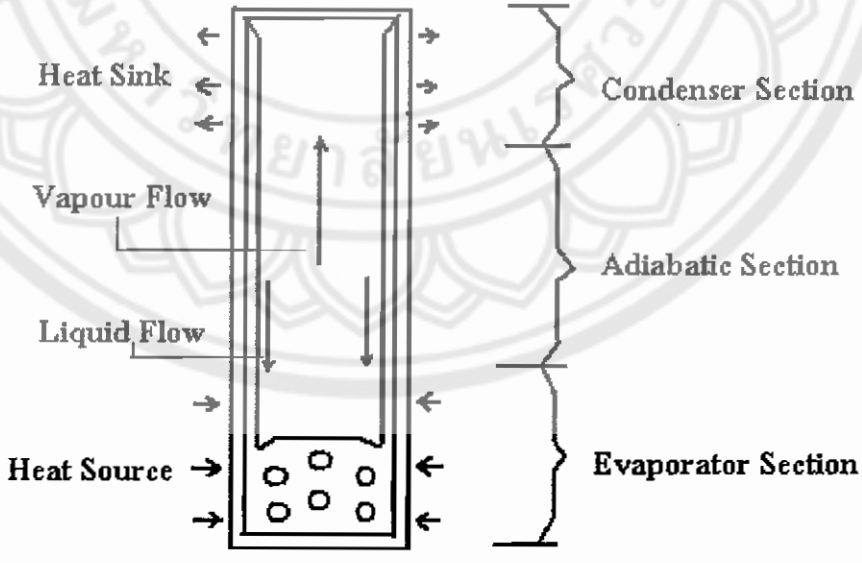
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบปิดจะมีโครงสร้างเป็นภาชนะปิดโดยภายในบรรจุสารทำงานจำนวนหนึ่ง ทำงานอยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก โดยได้แบ่งเป็นส่วนรับความร้อนหรือส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic section) และส่วนคายความร้อนหรือส่วนควบแน่น (Condenser section) ซึ่งการติดตั้งใช้งานจะต้องให้ส่วนทำระเหยอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นเสมอเมื่อติดตั้งอยู่กับภายใต้สนามแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วนทำระเหยจะสัมผัสอยู่กับแหล่งอุณหภูมิสูงและส่วนควบแน่นจะสัมผัสอยู่กับแหล่งอุณหภูมิต่ำ เมื่อสารทำงานอยู่ในส่วนทำระเหยรับพลังงานความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูงก็จะทำให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะเป็นไอลอยขึ้นสู่ด้านบนซึ่งเป็นส่วนควบแน่น เมื่อไอไปสัมผัสกับพื้นผิวของส่วนควบแน่นที่อยู่ในส่วนอุณหภูมิต่ำก็จะปล่อยความร้อนแฝงออกมาให้กับแหล่งอุณหภูมิต่ำแล้วส่วนตัวสารทำงานก็จะเปลี่ยนเป็นของเหลวไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยตามผนังท่อโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อย้อนกลับไปรับพลังงานความร้อนใหม่ต่อไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของเทอร์โมไซฟอน[2]

2.2 การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด

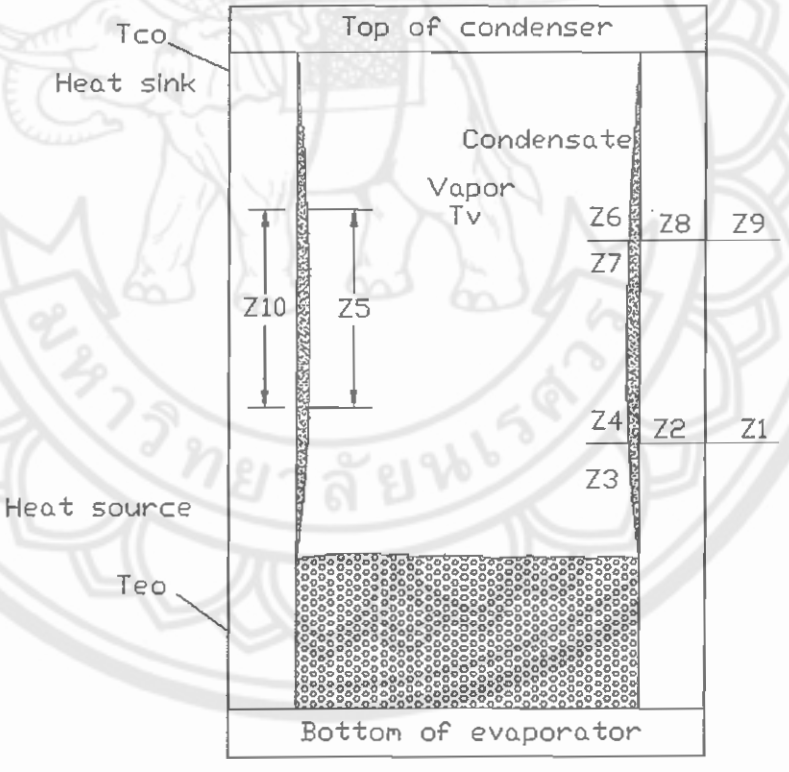
สำหรับการทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two-phase closed Thermosyphon) ความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Z) อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Q) ผลต่างอุณหภูมิระหว่างแหล่งผลิตความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน ($\Delta T=T_{so}-T_{si}$) จะได้

$$Q = \Delta T/Z \qquad (2.1)$$

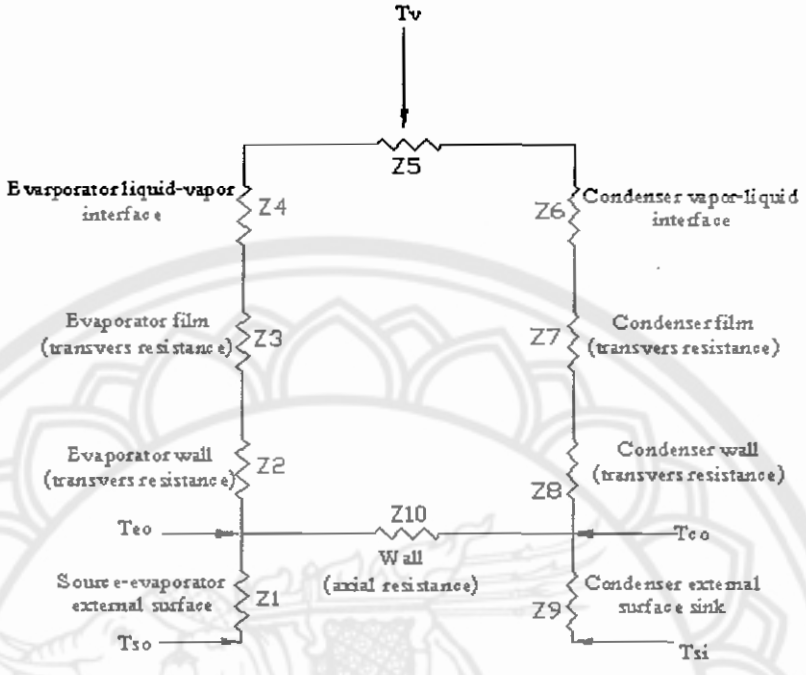
โดยที่ T_{so} = อุณหภูมิที่ผิวด้านนอก

T_{si} = อุณหภูมิที่ผิวด้านใน

รูปแสดงตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนดังรูป 2.2 และวงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอนแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด**[2]**



รูปที่ 2.3 วงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน **[2]**

Z_1 และ Z_9 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งผลิตความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหยและระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อนตามลำดับ

$$Z_1=1/(h_{eo}S_{eo}) \text{ and } Z_9=1/(h_{co}S_{co}) \qquad (2.2)$$

โดยที่ h_{eo} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย

S_{eo} = พื้นที่ผิวข้างนอกในส่วนทำระเหย

h_{co} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนควบแน่น

S_{co} = พื้นที่ผิวข้างนอกในส่วนควบแน่น

Z_2 และ Z_8 เป็นความต้านทานความร้อนที่ผ่านความหนาของผนังของเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ

$$Z_2= \ln(D_o/D)/2\pi l_e\lambda_x \text{ และ } Z_8= \ln(D_o/D)/2\pi l_c\lambda_x \qquad (2.3)$$

โดยที่ D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

λ_x = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในแนวแกน

Z_3 และ Z_7 เป็นความต้านทานความร้อนภายในของของเหลวที่กำลังเดือดและควบแน่นในเทอร์โมไซฟอนตามลำดับ และขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล ขนาดของเทอร์โมไซฟอนและอัตราการถ่ายเทความร้อน วิธีการประมาณ Z_3 และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

$$Z_3 = Z_{3p}F+Z_{3f}(1-F) \qquad (2.4)$$

$$Z_{3f}=CQ^{1/3}/D^{4/3}g^{1/3}l_e(\Phi_2)^{4/3} \qquad (2.5)$$

$$Z_{3p}=1/\Phi_3 g^{0.2}Q^{0.4}(\pi D\, l_e)^{0.6} \qquad (2.6)$$

โดยที่ Z_{3p} = ความต้านทานความร้อนในแอ่งเดือด

Z_{3f}=ความต้านทานความร้อนฟิล์ม

โดยที่สารทำงานเป็นน้ำ $\Phi_3=63(P_v/P_a)^{0.23}$

$$Z_7= CQ^{1/3}/D^{4/3}g^{1/3}l_c(\Phi_2)^{4/3} \qquad (2.7)$$

โดยที่ C= 0.235

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างไอแก๊สกับผิวของของเหลวในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ แต่น้อยมากดังนั้นจึงไม่นำมาคิด

Z_5 เกิดจากความดันดกคร่อมระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น แต่น้อยมากดังนั้นจึงไม่นำมาคิด

Z_{10}เป็นความต้านทานความร้อนตามแนวแกนของผนังของภาชนะ

$$Z_{10}= (0.5l_e + l_a +0.5l_c)/(A_x\lambda_x) \qquad (2.8)$$

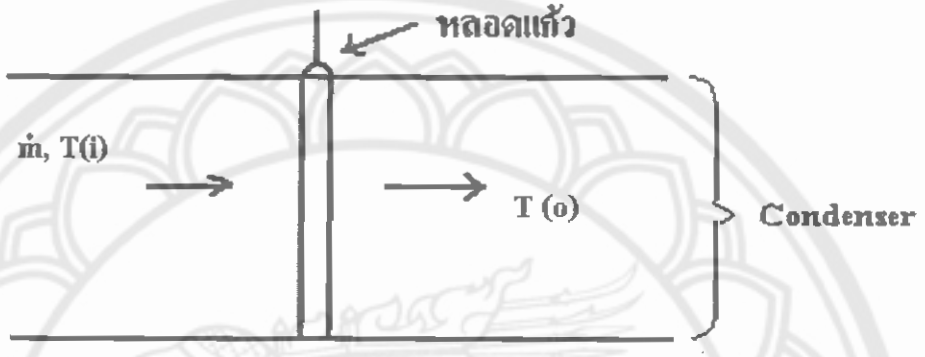
โดยที่ A_x เป็นพื้นที่หน้าตัดของผนัง

λ_x เป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สำหรับตำแหน่งการทำงานปกติ เมื่อส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่อจะมีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน ในทางกลับกันถ้าส่วนทำระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่นการถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอน จะเกิดขึ้นจากการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่ออย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมากดังนั้นสามารถใช้เทอร์โมไซฟอนเป็น วงจรความร้อน (Thermal diode) ได้

2.3 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น

จากการทดลองได้ทำการบันทึกค่าของอัตราการไหลของน้ำเย็น, อุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้า และค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นขาออก และนำค่าจากตารางมาคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนทั้งสองหลอดตามสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.4 รูปประกอบการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น

$$Q = \dot{m}C_p \Delta T = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \qquad (2.9)$$

โดยที่ Q เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน (kW)

$\dot{m}$ เป็นอัตราการไหลของน้ำ (kg/s)

Cp เป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.K)

ΔT เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้ากับขาออก (K)

T_i เป็นอุณหภูมิน้ำที่ขาเข้า (K)

T_o เป็นอุณหภูมิน้ำที่ขาออก (K)

2.4 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง

รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมอยู่ในแนวดิ่งที่ทั้งไอและของเหลวไหลขึ้นด้านบน แบ่งได้ 5 รูปแบบตามรูปที่ 2.5

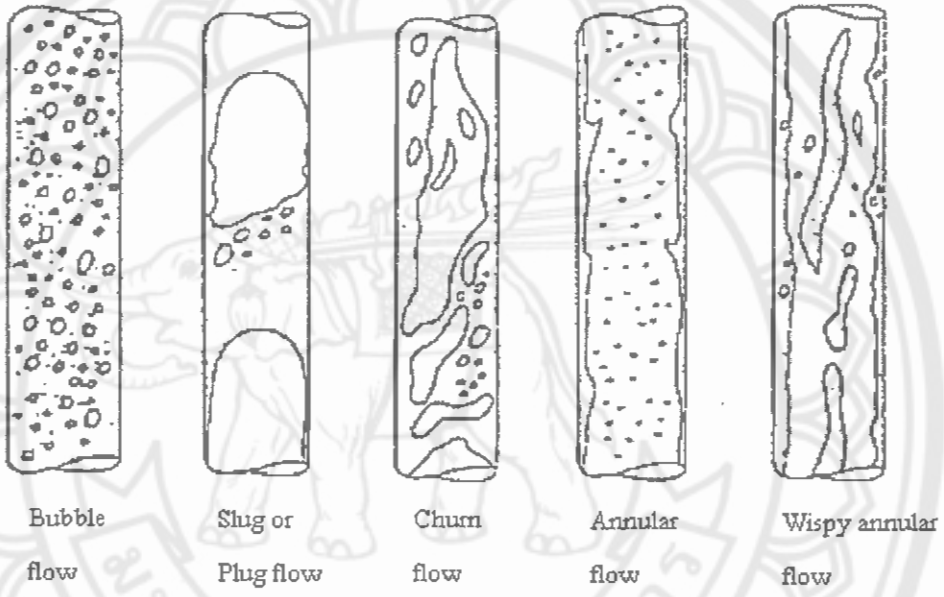
2.4.1Bubble flow รูปแบบการไหลที่มีฟองไอทรงกลมเล็กๆ ไหลปะปนของเหลวขึ้นสู่ด้านบน

2.4.2 Slug flow หรือ Plug flow รูปแบบการไหลที่มีฟองไอที่มีรูปร่างคล้ายลูกกระสุนขึ้นสู่ด้านบนโดยมีของเหลวขั้นกลางพร้อมกับมีไอปะปนบ้าง โดยขณะเดียวกันก็มีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองไอรูปกระสุน

2.4.3 Churn flow รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองบิดเบี้ยวไปเนื่องจากฟองไอมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลแบบนี้จะไม่ปรากฏให้เห็นเมื่อท่อมีขนาดเล็กๆ

2.4.4 Annular flow รูปแบบการไหลที่มีการไหลของไออยู่ในแกนกลางท่อโดยมีหยดของเหลวเล็กๆปะปนไปด้วยและขณะเดียวกันก็มีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ

2.4.5 Wispy annular flow รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้นของไออยู่แกนกลางท่อโดยที่หยดของเหลวได้ปะปนไปกลับไอนั้นได้ไปรวมตัวกันเป็นริ้วปนไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งการที่เกิดการรวมตัวของหยดของเหลวเล็กๆนั้นก็เนื่องจากอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้นด้วย

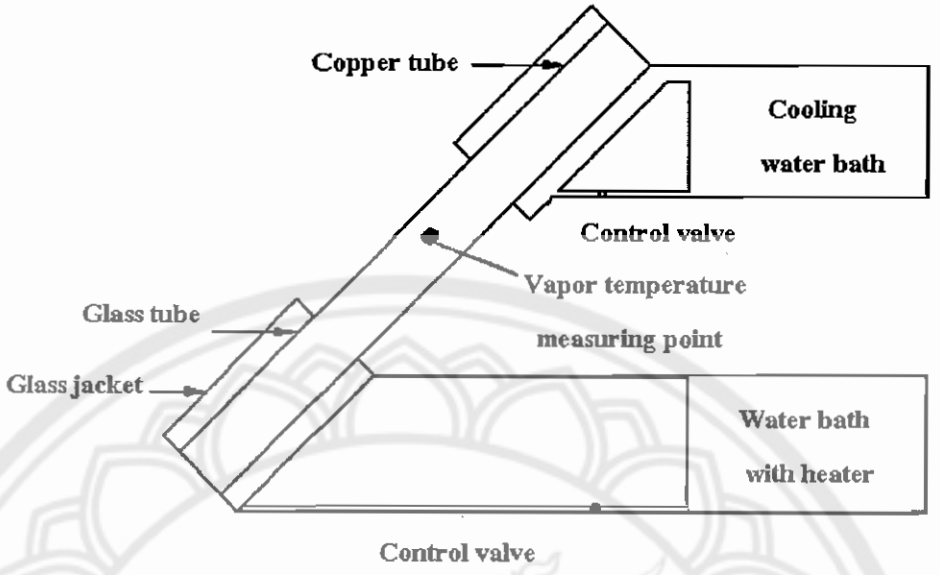


รูปที่ 2.5 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมอยู่ในแนวดิ่ง **[1]**

2.5 ศึกษาผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Terdtoon et. al. (1998) เรื่อง ผลกระทบของอัตราส่วนสนทรรศน์ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะในแนวเอียงที่สภาวะการทำงานปกติ โดยมีอุปกรณ์การทดสอบดังรูปที่ 2.6

เทอร์โมไซฟอนถูกสร้างเหมือนหลอด มีสองส่วน คือส่วนที่เป็นแก้วที่ส่วนทำระเหยและทองแดงที่ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและส่วนควบแน่น ส่วนที่เป็นแก้วจะสามารถสังเกตการไหลภายในที่ส่วนทำระเหยได้ ขณะที่ในส่วนของทองแดงจะมีการควบแน่นเกิดขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 11.1 mm ส่วนควบแน่นยาวเท่ากับ 440 mm สำหรับความยาวของส่วน



รูปที่ 2.6 เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะในแนวเอียงที่สภาวะการทำงานปกติ **[3]**

ทำระเหยและส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของ Le/d ที่ใช้ในการทดลอง ใช้ R123 เป็นสารทำงาน เนื่องจากเป็นสารที่ไม่มี CFC ใช้น้ำร้อนเป็นความร้อนของส่วนระบายความร้อนและมีการระบายความร้อนจากส่วนควบแน่นด้วยน้ำเย็น โดยมีการติดตั้งกล้องวีดีโอบันทึกการไหลไว้ตลอดและบันทึกภาพนิ่งไว้ในเวลาเดียวกัน แล้วควบคุมอุณหภูมิของไอที่ 27-33°C อัตราส่วนการเติมคือ 80% ขณะที่ Le/d จะเปลี่ยนแปลงเป็น 5, 10, และ 30 มุมเอียงคือ 90°, 30° และ 5° จากแนวระดับ และในการทดลองได้มีการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนไว้ด้วย จากการศึกษาจะเห็นถึงผลกระทบของอัตราส่วนสนทรรศน์ ที่มีต่อปรากฏการณ์การไหลภายในของเทอร์โมไซฟอน แบบเอียงสองสถานะ ที่สภาวะทำงานปกติ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ที่อัตราส่วนสนทรรศน์ 10 และสูงกว่า การไหลภายในเปลี่ยนจากการไหลแบบ annular และ การไหลแบบ churn ที่ตำแหน่งแนวตั้งไปเป็นการไหลแบบ slug ในตำแหน่งเอียงที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของอัตราส่วนสนทรรศน์น้อยกว่า 10 การเอียงเทอร์โมไซฟอนจากแนวตั้งไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในที่เต็มไปด้วยฟองไอ (bubbly flow) จะเห็นว่ายังขาดการศึกษาถึงอุณหภูมิการทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหล และค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ซึ่งจะศึกษาเพิ่มเติมในโครงงานนี้