

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

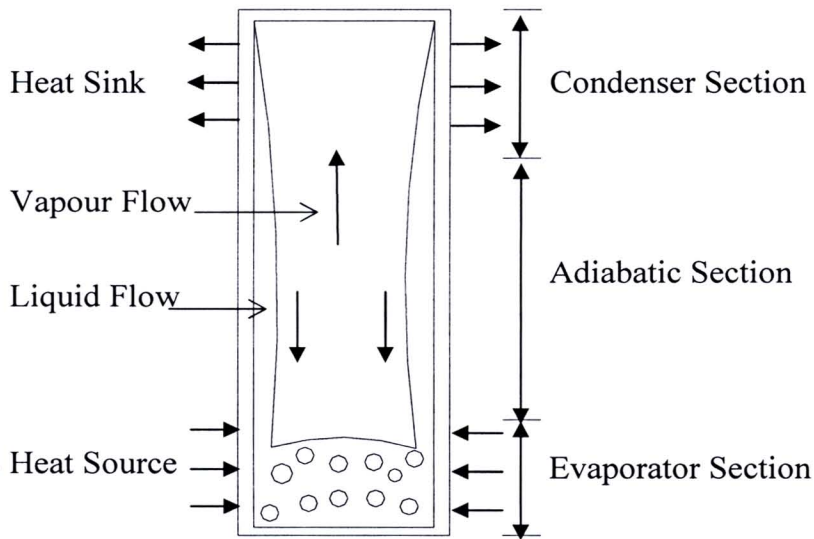
เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีการทำงานโดยอาศัยหลักการเดือด และการกลั่นตัวของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีค่าการนำความร้อนสูงมาก เพราะค่าความร้อนแฝงของการระเหยของสารทำงานมีค่าสูงมาก จึงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ปริมาณมากจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง แม้ว่าจะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านเพียงเล็กน้อย (ประดิษฐ์, 2536) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ เทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึกและเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

2.1.1 เทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึก

ลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึกสามารถอธิบายได้ดังรูป 2.1 คือ มีสารทำงานบรรจุอยู่ภายในภาชนะปิดซึ่งเป็นสุญญากาศและมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนคงที่ของความร้อน และส่วนควบแน่น

หลักการทำงาน คือ เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน สารทำงานในสถานะของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในจะร้อนขึ้นและเดือดระเหยกลายเป็นไอ ไหลผ่านส่วนคงที่ของความร้อนขึ้นไปยังส่วนควบแน่นที่จะคายความร้อนออกสู่แหล่งรับความร้อน สารทำงานในสถานะไอจะควบแน่นเป็นของเหลวแล้วไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยเพื่อรับความร้อนอีก โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

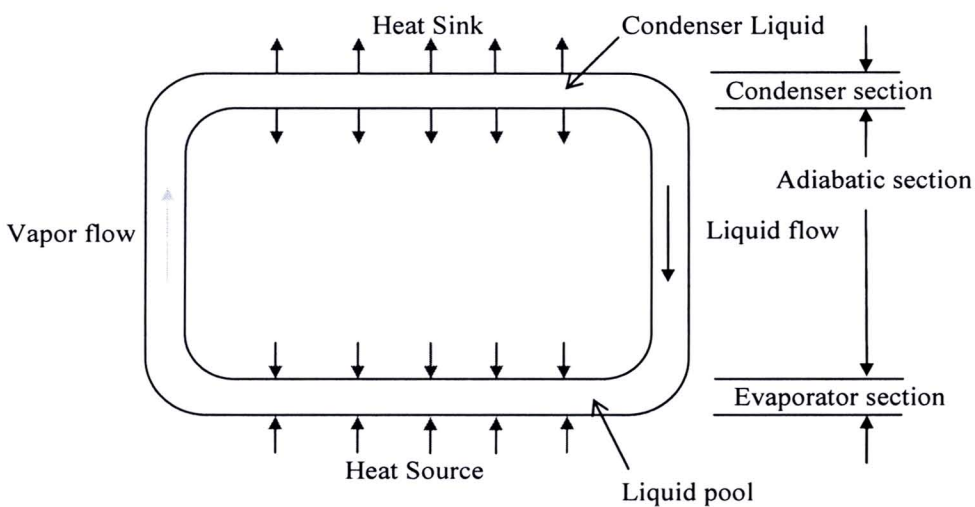
ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดท่อ ชนิดท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็น และสัดส่วนการเติมสารทำงาน เป็นต้น



รูป 2.1 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึก

2.1.2 เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ (Loop Thermosyphon) เป็นการพัฒนาศมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนอีกรูปแบบหนึ่ง โดยมีการไหลของของไหลหรือสารทำงานในสถานะของเหลวและสถานะไอจะไม่ไหลสวนทางกันทำให้ช่วยลดปัญหาการเกิดการหลุดติดของหยดของเหลวไปปนกับไอที่กำลังลอยขึ้น (Entrainment) และเพิ่มความคล่องตัวในการวางตำแหน่งของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น



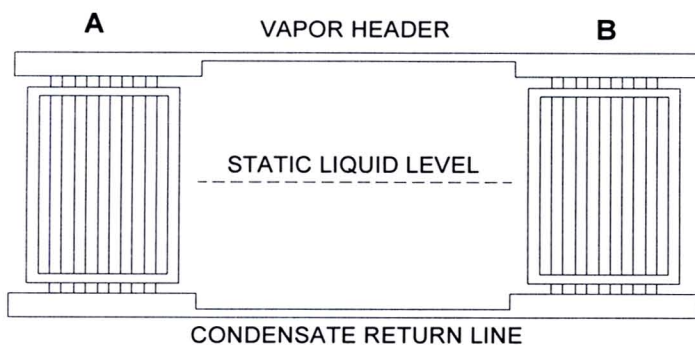
รูป 2.2 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

ลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบสามารถอธิบายได้ในรูป 2.2 ในหนึ่งวงรอบ ประกอบด้วยส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น ต่อกันด้วยท่อส่งไอระเหยและท่อส่งของเหลวควบแน่นกลับ โดยจะวางส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นให้อยู่ในระดับแนวนอน โดยส่วนทำระเหยจะอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น ซึ่งจะทำให้การไหลของสารทำงานเป็นไปในทิศทางเดียว เรียกว่า เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบชนิดทางเดียว (Unidirectional loop thermosyphon) คือสามารถถ่ายเทความร้อนได้เพียงทางเดียวจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น และจะหยุดการถ่ายเทความร้อนลงทันทีถ้าอุณหภูมิของส่วนควบแน่นสูงกว่าส่วนทำระเหย

สำหรับหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้ มีหลักการทำงานเหมือนกับเทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดฉนวน จะแตกต่างกันที่จะไม่มีการไหลสวนทางกันระหว่างไอกับของเหลวของสารทำงาน แต่ก็อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเช่นเดียวกัน

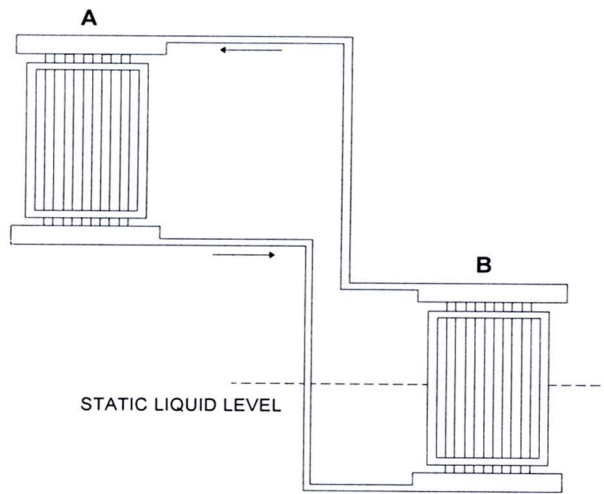
2.1.2.1 การใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

1) วางส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นให้อยู่ในระดับแนวนอนเดียวกันซึ่ง เรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบชนิดสองทิศทาง (Bidirectional Loop Thermosyphon Heat Exchanger) ดังแสดงในรูป 2.3 เครื่องสามารถที่จะถ่ายเทความร้อนได้สองทิศทาง คือ จาก A ไป B และ จาก B ไป A ถ้าอุณหภูมิของ A ต่ำกว่าของ B ความร้อนจะถ่ายเทจาก B ไปยัง A แต่ถ้าอุณหภูมิของ B ต่ำกว่าของ A ความร้อนจะถ่ายเทจาก A ไปยัง B



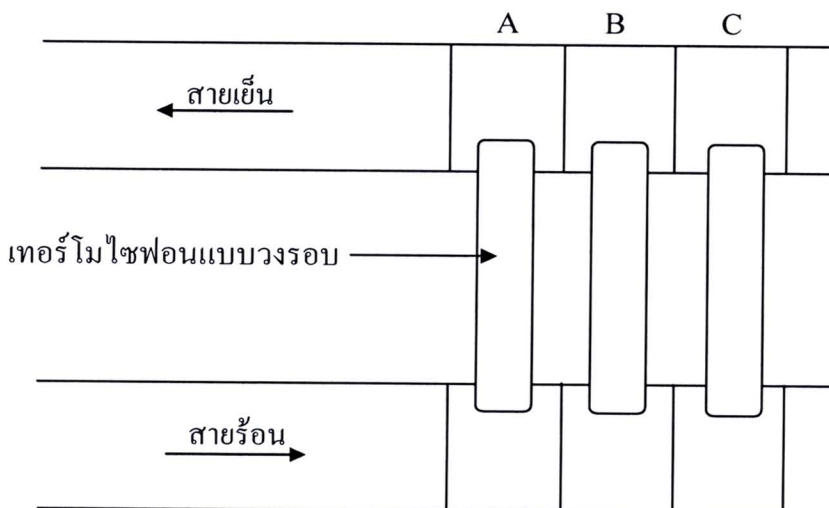
รูป 2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบชนิดสองทิศทาง

2) วางส่วนทำระเหยให้อยู่สูงกว่าส่วนควบแน่น ซึ่งเรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบชนิดทิศทางเดียว (Unidirectional Loop Thermosyphon Heat Exchanger) ดังแสดงในรูป 2.4 เครื่องสามารถที่จะถ่ายเทความร้อนได้เพียงทางเดียว คือ จาก B ไป A และการถ่ายเทความร้อนหยุดลงทันทีในกรณีที่อุณหภูมิของ A สูงกว่าของ B



รูป 2.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบวงจรชนิดทิศทางเดียว

เทอร์โมไซฟอนแบบวงจรชนิดทิศทางเดียวโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าเทอร์โมไซฟอนแบบวงจรชนิดสองทิศทาง เพราะทั้งคอยล์และลู่ออกจะออกแบบให้เหมาะสมที่สุดเพียงสภาวะใดสภาวะหนึ่ง ไม่ว่ากรณีใดก็ตามการนำพลังงานที่มีอยู่กลับมาใช้ให้ได้ในสัดส่วนที่สูง ทำได้โดยนำเทอร์โมไซฟอนแบบวงจรหลายๆ ชุดมาต่ออนุกรมระหว่างท่อส่งเข้าและท่อปล่อยทิ้ง เพื่อที่จะให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไหลแบบสวนทางกันซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพผลรวมสูงกว่ามีเพียงลู่ออกเดียว ดังแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 เทอร์โมไซฟอนแบบวงจรหลายๆ ชุดที่ต่อเรียงกัน



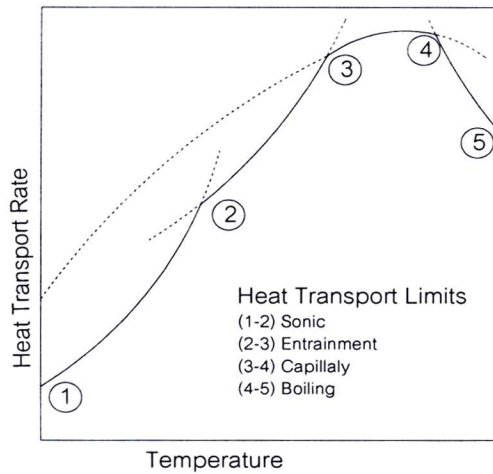
2.1.2.2 ลักษณะเด่นของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ [สาริธ, 2540] ได้แก่

- 1) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยของท่อความร้อนสูงกว่าอัตราการนำความร้อนของแท่งโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน
- 2) ไม่จำเป็นต้องใช้แรงภายนอกกระทำต่อตัวมันเองในการทำงาน
- 3) อุณหภูมิใช้งานมีช่วงกว้าง สามารถทำงานได้แม้ผลต่างระหว่างแหล่งจ่ายความร้อนกับแหล่งรับความร้อนมีค่าน้อย และใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ เมื่อเลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิใช้งาน
- 4) ปัญหาการบำรุงรักษามีน้อยและไม่มีเสียงดังเพราะไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว
- 5) ไม่มีปัญหาการปนเปื้อนกัน (Contaminant) ระหว่างของไหลที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลทำงาน
- 6) มีโครงสร้างอย่างง่าย ๆ น้ำหนักเบาและรูปร่างกะทัดรัด
- 7) สามารถแยกส่วนทำระเหยหรือส่วนรับความร้อนกับส่วนควบแน่นหรือส่วนคายความร้อนให้ออกห่างจากกันได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และยังทำให้สะดวกต่อการติดตั้งด้วย
- 8) การตอบสนองเชิงความร้อนเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในรูปของความร้อนแฝง การตอบสนองเชิงความร้อนจึงรวดเร็วและสามารถรับการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายความร้อนได้ดี

2.1.3 ขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของเทอร์โมไซฟอน

สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาณการเติมสารทำงาน มุมเอียง สัดส่วนความยาวของส่วนต่างๆ ของท่อ ชนิดของสารทำงาน ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ส่วนทำระเหย หากมีการกำหนดหรือควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างเทอร์โมไซฟอนหรือการนำไปใช้งานไม่เหมาะสม ก็จะทำให้เทอร์โมไซฟอนมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่ำลงหรือไม่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ในที่สุด ผลจากการเปลี่ยนตัวแปรที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดขีดจำกัดเนื่องจากกลไกการถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอน ดังแสดงในรูป 2.6





รูป 2.6 ขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน
 ที่มา : Engineering Science Data Unit (1981)

ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญของเทอร์โมไซฟอนประกอบไปด้วย ขีดจำกัดความดันไอ (Vapour pressure limit) ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit) ขีดจำกัดการแห้ง (Dryout limit) ขีดจำกัดการเดือด (Boiling limit) และขีดจำกัดการไหลสวนทาง (Counter-current flow limit)

2.1.3.1 ขีดจำกัดความดันไอ (Vapour pressure limit)

เมื่อใช้เทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ความดันตกของไอจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับความดันในส่วนทำระเหย วิธีที่จะใช้หาขีดจำกัดความดันไอสามารถที่จะหาได้จากสมการทางทฤษฎีดังนี้

$$\frac{Q_m}{A\lambda} = \frac{D^2 P_v \rho_v}{64 \mu_v L_{eff}} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$L_{eff} = 0.5L_e + L_a + 0.5L_c \quad (2.2)$$

2.1.3.2 ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit)

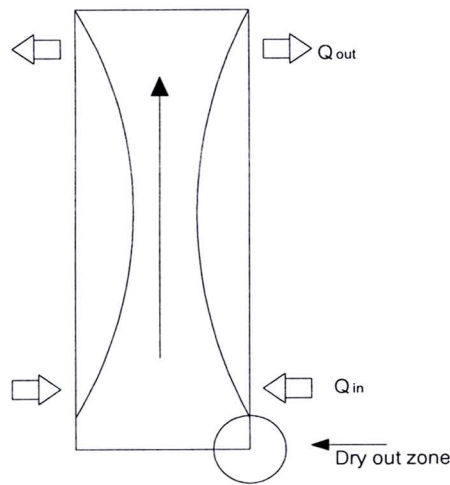
การใช้งานเทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำกว่าความเร็วไอจะมีค่าเข้าใกล้ความเร็วเสียง วิธีที่จะหาขีดจำกัดความเร็วเสียงสามารถที่จะประมาณได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ดังสมการ

$$\frac{Q_m}{A\lambda} = 0.5(P_v \rho_v)^{0.5} \quad (2.3)$$

2.1.3.3 ขีดจำกัดการแห้ง (Dryout limit)

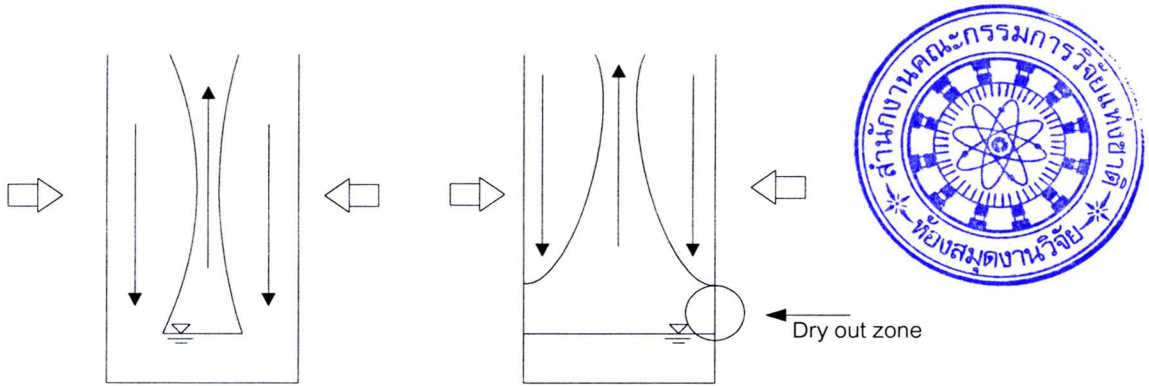
ขีดจำกัดการแห้งจะเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ เมื่อเติมปริมาณสารทำงานน้อยเกินไป และเมื่อเติมปริมาณสารทำงานมากเกินไป

1) การเติมปริมาณสารทำงานน้อยเกินไป หากมีการให้ความร้อนในส่วนทำระเหยสูงจะทำให้ของเหลวส่วนล่างเริ่มแห้ง อุณหภูมิของผนังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการไหม้ได้ แสดงดังรูป 2.7



รูป 2.7 การแห้งเมื่อปริมาณการเติมสารทำงานน้อย

2) เมื่อเติมปริมาณสารทำงานมากเกินไป จะทำให้สารทำงานระเหยกลายเป็นไอน้ำได้มากขึ้นและระดับผิวของของเหลวลดลงอย่างช้าๆ ผลต่อมาจะมีแรงเหวี่ยงระหว่างความเร็วของไอน้ำกับของเหลวที่ความดันสูงขึ้น จะทำให้เกิดการสะสมของของเหลวในช่วงการควบแน่นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแห้งเหนือแอ่งของเหลวทำให้อุณหภูมิของผนังท่อสูงขึ้น เมื่อน้ำหนักของของเหลวที่ควบแน่นมากกว่าแรงของไอน้ำ ของเหลวจะตกลงสู่ช่วงการทำระเหยและจะทำให้อุณหภูมิของผนังกว้างไปมา แสดงดังรูป 2.8



รูป 2.8 การแห้งเมื่อปริมาณการเติมสารทำงานมาก

2.1.3.4 ขีดจำกัดการเดือด (Boiling limit)

ขีดจำกัดการเดือดจะเกิดขึ้นเมื่อ เกิดแผ่นฟิล์มของไอขึ้นที่ผนังท่อในส่วนทำระเหยซึ่งกำหนดเป็นการถ่ายเทความร้อนสูงสุดต่อพื้นที่ดังสมการ 2.4

$$\frac{Q_m}{S_e} = 0.12 \lambda \rho_v^{0.5} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (2.4)$$

โดยที่ S_e คือ พื้นที่ผิวท่อด้านในของส่วนทำระเหย

σ คือ แรงตึงผิวของของเหลว

2.1.3.5 ขีดจำกัดการไหลสวนทาง (Counter-current flow limit)

เมื่อการเติมสารทำงานพอเหมาะที่จะไม่ทำให้เกิดการแห้งขึ้น ขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับขีดจำกัดอื่นๆ คือขีดจำกัดการหลุดลอยของของเหลว โดยไอของสารทำงานที่ไหลสวนทางกับฟิล์มของเหลวซึ่งมักเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการท่วม (Flooding) หรือขีดจำกัดการหลุดลอย (Entrainment limit) ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเกิดขีดจำกัดนี้ขึ้น หาได้จากสมการ 2.5

$$\frac{Q_m}{A\lambda} = f_1 f_2 f_3 \rho_v^{0.5} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (2.5)$$

โดยที่ f_1 คือ ฟังก์ชันของค่า Bond number ซึ่งนิยามจากค่า f_1 สามารถหาได้จากรูป 2.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bo กับ f_1 แต่ถ้าหาก $Bo > 11$ แล้ว $f_1 = 8.2$

$$Bo = d \left[g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma} \right) \right]^{0.5} \quad (2.6)$$

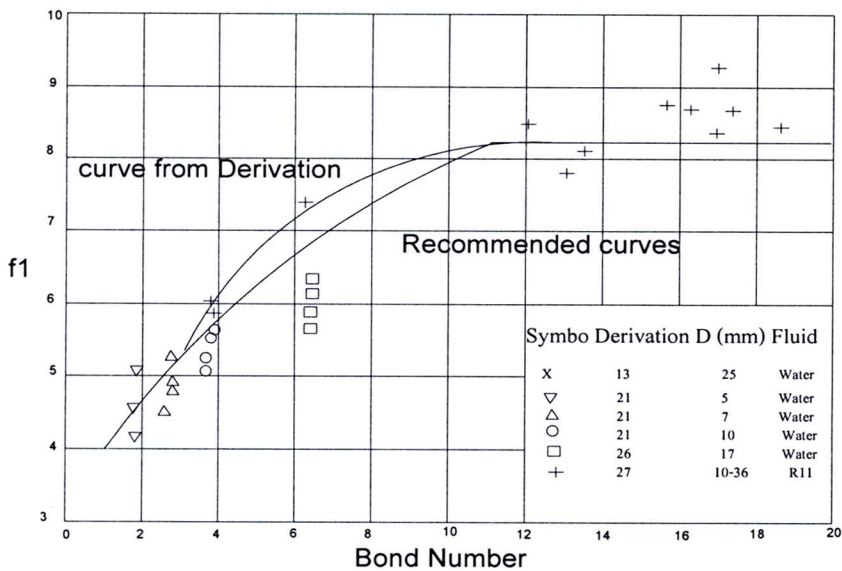
f_2 คือ ฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติของความดัน (K_p) ซึ่งนิยามจาก

$$K_p = \frac{P_v}{[g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{0.5}} \quad (2.7)$$

โดยที่ $f_2 = K_p^{-0.17}$ เมื่อ $K_p \leq 4 \times 10^4$

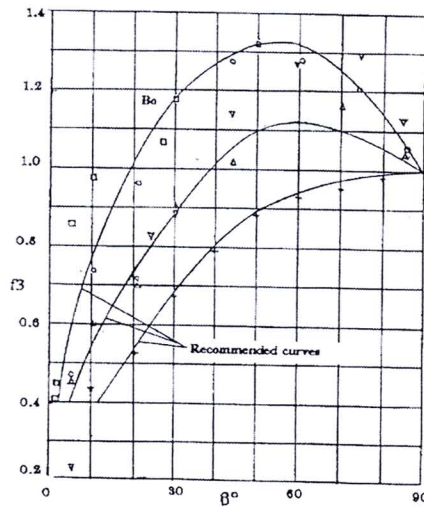
$f_2 = 0.165$ เมื่อ $K_p > 4 \times 10^4$

f_3 คือ ฟังก์ชันของการเยื้องท้อ เมื่อท่ออยู่ในแนวดิ่ง $f_3 = 1$ เมื่อท่อเอียงค่า f_3 สามารถหาได้จากรูป 2.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับ f_3 ที่ค่า Bo ต่างๆ ผลคูณของ $f_1 f_2 f_3$ เรียกว่า Kutateladze number



รูป 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างบอนด์นัมเบอร์กับค่าปัจจัย f_1

ที่มา : Engineering Science Data Unit (1981)



รูป 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อกับ f_3
ที่มา : Engineering Science Data Unit (1981)

2.1.4 สัดส่วนการเดินสารทำงาน

สัดส่วนการเดินสารทำงานมีผลต่อการทำงานของเทอร์โมไซฟอน จึงมีการศึกษาสัดส่วนการเดินสารหลายค่า ซึ่งการหาปริมาณของสารที่เดินเข้าไปในเทอร์โมไซฟอนหาได้ดังต่อไปนี้

$$F = \frac{V}{AL_e} \quad (2.8)$$

2.2 การถ่ายเทความร้อน

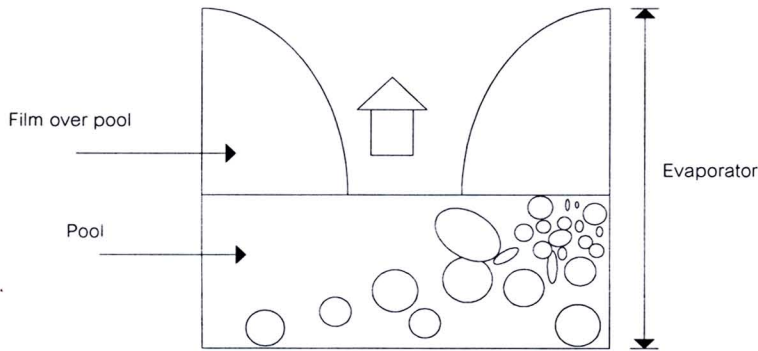
2.2.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน สำหรับในเทอร์โมไซฟอนจะมีการถ่ายเทความร้อนดังนี้

2.2.1.1 การถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหย (Evaporator)

เมื่อป้อนความร้อนให้กลับส่วนทำระเหย ความร้อนส่วนหนึ่งจะไหลผ่านผนังท่อไปยังผิวของของเหลว โดยการนำความร้อนและไหลผ่านชั้นของเหลวไปยังผิวอิสระ โดยการพาความร้อนอย่างอิสระ (Free Convection) การระเหยทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่ผิวของของเหลว เมื่อป้อนความร้อนสูงขึ้นจะมีฟองไอลึกๆ เกิดขึ้นและหลุดลอยขึ้นมาและสลายตัวออกเพราะความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวที่อยู่โดยรอบ ของเหลวที่เย็นกว่าจะดูดพลังงานความร้อนบางส่วนจากฟองไอลงจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นและความหนาแน่นลดลง ดังนั้นฟองไอลอยมาที่ผิวแล้วระเหยกลายเป็นไอน้ำ

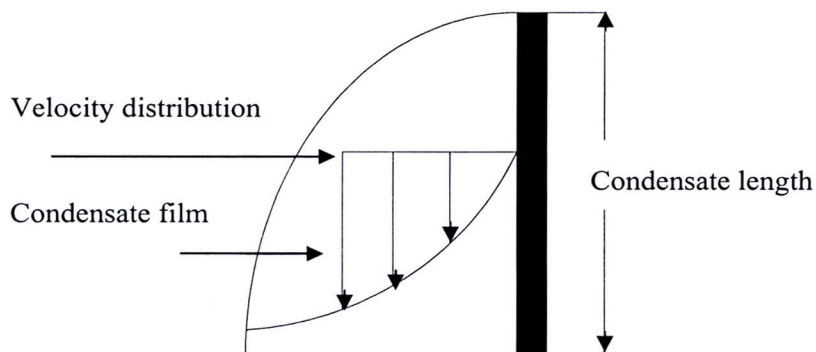
ออกจากผิวได้ ของเหลวที่อยู่ในภาชนะจะเกิดการเดือดแบบปั่นป่วนแต่อุณหภูมิคงที่ ใบบางส่วนจะลอยไปสู่ช่วงการควบแน่นและควบแน่นเป็นฟิล์มของเหลวเหนือแอ่งของเหลว แสดงดังรูป 2.11



รูป 2.11 แสดงแบบจำลองการเดือดในแอ่งของส่วนทำระเหย

2.2.1.2 การถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น (Condenser)

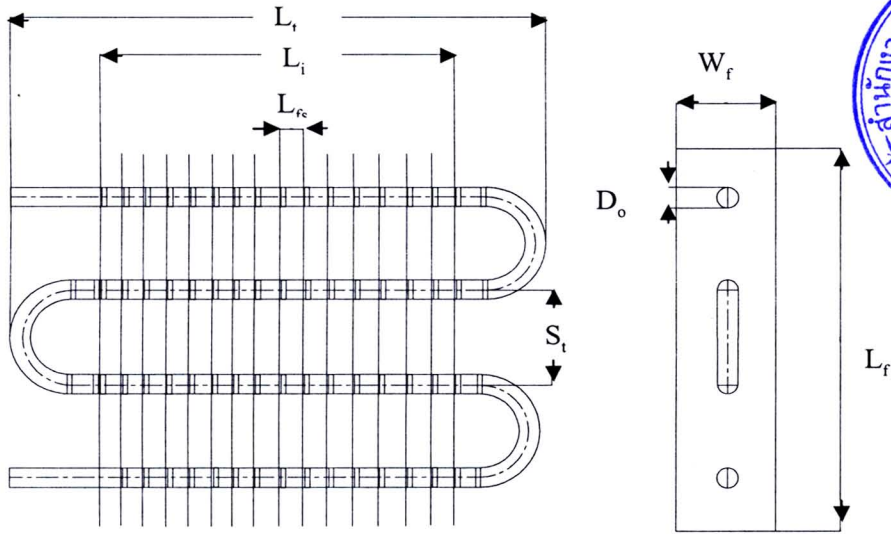
การควบแน่นหรือการกลั่นตัวจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อไออิ่มตัว (Saturated Vapor) สัมผัสกับผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ ในสภาวะดังกล่าวจะเกิดฟิล์มของเหลวหรือหยดน้ำ ไหลย้อยลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลก โดยมีสมมุติฐานว่าการไหลที่สัมผัสเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) และไม่คำนึงถึงแรงเฉือน (Viscous Shear) ที่สัมผัสระหว่างไอที่มีความเร็วสูงกับฟิล์มของของเหลว ฟิล์มของเหลวจะค่อยๆ เพิ่มความหนาจากบนลงสู่ส่วนล่างเป็นลักษณะโปรไฟล์ของการไหล แสดงดังรูป 2.12



รูป 2.12 การควบแน่นของผิวในแนวดิ่ง

2.2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ ของคอยล์แบบท่อกลมและครีบนิดคลื่นต่อเนื่อง (Circular tube –continuous wavy fin) ที่ใช้เป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในการศึกษาวิจัยนี้ จะสมมติให้ว่ามีมิติต่างๆ เท่ากับคอยล์แบบท่อกลมและครีบนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง (Circular tube continuous plate fin) ดังแสดงในรูป 2.13 เพราะมีรูปร่างใกล้เคียงกันและง่ายต่อการคำนวณ ซึ่งมีมิติต่างๆ ดังนี้



รูป 2.13 แสดงลักษณะของคอยล์แบบท่อกลมและครีบนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง

$$N_t = N_r \cdot N_c \quad (2.9)$$

$$N_f = \frac{L_i}{L_{fs}} + 1 \quad (2.10)$$

$$A_f = 2N_f(W_f \cdot L_f - \frac{\pi D_o^2 \cdot N_t}{4}) + 2N_f \cdot L_f \cdot t_f \quad (2.11)$$

$$A_b = N_t(\pi \cdot D_o L_i - N_f \cdot t_f \pi D_o) \quad (2.12)$$

$$A_t = A_f + A_b \quad (2.13)$$

$$A_{ff} = (L_i \cdot L_f) - N_c \cdot D_o (L_i - N_t \cdot t_f) - (N_f \cdot L_f \cdot t_f) \quad (2.14)$$

$$A_{fr} = L_i \cdot L_f \quad (2.15)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot A_{ff} \cdot W_f}{A_t} \quad (2.16)$$

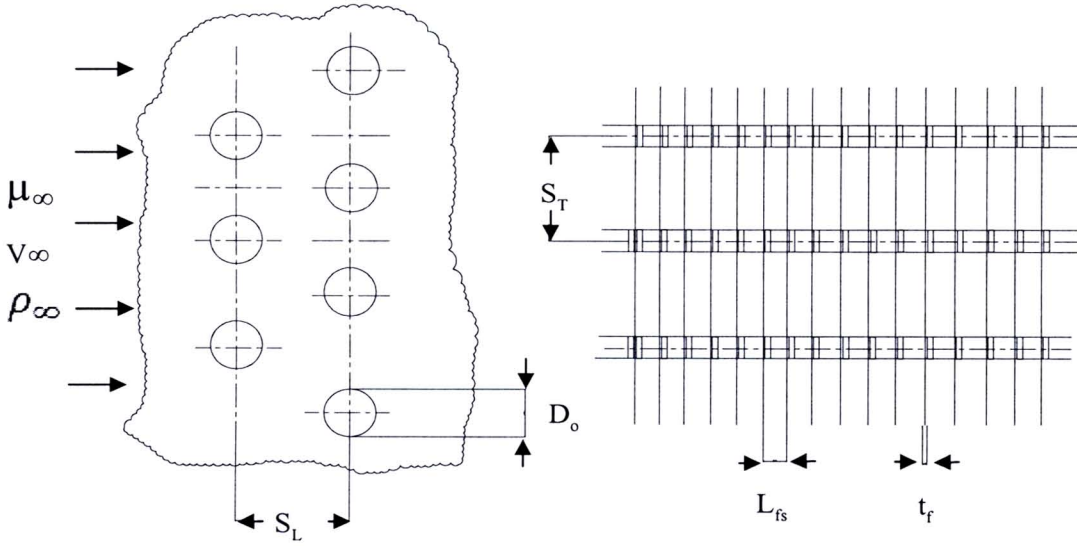
$$t_w = \frac{D_o - D_i}{2} \quad (2.17)$$

$$A = N_T \left(\pi D_o (H - N_f t_f) + 2N_f R_f \left(S_T S_L - \frac{\pi D_o^2}{4} \right) \right) \quad (2.18)$$

สำหรับค่า h_{eo} ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลภายนอกคอยล์สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านครีป (h_f) กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านท่อส่วนที่ไม่ติดครีป (h_b) ที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_{eo} = \frac{(\eta_f A_f h_f + A_b h_b)}{A_i} \quad (2.19)$$

ซึ่ง h_f สามารถประมาณได้จากการใช้สมการถ่ายเทความร้อนของชั้นขอบที่ไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) ผ่านแผ่นราบ เพราะว่าของไหลที่ไหลใกล้ครีปจะเกิดการปั่นป่วน โดยเริ่มเกิดขึ้นที่ขอบของครีป จึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดเป็นชั้นขอบเขตแบบชั้นๆ (Laminar boundary layer) ได้ ซึ่งค่าประมาณของ h_f ในช่วงความยาวประสิทธิผลของครีป L_{eff} สามารถหาได้โดยใช้สมการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ คือ



รูป 2.14 แสดงการจัดเรียงท่อแบบเหลื่อมกันในคอยล์แบบท่อกลมและครีปชนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง

$$St = 0.036 \left(\frac{L_{eff} v_{\infty} \rho_{\infty}}{\mu_{\infty}} \right)^{-0.2} (Pr)^{-2/3} \quad (2.20)$$

เมื่อ
$$St = \frac{h_f}{c_{p\infty} v_{\infty} \rho_{\infty}} \quad (2.21)$$

$$Pr = \frac{c_{p\infty} \mu_{\infty}}{k_{\infty}} \quad (2.22)$$

และ L_{eff} = ความยาวประสิทธิภาพของครีบท่อกับครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างผิวท่อที่อยู่ติดกันในแนวตั้งฉากกับการไหล

ดังนั้น
$$L_{eff} = \frac{S_T - D_o}{2} \quad (2.23)$$

ประสิทธิภาพของครีบท่โดย

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_{eff})}{mL_{eff}} \quad (2.24)$$

เมื่อ
$$mL_{eff} = L_{eff} \sqrt{\frac{2h_f}{k_f t_f}} \quad (2.25)$$

และสำหรับ h_b สามารถประมาณหาได้จากสมการมาตรฐานสำหรับของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ คือ

$$Nu = BC_z Re^m Pr^{1/3} \quad (2.26)$$

เมื่อ
$$Nu = \frac{h_b D_o}{k_\infty} \quad (2.27)$$

$$G_{max} = \rho_\infty v_\infty \frac{A_{fr}}{A_{ff}} \quad (2.28)$$

$$Re = \frac{D_o G_{max}}{\mu_\infty} \quad (2.29)$$

C_z เป็นค่าตัวคูณซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงท่อและจำนวนแถว ซึ่งค่า C_z สำหรับการจัดเรียงท่อแบบเหลื่อมกัน (Staggered alignment) แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_r กับ C_z

N_r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥ 10
C_z	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00

2.2.2.1 การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหย

$$Q_e = (\dot{m}C_p)_e \Delta T_e \quad (2.30)$$

$$Q_e = (\dot{m}C_p)_e (T_{e,in} - T_{e,out}) \quad (2.31)$$

2.2.2.2 การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น

$$Q_c = (\dot{m}C_p)_c \Delta T_c \quad (2.32)$$

$$Q_c = (\dot{m}C_p)_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2.33)$$

2.2.3 ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

กำหนดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่บอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังนี้

$$Eff = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (2.34)$$

$$Eff = \frac{UA}{(\dot{m}C_p)_{\min}} \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{\max}} \quad (2.35)$$

เมื่อ $(\dot{m}C_p)_c < (\dot{m}C_p)_e$

$$Eff = \frac{(T_{c,out} - T_{c,in})}{(T_{e,in} - T_{c,in})} \quad (2.36)$$

หรือ

เมื่อ $(\dot{m}C_p)_e < (\dot{m}C_p)_c$

$$Eff = \frac{(T_{e,in} - T_{e,out})}{(T_{e,in} - T_{c,in})} \quad (2.37)$$

2.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ราคาต้นทุนของอุปกรณ์จะอยู่ในรูป

$$C_T(x_i) = a^c \sum_{i=1}^n C_i^c(x_i) + b^c \quad (2.38)$$

เมื่อ

$$a^c = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.39)$$

ราคาของพลังงานที่ประหยัดได้เมื่อมีการนำอุปกรณ์ประหยัดพลังงานมาใช้ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$C_{saving} = t_{op} c_q Q_{total} \quad (2.40)$$

ที่จุดเหมาะสม (Optimum point) ได้ผลตอบแทนสุทธิ สูงสุดคือ

$$P = C_{saving} - C_T \quad (2.41)$$

โดยที่

- c_q = ราคาต่อหน่วยพลังงาน (บาท/ยูนิต)
- $\sum_{i=1}^n C_i^c(x_i)$ = ราคาต้นทุนของอุปกรณ์แต่ละหน่วย (บาท)
- t_{op} = เวลาการทำงานใน 1 ปี
- (x_i) = ปัจจัยที่มีผลต่อราคาอุปกรณ์
- a^c = Capital- recovery factor
- b^c = ค่าใช้จ่ายรายปี สมมุติให้คงที่
- Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำได้ (กิโกลู/วินาที)
- P = ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)

