

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรง

เมื่อเทอร์โมไซฟอนทำงานโดยการที่สารทำงานรับความร้อนจากส่วนที่ระเหยแล้วพาความร้อนไปคายให้กับส่วนควบแน่นโดยการกลั่นตัวนั้นซึ่งจะทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) ค่าความต้านทานรวม (Z) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) จากสมการ (2.1)

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

โดยที่ $\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h$ เมื่อ T_{so} คืออุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน T_{si} คือ อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อน และ ΔT_h คืออุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยอันเกิดเนื่องจากหัวน้ำ (Hydrostatic head) ส่วนค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนจะหาได้จากวงจรความต้านทาน (Network of resistances) ซึ่งประกอบไปด้วย Z_1 ถึง Z_{10} เป็นวงจรความต้านทานโดยมีความต้านทานความร้อนต่างๆ ดังนี้

Z_1 และ Z_9 คือความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งให้ความร้อนกับผิวนอกของท่อส่วนที่ระเหย และระหว่างแหล่งรับความร้อนกับผิวนอกของท่อส่วนควบแน่นตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2)

$$Z_1 = 1 / (h_{co} S_{co}) \quad \text{และ} \quad Z_9 = 1 / (h_{co} S_{co}) \quad (2.2)$$

Z_2 และ Z_8 คือความต้านทานความร้อนเนื่องจากความหนาของท่อในส่วนที่ระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$Z_2 = \frac{\ln[D_o / D]}{2\pi L_c \lambda} \quad \text{และ} \quad Z_8 = \frac{\ln[D_o / D]}{2\pi L_c \lambda} \quad (2.3)$$

Z_3 และ Z_7 เป็นความต้านทานภายในอันเนื่องจากการเค็ดและการกั้นตัวในเทอร์โมโซโฟนซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงาน ขนาดท่อเทอร์โมโซโฟนและอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการคำนวณจะอยู่ในหัวข้อต่อไป

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผสมปนเปกันระหว่างของเหลวกับไอในส่วนทำระเหยและในส่วนควบแน่นปรกติจะมีค่าน้อยมากและจะไม่นำมาคิด

Z_5 เป็นความต้านทานความร้อนยังผลอันเนื่องมาจากความดันตกของการไหลจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นความดันตกนี้ จะทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวของไอลดลงมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่นมีค่าลดลง ค่า Z_5 นี้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Z_3 และ Z_7

Z_{10} เป็นความต้านทานการนำความร้อนตามแนวยาวของผนังท่อซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาและชนิดของท่อค่า Z_{10} นี้จะประมาณได้จากสมการ (2.4)

$$Z_{10} = (0.5L_e + L_a + 0.5L_c) / (A * k) \quad (2.4)$$

สำหรับการทำงานตามปรกติของเทอร์โมโซโฟน ที่มีส่วนทำระเหยอยู่ระดับต่ำกว่าส่วนควบแน่น การนำความร้อนตามแนวยาวของผนังท่อจะช่วยทำงานเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจใช้หลักการ “เทอร์มอลไดโอด (Thermal diode)” ซึ่งจะได้เกณฑ์ในการพิจารณาดังสมการ (2.5)

$$Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8) > 20 \quad (2.5)$$

ถ้าใช้หลักเกณฑ์ดังสมการ (2.5) จะประมาณความต้านทานความร้อนรวมได้จากสมการ (2.6)

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.6)$$

ถ้าไม่ใช้หลักเกณฑ์ตามสมการ (2.5) ก็จะได้จากสมการ (2.7)

$$Z = [Z_1 + (Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)^{-1} + 1/Z_{10}]^{-1} + Z_9 \quad (2.7)$$

หากว่าความร้อนไหลกลับทิศทางของเทอร์มอลไดโอด มันจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในและความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าดังสมการ (2.8)

$$Z = Z_1 + Z_9 + Z_{10} \quad (2.8)$$

ขอบเขตและเงื่อนไขในการคำนวณ

1. ทราบอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) และถ้าต้องการคำนวณหาอุณหภูมิที่แตกต่างกันของผิวนอกท่อระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น ($T_{co} - T_{co}$) เพื่อนำไปเปรียบเทียบเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งหมด ซึ่งหากทราบอุณหภูมิตัวใดตัวหนึ่งแล้วก็จะสามารถหาอุณหภูมิของไอสารทำงานได้

2. ทราบอุณหภูมิผิวนอกท่อส่วนควบแน่น (T_{co}) และอุณหภูมิของแหล่งรับความร้อน (T_{si}) ต้องการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) และอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน (T_{so}) ต้องการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนแก่สารทำงาน

3. ทราบอุณหภูมิผิวนอกท่อส่วนทำระเหย (T_{co}) และอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน (T_{so}) ต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q)

4. ทราบอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน (T_{so}) และแหล่งรับความร้อน (T_{si}) ต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q)

อุณหภูมิผิวนอกท่อในส่วนของการทำระเหยและส่วนควบแน่น สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$T_{co} = T_{so} - (Z_1 / Z) \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

$$T_{co} = T_{si} - (Z_9 / Z) \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

เมื่อไม่คิดการนำความร้อนในแนวแกน และความดันตกของไอน้ำน้อยมากอุณหภูมิไอของสารทำงานจะหาได้จากสมการ (2.11)

$$T_v = T_{si} + \left[\frac{(Z_7 + Z_8 + Z_9)}{Z} \Delta T \right] \quad (2.11)$$

เมื่อคิดว่าความดันตกของไอน้ำผล และทราบอุณหภูมิไอของสารทำงานในส่วนควบแน่น (T_{vc}) ก็สามารถหาอุณหภูมิไอของสารทำงานในส่วนทำระเหย ได้จากสมการ (2.12)

$$T_{ve} = T_{vc} + Z_5 Q \quad (2.12)$$

ความต้านทานความร้อนภายใน (Internal thermal resistance)

ค่าความต้านทานความร้อนภายในประกอบด้วย $Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7$ เมื่อไม่คิดค่า Z_4 และ Z_6 และค่า Z_5 มีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้จะได้ความต้านทานความร้อนภายในเหลือเพียง $Z_3 + Z_7$

ความต้านทานภายในของท่อตั้งผิวเรียบ

ความต้านทานความร้อนเนื่องจากแผ่นฟิล์มที่เกิดจากการกลั่นตัวลงมาของสารทำงานตามผิวท่อ แนวตั้งสามารถคำนวณจากทฤษฎีของ Nusselt ดังสมการ (2.13)

$$Z_7 = (C \cdot Q^{1/3}) / (D^{4/3} g^{1/3} L_c \phi_2^{4/3}) \quad (2.13)$$

$$\text{โดย } C = (1/4)(3/\pi)^{4/3} = 0.235$$

$$\phi_2 = (Lk^3 \rho_1^2 / \mu)^{0.25}$$

ในส่วนทำระเหยก็เกิดแผ่นฟิล์มที่ผนังท่อเช่นกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.14)

$$Z_{3f} = (C \cdot Q^{1/3}) / (D^{4/3} g^{1/3} L_c \phi_2^{4/3}) \quad (2.14)$$

ในทางปฏิบัติเกิดแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเรียบได้ยากเพราะแผ่นฟิล์มจะมีลักษณะเป็นคลื่นและจากการทดลองที่ผ่านมาก็เกี่ยวกับเทอร์โมไซฟอน พบว่าความต้านทานความร้อนจะมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้จากสมการ (2.14) เมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของแผ่นฟิล์มในส่วนอะเดียบาติกมีค่าน้อยกว่า 50

ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re_f) คำนวณได้จากสมการ (2.15)

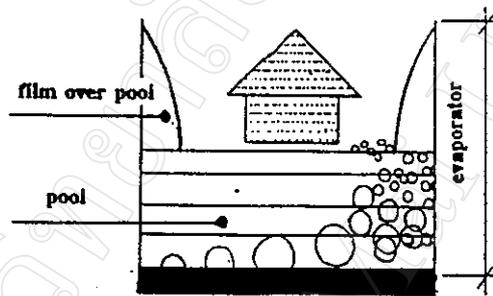
$$Re_f = 4 \cdot Q / L \mu \pi D \quad (2.15)$$

ที่ค่า Re_f ต่ำๆ ค่าความต้านทานความร้อนจะสูงกว่าทางทฤษฎีดังนั้นสมการ (2.13) จึงใช้ได้เฉพาะในช่วง $00 < Re_f < 1300$ ถ้า $Re_f < 1300$ จะเกิดแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นคลื่นและไหลปั่นป่วนซึ่งจะคำนวณหา Z_7 ได้จากสมการ (2.16)

$$Z_7 = Z_7 \text{ (จากสมการ 2.18)} \times 191 \text{ Re}_f^{-0.733} \quad (2.16)$$

2.1.1 การถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหย

เมื่อป้อนความร้อนให้กับช่วงการระเหย ความร้อนส่วนหนึ่งจะไหลผ่านผนังท่อไปยังผิวอิสระ(ผิวบน)ของของเหลวโดยการนำความร้อนและอีกส่วนหนึ่งไหลผ่านชั้นของเหลวไปยังผิวอิสระ โดยการพาอย่างอิสระการระเหยทั้งหมดจะเกิดที่ผิวของของเหลวเมื่อความร้อนสูงขึ้นจะเกิดมีฟองไอเล็กๆเกิดขึ้น และหลุดลอยขึ้นมาและสลายตัวออก เพราะความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวที่อยู่โดยรอบ ของเหลวที่เย็นกว่าจะดูดพลังงานความร้อนบางส่วนจากฟองไอนี้จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นและความหนาแน่นลดลง ดังนั้นฟองไอนี้จะลอยมาที่ผิวแล้วระเหยกลายเป็นไอน้ำออกจากผิวได้ ของเหลวที่อยู่ในภาชนะจะเกิดการเดือดปั่นป่วนแต่อุณหภูมิคงที่ ไอน้ำบางส่วนจะลอยไปสู่ช่วงการควบแน่น และบางส่วนจะควบแน่นเป็นฟิล์มของเหลวเหนือบ่อของเหลวดังรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงกลไกของ Pool boiling ในส่วนของ Evaporator

เนื่องจากส่วนทำระเหยจะมีสารทำงานที่แยกกันได้ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นของเหลว และส่วนที่เป็นฟิล์มของเหลวเหนือแอ่งของเหลว ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหยจึงแยกออกได้ 2 กรณี

1. การถ่ายเทความร้อนในแอ่งของเหลว

การถ่ายเทความร้อนในแอ่งของเหลวจะพิจารณาที่จุดเริ่มต้นของการเดือด โดยที่การเดือดในแอ่งของเหลวจะแตกต่างจากการเดือดที่เห็นอยู่ทั่วไป เนื่องจากเทอร์โมไซฟอน

กระทำในระบบปิดและอาศัยแรงโน้มถ่วง จึงทำให้การเคลื่อนที่ของไอและความดันมีผลกระทบมากในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่การเดือดในส่วนทำระเหยจะเป็นไปแบบสมบูรณ์ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่จะพิจารณา จึงเป็นเพียงสูตรโครงสร้างที่หาจากความคล้ายคลึงกัน ของการเดือดในระบบปิดกับระบบเปิด โดยมีความดันเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการ (2.17)

$$h_p(\text{closed}) \propto h_p(\text{open}) \cdot (P / \text{Pa})^n \quad (2.17)$$

จากการทดลองที่ผ่านมาในอดีตทำให้มีสมการสำหรับหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดในเทอร์โมไซฟอนดังสมการ (2.18)

$$h_p = 0.32 \frac{\rho^{0.65} k^{0.3} C_p^{0.7} g^{0.2}}{\rho_V^{0.25} L^{0.4} \mu^{0.1}} (P / \text{Pa})^{0.23} / q_e^{0.4} \quad (2.18)$$

2. การถ่ายเทความร้อนในฟิล์มของเหลว

การถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ในส่วนทำระเหยถ้ามีค่าน้อยลักษณะของฟิล์มจะเป็นแบบราบเรียบ และสามารถพิจารณาหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากทฤษฎีของ Nusselt ได้ถ้าค่าการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ในส่วนทำระเหยมีค่ามาก ($q_e > 1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$) รูปแบบของสมการยังต้องการการศึกษา ดังนั้นจึงสรุปสมการสำหรับหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีนี้ได้ดังสมการ (2.19)

$$h_f (v^2 / g)^{1/3} / k = (4/3)^{1/3} Re_{cf} = h_f^* , q_e < q_e^* \quad (2.19)$$

$$h_f = h_p \quad , q_e > q_e^* \quad (2.20)$$

$$\text{โดยที่ } Re_f = (4 * q_e) / (L * \mu)$$

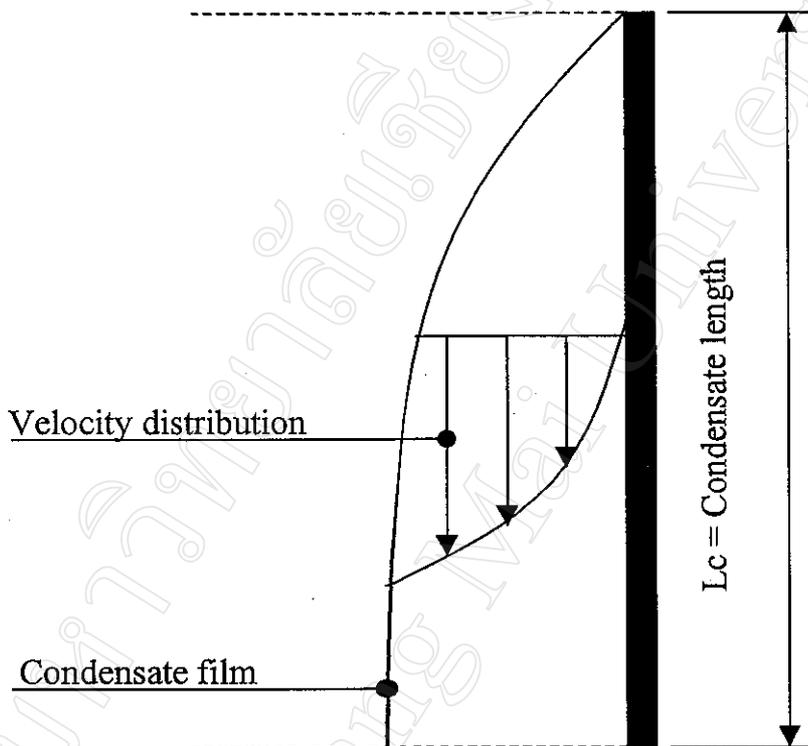
2.1.2 การถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น

การถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่นสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มไอลงันตัว โดยสมมุติฐานว่าฟิล์มไอลงันตัวมีลักษณะบาง และไหลแบบราบเรียบลง

ตามรัศมีด้านในของท่อ โดยที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของส่วนควบแน่นจะหาได้จาก ทฤษฎีของ Nusselt สำหรับฟิล์มไอกลั่นตัวที่ไหลแบบราบเรียบในแนวตั้งดังรูป 2.2 และหาค่าได้จากสมการ (2.21)

$$h_c = (4/3)^{4/3} \cdot Re_c^{-1/3} \cdot k / (V^2 / g)^{1/3} \quad (2.21)$$

$$\text{โดยที่ } Re_c = (4q_c \cdot L_c) / (L \cdot \mu)$$



รูป 2.2 แสดงการกลั่นตัวบนพื้นผิวในแนวตั้ง

ในส่วนทำระเหยนอกจากจะมีความต้านทานความร้อนเนื่องจากแผ่นฟิล์ม Z_{3f} แล้วยังมีความต้านทานความร้อนเนื่องจากการเดือดในแอ่งของเหลว Z_{3p} ซึ่งหาได้จากสมการ (2.22)

$$Z_{3p} = 1 / [\phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D L e)^{0.6}] \quad (2.22)$$

$$\text{โดยที่ } \phi_3 = \frac{0.32 \rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} C_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (2.23)$$

เมื่อ ϕ_3 เป็นคุณสมบัติกายภาพในการระเหยของสารทำงานที่อุณหภูมิการเดือดในบรรยากาศ
สมการ (2.23) นี้จะใช้ได้ในช่วง $0.03 < P_v / P_a < 2$

สรุป: ในการคำนวณค่าความต้านทานความร้อนภายในของเทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรงที่มี
ผนังเรียบและไม่มีวัสดุพรุนมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณ Re_f จากสมการ 2.20
2. คำนวณ Z_7 เมื่อ $50 < Re_f < 1300$ ใช้สมการ (2.18)
เมื่อ $Re_f < 1300$ ใช้สมการ (2.21)
3. คำนวณ Z_{3f} จากสมการ (2.19)
4. คำนวณ Z_{3p} จากสมการ (2.22)
5. ถ้า $Z_{3p} \leq Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$ นอกเหนือจากนี้ใช้การประมาณค่าดังสมการ (2.24)

$$Z_3 = Z_{3p}F + Z_{3f}(1-F) \quad (2.24)$$

โดย F คือปริมาณสารทำงานที่เติม สมมติฐานของสมการ (2.24) คือ ระดับของเหลวเมื่อ
เกิดการเดือดจะไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าการให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้นก็ตามและไม่ทำให้แผ่นฟิล์ม
ถูกรบกวนเนื่องจากผลของฟองเดือด

ความต้านทานความร้อนภายในของท่อผิวเรียบแนวเอียง

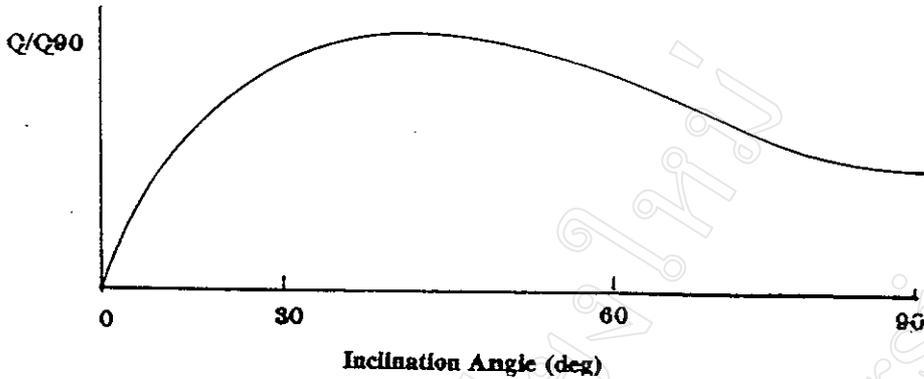
การเอียงท่อจะทำให้สามารถลดความต้านทานความร้อนในแผ่นฟิล์มไอก์กันตัว (Z_7)
แต่มันก็ทำให้ความต้านทานความร้อนของการกลายเป็นไอ (Z_3) มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากผิวด้าน
บนของท่อมีความเปียกผิวด้าน

สำหรับความต้านทานความร้อนของแผ่นฟิล์มไอก์กันตัว (Z_7) ในท่อวางแนวระดับ
สามารถคำนวณจากทฤษฎีของ Nusselt ดังสมการ (2.25)

$$Z_7 = \frac{0.335Q^{1/3}}{Dg^{1/3}L_c^{4/3}f_2^{4/3}} \quad (2.25)$$

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรงกับแบบเอียง
จากตัวอย่างหนึ่งซึ่งแสดงในรูป 2.3 จะพบว่าเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงให้ความร้อนที่จุดวิกฤตได้สูง

กว่าแบบตั้งตรงแสดงให้เห็นถึงการวางท่อตำแหน่งมุมเอียงของเทอร์โมไซฟอนมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน



รูป 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับมุมเอียง

สำหรับการทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรงจะพบว่าจะมีข้อจำกัดที่จะทำให้เกิดสภาวะวิกฤตในเทอร์โมไซฟอน แล้วจะทำให้เทอร์โมไซฟอนไม่สามารถส่งผ่านความร้อนได้อีกต่อไป

ซึ่งความต้านทานภายใน (Z_i) ของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงที่ทำงานที่สภาวะปรกติจะหาได้จากสมการ (2.26)

$$(Z_i)_{\text{ท่อเอียง}} = (R_{\text{nominal}} / R_{n90}) \times Z_i \text{ (ท่อตรง)} \quad (2.26)$$

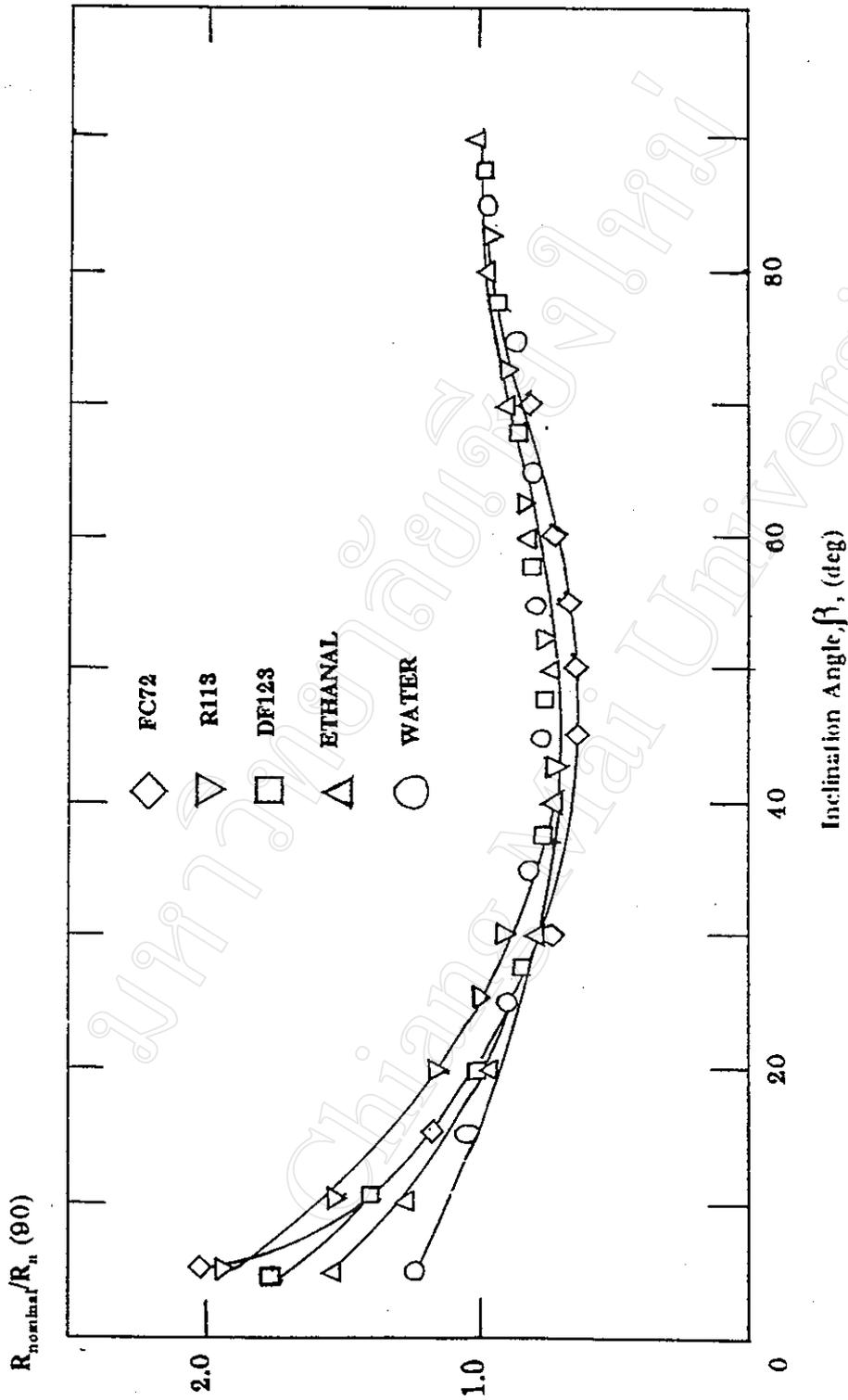
โดยที่ $(R_{\text{nominal}} / R_{n90})$ คือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานความร้อนภายในสำหรับการเอียงท่อ

$(R_{\text{nominal}} / R_{n90})$ จะสามารถหาได้จากรูป 2.4 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเทอร์โมไซฟอนที่เอียงไปจากแนวระนาบกับค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานความร้อนภายในสำหรับการเอียงท่อ

ความแตกต่างของอุณหภูมิเนื่องจากหัวน้ำ (Hydrostatic head)

การทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนมักจะกระทำที่ความดันต่ำซึ่งความดันนี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนที่ระดับต่างๆ โดยความดันที่กั้นแ่งของเหลวพิจารณาจากสมการ (2.27)

$$P_p = P_v + \rho_1 g F L_c \sin \beta \quad (2.27)$$



รูป 2.4 แสดงกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานความร้อนภายในกับมุมเอียง

เมื่อ β คือมุมเอียงในการวางท่อเทอร์โมไซฟอนกับแนวระดับ และที่ความดัน P_p จะหาอุณหภูมิอิ่มตัวที่กันแ่งของเหลว T_p ได้จากตารางแสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์รูป 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระดับของของเหลวในท่อส่วนทำระเหย อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน (T_{so}) ถูกตั้งสมมุติฐานว่าไม่ขึ้นอยู่กับระดับความลึกอุณหภูมิอิ่มตัวของการเดือด (T_s) จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นโค้งในส่วนทำระเหย และค่อนข้างจะคงที่ในส่วนอะเดียติกและส่วนควบแน่น แต่เพื่อความสะดวกจะตั้งสมมุติฐานว่าอุณหภูมิของของไหลในส่วนที่อยู่เหนือระดับของเหลวมีค่าคงที่เท่ากับ (T_v) และจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงตามระดับความลึกของของเหลวจนถึงอุณหภูมิ (T_p) ที่กันแ่งของเหลว ดังนั้นอุณหภูมิของของไหลในส่วนทำระเหยหาได้จากสมการ (2.28)

$$T_{mc} = T_v(1-F) + \frac{(T_v + T_p)F}{2} \quad (2.28)$$

ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิเนื่องจากหัวน้ำหาได้จากสมการ (2.29)

$$\Delta T_h = T_{mc} - T_v = \frac{(T_p + T_v)F}{2} \quad (2.29)$$

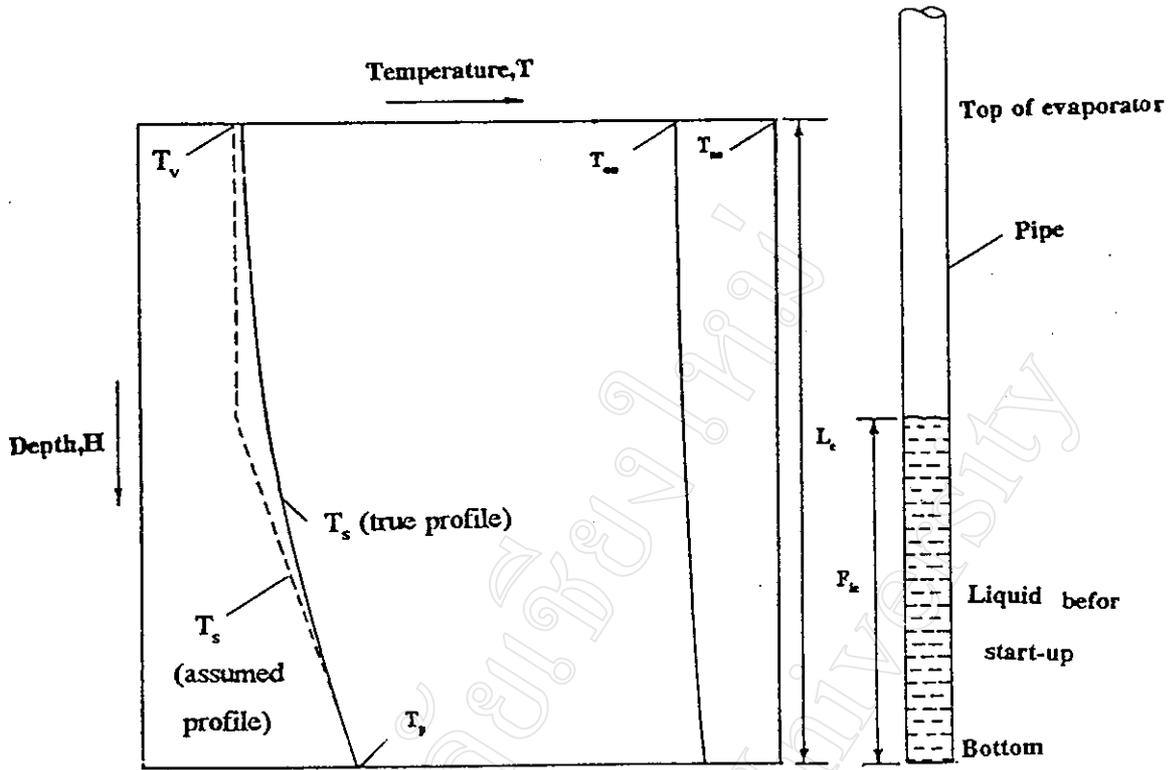
รูป 2.6 ถ้าข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานมีไม่เพียงพอ..อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับระดับความลึกของของเหลวสามารถหาได้จากสมการของ Clausius-Clapeyron (2.30)

$$\frac{dT_s}{dH} = \frac{T_s g}{L} \left[\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right] \quad (2.30)$$

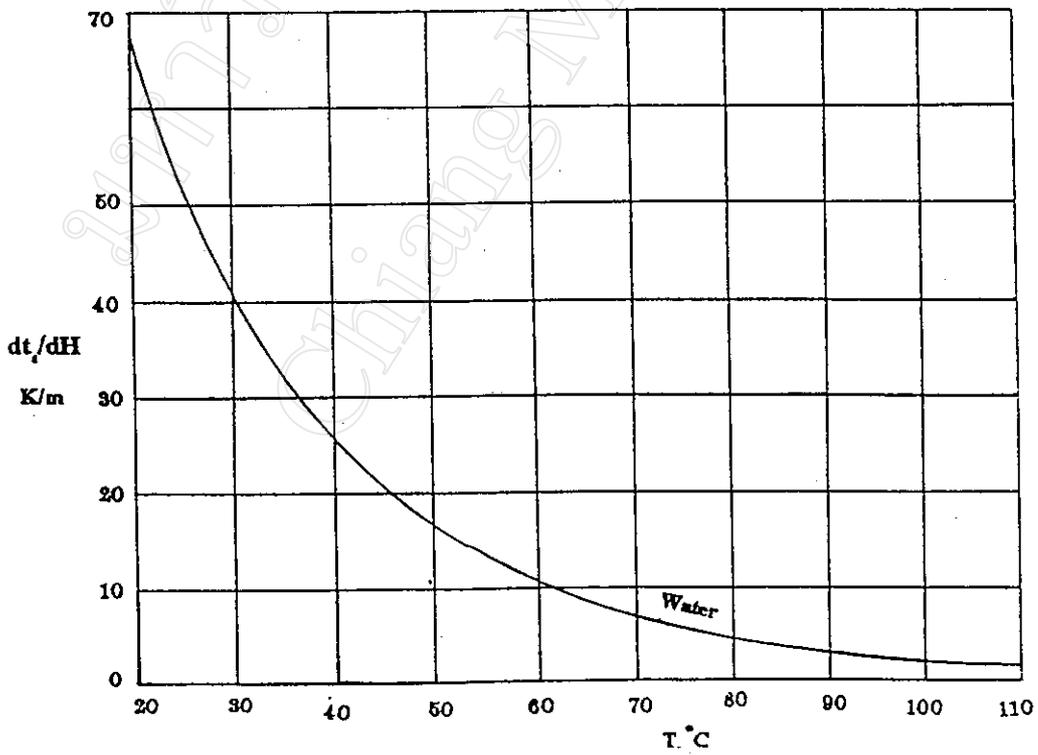
ถ้าไม่คิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารทำงานกับความลึกอุณหภูมิของของเหลวที่กันแ่งจะเป็นดังสมการ (2.31)

$$T_p = T_v + \left[\frac{dT_s}{dH} \right] L_c F \quad (2.31)$$

โดยทั่วไปแล้ว ΔT_h จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะประมาณค่า $T_{mc} \approx T_v$ เชียก็ได้แต่ก็ควรที่จะตรวจสอบ ΔT_h เมื่อความดันไอของสารทำงานต่ำกว่าความดันบรรยากาศ



รูป 2.5 แสดงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆในส่วนทำระเหย



รูป 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ (T_s) กับอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิเทียบกับระดับความลึก (dt/dH)

2.2 ขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของเทอร์โมไซฟอน

เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เทอร์โมไซฟอนมีการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นจนถึง จุดๆ หนึ่งซึ่งจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเรียกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤต ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีอยู่หลายประการคือ

1. ขีดจำกัดความดันไอ (Vapour pressure limit)

การทำงานของเทอร์โมไซฟอนจะกระทำที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศทำให้ความดันตกของไอมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

2. ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit)

การทำงานที่ความดันต่ำในเทอร์โมไซฟอนจะทำให้ความเร็วของไอมีค่าเข้าใกล้กับความเร็วเสียงในไอซึ่งเป็นสาเหตุให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้สูงขึ้นไปอีก ดังนั้นการคำนวณหาขีดจำกัดความเร็วเสียงจะเป็นการประมาณการถ่ายเทความร้อนสูง จากสมการ (2.32)

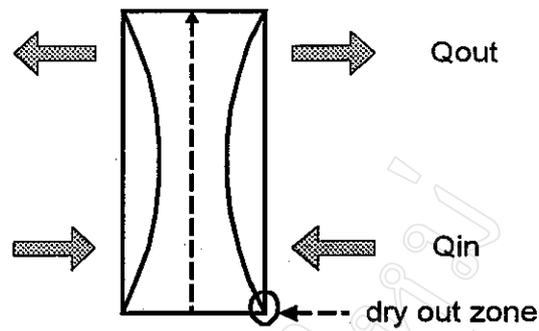
$$\frac{Q_{\max}}{AL} = 0.5(\rho_l \rho_v)^{0.5} \quad \text{kg / (s.m}^2\text{)} \quad (2.32)$$

3. ขีดจำกัดเนื่องจากการเหือดแห้ง (Dry out limit)

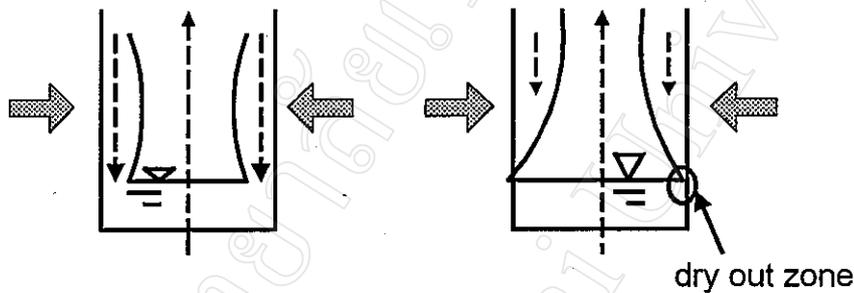
ขีดจำกัดนี้จะเกิดได้สองกรณีคือเมื่อเติมปริมาณสารทำงานน้อยเกินไปและเติมปริมาณสารมากเกินไป

ก. การเติมปริมาณสารน้อยเกินไปหากมีการป้อนฟลักซ์ความร้อนช่วงการระเหยสูง จะทำให้ของเหลวส่วนล่างเริ่มแห้งอุณหภูมิของผนังจะค่อยๆเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 2.7

ข. เมื่อเติมสารทำงานมากเกินไปจะทำให้สารทำงานระเหยกลายเป็นไอดีมากขึ้นและระดับผิวของเหลวลดลงอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูป 2.8 ผลต่อมาจะมีแรงเฉือนระหว่างความเร็วของไอกับของเหลวที่ควบแน่นสูงขึ้น จะทำให้เกิดการสะสมของของเหลวในช่วงการควบแน่นมากขึ้นก็จะทำให้เกิดการเหือดแห้งเหนือบ่อของเหลว อุณหภูมิของผนังท่อจะสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักของเหลวที่ควบแน่นมากกว่าแรงของไอของเหลว จะตกลงสู่ช่วงการระเหยและจะทำให้อุณหภูมิที่ผนังแกว่งไปมา



รูป 2.7 แสดงถึงการเหือดแห้งเมื่อเดมสารทำงานน้อยเกินไป



รูป 2.8 แสดงถึงการเหือดแห้งเมื่อเดมสารทำงานมากเกินไป

4. ขีดจำกัดเนื่องจากการเดือดหรือการแตกตัวออก (boiling limit)

จะเกิดในสภาวะที่มีการป้อนฟลักซ์ความร้อนเข้าสู่ช่วงการระเหยสูงๆ ทำให้เกิดการเดือดและฟองของไอ (vapor bubble) ไปรวมตัวกับฟิล์มของไอที่ผนังอย่างรวดเร็ว ฟิล์มของไอนี้จะเป็นฉนวนไม่ให้เกิดการระเหยจากผิวของเหลว และกันความร้อนไม่ให้ผ่านผนังท่อสู่ของเหลว จึงเกิดการสะสมความร้อนในผนังทำให้อุณหภูมิของผนังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดเป็นจุดร้อนจัด (hot spot) ขึ้นขีดขวางการหมุนเวียนของของเหลว ขีดจำกัดนี้เรียกว่าขีดจำกัดเนื่องจากการเดือด ซึ่งกำหนดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดดังสมการ (2.33)

$$\frac{Q_{\max}}{S_e} = 0.12L(\rho_v)^{0.5} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (2.33)$$

โดยที่ S_e คือ พื้นที่ผิวภายในของส่วนทำระเหย

σ คือ แรงตึงผิว (Surface tension) ของสารทำงาน

5. ขีดจำกัดการไหลทวนเวียน (Countercurrent flow limit)

เมื่อเติมสารทำงานเพียงพอต่อการที่จะทำให้ไม่เกิดการแห้ง อัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นที่มักจะเกิดขึ้นคือแรงดันไอของสารทำงานจะดันสารทำงานที่ก้นตัวเป็นของเหลวไม่ให้ตกลงมาข้างล่างของเหลวเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Flooding หรือ Entrainment-limit

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เกิดจากขีดจำกัดการไหลทวนเวียนเป็นดังสมการ (2.34)

$$\frac{Q_{\max}}{AT} = f_1 f_2 f_3 (\rho_v)^{0.5} [g(\rho_1 - \rho_v)\sigma]^{0.25} \quad (2.34)$$

เมื่อปัจจัย f_1 เป็นฟังก์ชันของค่าบอนด์นัมเบอร์ Bo ซึ่งนิยามได้จากสมการ (2.35)

$$Bo = D \frac{[g(\rho_1 - \rho_v)]^{0.5}}{\sigma} \quad (2.35)$$

ค่าของ f_1 สามารถหาได้จากรูป 2.9 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Bo กับ f_1 แต่ถ้า $Bo > 11$ แล้ว $f_1 = 8.2$

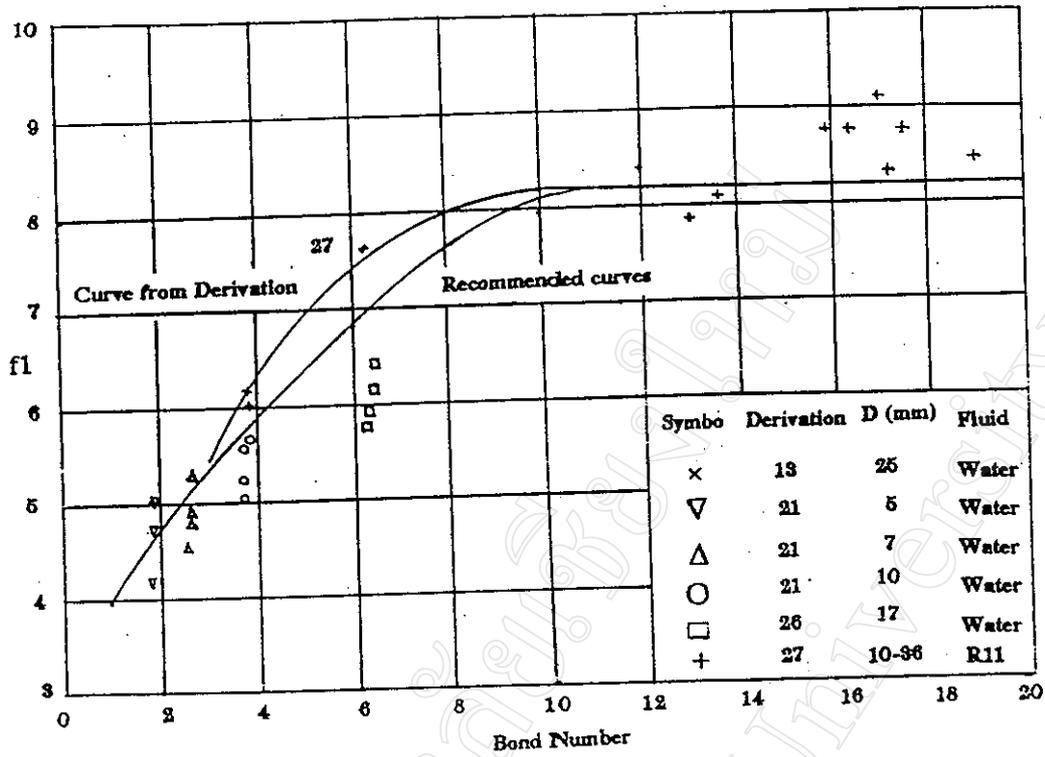
ปัจจัย f_2 เป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบไร้นหน่วยของความดัน (Kp) ซึ่งนิยามได้จากสมการ (2.36)

$$Kp = \frac{P_v}{[g(\rho_1 - \rho_v)\sigma]^{0.5}} \quad (2.36)$$

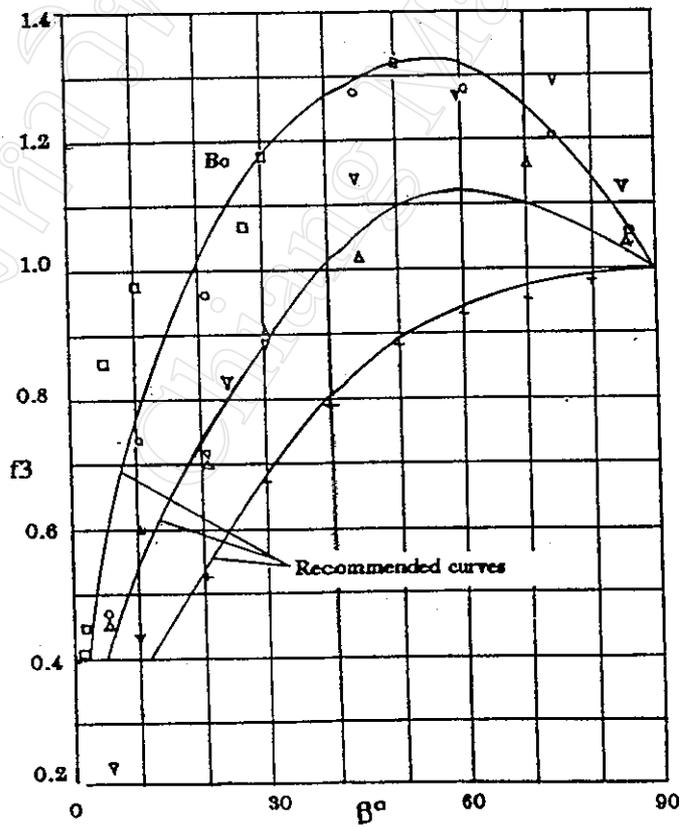
$$\text{โดยที่ } f_2 = Kp^{-0.17} \text{ เมื่อ } Kp \leq 4 \times 10^4 \quad (2.37)$$

$$f_2 = 0.165 \text{ เมื่อ } Kp > 4 \times 10^4$$

ปัจจัย f_3 เป็นฟังก์ชันของการเอียงท่อ สำหรับท่อตรง $f_3 = 1$ ถ้าเป็นท่อเอียง f_3 สามารถหาได้จากรูป 2.10 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียง (β) กับ f_3 ผลคูณของ $f_1 f_2 f_3$ เรียกว่า Kutateladze number



รูป 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างบอนด์นัมเบอร์กับค่าปัจจัย f_1

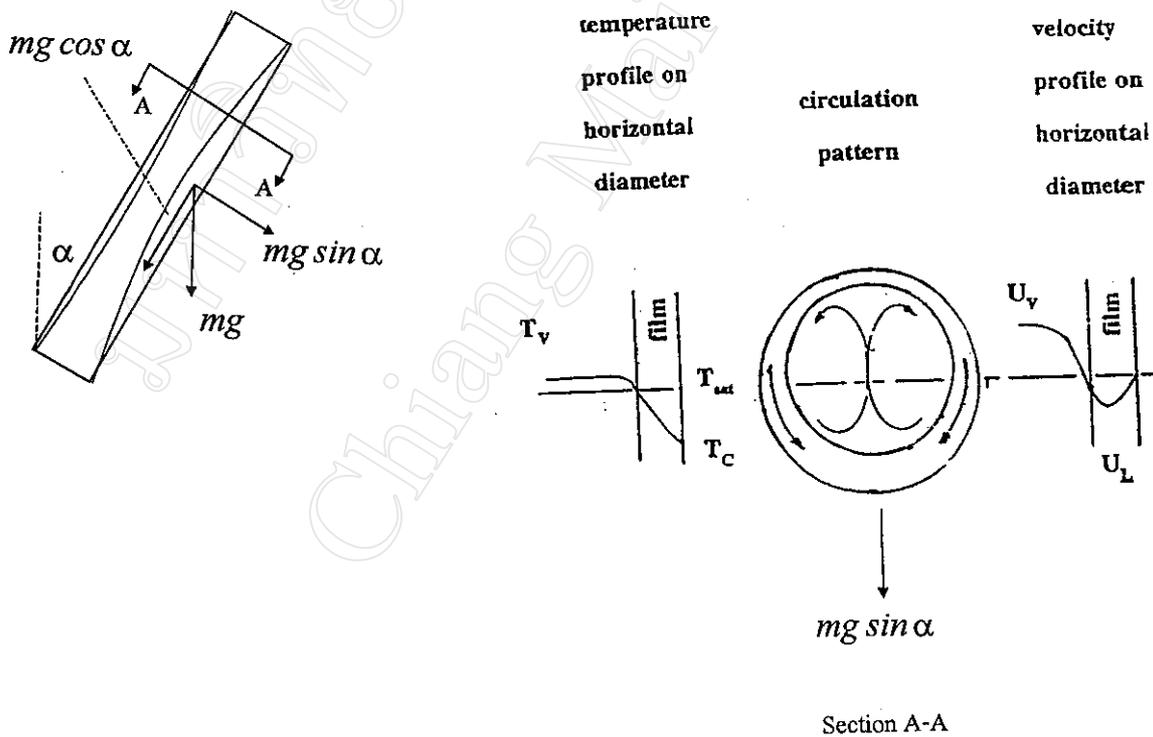


รูป 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อกับ f_3

2.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์มิไซโฟนแบบเอียง

2.3.1. แบบจำลองทางความร้อนของท่อเอียง

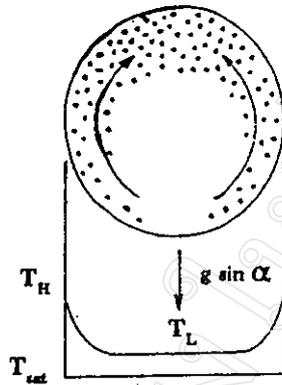
จากผลของแรงโน้มถ่วงที่ค่อนข้างจะซับซ้อนบางที่อาจจะเข้าใจได้ดีที่สุดในรูป บทบาทของแรงโน้มถ่วงในส่วนระเหยและส่วนควบแน่นที่จะพิจารณาแยกกันไป ผลของแรงโน้มถ่วงที่มีผลต่อการควบแน่นแบบแผ่นฟิล์มนั้นได้มีการอธิบายไว้ในรูป 2.11 เมื่อท่อมีการเอียงไปเป็นมุม α จากแนวตั้งตั้งนี้พจน์ $mg \sin \alpha$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแรงโน้มถ่วงตามแนวตั้งฉากกับความยาวท่อก็จะกระทำเป็นแนวตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ และดังนั้นก็จะเกิดการหมุนเวียนชนิดที่สองซึ่งจะแตกต่างไปจากระบบสถานะเดียว คือที่มีรอยต่อระหว่างไอและของเหลว แรงลอยตัวเนื่องจากความร้อนก็จะทำให้เกิดการหมุนเวียนเกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าแรงลอยตัวตามปกติมาก และจะสังเกตเห็นได้ชัดว่าการไหลเวียนแบบที่สองนี้จะทำให้ความหนาของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนไป โดยจะมีความหนาน้อยที่สุดที่พื้นผิวด้านบนของท่อและหนาที่สุดที่พื้นผิวด้านล่าง ซึ่งหมายความว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนตามรัศมีจะลดลงจากด้านบนไปสู่ด้านล่างของแผ่นฟิล์ม



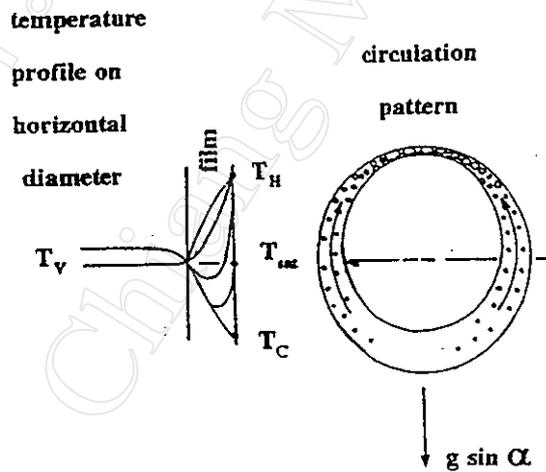
รูป 2.11 แสดงการไหลเวียนแบบที่สองในการควบแน่นแบบฟิล์มในท่อเอียง

ในส่วนทำระเหยนั้นการพิจารณานี้ก็จะสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนด้วยกันคือในส่วน
ของแองของเหลวและในส่วนของแผ่นฟิล์มรูป 2.12 แสดงให้เห็นว่าการเค็ดแบบฟองนั้นจะเกิด
ขึ้นในแองของเหลวและทำให้เกิดฟองไอไหลผ่านตามผนังเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนของผิวหน้าด้าน
บนของท่อ ซึ่งจะทำให้จำนวนของฟองอากาศมีค่ามากขึ้น ในขณะที่การหมุนเวียนแบบที่สองก็จะ
ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากมายในอัตราการถ่ายเทความร้อน และจะทำให้ฟองอากาศมีขนาด
โตขึ้นและหลุดลอยขึ้นไปได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของช่องว่างก็จะมีบทบาทสำคัญ
เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเค็ดแบบเป็นฟองอย่างง่าย ที่บริเวณผิวด้านบนของ
ท่อ และนอกจากนั้นยังห่างจากปลายปิดของท่อไปเท่าไรการระเหยก็จะเกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มของ
ของเหลวควบแน่นที่ไหลย้อนกลับด้วย ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนรูป 2.13 ว่าด้านซ้ายมีอนันมีหน้าตัดของ
แองของ-เหลวมีการแปรเปลี่ยนในอัตราส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเค็ดแบบเป็นฟอง ซึ่ง
จะทำให้รูปแบบการไหลของของเหลวในแบบที่สองเป็นไปตามรูป 2.11 โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วน
ช่องว่างก็จะมีค่าสูงที่บริเวณผิวด้านบน ซึ่งแผ่นฟิล์มนั้นก็บางเพียงพอที่จะเกิดการระเหยของ
ฟองอากาศเล็กๆ ซึ่งเป็นการพ่นหยดของเหลวเข้าสู่แกนไอที่อยู่ตรงกลางและเส้นรอบวงทั้งหมด
ของท่อก็จะมีแผ่นฟิล์มบางๆ หรือแท่งของเหลวเข้าไปกคลุมไว้เกือบจะทั้งหมด

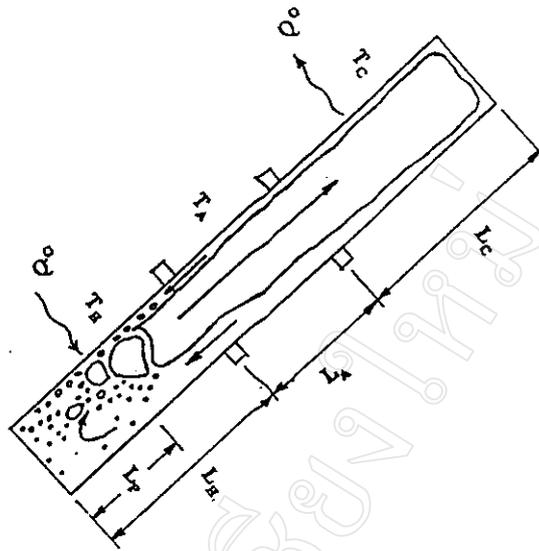
เมื่อรวมผลที่สองที่อธิบายไว้เนื่องจากความเร่งของโลกคือพจน์ $g \sin \alpha$ ก็จะเป็นไปได้ที่
จะสร้างแบบจำลองของการไหลแบบง่าย ๆ ของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงได้ รูป 2.14 แสดงถึงแบบ
จำลองนี้ สิ่งที่เห็นได้ชัดจากการไหลของท่อแบบเอียง ก็คือมีการเคลื่อนจุดศูนย์กลางของแผ่นฟิล์ม
ของเหลวควบแน่น และมีการแปรเปลี่ยนของส่วนที่เป็นส่วนของการเค็ดด้วย ที่บริเวณใกล้กับ
แนวเค็ดการเคลื่อนจุดศูนย์กลางของไอนั้นจะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากว่ายังเอียงเข้าไปใกล้แนวระดับมากๆ
จะมีค่าสูงขึ้น ของเหลวควบแน่นส่วนใหญ่ก็จะไหลกลับมาในรูปของของเหลวที่ค่อนข้างจะหนา
และเคลื่อนไหลแบบช้าๆปรกติจะไม่มีกรไหลแบบวงกลมซ้อนกัน แต่ว่าจะเป็นลักษณะของวง-
กลมซ้อนกัน ซึ่งจะเห็นว่าแรงลอยตัวแบบธรรมดาที่ก็จะผลิตอีกแบบหนึ่ง ในทำนองเดียวกันช่วง
ของการเค็ดแบบไอนั้นก็จะเปลี่ยนไปเล็กน้อยที่บริเวณใกล้ๆแนวเค็ด แต่ถ้าหากว่าเทอร์โมไซฟอน-
เอียงไปมากๆก็จะทำให้เกิดการไหลในรูปของเกลียวผ่านเส้นรอบรูป หรืออาจจะมีฟองไอเกิดขึ้นที่
บริเวณใกล้แนวระดับด้วย อัตราส่วนช่องว่างที่มีค่าสูงๆที่ผิวด้านบนของส่วนทำระเหยนี้จะทำให้
เกิดกลุ่มไอที่มีขนาดใหญ่ และก็จะทำให้ช่วงการไหลแบบสองสถานะนั้นเกิดขึ้นภายในแผ่นฟิล์ม
ของเหลวควบแน่นแบบบางๆ เป็นที่คาดหมายได้ว่าพฤติกรรมกรไหลของด้านบนของส่วนทำ-
ระเหยก็จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ถ้าหากว่าเราเอียงเทอร์โมไซฟอนไปใกล้ๆแนวระดับ และ
จะมีการเปลี่ยนจากการไหลเป็นช่วงเข้าสู่การไหลแบบขะงัก หรือจะเป็นการไหลแบบแยกชั้นกัน
นั่นเอง



รูป 2.12 แสดงการไหลเวียนแบบที่สองในการเดือดแบบแอ่งของท่อเอียง



รูป 2.13 แสดงการไหลเวียนแบบที่สองของแผ่นฟิล์มเดือดในท่อเอียง



รูป 2.14 แสดงแบบจำลองเทอร์โมไซฟอนแบบสองสถานะในแนวเอียง

2.3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สภาวะวิกฤตแบบเอียง

2.3.2.1 ผลของมุมเอียง อัตราส่วนการเติม และความดัน ถ้าหากว่ามีการเติมของไหลทำงานมากเป็นอัตราส่วนมากเมื่อเทียบกับปริมาตรส่วนทำระเหยเช่น $v_R > 35\%$ การระเหยในส่วนด้านล่างที่แผ่นฟิล์มของเหลวควบแน่นไหลลงมาถึง ก็จะมีคามสำคัญน้อยกว่า และพฤติกรรมทางความร้อนในตำแหน่งแนวตั้งนั้น ก็จะควบคุมโดยส่วนควบแน่นเสียเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าเราเอียงท่อจากแนวตั้งลงมาก็จะทำให้สมรรถนะดีขึ้นในตอนแรก ก็เพราะว่ามีการเกิดการไหลวนแบบที่สองซึ่งจะทำให้เกิดแผ่นฟิล์มเคลือบที่มีความหนาน้อยลง และแนวทางการเดินก็จะสั้นกว่าเล็กน้อย ดังนั้นเองก็จะทำให้มีตัวเลขของ Reynolds ที่มีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่นจะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหยจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของการเกิดช่องไอและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของการไหล แต่อย่างไรก็ดีเมื่อเอียงไปมากๆ ก็จะทำให้องค์ประกอบของแรงโน้มถ่วงนั้นมีค่าลดลงก็จะทำให้แรงลอยตัวซึ่งเป็นแรงขับนั้นมีค่าลดลงด้วยมุมเอียงที่เหมาะสมนั้นสามารถจะหาค่าได้ดังที่ สังเกตในรูป 2.15 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพฤติกรรมนี้มีบางส่วนที่คล้ายคลึงกับระบบแบบสถานะเดี่ยวคือมีผลของการไหลแบบที่สองที่ทำให้สมรรถนะดีขึ้นแต่จะทำให้ผลชนิดแรกนั้นมีค่าน้อยลง และดังนั้นแผ่นฟิล์มของของเหลวอาจจะเกิดเป็นลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น ถ้าหากว่าเกิดขึ้นแล้วตัวเลขของ Reynolds แบบแผ่นฟิล์มก็จะมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนส่วนควบแน่นลดลงด้วย ถ้าเกิดสภาพการณ์เหล่านี้ผลของการเอียงก็จะทำให้สมรรถนะลดลงไปด้วย ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับขีดจำกัดการท่วม สมรรถนะนั้นก็ลดลงอย่างรวดเร็ว

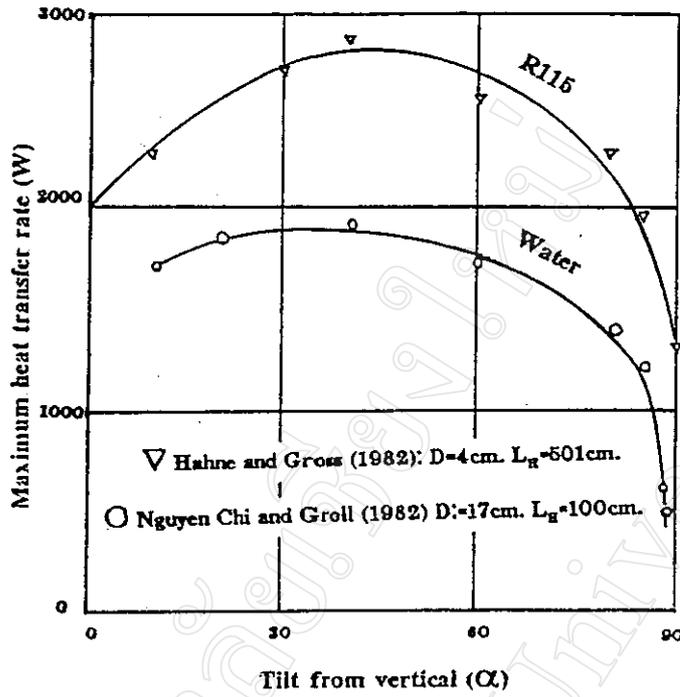
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มนั้นจะไหลย้อนกลับเมื่อมีการเพิ่มมุมเอียงขึ้นมา ซึ่งอันนี้มีการแสดงให้เห็นใน ข้อมูลของ Pioro (1986) ซึ่งสังเกตได้จากสมการ (2.38)

$$q_{\max} = C \left(\frac{D}{L_H} \right)^{0.9} (\sin \beta)^{0.3} \quad (2.38)$$

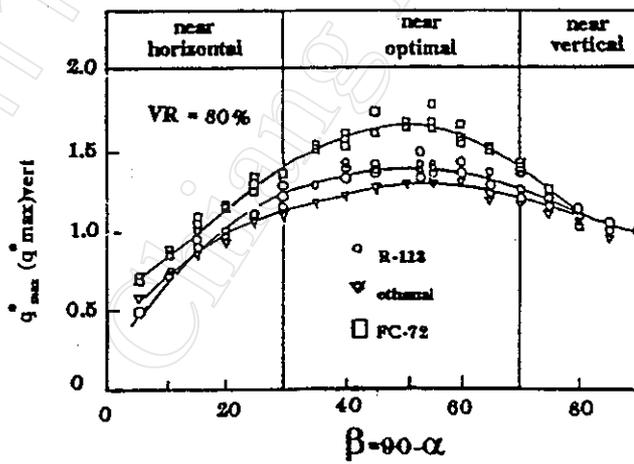
โดยที่ q_{\max} เป็นค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดโดยคิดจากพื้นที่หน้าตัด $\beta = 90^\circ - \alpha$ และ C เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองขึ้นอยู่กับของไหลชนิดนั้น นอกจากนี้ผลของอัตราส่วนกลับ L_H / D ก็มีผลมากด้วย ซึ่งสมการนี้ก็จะเห็นได้ชัดเจนจากการที่สมรรถนะลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่เทอร์โมไซฟอนเกือบจะอยู่ในระดับแล้ว การลดลงของอัตราการส่งผ่านความร้อนนี้ก็จะเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูป 2.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอาจจะอยู่ในช่วง $10^4 - 10^5 \text{ W / m}^2$ โดยคิดจากพื้นที่ผิวที่ได้รับความร้อน ถ้าหากคำนวณโดยใช้พื้นที่ผิวหน้าตัดก็จะทำให้มีค่าต่างกันมากมายดังที่จะเห็นได้ชัดจากรูป 2.15

สำหรับอัตราการเติมที่มีค่าการเติมสูงๆ เช่น $v_R > 75\%$ เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าใกล้ค่าสูงสุดจะเห็นได้ชัดจากรูป 2.16 ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Terdtoon et al. [19] ซึ่งได้แยกช่วงใกล้ค่าสูงสุดแบ่งเป็นสองส่วนด้วยกันได้มีการนิยามไว้อย่างคร่าวๆว่าช่วงหนึ่งนั้นก็จะเป็ช่วงที่สมรรถนะควบแน่นนั้นเพิ่มขึ้นและปรากฏการณ์นี้ทำให้สมดุลโดยการลดลงของสมรรถนะของช่วงส่วนทำระเหย และในช่วงที่ใกล้กับแนวอนในระดับนั่นเองซึ่งที่นี้แบ่งไว้ประมาณ 30° เทอร์โมไซฟอนจะถูกจำกัดโดยส่วนทำระเหยอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งถ้าเป็นในช่วงที่อยู่ใกล้ๆกับแนวตั้งนั้นส่วนควบแน่นก็จะเป็ตัวจำกัดสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน อย่างไรก็ตามก็ควรจะเน้นให้เห็นด้วยการแบ่งช่วงต่างๆนี้ไม่โดดเด่นเท่าไรนักดังที่ได้แสดงในรูป 2.16 นั้นยังคงมีผลของคุณสมบัติของของไหลและจะเห็นด้วยว่าก็ยังขึ้นกับอัตราการเติมรูปทรงทางเรขาคณิตและค่าประมาณของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ใกล้ค่าสูงสุด บางที่เราสามารถพูดอย่างเป็นกลางได้เพียงอย่างเดียวก็คือว่าค่าสูงสุดจะมีค่าต่ำลงมา เมื่อเส้นโค้งของการถ่ายเทความร้อนนั้นอยู่ในช่วงประมาณ $20^\circ - 60^\circ$ หรืออีกนัยก็คือการวัดมุมจากแนวตั้ง $30^\circ - 70^\circ$ และกระนั้นคำอธิบายนี้อาจจะไม่เป็นจริงถ้าพิจารณาตามตัวอย่างของ Pioro

หากเราจะพิจารณาผลของความดันก็จะพบว่าฟองอากาศขนาดใหญ่นี้จะเกิดขึ้นเป็นลักษณะที่สำคัญของเทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำ ที่ความดันสูงขึ้นมาๆนั้นขนาดของฟองอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็วและจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นดังที่เราได้สังเกตก่อนหน้านี้ สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่เอียงไปนั้นก็จะเห็นได้ชัดจากงานของ Gross and Hahne ซึ่งมีอัตรา-



รูป 2.15 แสดงผลของมุมเอียงที่มีต่ออัตราความร้อนสูงสุดในเทอร์โมไซฟอนสองสถานะ



รูป 2.16 แสดงช่วงมุมเอียงของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะภายใต้สภาวะบีดจำกัด

การเดิมที่ค่อนข้างมากและมีค่าอัตราส่วน $L_H / D = 12.5$ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ในส่วนทำระเหยนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนไปกับความดัน สำหรับท่อในแนวตั้งแต่ว่าผลของการเอียงก็แสดงให้เห็นในรูป 2.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนนั้นลดลงในขณะที่มีมุม α เพิ่มจาก $0^\circ - 60^\circ$ แนวโน้มนี้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ α เข้าใกล้ 90° ส่วนควบแน่นอนนั้นถ้าหากว่ายังคงมีแผ่นฟิล์มแบบที่ไหลราบเรียบอยู่ ก็จะสามารพิสูจน์ได้ว่ายังคงมีมุมเอียงที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เพิ่มผลของการไหลชั้นที่สองจะทำให้สมดุล โดยการลดผลของการไหลชั้นที่หนึ่งลง ซึ่งอันนี้สังเกตเห็นได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนค่าๆ ข้อมูลของส่วนทำระเหยสำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าใกล้เคียงกันที่ใช้กับรูป 2.17 ก็แสดงให้เห็นในรูป 2.18 มุมเอียงนี้มีผลเพียงบางส่วนต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อความดันไม่สูงมากเกินไป เช่น $P/P_{cr} < 0.9$ แผ่นฟิล์มของของเหลวควบแน่นอนที่ไหลแบบราบเรียบก็จะทำให้ค่า h สูงขึ้นเมื่อมุมเอียงมากขึ้นจนเกือบถึงประมาณ 50° ที่ความดันสูงๆ แผ่นฟิล์มของเหลวควบแน่นอนก็จะไหลแบบปั่นป่วนและจะทำให้ค่า h ลดลงเมื่อมุมเอียงนั้นเพิ่มขึ้น การแปรเปลี่ยนแบบราบเรียบสู่การไหลแบบปั่นป่วนเมื่อเกิดขึ้นแล้วก็จะทำให้สมรรถนะนั้นเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อยและถ้าหากว่าศึกษาอย่างละเอียดเข้าไปถึงช่วงการแปรเปลี่ยนนี้ Gross and Hahne ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่แสดงในรูป 2.19 ว่าหาค่าได้จากสมการ (2.39)

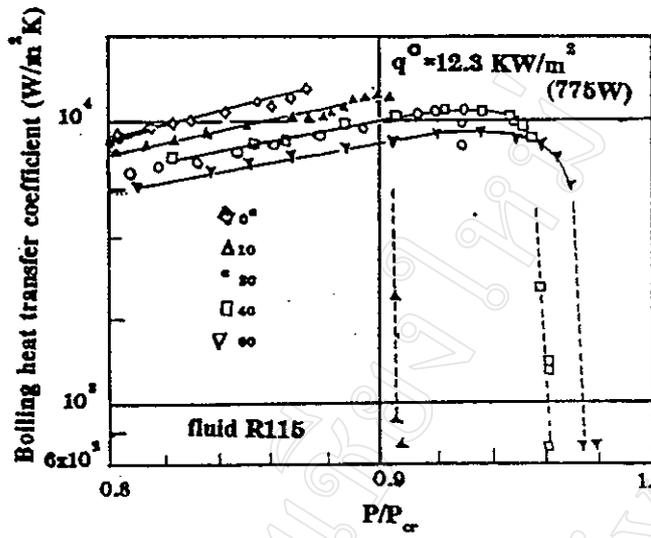
$$Nu = [(Nu_1)^2 + (Nu_2)^2]^{1/2} \quad (2.39)$$

โดยที่ Nu_1, Nu_2 เป็นรูปซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาวะแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนตามลำดับ Re_a เป็นตัวเลขของ Reynolds ของแผ่นฟิล์มสำหรับพื้นที่ผิวในแนวตั้งและคูณด้วยฟังก์ชันของการเอียง $F(\alpha)$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อท่ออยู่ในแนวตั้ง และที่มุมอื่นสามารถหาค่าได้จากสมการ (2.40)

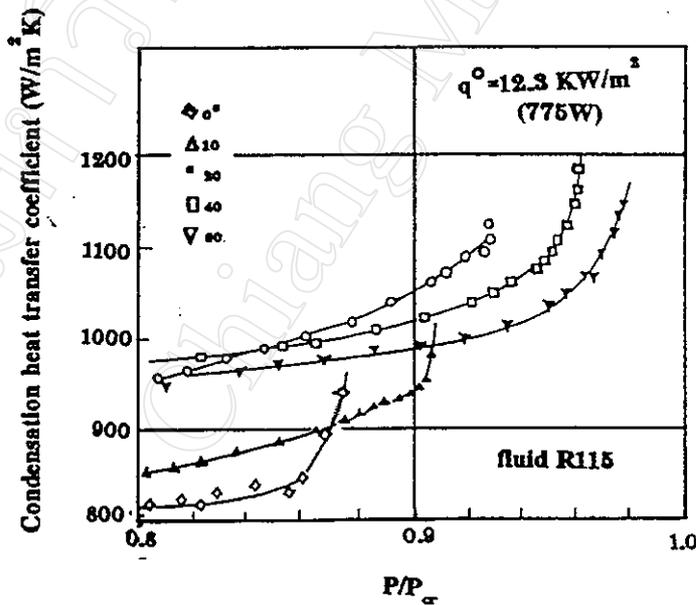
$$F(\alpha) = \frac{2.87D}{L_c \sin \alpha} \quad (2.40)$$

สำหรับ $\alpha = 10^\circ$ สังเกตเห็นได้อีกครั้งหนึ่งว่าผลของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นเกิดขึ้นด้วยฟังก์ชันของ f ซึ่งได้เลือกมาที่นี่สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.41)

$$\frac{1}{f} = 1 - 0.63 \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^{3.3} \quad (2.41)$$



รูป 2.17 แสดงผลของมุมเอียงต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบเดือดที่ความดันสูง



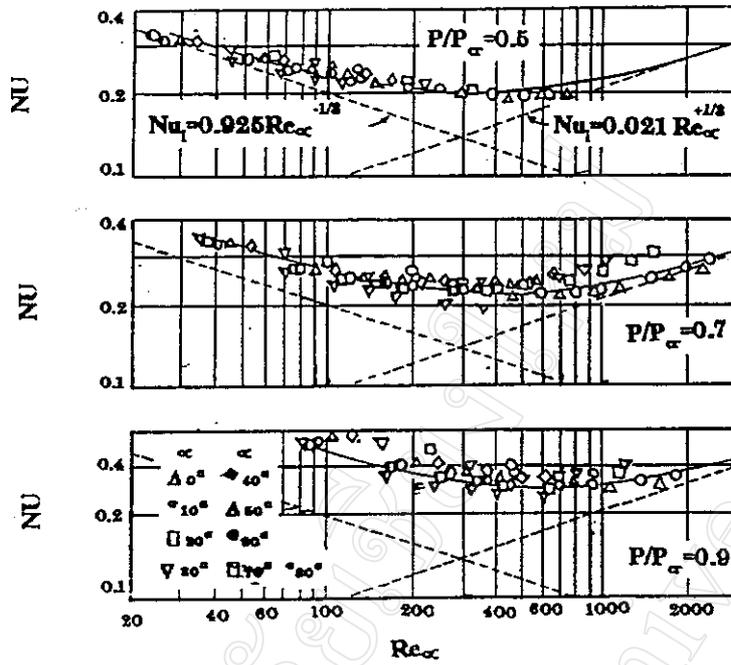
รูป 2.18 แสดงผลของมุมเอียงที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบควบแน่นที่ความดันสูง.

ช่วงของการแปรเปลี่ยนนั้นสามารถจะเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขของ Reynolds ซึ่งตัดกับเส้นสมมาตรกัน ซึ่งเกิดขึ้นที่ค่า $Re_s = 290$ และสอดคล้องกับแผ่นในแนวตั้ง ถ้าหากว่าความดันเพิ่มขึ้นตัวเลขของการทดลองก็จะเพิ่มขึ้นเหนือแกนสมมาตรที่เป็นแบบราบเรียบนี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความไม่เสถียรของผิวรอยต่อมีปรากฏการณ์ที่เป็นคลื่นเกิดขึ้นที่ผิวหน้า และมีบทบาทที่สำคัญในการไหลแบบราบเรียบนี้ และอาจจะเป็นเพราะแรงดึงผิวมันมีค่าลดลงก็ได้ ผลของความดันสูงที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง ก็จะสามารถตีความได้ว่าอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการไหม้ที่ความดันสูง ในตำแหน่งที่อยู่ในแนวตั้งนั้นขีดจำกัดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P/P_\infty \leq 0.9$ และมีการไหลเวียนชั้นแรกในส่วนที่เป็นแอ่งของเหลวของส่วนทำระเหย การเอียงท่อลงไปก็จะทำให้การไหลชั้นแรกนี้เปลี่ยนแปลงไป โดยที่จะมีของเหลวควบแน่นไหลลงเข้าไปรวมผิวด้านล่างของท่อและฟองอากาศจะไหลขึ้นไปด้านบนของผิวท่อ นอกจากนี้ความเร็วของการไหลที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า \mathcal{L} ลดลง และถ้าหากว่าโดยการที่กำหนดค่าระความร้อนเอาไว้ผลนี้ก็จะนำไปสู่การไหม้ คือปรากฏการณ์ไหม้ข้างล่างที่ความดันสูงสุด รูป 2.17 และรูป 2.18 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของการหน่วงนี้จะดำเนินต่อไปถ้าหากเราเพิ่มมุมเอียงขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่ง $\alpha = 60^\circ$ อย่างไม่รู้ที่ความดันต่ำๆนั้นเมื่อขีดจำกัดความหนืดและขีดจำกัดทางเสียงเกิดขึ้น ผลของมุมเอียงนี้อาจจะไม่นำมาคิดก็ได้ เพราะว่าสมดุลแรงที่เหมาะสมของไอนี้จะไม่ได้คิดรวมพจน์ของแรงโน้มถ่วงเข้าไปด้วย ถ้าหากว่าพิจารณาอย่างถี่ถ้วนแล้วแบบจำลองที่ใช้นี้ก็ไม่สามารถใช้ได้กับตำแหน่งของมุมเอียงนี้อีกต่อไป แต่ว่าจะเปลี่ยนไปเพราะว่ารูปทรงเรขาคณิตของแกนไอตรงกลางนี้จะเปลี่ยน และผลของการแปรเปลี่ยนในความเค้นระหว่างรอยต่อของผิว ก็จะไม่สามารถเปลี่ยนสถานะของขีดจำกัดต่างๆที่ความดันต่ำ แต่อย่างไรก็จะสังเกตเห็นได้ชัดว่าการท่วมนี้เป็นคุณลักษณะที่สำคัญ ที่จะเป็นขีดจำกัดของสมรรถนะในเทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำ แต่วาก็ยังขึ้นอยู่กับอีกหลายตัวแปรด้วยกันซึ่งอย่างน้อยที่สุดก็คือความดัน และมุมเอียง การที่ความดันมีค่าลดลงนี้ที่ส่วนทำระเหยมีค่าที่ค่อนข้างยาว และมีอัตราการเติมที่ค่อนข้างจะสูง มีความดันลดลงก็จะทำให้เกิดช่องไอที่มีขนาดใหญ่ และทำให้ของเหลวควบแน่นซึ่งกำลังจะไหลลงมานั้น ชะงักค้างอยู่ในส่วนควบแน่นทำให้เกิดการแห้งของแผ่นฟิล์มของเหลว ผลกระทบที่เกิดขึ้นของมุมเอียงที่เห็นได้ชัดคือทำให้รูปแบบการไหลชั้นแรกเปลี่ยนไป และอาจจะทำให้เกิดพฤติกรรมของการท่วมก็ได้ เมื่อมีการเอียงท่อจากแนวตั้งไปนั้น แกนของเหลวซึ่งจะมีลักษณะผอมและยาวกว่า ก็จะเกิดขึ้นรอบๆพื้นผิวด้านล่างของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น และเนื่องจากมันมีพื้นที่สัมผัสลดน้อยลงก็จะทำให้มีความไม่เสถียรเกิดขึ้นได้ ดังนั้นผลของการเอียงลงไปก็คือการที่จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขีดจำกัดซึ่งเกี่ยวข้องกับการท่วมได้ เมื่อยังเพิ่มมุมเอียงเข้าไปอีกแรงลอยตัวซึ่งเป็นแรงขับของเหลวควบแน่นก็จะมีค่าลดลง จนทำให้ขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดผ่านจุด

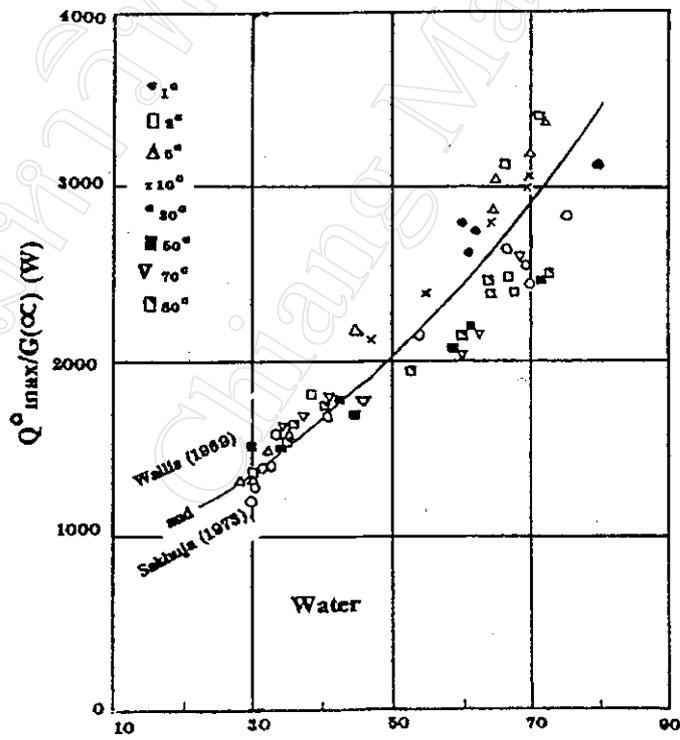
สูงสุดและลดลงอย่างรวดเร็วที่ α มีค่าประมาณ 45° พฤติกรรมการลดลงนี้แสดงให้เห็นชัดในรูป 2.16 และรูป 2.17 และได้มีการอธิบายโดย Nguyen Chi and Groll จากสมการ (2.42)

$$Q_{\max} = G(\alpha) = \left(\frac{\beta}{180^\circ} + (\sin 2\beta)^{1/2} \right)^{0.65} \quad (2.42)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของ Piro ซึ่งแสดงโดยสมการ (2.38) และ $\beta = 90^\circ - \alpha$ นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันที่ได้มานี้ Nguyen-Chi and Groll ได้พบว่าข้อมูลของการถ่ายเทความร้อนที่ขีดจำกัด สำหรับน้ำสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ โดยใช้แบบจำลองของการไหลสองสถานะสวนทางกันในมิติเดียวของ Wallis และ Sakhaja การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นชัดในรูป 2.20 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะเมื่ออุณหภูมิอิ่มตัวสูงขึ้น ถ้าหากว่าเป็นท่อที่มีขนาดยาวมาก อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดนี้ก็จะเป็นไปอีกครั้งหนึ่ง เมื่อของเหลวในส่วนบนสุดไหลลงมาที่ส่วนทำ-ระเหยด้วยระดับความร้อนยวดยิ่งที่สูงมาก และอันนี้จะเปลี่ยนไปทำให้เกิดลักษณะเป็นการกระแทก พฤติกรรมนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากช่วงของไอไหลขึ้นเป็นช่วงๆ ทำให้เกิดการกระแทกนี้ขึ้น การเดือดแบบรุนแรงก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนไปเป็นรูปของการเกิดเป็นช่วงๆขึ้นมาสามารถเกิดปรากฏการณ์ geyser ขึ้นมาได้ มุมเอียงก็จะมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมนี้ เพราะว่าจะเกี่ยวข้องกับผลของแรงโน้มถ่วงได้โดยตรง ตัวอย่างเช่นที่บริเวณใกล้ๆกับแนวระดับนั้นก็จะมีการเดือดเป็นช่วงๆเกิดขึ้น และนอกจากนี้การเดือดเป็นช่วงๆนี้ก็จะสามารถเกิดได้ในช่วงที่เทอร์โมไซ-ฟอน ที่อยู่ในแนวตั้งนั้นเริ่มทำงาน และนอกจากนี้อัตราการเติมที่มีค่าน้อย ก็อาจจะทำให้เทอร์โมไซ-ฟอนไม่สามารถปฏิบัติงานในสภาวะปรกติได้



รูป 2.19 แสดงผลของความดันและตัวเลข Reynolds ต่อการถ่ายเทความร้อนในส่วนของความแน่นของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง



รูป 2.20 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่วัดค่าได้กับการคำนวณ