงแ้งของเหลวหาได้จากสมการ

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

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

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

และเลื่อนไปในการใช้ค่า 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

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

Z_7 คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนคายความร้อน หาได้จากสมการ

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

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 (Axial) ซึ่งหาค่าประมาณจากสมการ

$$Z_{10} = \frac{0.5L_c + L_a + 0.5L_c}{A_x \lambda_x} \quad (2.13)$$

โดยที่ A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อความร้อน

λ_x คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

เงื่อนไขการกำหนดค่าความร้อนคือ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} > 20 \quad (2.14)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ 2.14 ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.15)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ 2.14 ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

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

หลังจากได้ค่าความต้านทานร้อนแล้ว สามารถหาค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งถ่ายได้โดย

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

เมื่อ ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็น หาได้จากสมการ

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

เมื่อ T_{so} คือ อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน

T_{si} คือ อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อน

ΔT_h คือ อุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องจากหัวน้ำ (Hydrostatic head)

2.2 ชนิดและหลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด (CEOHP)

ท่อความร้อนแบบสันจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานภายนอกเหมือนกับเทอร์โมไซฟอน มีลักษณะเป็นระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนเหมือนกับเทอร์โมไซฟอนคือ ส่วนทำระเหย (Le) ส่วนฉนวน (La) และส่วนควบแน่น (Lc) สามารถทำงานได้โดยเมื่อสารทำงานถูกบรรจุลงในท่อที่ทำมาจากท่อคาปิลารีที่ขดไปมาภายในเป็นสภาวะสุญญากาศ เมื่อให้ความร้อนในส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลวอิมิตัวเกิดการเดือดแบบฟองและรวมตัวเป็นก้อนไอ (Vapor slug) โดยความร้อนแฝงกลายเป็นไอ ลอยผ่านส่วนฉนวนไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ก้อนไอจะเกิดการควบแน่นและยุบตัวลงแล้วหายไปทีละจุด ดังนั้นสารทำงานที่เป็นก้อนไอจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ ถ้าอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าแตกต่างกัน

ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสันนั้น อาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ลักษณะการทำงาน ชนิดของสาร อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ซึ่งในส่วนนี้จะทำการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

ท่อความร้อนแบบพิเศษชนิดท่อความร้อนแบบสัน (OHP) สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิดหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยรูปที่ 2.3(a) เป็น Close – Loop Oscillating Heat Pipe (CLOHP) 2.3 (b) เป็น Close – End Oscillating Heat Pipe (CEOHP) และ 2.3(c) เป็น Closed – Loop Oscillating Heat Pipe แบบมีใช้ควาล์ว (CLOHP with check valve)

โดยในรูป 2.3(a) นั้นทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบคาปิลารีที่ยาวจำนวนหนึ่งท่อหรือมากกว่านั้นที่ถูกขดและเชื่อมปลายติดกันให้เป็นวงปิดโดยไม่มีเชื้อควาล์ว ในรูป 2.3(b) นั้นทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบคาปิลารีที่ทำปลายเปิดทั้งสองข้างโดยไม่มีเชื้อควาล์ว และไม่ใช้วงปิดจะประกอบด้วยท่อคาปิลารียาวๆเส้นหนึ่งทีขดไปตามรูป ในกรณีนี้ การถ่ายเทความร้อนจะปรากฏในรูปการสันตะเพื่อนที่เกิดมาจากคลื่นความดันที่สั่นไปมาอย่างรุนแรง โดยเกิดจากการเดือดแบบฟองในสารทำงานนั่นเอง และในแบบสุดท้ายคือ รูป 2.3(c) ทำมาจากท่อคาปิลารีที่ยาวจำนวนหนึ่งท่อหรือมากกว่านั้น ที่ขดไปมาและเชื่อมให้เป็นวงตามรูป ในวงของท่อความร้อนนั้นจะมีเชื้อควาล์วคอยบังคับทิศทางของสารทำงานซึ่งทำหน้าที่พาความร้อนไหลเวียนอย่างรวดเร็ว

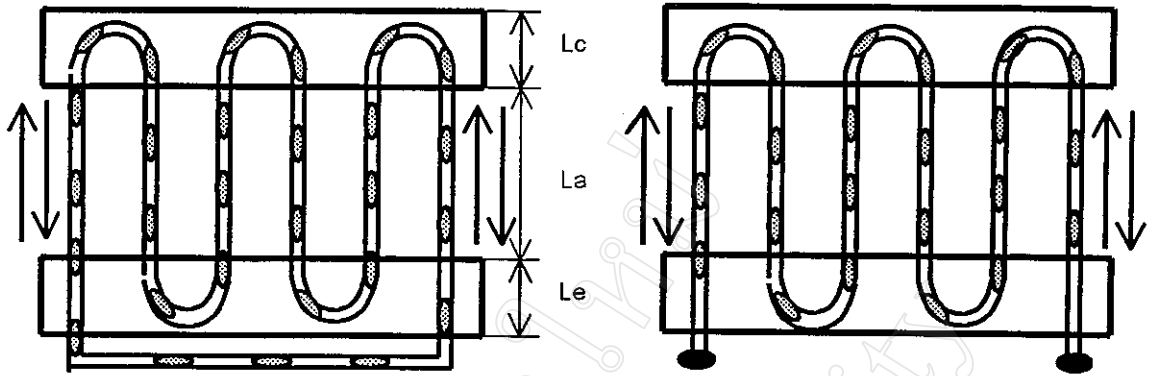
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.3.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CEOHP

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CEOHP เป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเมื่อท่อความร้อนทำงาน สารทำงานจะรับความร้อนจากส่วนทำระเหย และระเหยพาความร้อนไปคายให้กับส่วนควบแน่นโดยการกลั่นตัว จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ซึ่งจะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) ดังสมการที่ 2.19

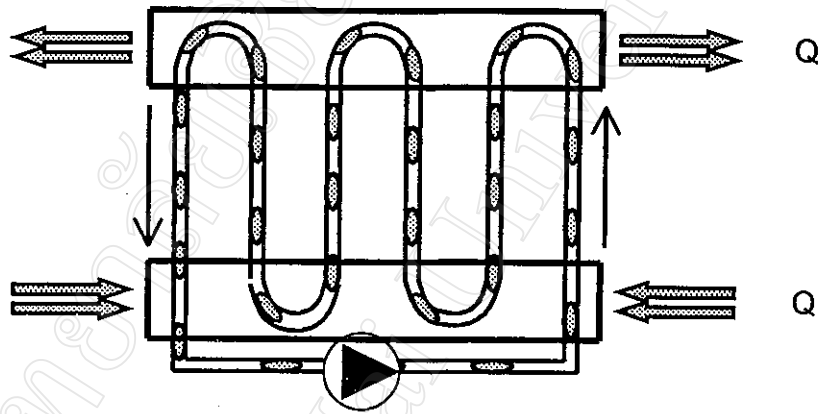
$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (2.19)$$

ในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนนั้น ยังมีคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่เป็นตัวควบคุมการส่งถ่ายความร้อนซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนด้วย คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวม แสดงไว้ในสมการที่ 2.20 คือ



2.3(a) Closed – Loop OHP

2.3(b) Closed – End OHP



2.3(c) Closed – Loop OHP with check valve

รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบทั้ง 3 ชนิดของ OHP

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

โดยที่ค่า R คือค่าความต้านทานรวมของท่อ CEOHP ในที่นี้จะแตกต่างจากค่า Z ของท่อเทอร์โมไซฟอนคือ การทำงานของท่อ CEOHP นั้นในส่วนทำระเหยและความแน่นไม่มีแอ่งของเหลวหรือฟิล์มของของเหลวอยู่จึงทำให้ไม่มีค่า Z3 และ Z7 จึงทำให้คิดค่าความต้านทานความร้อนในแบบของท่อเทอร์โมไซฟอนไม่ได้

และในการที่จะหาค่าความร้อนที่น้ำร้อนให้ ความร้อนแก่ส่วนทำระเหย (Heat sink) หรือ ค่าความร้อนที่น้ำรับ (Heat source) คำนวณจากวิธี caloric โดยการวัดค่าอุณหภูมิทั้งขาเข้าและขาออก จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตรดังสมการที่ 2.21

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

สำหรับคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CEOHP ยังไม่มี ทฤษฎีเบื้องต้นมารองรับ เพราะยังไม่มีผู้ใดศึกษาวิจัยเอาไว้ จึงต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อที่จะหา ทฤษฎีเบื้องต้นมารองรับต่อไป

2.3.2 ตัวแปรไร้มิติ

ตัวแปรไร้มิติ คือ กลุ่มตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษานี้มีตัวแปรอยู่ หลายประเภท เช่น

ก. ปราบกฎการไหลสวนทางของไอและของเหลว

ปราบกฎการไหลสวนทางของไอและของเหลวในท่อความร้อน คือ ปราบกฎการที่ฟิล์มของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นไหลลงสู่แอ่งของเหลวในส่วนทำระเหย ในขณะที่ไอของของเหลวกำลังไหลขึ้นไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งเป็นปราบกฎการที่เกิดขึ้นเหนือแอ่งของเหลวในส่วนทำระเหย ซึ่งปราบกฎการนี้เกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้มิติ 2 ตัวด้วยกันคือ [2]

- เวเบอร์นัมเบอร์ (Waber number) เป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงตึงผิวของของเหลวใดๆ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$We = \frac{v^2 \rho l}{\sigma} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 เมื่อนำ l คูณทั้งบนและล่างจะได้สมการที่ 2.23

$$We = \frac{v^2 \rho l^2}{\sigma l} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 ด้านบนก็คือแรงเฉื่อยเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอของเหลวที่กำลังไหลขึ้นไปสู่ส่วนควบแน่น ด้านล่างก็คือแรงเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลวที่พยายามดึงไม่ให้

ของเหลวที่ความหนืดกำลังไหลลงสู่แอ่งของเหลวในส่วนทำระเหยหลุดลอยไปกับไอของเหลวที่ไหลสวนทางขึ้นมา

- ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number) เป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากน้ำหนักของของเหลวใดๆ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Fr = \frac{v^2}{gl} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 เมื่อนำอัตราการไหลโดยมวล m คูณทั้งบนและล่างจะได้สมการ 2.25

$$Fr = \frac{mv^2}{mgl} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.25 ด้านบนก็คือแรงเฉื่อยเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอของเหลวที่กำลังไหลขึ้นไปสู่ส่วนความหนืด ด้านล่างก็คือแรงเนื่องจากน้ำหนักของของเหลวที่ความหนืดกำลังไหลลงสู่แอ่งของเหลวในส่วนทำระเหยเพื่อไม่ให้ของเหลวที่ความหนืดที่ไหลลงมาไหลกลับไปสู่ส่วนความหนืดตามแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอของเหลวที่ไหลสวนทางขึ้นมา

ข. ปრაกฏการณ์การเดือด

ปრაกฏการณ์การเดือด เป็นปრაกฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแอ่งของเหลวในส่วนทำระเหยของท่อความร้อน โดยปრაกฏการณ์นี้เกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้มิติ 2 ตัว คือ

- บอนด์นัมเบอร์ เป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิวของของไหลใดๆ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Bo = d \left[g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma} \right) \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 เมื่อนำ d คูณในวงเล็บทั้งบนและล่างจะได้สมการที่ 2.27

$$Bo = \left[\frac{d^3 g (\rho_l - \rho_v)}{d\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ 2.27 ด้านบนคือแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น เป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศที่เกิดจากการเดือดของของเหลว ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลว พยายามที่จะลอยขึ้นไปสู่ผิวด้านบนของของเหลวในแอ่ง ด้านล่างก็คือแรงดึงผิวของของเหลว เป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศพยายามดึงไม่ให้ฟองอากาศหลุดลอยไปจากผนังท่อเทอร์โมไซฟอนซึ่งก็คือปรากฏการณ์การเดือด ถ้าหากว่าค่าตัวเลขของบอนด์มากกว่า 1 แสดงว่าเกิดการเดือดขึ้นภายในเทอร์โมไซฟอน

- คุทาเทลาดเซนมเบอร์ (Kutateladze number) เป็นอัตราส่วนของ ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลต่อฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหลนั้น สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Ku = \frac{q_c}{\rho_v h_{fg} \left[\sigma g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}}} \quad (2.28)$$

จากสมการ 2.28 ด้านบนของสมการคือ ค่าการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของเทอร์โมไซฟอนที่ถ่ายเทไทม์ในขณะนั้น ด้านล่างของสมการก็คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนวิกฤตของของไหลในขณะนั้นที่สามารถทำได้

ค. ปรากฏการณ์การนำความร้อน

ปรากฏการณ์การนำความร้อน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานภายในท่อความร้อน โดยปรากฏการณ์นี้เกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้มิติ คือ

- ไบออตนมเบอร์ (Biot number) เป็นอัตราส่วนความต้านทานความร้อนภายในของวัตถุทั้งหมดต่อความต้านทานความร้อนในแต่ละชั้นของเนื้อวัตถุ

$$Bi = \frac{hL}{k_s} \quad (2.29)$$

จากสมการ 2.29 ปรับรูปแบบสมการใหม่แสดงในสมการที่ 2.30

$$Bi = \frac{h}{\frac{k_s}{L}} \quad (2.30)$$

จากสมการ 2.30 ด้านบนของสมการคือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน ซึ่งจะเกิดขึ้นโดยการระเหยกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อเทอร์โมไซฟอน ด้านล่างเป็น ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน ทั้งนี้ผนังของท่อเทอร์โมไซฟอนจะเป็นตัวนำความร้อน

ง. ปรากฏการณ์การพาความร้อน

- กราซอฟน์มเบอร์ (Grashof number) เป็นอัตราส่วนเนื่องจากแรงลอยตัวต่อแรงเนื่องจากความหนืด

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.31 ด้านบนคือแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนและแหล่งจ่ายความร้อน เป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศที่เกิดจากการเดือดของของเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าทำให้ความหนาแน่นต่ำกว่า พยายามที่จะลอยขึ้นไปสู่ผิวด้านบนของส่วนควบแน่น ด้านล่างก็คือความหนืดของของเหลว เป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศถูกดันไม่ให้หลุดลอยไปจากผนังท่อเทอร์โมไซฟอนซึ่ง

- แพลนตันน์มเบอร์ (Prandtl number) เป็นอัตราส่วนของโมเมนตัมต่อการแพร่กระจายของความร้อน

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.32)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.33 ด้านบนคือ การแพร่ของอนุภาคที่เคลื่อนเทียบกับไอที่เกิดจากการเดือดในแอ่งของเหลวแล้วเคลื่อนที่สู่ส่วนควมแน่น ด้านล่างคือการแพร่ของความร้อนเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นซึ่งความร้อนจะถูกพาไปในรูปของความร้อนแฝง

นอกจากนี้อาจมีตัวแปรไร้มิติอื่นที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น ตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับความเร็วของสารทำงาน คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number , Re)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University