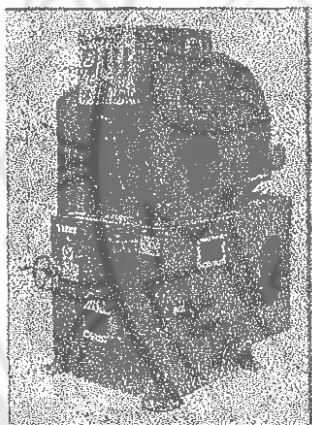


บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 รูปร่างและลักษณะของเครื่องขัดข้าว

ลักษณะการทำงานของเครื่องขัดข้าวมีการวางหินขัดข้าวขาวในแนวตั้งมีข้าวเปลือกลงมาจากด้านบน บริเวณรอบหินขัดข้าวขาวจะมีตะแกรงอยู่บริเวณรอบ ๆ ความเร็วรอบของหินขัด 500 รอบ ต่อ นาที เครื่องขัดข้าวขาวมีขนาดของหินขัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ด้านบนขนาด 420 mm ด้านล่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 340 mm โดยมีรูปร่างเป็นแท่งทรงกรวยที่ด้านบนมีขนาดใหญ่ กว่าด้านล่าง



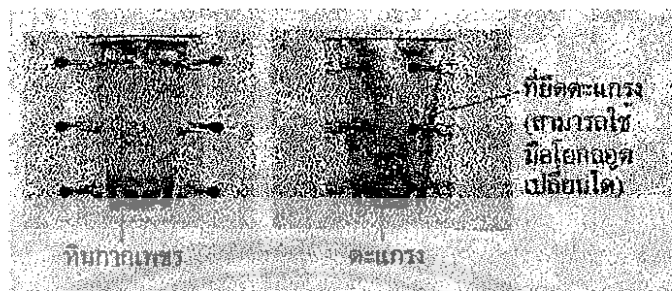
เครื่องขัดข้าวขาวแบบหินกากเพชร



หินขัดข้าวขาวแบบหินกากเพชร

รูป 2.1 เครื่องขัดข้าวขาวแบบหินกากเพชรและหินขัดข้าวขาวแบบหินกากเพชร

(ที่มา : บริษัทไรซ์ เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด)

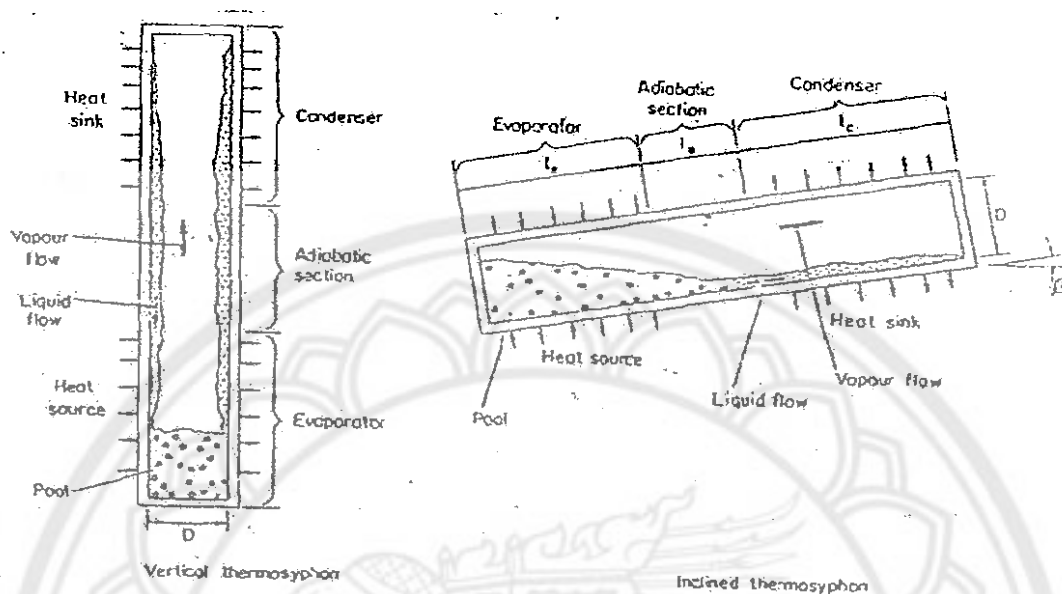


รูป 2.2 ตะแกรงหินขัดข้าวขาว
(ที่มา : บริษัท ไรซ์ เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด)

2.2 เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

ท่อเทอร์โมไซฟอนหรือการถ่ายเทความร้อนมีโครงสร้างดังรูป 2.3 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (Evaporating Section) ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic Section) และส่วนควบแน่น (Condensing Section) โครงสร้างทั้งหมดจะรวมกันอยู่ในท่อปิด ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนจะบรรจุสารทำงาน R134a โดยส่วนที่ควบแน่นจะอยู่สูงกว่าส่วนทำระเหย เพื่อที่จะใช้ แรงโน้มถ่วงของโลกช่วยในการไหลของสารทำงานจากส่วนควบแน่นลงมาสู่ส่วนทำระเหย

เทอร์โมไซฟอนมีอยู่หลายแบบ ในโครงการนี้ใช้เทอร์โมไซฟอนแบบสองสถานะหมุนตามแนวแกนแบบท่อร่วมศูนย์ เนื่องจากจะต้องนำไปติดตั้งกับหินขัดข้าวขาวซึ่งจะทำงานจะหมุนรอบแกนตั้ง



รูป 2.3 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแนวตั้งและแบบเอียง

(ที่มา : Heat pipe-performance of two-phase closed thermosyphon , Engineering sciences data)

2.2.1 หลักการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอน

แหล่งความร้อน (Heat Source) จะอยู่ต่ำกว่าแหล่งระบายความร้อน (Heat Sink) โดยที่ความร้อนจะถ่ายเทเข้าส่วนทำระเหย สารทำงานจะเดือดและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ส่วนที่เป็นไอของสารทำงานจะลอยตัวขึ้น และระบายความร้อนออกที่ส่วนควบแน่น แล้วกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวไหลเคลือบผนังท่อเป็นแผ่นฟิล์มบางๆกลับสู่ส่วนทำระเหยอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้การทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง ท่อเทอร์โมไซฟอนมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี เพราะความร้อนที่ได้เป็นความร้อนแฝง (Latent Heat) ที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน

2.2.2 เทอร์โมไซฟอนแบบสองสถานะหมุนตามแนวแกนแบบท่อร่วมศูนย์

เทอร์โมไซฟอนแบบหมุนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมไซฟอนแบบสถานะเดียว และเทอร์โมไซฟอนแบบสองสถานะ และสามารถแบ่งตามตำแหน่งของท่อออกเป็น ท่อร่วมศูนย์กลาง และท่อเอียงศูนย์กลาง

การพิจารณาความร้อนแบบสองสถานะ ซึ่งเน้นถึงบทบาทของผิวสัมผัสระหว่างสารทำงานกับไอ รูปร่างและการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของการไหล

ในระบบหมุนร่วมศูนย์กลาง รูป 2.4 ได้แสดงให้เห็นถึงการไหลเวียนในคอนแรกของท่อ ซึ่งมีการกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใต้สภาวะการณ์ที่ว่า ความเร็วของการหมุนจะสูงพอที่จะทำให้เกิดการไหลเคลื่อนผิวตลอดทั้งผนัง ได้ที่ความเร็วสูง ของเหลวนี้อาจจะเคลื่อนผนังไว้ทั้งหมด เป็นลักษณะของแผ่นฟิล์ม ฟิล์มเคลื่อนที่ด้วยผล 3 ประการด้วยกันคือ

1. แรงลอยตัว จะทำใกล้กับปลายท่อที่บีบอยู่ซึ่งมีผลกระทบต่อ การไหลเวียนในขณะที่สารทำงานจะถูกแรงกระทำเบี่ยงออกไปด้านนอก
2. ระดับความแตกต่างของอุณหภูมิตามแนวแกน ทำให้เกิดระดับความแตกต่างของความดันตามแนวแกน
3. แผ่นฟิล์มจะค่อนข้างบางลงเรื่อยๆ ทำให้เกิดความแตกต่างตามแนวแกนของความดัน ดังนั้นจะเป็นแรงขับหลัก และแผ่นฟิล์มจะเคลื่อนเข้าสู่ส่วนทำระเหย

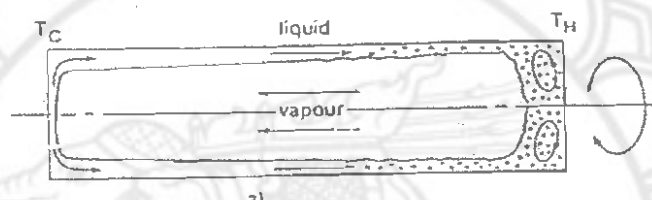
สมรรถนะของท่อบางส่วนแบบร่วมศูนย์กลางนั้น สามารถมีค่าสูงขึ้นได้ โดยใช้ร่องตามแนวยาว หรือว่าครีปในผิวด้านใน อย่างน้อยที่สุดการเพิ่มครีปด้านใน ก็จะมีผลที่จะทำให้เพิ่มพื้นที่ผิว และลดความหนาของฟิล์มเฉลี่ย ผลในการสลับเหวี่ยงมากยิ่งขึ้นถ้าหากว่าร่องเป็นแบบเกลียววน

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มอาจจะเกิดขึ้นในส่วนทำระเหยด้วย ซึ่งแบบจำลองทั่วไปจะแสดงในรูป 2.4 แสดงให้เห็นว่า เกิดการรวมกันของการระเหยที่ผิวด้านล่างของส่วนควบแน่น ถ้าหากว่าส่วน Adiabatic ยาวจะทำให้ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นห่างจากกันมาก ไอที่ย้อนกลับมาส่วนทำระเหย ก็จะมีระดับความร้อนยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้สารทำงานส่วนควบแน่นร้อนขึ้น มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัวด้วย ขณะที่สารทำงานเข้าสู่ส่วนทำระเหยนั้น สารทำงานยังคงมีความร้อนอยู่จึงทำให้เกิดการเดือดง่ายขึ้น และจะระเหยขึ้นไปในส่วนควบแน่นทันที แต่ในทางตรงกันข้าม สนามแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางก็จะเหนี่ยวนำให้เกิด สารทำงานเกาะที่ผนังส่วนทำระเหย และจะทำให้การเดือดมีโอกาสน้อยที่จะลดลงได้

ถ้าหากว่าเราใช้ค่าลักษณะความร้อนแบบหมุนร่วมจุดศูนย์กลาง ก็ค่อนข้างที่จะชัดเจนว่า การหมุนก็จะเสริมให้เกิดการเดือดในแอ่งส่วนทำระเหย ซึ่งทำให้เกิดสภาวะการแห้งเร็วขึ้น ความเร่งเนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้จะช่วยกดตำแหน่งของการเกิดฟองขึ้นภายในผนังของส่วนทำระเหย ในขณะที่เดียวกันก็จะเกิดอัตราส่วนของไอมีค่าสูงกว่าที่ใกล้ๆ แกนของท่อ ทำให้เกิดผลสองประการคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้น และเกิดการท่วม (Flooding) คือสารทำงานระเหยกลายเป็นไอบางเกินไปทำ

ให้อายุของสารทำงานไปค้นสารทำงานส่วนควบแน่นที่เป็นของเหลวไม่ให้ไหลลงมาในส่วนทำ
ระเหย

อัตราการเติมสารทำงานที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 10 – 14 % ของปริมาตรของท่อที่ ความเร็ว
ต่ำ หากว่ามีการเติมน้อยกว่านี้ แผ่นฟิล์มจะไม่ครอบคลุมส่วนทำระเหยทั้งหมด ถ้าหากว่าหมุนด้วยความ
ความเร็วสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนจะน้อยลง และทำให้เกิดการแห้ง (Dry out) ขึ้นคือ ปริมาณของ
ของเหลวที่เติมลงไปไม่เพียงพอที่จะปกคลุมท่อความร้อนทั้งหมดเหนือปลายท่อด้านล่างด้วยฟิล์ม
ของเหลว สำหรับการเติมสารทำงานมากเกินไป ทำให้แผ่นฟิล์มหนาขึ้น อัตราการระเหยและอัตรา
การควบแน่นลดลง



รูป 2.4 แบบจำลองเทอร์โมไซฟอนสองสถานะหมุนร่วมศูนย์แบบผนังขนาน
(ที่มา : กาลึกความร้อน , ผศ.ดร.ประคิษฐ์ เทอดภูต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

2.2.3 การออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอน

2.2.3.1 อัตราการเติมสารทำงาน

อัตราการเติมสารทำงาน หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของสารทำงานเป็น
ของเหลวที่ยังไม่ได้ให้ความร้อนต่อปริมาตรของส่วนทำระเหย

สมการการเติมสารทำงาน (Liquid Fill) ในเทอร์โมไซฟอน

$$F = V/AI_e \dots\dots\dots(2.1)$$

สมการตรวจสอบการเกิดการแห้ง (ปริมาณของของเหลวที่เติมลงไปไม่เพียงพอที่จะปกคลุม
ท่อความร้อนทั้งหมดเหนือด้านล่างของท่อด้วยฟิล์มของเหลว)

$$V_1 \geq 0.001D(l_r + l_d + l_o) \quad \text{เมื่อไม่มี wick} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

$$V_1 \geq 0.001D(l_d + l_o) + A l_r \varepsilon \quad \text{เมื่อมี wick} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

Wick คือ ช่องทางไหลของสารทำงานภายในผิวท่อด้านใน

2.2.3.2 ความต้านทานความร้อนรวม

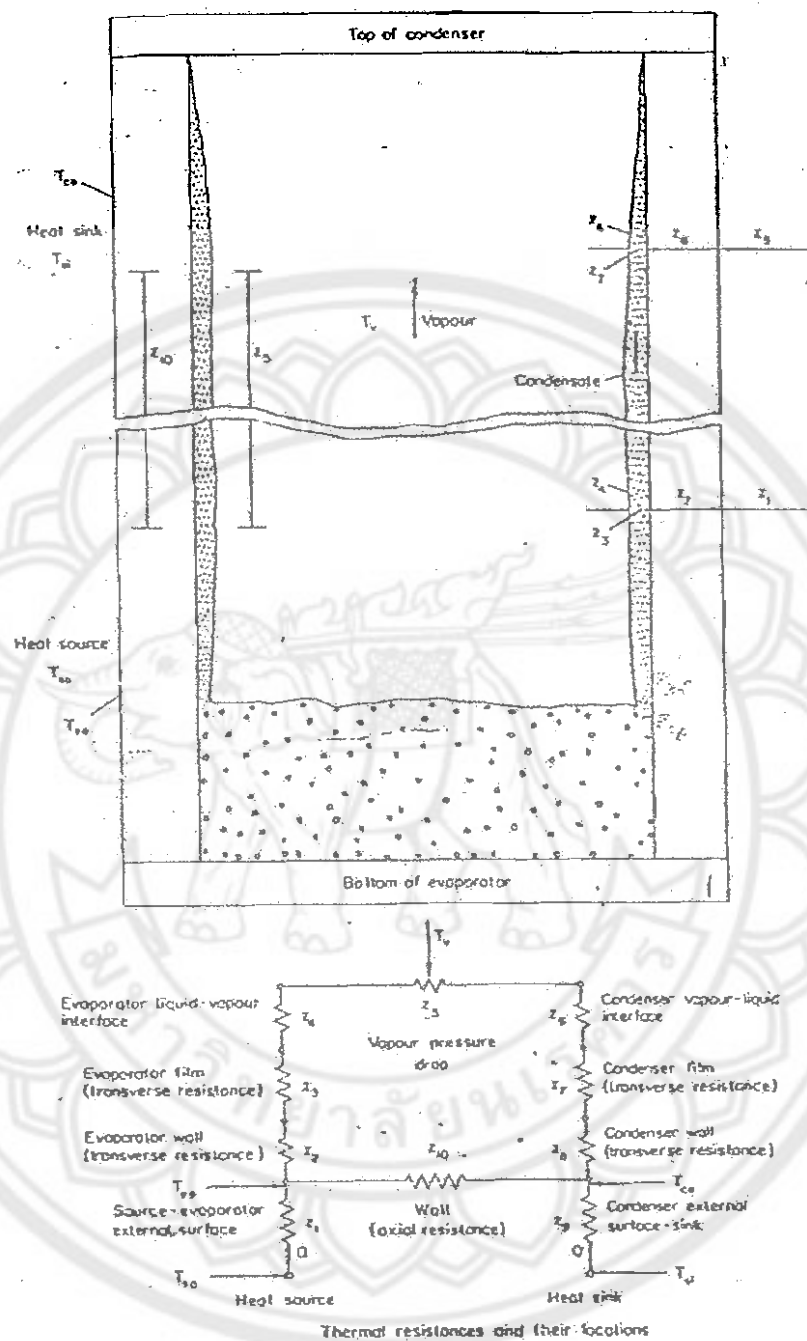
การหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) ของท่อความร้อนสามารถหาได้จากการหาค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z)
สมการความต้านทานความร้อนรวม

$$Q = \Delta T / Z \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

โดยที่

$$\Delta T = T_{so} - T_{st} - \Delta T_h \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

การหาความต้านทานความร้อนรวมจะทำได้โดยนำมาเขียนเป็นวงจรความต้านทานความร้อน Z_1 ถึง Z_{10} ดังรูป 2.5



รูป 2.5 ตำแหน่งค่าความต้านทานความร้อนและการเขียนวงจรความต้านทานความร้อน
(ที่มา : Heat pipe-performance of two-phase closed thermosyphon , Engineering sciences data)

Z_1 และ Z_9 คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งความร้อน (Heat Source) กับผิวนอกของส่วนทำระเหย และระหว่างผิวนอกของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อน (Heat Sink) ตามลำดับ

$$Z_1 = 1/(h_{eo} * s_{eo}) \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$Z_9 = 1/(h_{co} * s_{co}) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Z_2 และ Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนตลอดความหนาของผนังท่อในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ

$$Z_2 = \ln (D_o/D)/(2\pi l_e \lambda_s) \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

$$Z_8 = \ln (D_o/D)/(2\pi l_c \lambda_s) \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Z_3 และ Z_7 คือ ค่าความต้านทานความร้อนของชั้นของเหลวที่กั้นตัวมาจากไอในส่วนของส่วนทำระเหยและส่วนของส่วนควบแน่น ตามลำดับ

Z_4 และ Z_6 คือ ค่าความต้านทานความร้อนของผิวของเหลวกับไอภายในท่อเทอร์โมไซฟอนซึ่งมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้

Z_5 คือ ค่าความต้านทานความร้อนเนื่องจากความดันที่ลดลงของไอที่ไหลจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น Z_5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ Z_3 และ Z_7

Z_{10} คือ ค่าความต้านทานความร้อนในแนวแกนของผนังท่อเทอร์โมไซฟอน

$$Z_{10} = (0.5 l_e + l_a + 0.5 l_c) * (A_s \lambda_s) \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

กรณีที่ $Z_{10} < 5\%$ จะสามารถตัดทิ้งได้โดยเทียบจาก

$$Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8) > 20 \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

โดยถ้า $Z_{10} > 20$ จะสามารถตัดทิ้งได้

และความต้านทานความร้อนรวม (Z) (กรณี Z_{10} ไม่ตัดทิ้ง)

$$Z = (Z_1 + (Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_7 + Z_8)^{-1} + 1/Z_{10})^{-1} + Z_9 \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

การถ่ายเทความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอนจะมีลักษณะเหมือน Diode ถ้ากรณีที่ส่วนควบแน่น (Condenser) มีอุณหภูมิสูงกว่าทางส่วนทำระเหย (Evaporator) จะไม่มีการถ่ายเทความร้อนภายในและค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าดังสมการ

$$Z = Z_1 + Z_9 + Z_{10} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

ค่าความต้านทานความร้อนภายในกรณี Z_4 , Z_8 และ Z_7 สามารถตัดทิ้งได้ จะได้ว่า

$$\text{ความต้านทานภายใน} = Z_3 + Z_7 \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

ข้อกำหนดพื้นฐานในการออกแบบ

1. ต้องทราบ T_{∞} หรือ T_{∞} ตัวใดตัวหนึ่งและค่า Q ซึ่งจะหาคำนวณหาค่าอุณหภูมิของไอได้
2. ต้องทราบ T_{∞} และ T_{∞} ซึ่งจะหาคำนวณหาค่าของ Q และ T_{∞} ได้
3. ต้องทราบ T_{∞} และ T_{∞} ซึ่งจะหาคำนวณหาค่าของ Q และ T_{∞} ได้
4. ต้องทราบ T_{∞} และ T_{∞} ซึ่งจะหาคำนวณหาค่าของ Q ได้

อุณหภูมิผิวภายนอกของท่อในส่วนของแหล่งรับความร้อน (Evaporator)

$$T_{eo} = T_{so} - (Z_1/Z) * \Delta T \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

อุณหภูมิผิวภายนอกของท่อในส่วนของแหล่งระบายความร้อน (Condenser)

$$T_{co} = T_{so} - (Z_9/Z) * \Delta T \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

ถ้า Z_7 และ Z_{10} น้อยมากจะสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิของไอได้

$$T_v = T_{so} + ((Z_7 + Z_8 + Z_9) * \Delta T)/Z \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

ถ้า Z , ไม่สามารถตัดทิ้งได้จะสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิของไอได้ในส่วนทำระเหย (Evaporator) ได้ โดยให้ T_w คือ อุณหภูมิของไอในส่วนควบแน่น

$$T_w = T_w + (Z, * Q) \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

2.2.3.3 ความต้านทานความร้อนภายใน (Internal Thermal Resistance)

ค่าความต้านทานความร้อนภายในสำหรับท่อผิวเรียบแนวดิ่ง

ค่าความต้านทานความร้อนภายในฟิล์มของของเหลวที่ควบแน่นไหลลงมาตามท่อผิวเรียบ

$$Z_7 = CQ^{1/3} / (D^{4/3} g^{1/3} \rho \phi_2^{4/3}) \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

เมื่อ $C = 0.235$

ϕ คือ คุณสมบัติทาง Thermophysic ที่เรียกว่า Figure of Merit

ค่า ϕ ของสารทำงานทั่วไปสามารถหาได้จาก Engineering Sciences Data Unit, London, 1980

สำหรับสมการที่ (2.19) ค่า Re_f จะอยู่ในช่วง $100 < Re_f < 1300$ ถ้าค่า Re_f มีค่ามากกว่านี้ ค่าความต้านทานที่บริเวณผิวของฟิล์มจะลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulence)

ค่าความต้านทานความร้อนจากสารทำงานที่เกิดการระเหยในส่วนของส่วนทำระเหย (Evaporator) คือ

$$Z_{3f} = CQ^{1/3} / (D^{4/3} g^{1/3} \rho \phi_2^{4/3}) \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

ค่า Reynolds numbers สำหรับสมการ (2.20) สามารถหาค่าได้จาก

$$Re_f = 4Q / (L \mu_f \pi D) \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

เมื่อ L คือ ค่าความร้อนจำเพาะของการกลายเป็นไอ

μ_f คือ ค่าความหนืดของการไหลของของไหล

ค่าความต้านทานการเดือดภายในแอ่งของของเหลวที่เป็นสองสภาวะ จะสามารถหาได้จากสมการ

$$Z_{3p} = 1/(\phi_g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D L)^{0.6}) \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

โดยที่

$$\phi_g = (p_1^{0.65} \lambda_g^{0.3} c_{pg}^{0.7} / p_v^{0.25} L^{0.4} u_1^{0.1}) (p/p_a)^{0.23} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

เมื่อ c_{pg} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว

p_a คือ ความดันบรรยากาศ

สำหรับสมการที่ (2.23) ใช้เมื่อ $0.03 < p/p_a < 2$

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแอมโมเนียและน้ำที่ความดันบรรยากาศเป็นดังนี้

$$\text{แอมโมเนีย} \quad \phi_g = 56(p/p_a)^{0.23} \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\text{น้ำ} \quad \phi_g = 63(p/p_a)^{0.23} \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

สำหรับผลกระทบของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบเอียง อาจทำให้สมการที่ (2.22) และ (2.23) สามารถใช้กับค่า $p/p_a > 20$

ค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้จากสมการ (2.22) จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากของจริง

วิธีการประมาณค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอนที่ผนังภายในเป็นผิวเรียบและไม่มี wick ท่ออยู่ในแนวตั้ง มีขั้นตอนการทำได้ดังนี้

1. คำนวณ Z_f จากสมการ (2.19)
2. คำนวณ Z_{3p} จากสมการ (2.20)
3. คำนวณ Re_f จากสมการ (2.21) ถ้า $50 < Re_f < 1300$ สามารถใช้ทฤษฎีนี้คำนวณได้
ถ้า $Re_f < 50$ จะไม่สามารถคำนวณได้จากวิธีนี้
ถ้า $Re_f > 1300$ จะใช้ค่า factor สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในหัวข้อผลของการไหลแบบปั่นป่วนต่อความต้านทานความร้อนภายใน
4. คำนวณ Z_{3p} จากสมการ (2.22)
5. ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ใช้ $Z_g = Z_{3p}$ หรืออาจหาค่าเฉลี่ยของความต้านทานความร้อนภายในส่วนทำระเหย (Evaporator) , Z_g , จากการ interpolation

5. ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ใช้ $Z_3 = Z_{3p}$ หรืออาจหาค่าเฉลี่ยของความต้านทานความร้อนภายใน ส่วนทำระเหย (Evaporator) , Z_3 , จากการ interpolation

$$Z_3 = Z_{3p}F + Z_{3f}(1 - F) \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

เมื่อ F คือ ของเหลวที่เดิมสามารถคำนวณจากสมการ $F = V/AI_e$

ค่าความต้านทานความร้อนภายในสามารถที่จะลดได้ ถ้าเราทำการเพิ่มความขรุขระในผนัง ด้านในของท่อเทอร์โมไซฟอน

ความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีเหมาะสมกับแรงดันสถิตย

จากการทดลองที่ความดันต่ำเป็นปัจจัยให้อุณหภูมิเปลี่ยนทำให้เกิดแรงดันสถิตยในส่วนของ แอ่งของของเหลวในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนแนวดิ่ง ความดันในส่วนล่างของแอ่งของ ของเหลวในส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไซฟอนสามารถหาได้จาก

$$p_p = p_v + \rho g F l_s \sin \beta \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

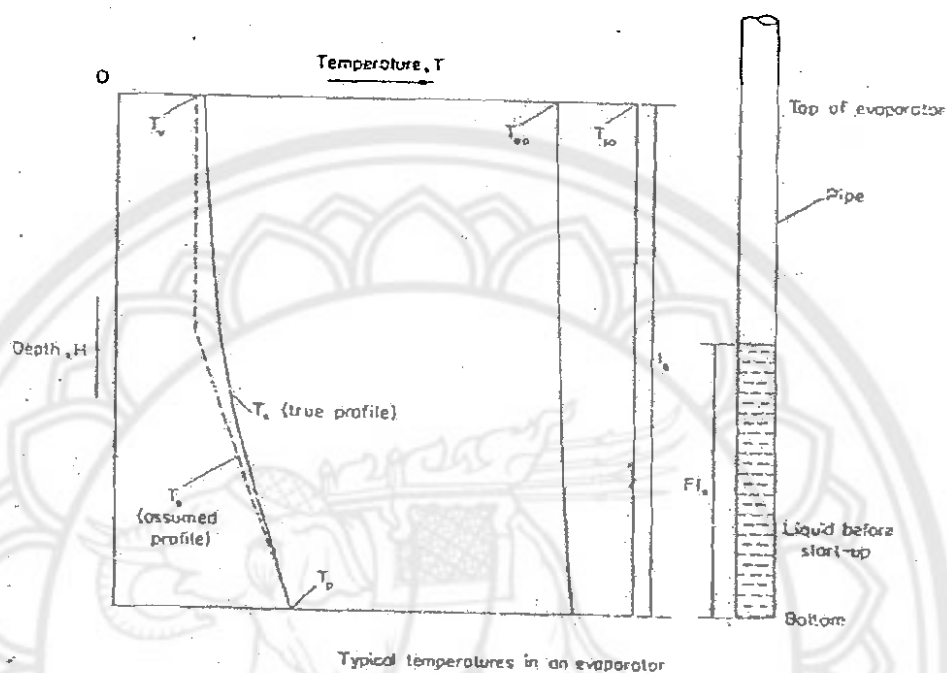
T_p คือ อุณหภูมิอิ่มตัวที่ด้านล่างของแอ่งของของเหลวสามารถหาได้จากข้อมูลทางเทอร์โมไคนามิก สำหรับสารทำงานที่ความดันอิ่มตัว p_p

จากรูป 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่าง ๆ และความลึกในส่วนทำระเหย (Evaporator) ของท่อเทอร์โมไซฟอนระบบปิด 2 เฟส โดยอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อน T_{so} , ไม่ขึ้นกับความลึก T_v คืออุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลวที่เดือดตามลักษณะของกราฟที่ขีดออก กราฟนี้ จะไม่ละเอียกเท่ากับอุณหภูมิของไอในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic Section) และ ส่วนควบแน่น (Condenser) T_c , ที่บนสุดของส่วนทำระเหย (Evaporator) และมีค่าเพิ่มขึ้นไปตาม ความลึกจนถึง T_p ที่ด้านล่างของส่วนทำระเหย (Evaporator) โดยอาจจะทำการสมมติได้ว่าอุณหภูมิ ของของไหลในส่วนทำระเหย (Evaporator) เท่ากับ T_v เหนือระดับของเหลวที่อยู่นิ่ง และเพิ่มขึ้นเป็น เส้นตรงกับความลึกในระดับนี้ ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของของเหลวในส่วนทำระเหย (Evaporator) คือ

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

ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องจาก hydrostatic head จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta T_h = T_{me} - T_v = (T_p - T_v)(F/2) \quad \dots\dots\dots(2.29)$$



รูป 2.6 ลักษณะของอุณหภูมิในส่วนทำระเหย

(ที่มา : Heat pipe-performance of two-phase closed thermosyphon , Engineering sciences data)

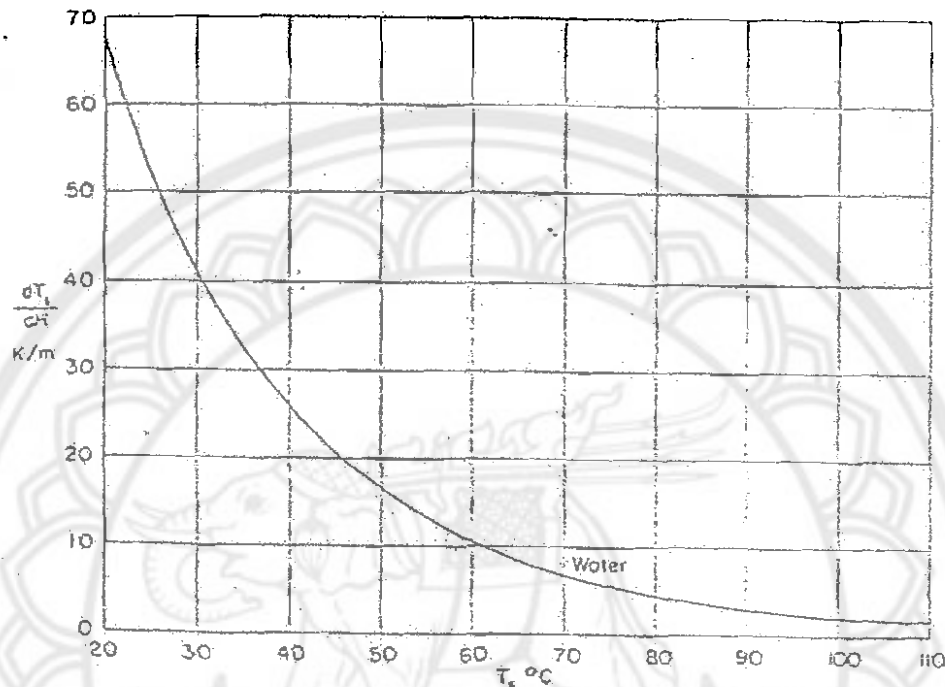
ถ้าข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิคไม่สามารถหาได้สำหรับสารทำงาน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอิมควกับความลึกสามารถหาได้โดยรวมสมการ (2.27) กับสมการของ Clasusius – Clapeyron ได้ดังนี้

$$dT/dH = (T_g/L)((\rho_l/\rho_g) - 1) \quad \dots\dots\dots(2.30)$$

ถ้าการเปลี่ยนแปลงความลึกไม่มีผลกับคุณสมบัติ อุณหภูมิที่ด้านล่างของแอ่งของของเหลวในส่วนทำระเหยคือ

$$T_p = T_v + (dT/dH)l_e F \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

รูป 2.7 ให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวของน้ำกับความลึก โดยเทียบค่ากับแอมโมเนีย ที่ 20 °C คือ 0.2 K/m เปรียบเทียบกับ 80 K/m สำหรับน้ำ



รูป 2.7 ผลกระทบของ Hydrostatic Head ที่ Saturation Temperature

(ที่มา : Heat pipe-performance of two-phase closed thermosyphon , Engineering sciences data)

สำหรับการใช้ที่ ΔT_s แตกต่างกันเล็กน้อยจะกำหนดให้ $T_{me} = T_s$ แต่การกำหนดแบบนี้ควรจะต้องการตรวจสอบโดยเฉพาะเมื่อความดันไอน้อยกว่าความดันบรรยากาศ

2.2.3.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Maximum Rate of Heat Transfer)

อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผ่านท่อเทอร์โมไซฟอนเพิ่มขึ้น เหตุการณ์นี้อาจเกิดขึ้นระหว่างการเดือด (Z_1 เพิ่มขึ้น) หรืออาจเกิดขึ้นระหว่าง pressure drop ของไอน้ำมากเกินไป (Z_2 เพิ่มขึ้น) หรืออาจเกิดขึ้นระหว่างปริมาณของของเหลวที่ผิวท่อร้อนมีค่าเกินไปจะสังเกตว่าในหัวข้อนี้จะใช้กับท่อแนวดิ่ง

2.2.3.5 จีดจำกัดของความดันไอ (Vapor Pressure Limit)

เมื่อใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ความดันที่ลดลงของไออาจจะใช้เปรียบเทียบกับความดันในส่วนทำระเหย ถ้าความดันไอน้อยกว่าความดันในส่วนทำระเหยมาก ไอจะไม่ไหลไปยังด้านบนทำให้ท่อเทอร์โมไซฟอนไม่สามารถถ่ายเทความร้อนได้

2.2.3.6 จีดจำกัดของคลื่นเสียง (Sonic Limit)

การทำงานที่ความดันต่ำจะเกิดจีดจำกัดของคลื่นเสียงที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าที่ความดันสูง สำหรับการประมาณค่าจีดจำกัดของคลื่นเสียงอย่างคร่าวๆ ได้จากมวลไอสูงสุดรอบแกนท่อ (The maximum axial vapour mass flux, $Q_{max}/(AL)$) ดังนี้

$$Q_{max}/AL = 0.5 \cdot (p_v \cdot \rho_v)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(2.32)$$

สมการนี้มีหน่วยเป็น $\text{kg}/(\text{sm}^2)$ และจะใช้งานได้ดี ถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ จีดจำกัดของคลื่นเสียงจะต่ำกว่าเงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อของไหลทำงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ ดังนั้นค่าความดันไอและความหนาแน่นของไอจะมีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขการใช้งานมากโดยจะค่อย ๆ ลดจากกระบวนการเริ่มต้น ตัวอย่างจีดจำกัดของเสียงในรูป Q/A สำหรับน้ำที่อุณหภูมิ 20°C มีค่าเท่ากับ $7.8 \text{ MW}/\text{m}^2$ สำหรับน้ำที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าเท่ากับ $277 \text{ MW}/\text{m}^2$

2.2.3.7 จีดจำกัด Dryout

Dryout หมายความว่า ปริมาณของของเหลวที่เดิมลงไปไม่เพียงพอที่จะปกคลุมท่อความร้อนทั้งหมดเหนือปลายท่อด้านล่างด้วยฟิล์มของเหลว สำหรับท่อแนวดิ่งฟิล์มของของเหลวที่ไหลลงมาในส่วนทำระเหยเกิดแห้งขึ้นก่อนที่ของเหลวจะไหลกลับลงมายังกันท่อ สำหรับท่อแบบเอียงการแห้งจะเกิดที่ส่วนบนสุดของส่วนทำระเหย

2.2.3.8 จีดจำกัดของการเดือด (Boiling Limit)

จีดจำกัดของการเดือด (Boiling Limit) เกิดขึ้นเมื่อฟิล์มกลายเป็นไอตลอดเวลา ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับผนังร้อน (Heat wall) ของส่วนทำระเหย (Evaporator) ซึ่งฟลักซ์ความร้อนสูงสุดหาได้ดังนี้

$$Q_{max}/S_e = 0.12 \cdot L \cdot (\rho_v)^{0.5} \cdot (\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v))^{0.5} \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

เมื่อ $S_e (= \pi D I_e)$ คือพื้นที่ผิวท่อภายในของส่วนทำระเหย (Evaporator) , σ คือแรงดึงผิวของของเหลว และ g คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก

ยกตัวอย่าง จิตจำกัดการเดือด (Boiling Limit) สำหรับน้ำเท่ากับ 200 kW/m^2 ที่ 20°C เพิ่มสูงขึ้น 200 kW/m^2 ที่ 100°C จิตจำกัดของคลื่นเสียง (Sonic Limit) เกิดขึ้นก่อนจิตจำกัดของการเดือด (Boiling Limit) ถ้าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ของส่วนทำระเหย (Evaporator) มากกว่า 10 สำหรับอุณหภูมิการทำงานที่ 20°C และ มากกว่า 68 สำหรับอุณหภูมิการทำงานที่ 100°C

2.2.3.9 จิตจำกัดของการไหลสวนทาง (Counter-current Flow Limit)

เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อของเหลวที่ใช้ในท่อเทอร์โมไซฟอนเพื่อป้องกันการเกิด Dryout นั้นมีปริมาณมากเกินไป ทำให้เกิดการท่วมของของเหลวค้างอยู่โดยสารทำงานที่กลายเป็นไอจะไปดันสารทำงานที่เป็นของเหลวที่ไหลลงมาไม่ให้ไหลลงแอ่งได้ มวลของไอสูงสุดตามแนวแกนสามารถหาได้จาก

$$Q_{\max}/AL = f_1 * f_2 * f_3 * (\rho_v)^{0.5} * (\sigma * g * (\rho_l - \rho_v))^{0.25} \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

เมื่อ f_1 เป็นฟังก์ชันของ Bond number ซึ่งนิยามว่า

$$Bo = D * (g * (\rho_l - \rho_v) / \sigma)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

ค่าของ f_1 สามารถอ่านจากรูป 2.8 และ $f_1 = 8.2$ เมื่อ $Bo > 11$

f_2 เป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ความดัน (K_p) ซึ่งนิยามว่า

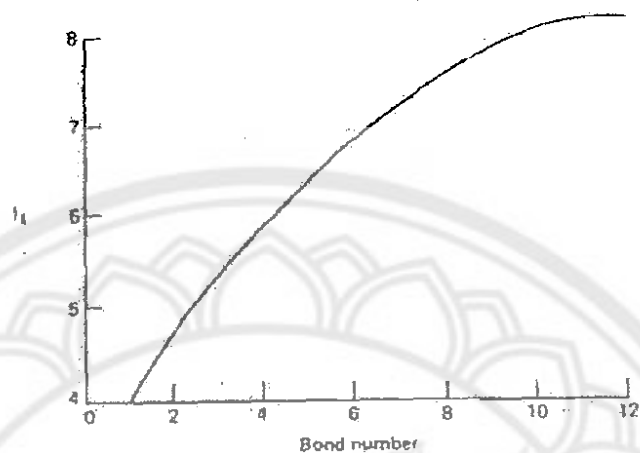
$$K_p = p_v / (g * (\rho_l - \rho_v) / \sigma)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

และ $f_2 = K_p^{-0.17}$ เมื่อ $K_p \leq 4 * 10^4$

และ $f_2 = 0.165$ เมื่อ $K_p > 4 * 10^4$

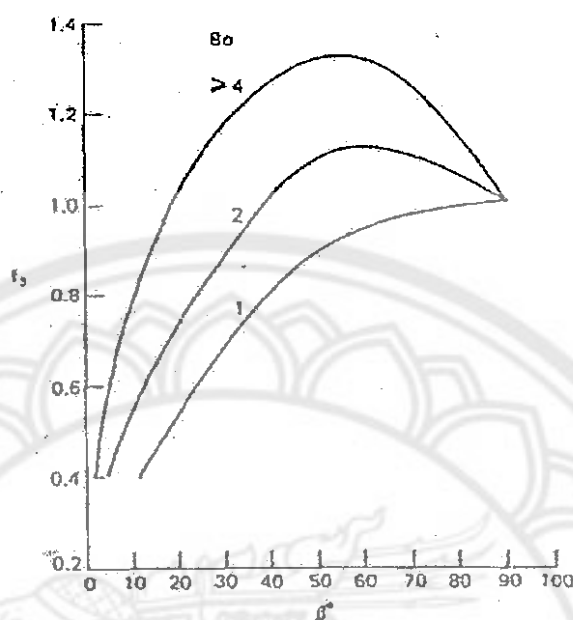
f_3 เป็นฟังก์ชันของท่อเอียงและสามารถอ่านได้จากรูป 2.9 โดยที่ f_3 ขึ้นอยู่กับมุมเอียงและ Bond number

ถ้าเป็นท่อแนวตั้ง $f_3 = 1$



รูป 2.8 การเปลี่ยนแปลงของ f , ในสมการ 2.36 กับ BOND NUMBER

(ที่มา : Heat pipe-performance of two-phase closed thermosyphon , Engineering sciences data)



รูป 2.9 การเปลี่ยนแปลงของ f_p ในสมการ 2.36 กับมุมเอียง

(ที่มา : Heat pipe-performance of two-phase closed thermosyphon , Engineering sciences data)

2.3 สมมติฐานสมการพลังงานของหินขัดข้าวขาว

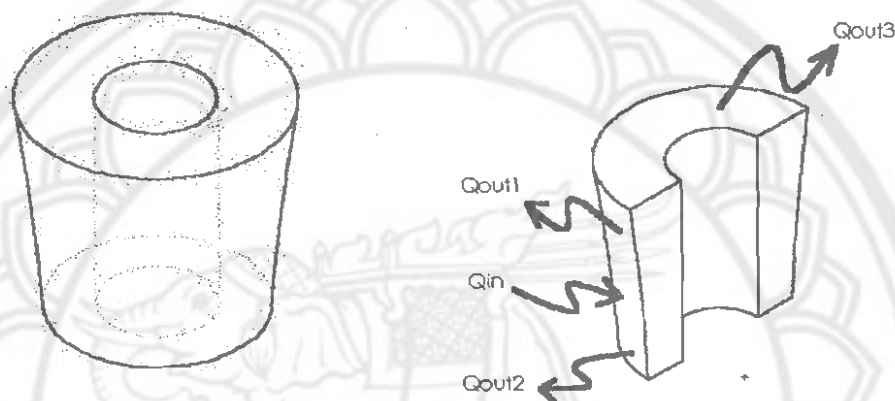
สมมติฐานในการคำนวณนี้ กำหนดให้อุณหภูมิของหินขัดข้าวขาวมีค่าเท่ากันทั้งหมดตลอดเนื้อหิน และการทำงานของเทอร์โมไซฟอนมีสถานะคงที่จากรูป 2.10 ให้ Q_{in} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่ผิวหินขัดทางด้านข้าง เมื่อหินขัดข้าวขาวได้รับความร้อนจากการขัดข้าวแล้วจะเกิดการสะสมความร้อนขึ้นในตัวหินขัดข้าวขาว จากนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวหินขัดใน 3 ส่วน คือในส่วนที่ 1 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากผิวหินขัดทางด้านข้าง และในอีก 2 ส่วน จะมีอัตราถ่ายเทความร้อนออกที่ผิวหลักที่ปิดในส่วนหัวและส่วนท้ายของหินขัดข้าวขาว โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการขัดข้าวนั้นจะสะสมอยู่ในหินขัดทำให้หินขัดมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำการสมมติอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่หินขัดข้าวขาวให้เท่ากับอุณหภูมิที่ให้ในส่วนการทำระเหย และใช้สมการพลังงานในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หินขัดข้าวขาวดังนี้

$Q_{in} = Q_{out1} + Q_{out2} + Q_{out3}$ ส่วนในขั้นตอนที่นำเอาชุดเทอร์โมไซฟอนเข้าไปติดตั้งแล้วดังรูป 2.11 ซึ่งเมื่อนำชุดเทอร์โมไซฟอนเข้าไปติดกับหินขัดข้าวขาวจะทำให้เกิดฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างชุด

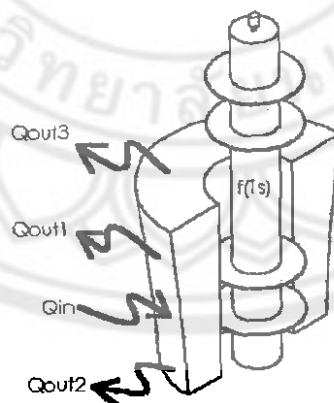
เทอร์โมไจฟอนกับหินขัดข้าวขาวซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิของหินขัดข้าวขาวที่คาดว่าได้รับ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{in} = h_{อากาศ} A_{ผิวออก} (T_{ผิวหิน} - T_{อากาศ}) + (T_{ผิวหิน} - T_{อากาศ}) / (L/k_{เหล็กแผ่น} A_{เหล็ก} + 1/h_{อากาศ} A_{เหล็ก}) + (T_{ผิวหิน} - T_{อากาศ}) / (L/k_{เหล็กแผ่น} A_{เหล็ก} + 1/h_{อากาศ} A_{เหล็ก}) + f(T_{ผิวหิน})$$

ซึ่งฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้คือความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนของชุดเทอร์โมไจฟอนกับอุณหภูมิที่ให้ในส่วนของการทำระเหย



รูป 2.10 การถ่ายเทความร้อนของหินขัดข้าวขาวก่อนติดเทอร์โมไจฟอน



รูป 2.11 การถ่ายเทความร้อนของหินขัดข้าวขาวเมื่อติดเทอร์โมไจฟอน