

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ท่ความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นที่น่าสนใจทั้งทางวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรมศาสตร์ R.S.Gaugler เป็นคนแรกที่เสนอความคิดเกี่ยวกับท่ความร้อนในปี ค.ศ.1942 แต่ผู้ที่ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ท่ความร้อนเป็นคนแรกคือ G.M.Grover ได้ประดิษฐ์ท่ความร้อนขึ้นในปี ค.ศ. 1960 ตั้งแต่นั้นมาคุณสมบัติอันโดดเด่นของท่ความร้อนก็เป็นที่รู้จักกันทั่วไป และได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ (ประดิษฐ์, 2536) โดยทั่วไปท่ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ด้วยกันคือ ท่ความร้อนแบบมีวัสดุพรุน (Wick) และท่ความร้อนแบบไม่มีวัสดุพรุน หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 ชนิดมีหลักการพื้นฐานดังนี้

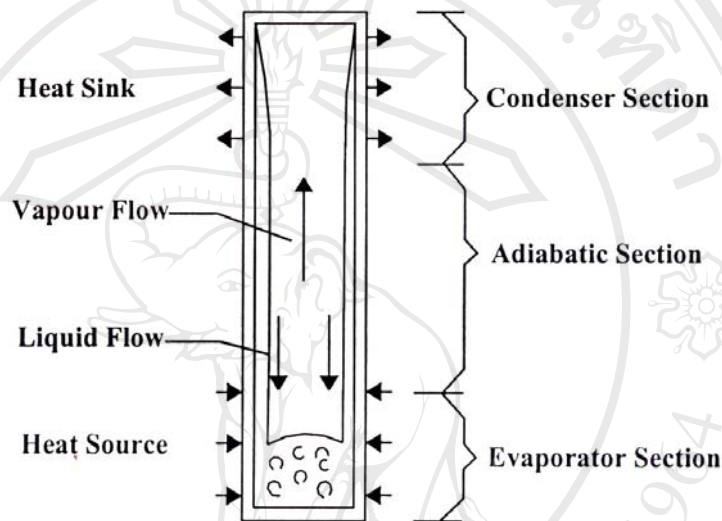
2.1 หลักการและทฤษฎีของท่ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

2.1.1 ท่ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ท่ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้นเป็นท่ความร้อนที่ปราศจากวัสดุพรุนซึ่งช่วยในการดึงสารทำงานที่กลั่นตัวให้ไหลย้อนกลับไปยังส่วนทำระเหย เป็นอุปกรณ์ความร้อนที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่ ซึ่งสารทำงานจะระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนและถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความเย็น รูป 2.1 แสดงส่วนประกอบของท่ความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายในมีลักษณะเป็นท่อระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนอะเดียบาติก และ ส่วนควบแน่น

หลักการทำงานคือเมื่อสารทำงานภายในท่บริเวณส่วนทำระเหยได้รับความร้อน สารทำงานจะระเหยกลายเป็นไอนำเอาความร้อนไปยังส่วนควบแน่นที่อยู่ด้านบนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าและจะปลดปล่อยความร้อนที่ส่วนควบแน่น จากนั้นสารทำงานจะกลั่นตัวเป็นของเหลวย้อนกลับลงมาตามผนังด้านในของท่สู่ส่วนทำระเหยโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อรับความร้อนต่อไป เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้

ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของท่อ ลักษณะการติดตั้ง ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น เป็นต้น



รูป 2.1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน

ที่มา : ESDU 80017 (1980)

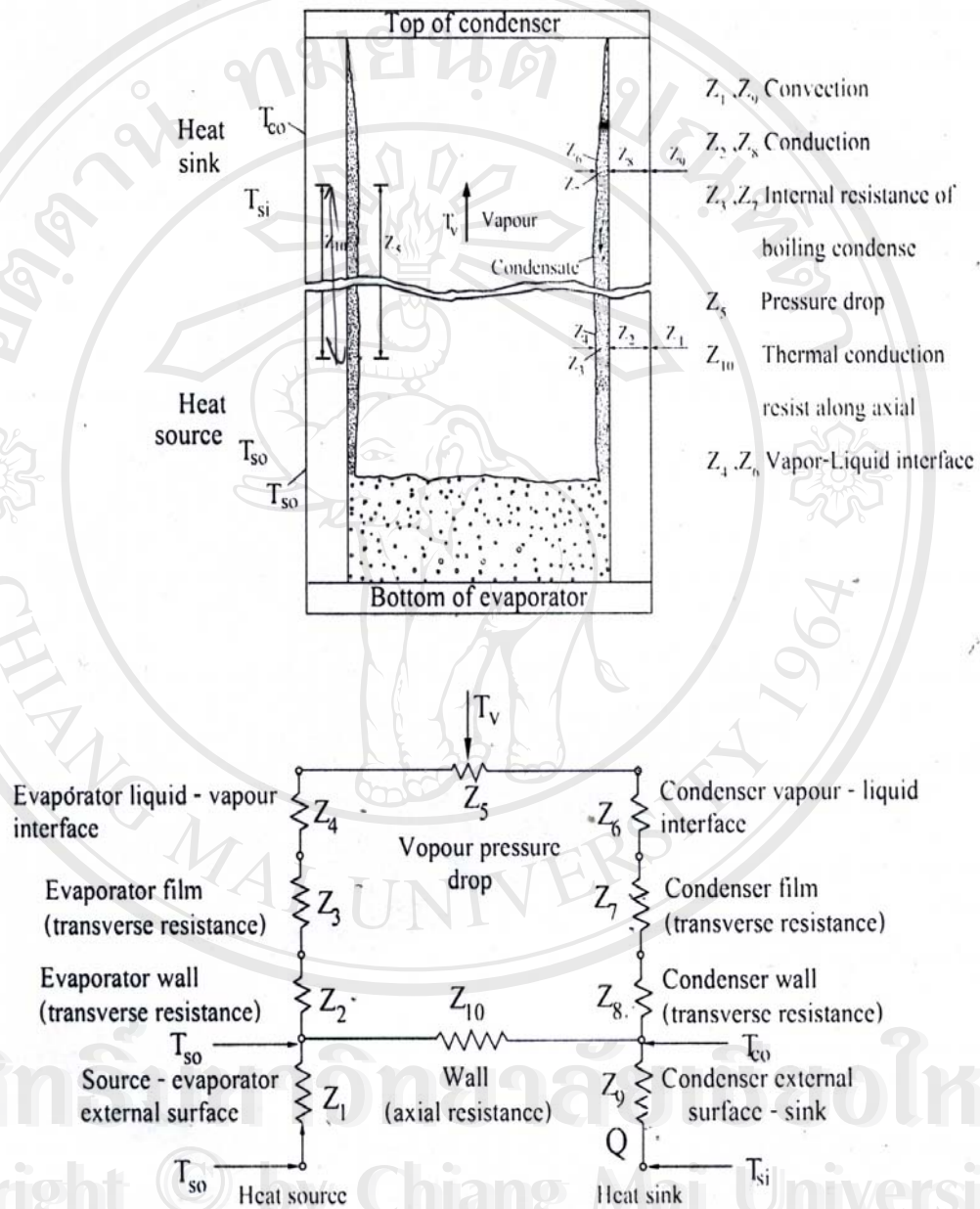
2.1.2 การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน

ค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งผ่านได้สามารถหาได้จากการหาค่าความต้านทานทั้งหมด (Z) ที่เกิดในระบบ โดยพิจารณาจากรูป 2.2

เมื่อ Z_1 และ Z_9 คือความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนกับผิวนอกของส่วนทำระเหยและระหว่างผิวนอกของส่วนควบแน่นกับส่วนระบายความร้อนตามลำดับ

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

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



รูป 2.2 ความต้านทานความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้นในท่อความร้อน

ที่มา : ESDU 81038 (1981)

Z_2 และ Z_8 คือความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อความร้อนซึ่งหาได้จากสมการ

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

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

Z_3 และ Z_7 คือความต้านทานความร้อนภายในเนื่องจากของเหลวที่เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อนโดยแยกเป็น

Z_{3p} คือความต้านทานความร้อนที่เกิดจากแอ่งของเหลวหาได้จากสมการ

$$Z_{3p} = \frac{1}{\phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$\phi_3 = 0.325 \times \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (2.6)$$

Z_{3p} คือความต้านทานความร้อนของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ส่วนแอ่งของเหลวในส่วนรับความร้อน 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 $Z_{3p} > Z_{3f}$ 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 คืออัตราการเติมสารทำงานโดย

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

Z_7 คือความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนคายความร้อน 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 คือความต้านทานความร้อนซึ่งเกิดจากความดันลดลงในส่วนคายความร้อน

ซึ่ง Z_4, Z_5 และ Z_6 โดยปกติจะมีค่าน้อยมากและไม่นำมาคิดในการคำนวณ

Z_{10} คือ ค่าการต้านทานความร้อนของท่อความร้อนตามแนวความยาวท่อ (Axial) ซึ่งหาค่าประมาณจากสมการ

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

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

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

หลังจากได้ค่าความต้านทานความร้อนแล้ว สามารถหาค่าความร้อนที่ต่อความร้อนสามารถส่งถ่ายได้โดย

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

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 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating Heat Pipe : PHP)

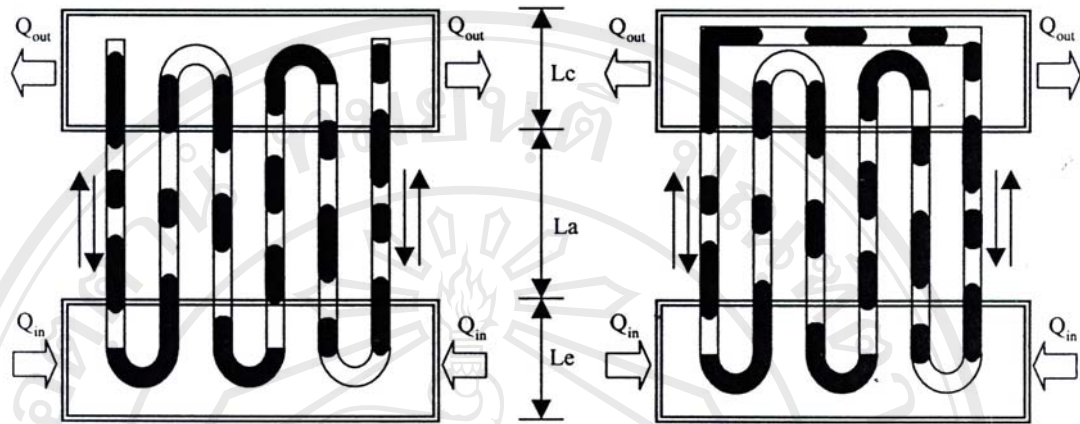
2.2.1 ท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating Heat Pipe : PHP)

ท่อความร้อนแบบสั่นจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเหมือนกับเทอร์โมไซฟอน มีลักษณะเป็นระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนควบแน่น (Condenser section) และ ส่วนอะเดียบาติก (Adiabatic section) สามารถทำงานได้โดยเมื่อสารทำงานถูกบรรจุลงในท่อที่ทำมาจากท่อคาปิลลารีขดไปมาภายในเป็นสภาวะสุญญากาศ เมื่อให้ความร้อนในส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลวอัมพัทธ์เกิดการเดือดแบบฟองและรวมตัวเป็นฟองไอ (Vapor slug) โดยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและเคลื่อนที่ผ่านส่วนอะเดียบาติกไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ก้อนไอยังเกิดการควบแน่นและยุบตัวลงไปในที่สุด ดังนั้นสารทำงานที่เป็นก้อนไอยังสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ ถ้าอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีความแตกต่างกัน

ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแปร ในการศึกษาจะศึกษาตัวแปร คือ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน

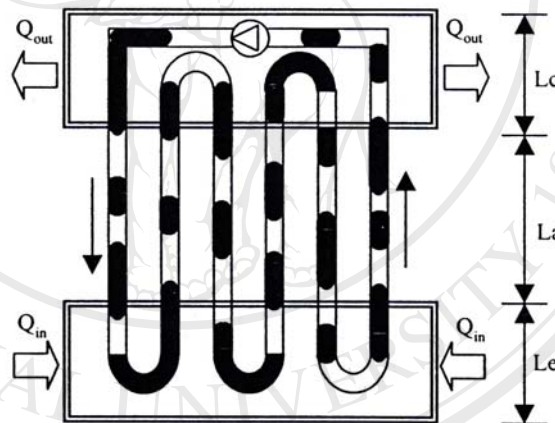
โดยทั่วไปท่อความร้อนแบบสั่น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบด้วยกันคือ ท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด (Closed-End Pulsating Heat Pipe) ท่อความร้อนแบบสั่นแบบวงรอบ (Closed-Loop Pulsating Heat Pipe) และสุดท้ายคือท่อความร้อนแบบสั่นแบบวงรอบมีวาล์วกันกลับของสติกของเหลว (Closed-Loop Pulsating Heat Pipe with Check Valve) ดังแสดงในรูป 2.3 ตามลำดับ

โดยในรูป 2.3 (ก) แสดงท่อความร้อนที่ทำขึ้นจากท่อคาปิลลารีโดยปลายทั้งสองข้างถูกปิดไว้ และในท่อบรรจุสารทำงาน การถ่ายเทความร้อนจะปรากฏในรูปของการสั่นจากคลื่นความดันที่สั่นไปมาอย่างรุนแรง โดยเกิดจากการเดือดของสารทำงานในท่อความร้อน รูป 2.3 (ข) แสดงท่อความร้อนที่ทำจากท่อคาปิลลารีเหมือนกับข้อ 2.3(ก) ต่างกันตรงที่ส่วนปลายจะต่อถึงกันให้เป็นวงรอบ ดังนั้นในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารในแนวแกนของท่อจึงเป็นเหตุให้เกิดการไหลเวียนในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และในแบบสุดท้ายก็คือ รูป 2.3(ค) แสดงท่อความร้อนทำจากท่อคาปิลลารี ขดไปมาและเชื่อมให้เป็นวงรอบ ในวงรอบท่อความร้อนนั้นประกอบด้วยเช็ควาล์วเพื่อบังคับทิศทางการไหลของสารทำงานให้ไหลไปในทิศทางที่กำหนด



(ก) ท่อความร้อนแบบส้นปลายปิด

(ข) ท่อความร้อนแบบส้นแบบวงรอบ



(ค) ท่อความร้อนแบบส้นแบบวงรอบมีวาล์วกักเก็บของสัดักของเหลว

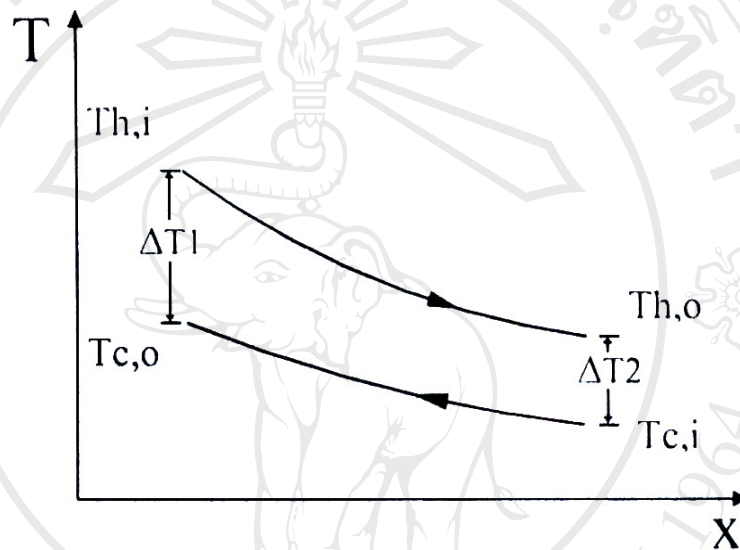
รูป 2.3 รูปแบบของท่อความร้อนแบบส้น

ที่มา : Akachi et al. (1996)

2.2.2 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบส้น

ในการศึกษาวิจัยนี้การไหลของอากาศเป็นแบบไหลสวนทางกัน จากรูป 2.4 จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิของไหลร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นและการกระจายอุณหภูมิของไหลเย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้

เนื่องจากการส่งถ่ายความร้อนจากของไหลร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระบายความร้อนให้แก่ของไหลเย็น ซึ่งการถ่ายเทความร้อนรวม (Q) ของท่อความร้อนแบบสัน สามารถคำนวณได้จากค่าอัตราการไหลเชิงมวลและอุณหภูมิเข้า-ออก ของของไหลที่ระบายความร้อนจากส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหйдังสมการ



รูป 2.4 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง
ที่มา : Frank P.Incropera, (1996).

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้านของไหลเย็น

$$Q_c = \left(\dot{m} c_p \right)_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2.19)$$

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้านของไหลร้อน

$$Q_c = \left(\dot{m} c_p \right)_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.20)$$

เมื่อ	$T_{c,o}$	คือ	อุณหภูมิขาออกส่วนควบแน่น (°C)
	$T_{c,i}$	คือ	อุณหภูมิขาเข้าส่วนควบแน่น (°C)
	$T_{h,i}$	คือ	อุณหภูมิขาเข้าส่วนทำระเหย (°C)
	$T_{h,o}$	คือ	อุณหภูมิขาออกส่วนทำระเหย (°C)

จะเห็นว่าสมการข้างต้นจะพิจารณาเฉพาะการส่งถ่ายความร้อนแต่ละกระแสน้ำของไหล ดังนั้นในการพิจารณาถึงการส่งถ่ายความร้อนสองกระแสน้ำจึงต้องมีวิธีการคิดการส่งถ่ายความร้อนจากทั้งสองกระแสน้ำคือ การพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิ Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) (อดิพงษ์ , 2001)

$$Q = (UA)_{total} \Delta T_{lmtd} \quad (2.21)$$

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left[\frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})} \right]} \quad (2.22)$$

$$(UA)_{total} = \frac{1}{Z_{eo} + Z_{et} + Z_{ei} + Z_{ci} + Z_{ct} + Z_{co}} \quad (2.23)$$

เมื่อ

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของอากาศ

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ

ΔT_{lmtd} คือ log mean temperature difference

$(U)_{total}$ = Overall thermal resistance of PHP สามารถหาได้จากสมการ

โดยที่ค่า Z คือ ค่าความต้านทานรวมของท่อความร้อนแบบสั้น ในที่นี้จะแตกต่างจากกรณีเทอร์โมไซฟอน คือ การทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นนั้นในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นไม่มีแอ่งของเหลวหรือฟิล์มของเหลวอยู่จึงไม่มีค่า Z_3 และ Z_7 (ประภัสสร , 2003)

Z_{eo} และ Z_{ei} คือค่าความต้านทานความร้อนด้านนอกและด้านในของท่อในส่วนทำระเหย

ตามลำดับ

$$Z_{eo} = \frac{1}{h_{eo} A_{eo} \eta_o} \quad (2.24)$$

$$Z_{ei} = \frac{1}{h_{ei} A_{ei}} \quad (2.25)$$

Z_{co} และ Z_{ci} คือค่าความต้านทานความร้อนด้านนอกและด้านในของท่อในส่วนควบแน่นตามลำดับ

$$Z_{co} = \frac{1}{h_{co} A_{co} \eta_o} \quad (2.26)$$

$$Z_{ci} = \frac{1}{h_{ci} A_{ci}} \quad (2.27)$$

เมื่อ h_{eo} และ h_{co} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ จากสมการความสัมพันธ์ (Y.J.Chang, 1996)

$$j = 0.425 \text{Re}_{Lp}^{-0.496} \quad (2.28)$$

$$j = \frac{h_o \text{Pr}^{2/3}}{\rho C_p V_{\max}} \quad (2.29)$$

เมื่อ $V_{\max} = \frac{\dot{m}}{\rho S_{\min}} \quad (2.30)$

ส่วนประสิทธิภาพต่อความร้อนรวมหาได้จากสมการ

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f (1 - \eta_f)}{A_{\text{total}}} \quad (2.31)$$

เมื่อ $\eta_f = \frac{\tanh(ml)}{ml} \quad (2.32)$

$$m = \sqrt{\frac{2h_o}{k_f d_f}} \quad (2.33)$$

เมื่อ	j	คือ	Colburn factor
	Re_{Lp}	คือ	Reynolds number based on louver pitch
	S_{min}	คือ	พื้นที่ช่องว่างอากาศของครีบบายความร้อน (m^2)
	A_f	คือ	พื้นที่ครีบบายความร้อน (m^2)
	A_{total}	คือ	พื้นที่รวมของท่อความร้อน (m^2)
	η_f	คือ	ประสิทธิภาพของครีบบายความร้อน
	η_o	คือ	ประสิทธิภาพรวมของท่อความร้อน
Z_{et} และ Z_{ct}	คือค่าความต้านทานความร้อนของผนังท่อในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ		

$$Z_{et} = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi k L_e} \quad (2.34)$$

$$Z_{ct} = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi k L_c} \quad (2.35)$$

2.3 ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameters)

ตัวแปรไร้มิติ คือ กลุ่มของตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล 2 สถานะและการเดือดภายใน สามารถแยกปรากฏการณ์ภายในท่อได้ 2 ประเภทคือ ปรากฏการณ์การไหลของไอและของเหลว (Vapour-liquid counter-current flow) และปรากฏการณ์การเดือด (Boiling) (ธวัช , 2540)

2.3.1 ปรากฏการณ์การไหลของไอและของเหลว (Vapour-liquid counter-current flow)

ปรากฏการณ์การไหลสวนทางของไอและของเหลวในเทอร์โมไซฟอน คือปรากฏการณ์ที่ฟิล์มของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นไหลสู่ส่วนทำระเหย ในขณะที่ไอของของเหลวกำลังไหลขึ้นไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหนือแอ่งของเหลวในส่วนทำระเหย ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์นี้มี 2 ตัวแปร คือ ตัวเลขของเวเบอร์ (Weber number) และ ตัวเลขของฟรูด (Froude number)

Weber number (We) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงตึงผิวของของเหลวใดๆ สามารถนิยามได้ดังสมการ

$$We = \frac{v^2 \rho l}{\sigma} \quad (2.36)$$

จากสมการ (2.30) เมื่อนำ 1 คูณทั้งบนและล่างจะได้สมการที่ (2.31)

$$We = \frac{v^2 \rho l^2}{l \sigma} \quad (2.37)$$

เมื่อ	We	คือ	ตัวเลขของเวเบอร์
	v	คือ	ความเร็วของไอของของเหลว (m/s)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
	l	คือ	ความยาวของไอของเหลว (m)
	σ	คือ	แรงตึงผิวของของเหลว (N/m)

จากสมการ (2.37) ด้านบนคือแรงเฉื่อยเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอของเหลวที่กำลังไหลขึ้นสู่ส่วนควบแน่น ด้านล่างคือแรงเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลวที่พยายามดึงไม่ให้ของเหลวที่ควบแน่นที่กำลังไหลลงสู่แอ่งของเหลวในส่วนที่ระเหยหลุดลอยไปกับไอของเหลวที่ไหลสวนทางขึ้นมา

Froude Number (Fr) คืออัตราส่วนของแรงเฉื่อยเนื่องจากน้ำหนักของของเหลวใดๆ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Fr = \frac{v^2}{gl} \quad (2.38)$$

จากสมการ (2.38) เมื่อนำอัตราการใช้มวล m คูณทั้งบนและล่างจะได้สมการ (2.39)

$$Fr = \frac{m v^2}{m gl} \quad (2.39)$$

เมื่อ	Fr	คือ	ตัวเลขของฟรูด
	$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

จากสมการ (2.39) ด้านบนคือแรงเฉื่อยเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอของเหลวที่กำลังไหลขึ้นไปสู่ส่วนควบแน่น ด้านล่างคือแรงเนื่องจากน้ำหนักของของเหลวที่ควบแน่นที่กำลังไหลลงสู่ส่วนทำระเหยเพื่อไม่ให้ของเหลวที่ควบแน่นที่ไหลลงมาไหลกลับไปสู่ส่วนควบแน่นตามแรงแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอของเหลวที่ไหลสวนทางขึ้นมา

2.3.2 ปรากฏการณ์การเดือด (Boiling)

ปรากฏการณ์เดือดเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแอ่งของเหลวในส่วนทำระเหยของท่อความร้อนปรากฏการณ์นี้เกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้มิติ คือ

Bond Number (Bo) คือ อัตราส่วนแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิวของของไหลใดๆ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)d^2}{\sigma} \quad (2.40)$$

จากสมการที่ 2.40 เมื่อนำ d คูณทั้งบนและล่างจะได้สมการที่ 2.41

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)d^3}{d\sigma} \quad (2.41)$$

เมื่อ	Bo	คือ	ตัวเลขของบอนด์
	ρ_l	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
	ρ_v	คือ	ความหนาแน่นของไอของของเหลว (kg/m^3)

จากสมการ 2.41 ด้านบน คือแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นเป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศที่เกิดจากการเดือดของของเหลว ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลวพยายาม

ที่จะลอยขึ้นไปสู่ฟิวส์ด้านบนของของเหลวในแอ่ง ด้านล่างก็คือแรงดึงดูดผิวของของเหลว เป็นปรากฏการณ์ที่ฟองอากาศพยายามดึงไม่ให้ฟองอากาศหลุดลอยไปจากผนังท่อซึ่งก็คือปรากฏการณ์การเค็ด ถ้าหากว่าค่าตัวเลขของบอนด์มากกว่า 1 แสดงว่าเกิดการเค็ดขึ้นภายในท่อ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved