บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

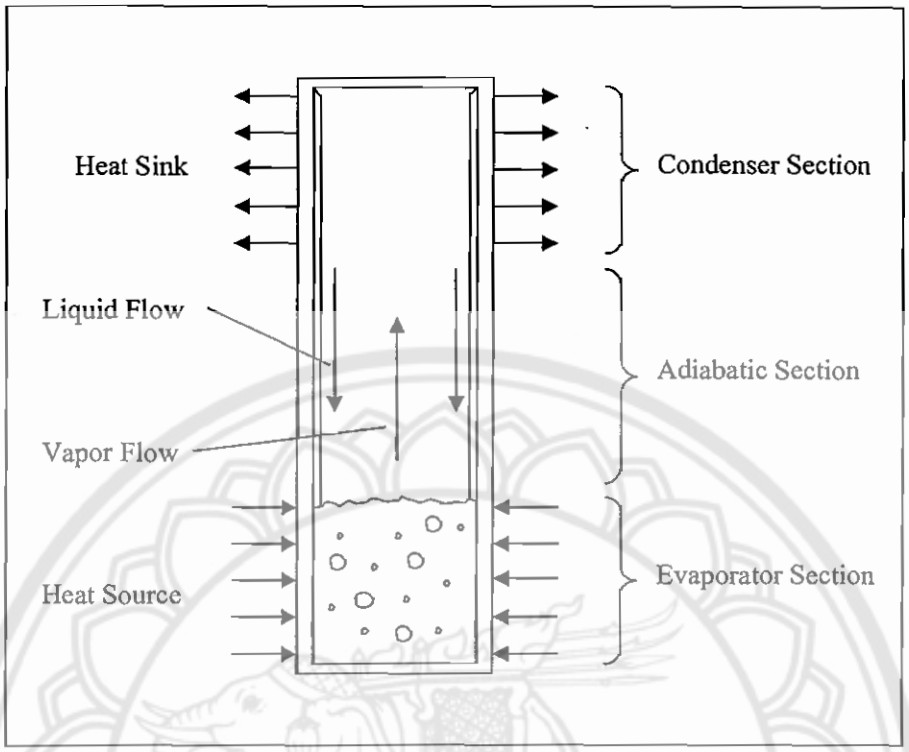
ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงงานนี้เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไซฟอนที่วางตัวในแนวดิ่งและแนวเอียง โดยเริ่มตั้งแต่เทอร์โมไซฟอน การถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอน รูปแบบการไหลต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิส่วนทำระเหยสูงพอ และการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน ในโครงงานนี้จำเป็นต้องรู้ทฤษฎีเหล่านี้เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งการศึกษาทฤษฎีได้ ดังนี้

2.1 เทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนชนิดหนึ่งที่มีความสามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงมาก ประมาณ 200 เท่าเมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของทองแดงที่มีมิติเท่ากัน (Dunn, P.D. และ Reay, D.A., 1981) ท่อที่ใช้ทำจากท่อปลายปิดทั้งสองด้านภายในเป็นสุญญากาศบรรจุด้วยสารทำงาน (Working fluid) ไว้จำนวนหนึ่ง ซึ่งชนิดของสารทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปใช้งาน เช่น การใช้งานที่มีอุณหภูมิของแหล่งความร้อนประมาณ 100-250°C และแหล่งระบายความร้อนอยู่ที่อุณหภูมิบรรยากาศปรกติคือ 25-35°C ควรจะใช้วัสดุที่ใช้ทำท่อบรรจุคือท่อทองแดง และมีน้ำเป็นสารทำงานภายใน เนื่องจากน้ำมีราคาต่ำและสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เป็นอย่างดีที่อุณหภูมิการทำงานดังกล่าว นอกจากนั้นการเลือกสารทำงานจำเป็นต้องพิจารณาความเข้ากันของวัสดุที่ใช้ทำท่อด้วย เนื่องจากถ้าสารทำงานไม่สามารถจะอยู่ร่วมกับท่อที่ใช้ทำเป็นท่อบรรจุได้ อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลทำให้ท่อมีอายุการใช้งานสั้นลง

2.1.1 โครงสร้างของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนมีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (Evaporator) ซึ่งเป็นส่วนที่รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน ส่วนควบแน่น (Condenser) เป็นส่วนที่ระบายความร้อนออกจากสารทำงานไปสู่บรรยากาศ ส่วนกันความร้อน (Adiabatic) เป็นส่วนที่อุณหภูมิคงที่ ภายในท่อจะบรรจุสารทำงานปริมาณหนึ่งไว้ โดยสารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นเพื่อระบายความร้อนออกที่ส่วนนี้ ชนิดของสารทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะนำเทอร์โมไซฟอนไปใช้งาน ซึ่งโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนจะแสดง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน [1]

2.1.2 หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน

ทำงานอาศัยความร้อนแฝง ของสารทำงานภายในท่อ เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ด้านล่างโดยก๊าซหรือน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูง สารทำงานภายในจะเดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อนเกิดขึ้น หลังจากที่ไอได้ลอยไปอยู่ที่ส่วนควบแน่นก็จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลย้อนกลับลงมาตามผิวท่อด้านในของท่อโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นของเหลวที่ไหลลงมาส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ทางด้านล่างของท่อก็จะระเหยกลายเป็นไอต่อไป ทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อน และทำงานเป็นวัฏจักร

2.1.3 ข้อดีของเทอร์โมไซฟอน

2.1.3.1 ออกแบบ สร้างและติดตั้งได้ง่าย

2.1.3.2 มีความสามารถในการนำความร้อนสูง

2.1.3.3 สามารถถ่ายเทความร้อนได้เมื่อแหล่งรับและระบายความร้อนอยู่ห่างกัน

2.1.3.4 สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนในบริเวณที่มีพื้นที่เล็กและแคบได้ เช่น ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

2.1.3.5 ไม่ต้องการแหล่งเกิดพลังงานจากภายนอกสำหรับใช้ในการทำงาน

2.1.4 อัตราการเติมสาร

ควรหลีกเลี่ยงการเติมสารทำงานที่มากเกินไป เพราะสารทำงานจะไปลดพื้นที่ในส่วนควบแน่น และทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง แต่ถ้าเติมสารทำงานไม่เพียงพอ จะเกิดการแห้ง (Dry out) ขึ้นที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย อัตราการเติมสารทำงานแทนด้วยสัญลักษณ์ F เป็นสัดส่วนกับปริมาตรของๆเหลวในเทอร์โมไซฟอนที่ขณะที่ยังไม่ได้ทำงาน (V_l) กับปริมาตรในส่วนทำระเหย คือ

$$F = V_l / A \ell_e \qquad (2.1)$$

โดยที่ V_l คือ ปริมาณของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนขณะยังไม่ได้ทำงาน, m^3

A คือ พื้นที่หน้าตัดภายในเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากับ $\pi D_i^2/4$, m^2

ℓ_e คือ ความยาวในส่วนทำระเหย, m

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน, m

2.2 การถ่ายเทความร้อนในการทำงานแบบ two-phase closed thermosyphon

ในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบปิด สามารถแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Q) ดังรูปที่ 2.2 และจาก ความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Z) และผลต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนให้ความร้อน และส่วนระบายความร้อน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

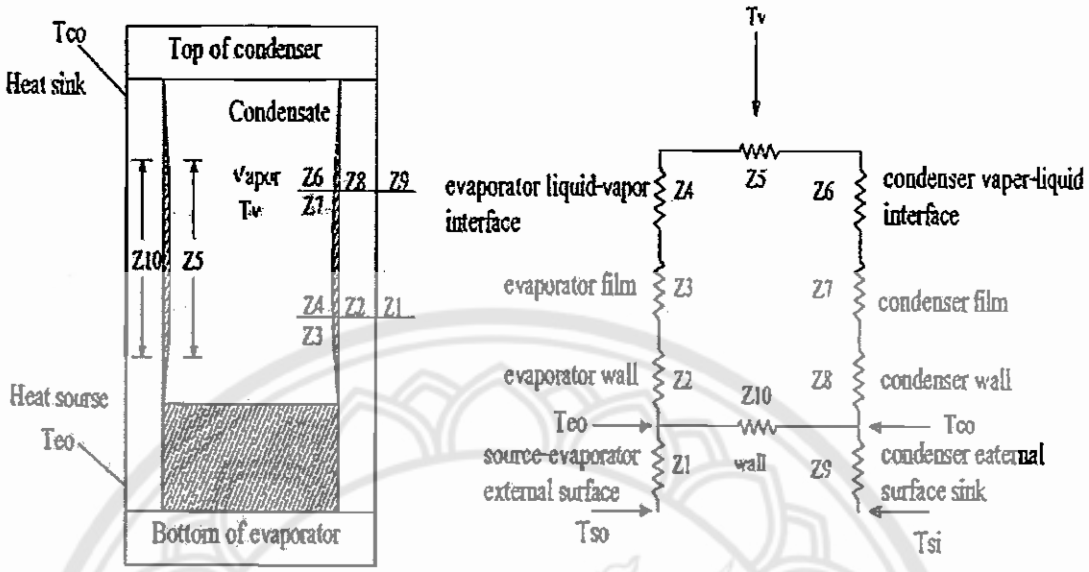
$$(\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h) \qquad (2.2)$$

$$Q = \Delta T / Z \qquad (2.3)$$

โดย T_{so} คือ อุณหภูมิที่ผิวนอกของส่วนให้ความร้อน

T_{si} คือ อุณหภูมิที่ผิวนอกของส่วนระบายความร้อน

ΔT_h คือ ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องจากความต่างของ Hydro static head



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรความต้านทานความร้อนรวม [1]

ความต้านทานความร้อนรวมของท่อเทอร์โมไซฟอนประกอบด้วยค่าความด้านทานต่างๆ คือ

Z_1 และ Z_9 คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างส่วนให้ความร้อนกับผิวนอกของส่วนทำระเหย และระหว่างผิวนอกของส่วนควบแน่นกับตัวระบายความร้อน ตามลำดับ

Z_2 และ Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนในการผ่านความหนาของผนังในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ

Z_3 และ Z_7 คือ ค่าความต้านทานความร้อนของของเหลวที่กำลังเดือดและควบแน่นภายในเทอร์โมไซฟอน โดยค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์โมไซฟอน และอัตราการถ่ายเทความร้อน

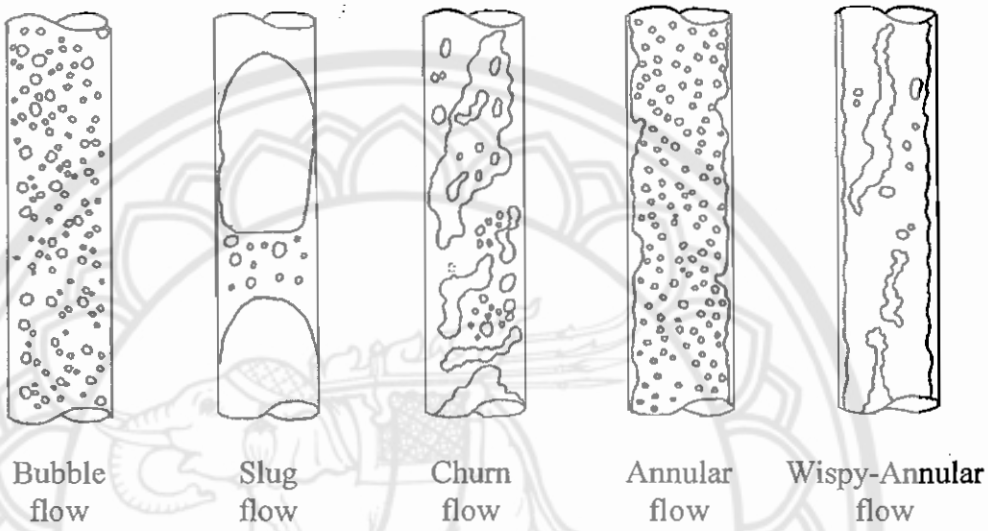
Z_4 และ Z_6 คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างที่ผิวหน้าของของเหลวและไอในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาคิด

Z_5 คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับ Z_3 และ Z_7 จึงไม่นำมาคิด

Z_{10} คือ ค่าความต้านทานความร้อนของผนังภาชนะจะขึ้นอยู่กับความหนาของผนังภาชนะ

2.3 การไหลสองสถานะภายในท่อปิดที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม

2.3.1 การไหลภายในท่อกลมแนวดิ่ง ซึ่งสามารถศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการไหลภายในท่อของของเหลวและของไอของสารทำงานภายในท่อได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการไหลภายในท่อปิดในแนวดิ่ง [3]

1. Bubbly หรือ Bubble flow

เป็นการไหลในช่วงเริ่มต้นมีการไหลของฟองไอภายในของเหลวอย่างต่อเนื่อง และฟองไอนี้แพร่กระจายทั่วของเหลว

2. Slug flow หรือ Plug flow

เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นฟองไอเหล่านั้นจะเริ่มจับตัวกันเป็นลักษณะของหัวกระสุนปืน และการแพระกระจายของฟองไอจะน้อยกว่า Bubble flow

3. Churn flow

เนื่องจากความเร็วในการไหลเพิ่มมากขึ้นอีกทำให้ไอส่วนที่เป็นลักษณะหัวกระสุนเกิดการแตกออกนำมาซึ่งความไม่เสถียรภายในท่ออาจจะทำให้เกิดการสั่นได้แต่ในกรณีที่ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กการสั่นนี้อาจไม่เกิดขึ้น

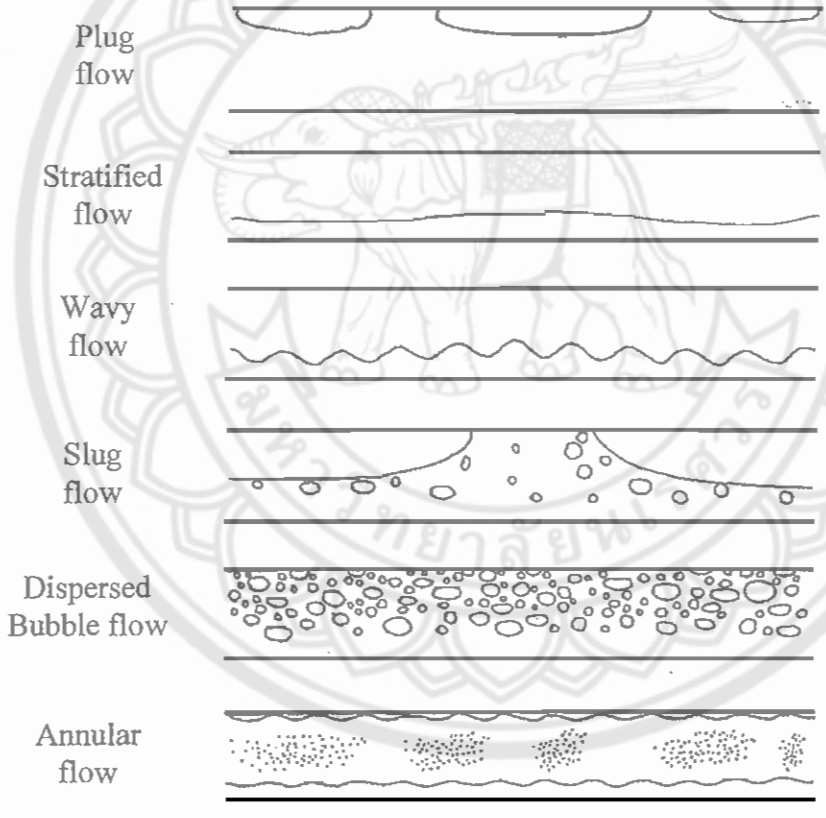
4. Annular flow

การไหลในช่วงนี้มีความเร็วจนกระทั่งของเหลวจะไหลขึ้นไปตามผิวท่อเป็นแผ่นฟิล์มส่วนที่เป็นก๊าซจะไหลอยู่ตรงกลางของท่อ

5. Wispy Annular flow

ในการไหลชนิดนี้ความเร็วในการไหลของก๊าซนั้นจะเพิ่มมากขึ้นจนสามารถพาของเหลวที่ไหลเป็นฟิล์มไหลตามขึ้นไปกับส่วนที่เป็นก๊าซ โดยของเหลวนี้จะรวมตัวกันจนเป็นก้อนนูน เรียกว่า "Wisp" และจะมี mass flux สูงมาก

2.3.2 การไหลภายในท่อกลมแนวระดับ ซึ่งสามารถศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการไหลภายในท่อของของเหลว และของไอของสารทำงานภายในท่อได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการไหลภายในท่อปิดในแนวระดับ [4]

1. Bubble Flow

รูปแบบนี้สัดส่วนของเหลวจะมากกว่า ก๊าซ มีลักษณะดังนี้ คือ จะเกิดฟองก๊าซแพร่กระจายในของเหลวและไหลไปด้วยความเร็วที่ใกล้เคียงกับของเหลว ความเข้มข้นของก๊าซจะอยู่ส่วนผิวท่อด้านบนส่วนด้านล่างจะเป็นของเหลว จากการทดลองรูปแบบนี้จะเกิดที่ความเร็วของเหลวประมาณ 1.5 ถึง 4.5 เมตรต่อวินาที ส่วนก๊าซมีความเร็วประมาณ 0.3 ถึง 3 เมตรต่อวินาที

2. Plug Flow

รูปแบบนี้จะเกิดฟองก๊าซคล้ายจุกไม้ก๊อกอยู่ส่วนบนของท่อ ขณะที่ของเหลวจะอยู่ส่วนล่าง

3. Stratified Flow

รูปแบบของการไหลจะแยกเฟสกันอย่างชัดเจน โดยของเหลวจะอยู่ส่วนล่าง แต่ก๊าซจะอยู่ส่วนบน ส่วนที่ interface ระหว่างก๊าซและของเหลว ค่อนข้างราบเรียบไม่เป็นระลอกคลื่น

4. Wavy Flow

รูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อก๊าซมีความเร็วมากกว่าของเหลว ก็จะไปทำให้ของเหลวก่อตัวเป็นรูปคลื่น ก็คล้ายกับการเกิดคลื่นในทะเล

5.Slug Flow

การไหลแบบนี้ที่เราควรออกแบบระบบท่อให้มั่นคงเป็นพิเศษกว่าปกติ ลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากเกิด wave แล้วจนกระทั่งอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลวเพิ่มขึ้นมันก็จะเปลี่ยนการไหลเป็นแบบ Slug flow ยอดคลื่นจะไปแตะผิวท่อด้านบน

6. Annular Flow

การไหลในช่วงนี้จะมีความเร็วจนกระทั้งของเหลวจะไหลไปตามผิวท่อเป็นแผ่นฟิล์ม ส่วนที่เป็นก๊าซจะไหลอยู่ตรงกลางของท่อ

7. Spray

เมื่อ Gas-liquid ratio สูงถึงจุดหนึ่ง ของเหลวก็จะแพร่กระจายไปใน ก๊าซ จนเป็นละออง spray

2.4 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน

จากการทดลองได้บันทึกค่าของอัตราการไหลของน้ำเย็น ค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้า และค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นขาออกที่ตู้ส่วนควบแน่น และนำค่าที่บันทึกได้เหล่านี้มาคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองได้ ดังสมการที่ 2.4

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2.4)$$

โดยที่ Q เป็นค่าการถ่ายเทความร้อน

$\dot{m}$ เป็นอัตราการไหลของน้ำเย็น

C_p เป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเย็น

ΔT เป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า และขาออก

T_i เป็นค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า

T_o เป็นค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาออก

มหาวิทยาลัยนเรศวร