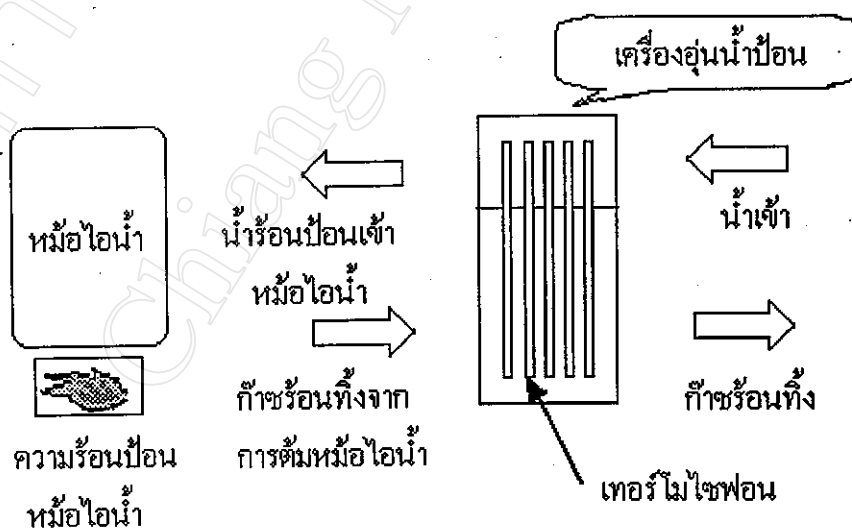


บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ทำจากท่อปลายปิดทั้งสองด้านภายในเป็นสุญญากาศบรรจุด้วยสารทำงาน (Working fluid) วัฏจักรหนึ่ง โดยทั่วไปเทอร์โมไซฟอนประกอบมีส่วนประกอบกัน 3 ส่วน คือส่วนทำระเหย(Evaporator) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic) และส่วนควบแน่น (Condenser section) การถ่ายเทความร้อนของท่อได้อาศัยความแตกต่างของสารทำงานภายในท่อ เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยโดยก๊าซร้อนหรือน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูง สารทำงานภายในจะนำความร้อนมาถ่ายเทที่ส่วนควบแน่นให้แก่อากาศหรือน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งปัจจุบันได้มีการประยุกต์ในการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่น ใช้สำหรับอุ่นน้ำป้อน เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการดึงความร้อนจากก๊าซไอเสียของการเผาไหม้จากการต้มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำของหม้อน้ำก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศทางปล่องควัน เครื่องอุ่นน้ำป้อนจะดึงความร้อนมาให้กับน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำเพื่อเป็นการเพิ่มให้แก่ น้ำ ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ดังแสดงดังรูป 2.1 จากลักษณะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเช่นนี้จะทำให้เกิดการกัดกร่อนทั้งภายในและภายนอก เนื่องจากผนังของท่อเทอร์โมไซฟอนต้องสัมผัสกับไอร้อนที่อยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

2.2 การส่งถ่ายความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน

การส่งถ่ายความร้อนของเทอร์โมไซฟอนจะคำนวณได้โดย ESDU 81038(1981)

$$Q = \frac{\Delta T}{Z_{total}} \quad (2.1)$$

เมื่อ ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็นหาได้จาก
สมการ

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

เมื่อ T_{so} คือ อุณหภูมิที่แหล่งความร้อน

T_{si} คือ อุณหภูมิที่แหล่งความเย็น

ΔT_h คือ ค่าเฉลี่ยความแตกต่างอุณหภูมิเนื่องจาก Hydrostatic head หาได้จาก

$$\Delta T_h = \frac{(T_p - T_v) \times F}{2} \quad (2.3)$$

เมื่อ T_p คือ อุณหภูมิที่แอ่งของเหลวสามารถหาได้จาก

$$T_p = T_v + \left(LeF \times \frac{dT_s}{dH} \right) \quad (2.4)$$

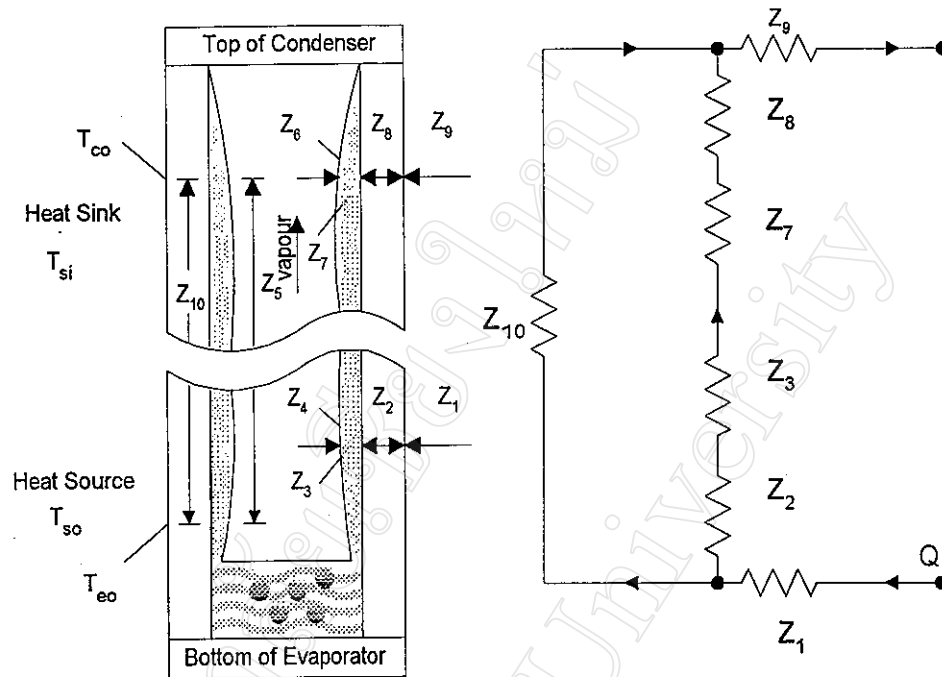
และ

$$\frac{dT_s}{dH} = \frac{T_s g}{L} \left[\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right] \quad (2.5)$$

T_v คือ อุณหภูมิไอของสารทำงานหาได้จาก

$$T_v = T_{si} + \frac{(Z_7 + Z_8 + Z_9)}{Z_{total}} (T_{so} - T_{si}) \quad (2.6)$$

Z_{total} เป็นค่าความต้านทานความร้อนทั้งหมดของเทอร์โมไซฟอนประกอบด้วยค่าความต้านทาน
ย่อยต่างๆ รวมกัน ดังรูป 2.2 ซึ่ง



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งค่าความต้านทานความร้อนของเทอร์โมไซฟอน และวงจรความต้านทาน
ที่มา :Engineering Science Data Unit (1981)

Z_1 และ Z_9 ความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนกับผิวนอกของส่วนทำระเหย และระหว่างผิวนอกของส่วนควบแน่นกับส่วนระบายความร้อนตามลำดับ

$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} s_{eo}} \quad (2.7)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} s_{co}} \quad (2.8)$$

Z_2 และ Z_8 ค่าความต้านทานความร้อนของผนังท่อในส่วนของทำระเหย และส่วนควบแน่นตามลำดับ

$$Z_2 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi l_c k} \quad (2.9)$$

$$Z_8 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi l_c k} \quad (2.10)$$

Z_3 ค่าความต้านทานภายในเนื่องจากของเหลวที่เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อนส่วนทำระเหย โดย Z_3 แยกเป็น Z_{3p} และ Z_{3f}

Z_{3p} คือความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแรงของเหลวหาได้จาก

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i Le)^{0.6}} \quad (2.11)$$

เมื่อ Φ_3 คือค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Phi_3 = 0.325 \times \frac{\rho_1^{0.5} k_1^{0.3} C_{p1}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_1^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (2.12)$$

Z_{3f} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ส่วนแอ่งของเหลวในส่วนรับความร้อนหาได้จากสมการ

$$Z_{3f} = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{1/3} g^{1/3} Le \Phi_2^{1/3}} \quad (2.13)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่ ซึ่ง $C = (1/4)(3/\pi)^{1/3} = 0.235$

Φ_2 คือ ค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Phi_2 = \left(\frac{Lk_1^2}{\mu_1} \right)^{1/4} \quad (2.14)$$

เงื่อนไขในการใช้ Z_{3p} และ Z_{3f} เพื่อใช้เป็นค่า Z_3 คือ

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$

$$Z_3 = Z_{3p} \quad (2.15)$$

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1-F) \quad (2.16)$$

เมื่อ F คือ อัตราส่วนการเดิม

$$F = \frac{V_1}{ALe} \quad (2.17)$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของสารทำงานที่เดิม

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

Z_4 และ Z_6 ความต้านทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากไอสารทำงานมีสถานะเป็นสถานะผสมในส่วนท่อบรรเทา และส่วนควบแน่นตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อย

Z_5 คือ ผลของค่าความต้านทานความร้อนอันเนื่องมาจากความดันไอตกเกิดจากการที่ส่วนท่อบรรเทาไปยังส่วนควบแน่นซึ่งถ้าความดันไอตกจะทำให้อุณหภูมิอิ่มตัว ตกลงตามด้วยมีผลทำให้อัตราการควบแน่นลดลงด้วย Z_5 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Z_3 และ Z_7

Z_7 คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนควบแน่น ซึ่งจะหาได้เช่นเดียวกับสมการการหา Z_{3f} คือ

$$Z_7 = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{1/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{1/3}} \quad (2.18)$$

Z_{10} คือ ค่าความต้านทานตามแนวแกนของท่อ หรือการนำความร้อนขึ้นกับความหนา และ วัสดุที่ใช้ทำท่อ

เนื่องจาก Z_4, Z_6, Z_5 และ Z_{10} มีค่าน้อยมากจึงสามารถตัดออกได้ ดังนั้นความต้านทานความร้อนรวมจะเป็น

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.19)$$

ผลจากการใช้งานทำให้เกิดเขม่าที่ผิวท่อ เป็นผลให้มีค่าความต้านทานย่อยเพิ่มขึ้นในส่วนท่อบรรเทา

Z_{11} คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเขม่าที่เกาะที่ผนังท่อในส่วนท่อบรรเทา

ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะเป็น

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 + Z_{11} \quad (2.20)$$

การมีความต้านทานย่อยเพิ่มขึ้นคือ Z_{11} ทำให้ค่า Z_{total} ของเทอร์โมไซฟอนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนลดลงเพราะมีความร้อนสูญเสียเนื่องจากเขม่าเพิ่มขึ้นมา

โดยปรกติการคำนวณค่าการส่งถ่ายความร้อนของเทอร์โมไซฟอนต้องทราบเงื่อนไขเริ่มต้นของ อุณหภูมิซึ่งต้องทราบค่าของอุณหภูมิอย่างน้อย 2 ค่า เช่น ทราบอุณหภูมิขาเข้าด้านส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเป็นต้น และจำเป็นต้องทราบความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านท่อทั้งส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น

2.3 ครีบบและประสิทธิภาพของครีบบ

การติดครีบบที่ผิวท่อจะช่วยให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากท่อความร้อนได้มีพื้นที่การส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น และช่วยลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลงด้วย ชนิดของครีบบมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาวะการทำงาน ครีบบชนิดกลม (Circular fin) ได้รับความนิยมสำหรับใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเนื่องจากติดตั้งง่าย ซึ่งประสิทธิภาพของครีบบชนิดนี้สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_f = \frac{\text{Tanh} \sqrt{\frac{2h}{k_f t_f}} \times 1}{\sqrt{\frac{2h}{k_f t_f}} \times 1} \quad (2.21)$$

เมื่อ η_f คือ ประสิทธิภาพครีบบ

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว

k_f คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของครีบบ

t_f คือ ความหนาครีบบ

เมื่อทำการติดครีบบที่ท่อในส่วนทำระเหยจะทำให้ได้สมการค่าความต้านทานความร้อนดังนี้

$$Z_1 = \frac{1}{h_{\infty} s_{\infty} \eta_f} \quad (2.22)$$

2.4 การกักความร้อน

การกักความร้อนหมายถึง การเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม การกักความร้อนเป็นต้นเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การกักความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุทางโครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นผลจากกลไกหลายอย่าง และทำให้ส่วนประกอบโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอ่อนแอลง จนกระทั่งถึงจุดการทำงานล้มเหลวเนื่องจากท่อความร้อนไม่สามารถทนความดันที่อยู่ภายในท่อจึงทำให้เกิดการรั่ว หรือซึมขึ้น

ชั้นฟิล์มของออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการกักความร้อนบางชนิดอาจจะทำให้ความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นผลที่เกิดจากการกักความร้อนจะทำให้เกิดการกัดขางเส้นทางการไหลเป็นเหตุให้ต้องสูญเสียกำลังงานของปั๊มหรือคอมเพรสเซอร์มากขึ้น

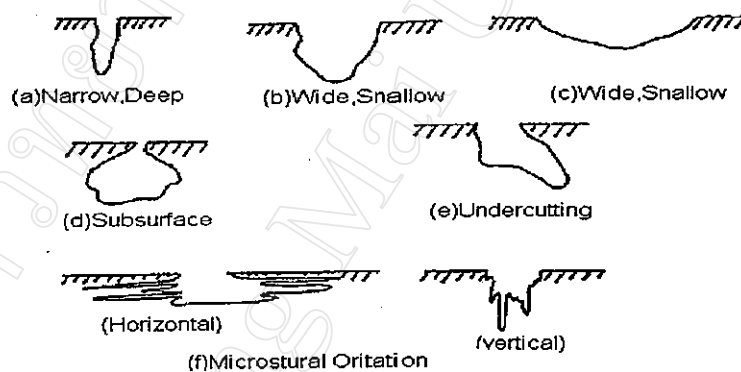
รูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.4.1 การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่พบเห็นบ่อยที่สุดมีลักษณะคือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั้งพื้นผิวที่ไม่มีอะไรปกคลุม ทำให้เกิดการสูญเสียของวัสดุอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม

2.4.2 การกัดกร่อนแบบกัดเป็นหลุม (Pitting corrosion)

การกัดกร่อนแบบกัดเป็นหลุม เกิดจากการที่พื้นผิวของโลหะถูกกัดกร่อนเป็นเฉพาะที่ จนเกิดเป็นหลุมเล็กๆ อาจเกิดได้จากสาเหตุต่าง ๆ กัน เช่น เกิดจากการกระจายตัวของออกซิเจนไม่สม่ำเสมอหลุมที่เกิดขึ้นนี้จะมีขนาดต่างกันอาจอยู่แยกกันหรืออยู่ใกล้กันเป็นกลุ่ม โดยทั่วไปการกัดกร่อนแบบนี้จะกัดกินในทิศทางของแรงโน้มถ่วงหรือกินลึกไปในทิศแนวนอน และอาจจะพบการกัดกร่อนแบบนี้ในพื้นผิวแนวตั้งได้ในบางครั้ง การกัดกร่อนแบบนี้ต้องใช้เวลาในการเริ่มต้นหรือฟักตัวเมื่อพื้นระบะนั้นไปแล้วการกัดกร่อนจะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งรูปแบบของการกัดกร่อนชนิดนี้ได้แสดงดังรูป 2.3

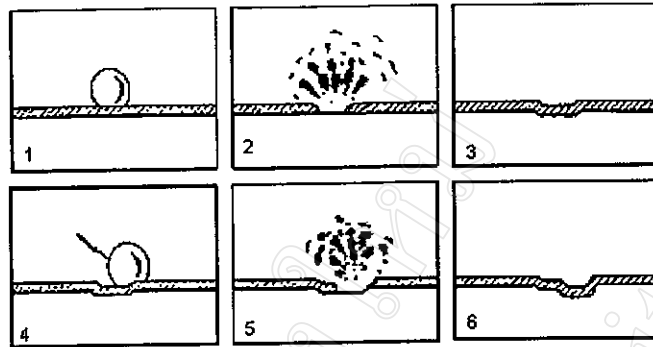


รูปที่ 2.3 แสดงรูปภาพตัดขวางของหลุมซึ่งเกิดจากการกัดกร่อน

ที่มา : Jones (1996)

2.4.3 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion corrosion) เป็นปรากฏการณ์ซึ่งเกิดความเสียหายจากการ

หลุดร่อนของผิวหน้าเนื่องจากผลจากการที่ของไหลไหลผ่านพื้นผิวด้วยความเร็วสูง การกัดกร่อนในลักษณะนี้จะแตกต่างกับการกัดกร่อนแบบอื่นๆ โลหะจะหลุดออกไปในรูปของโลหะ ไอออน (Ion) แต่การหลุดในลักษณะกัดเซาะจะหลุดจากผิวหน้าโลหะเป็นสภาพปรกติของโลหะนั้นๆ ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดอิโรชั่นจากการกระแทก
ที่มา : จงกล รัตสุข (2536)

2.4.4 การป้องกันการกัดกร่อนของเทอร์โมโซฟอน

การป้องกันการกัดกร่อนมีอยู่หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวภายนอกด้วยการเคลือบผิว และเติมสารยับยั้งสำหรับการป้องกันภายใน สำหรับการศึกษาี้ได้ทำการป้องกันการกัดกร่อนโดย

ก. ป้องกันผิวท่อด้วยการเคลือบอีนาเมล

การเคลือบอีนาเมลเป็นการเคลือบทางเซรามิกชนิดหนึ่งที่ใช้เคลือบโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง เป็นต้น แล้วเผาหรืออบด้วยความร้อนไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที จนกระทั่งอีนาเมลที่เคลือบและโลหะจับกันแน่น โลหะที่ผ่านการเคลือบผิวจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี ส่วนประกอบของอีนาเมลมีความซับซ้อนมากกว่าแก้ว ส่วนใหญ่เป็นจำพวก Borosilicate glass ซึ่งเป็นโลหะอัลคาไลน์ และซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนประกอบของอีนาเมลจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ เช่น โครงสร้างของโลหะ จุดหลอมเหลว และอัตราขยายตัวเมื่อรับความร้อน สำหรับการเคลือบโลหะแต่ละชนิดที่แตกต่างกันวิธีการเคลือบก็มีความแตกต่างกันออกไป

ข. ป้องกันผิวท่อด้วยการเคลือบสีทนความร้อน

การเคลือบผิวภายนอกด้วยสีทนความร้อน (Hi-temp) เป็นวิธีที่สะดวกและราคาต้นทุนสำหรับเคลือบน้อยกว่าอีนาเมลมาก แต่ระยะเวลาในการป้องกันการกัดกร่อนจะสั้นกว่าอีนาเมล ส่วนประกอบของสีประเภทนี้ส่วนใหญ่ได้แก่ Resin ความคงทนของสีที่ใช้เคลือบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน

ค. ป้องกันการกัดกร่อนโดยการเติมสารยับยั้ง

สารที่เติมลงในสารละลายเพื่อควบคุมการกัดกร่อนเรียกว่า สารยับยั้ง (Inhibitor) มีทั้งชนิดอินทรีย์ และอนินทรีย์ โดยสารยับยั้งจะทำปฏิกิริยากับผิวของโลหะจนเกิดเป็นฟิล์มปกคลุมผิวของโลหะไว้ ทำให้ป้องกันการกัดกร่อนของโลหะจากการกัดกร่อน และมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถใช้ได้กับโลหะชนิดต่างๆ
- สารป้องกันการกัดกร่อนจะมากขึ้นตามความเข้มข้นของสารควบคุมที่ใช้ถ้าไม่ควบคุมให้

ถึงขนาดก็จะป้องกันการกัดกร่อนได้ไม่ดี

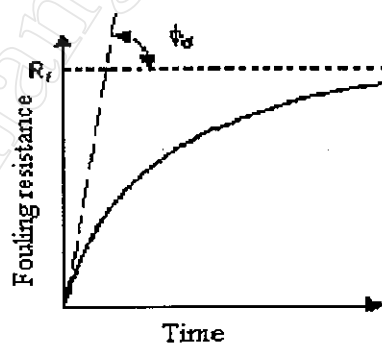
- ความเข้มข้นขึ้นอยู่กับสารละลาย เหนือไขของโลหะ และสภาพผิวของโลหะตลอดจนอุณหภูมิของของเหลว

2.4.5 การสะสมของฟาวลิง

ฟาวลิงหมายถึงคราบสะสมใดๆบนพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะเพิ่มความต้านทานให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ฟาวลิงที่ได้จากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตาจะมีเศษถ่านปนไปกับไอลีความร้อนและเกาะตัวที่ผิวของเทอร์โมไซฟอนซึ่งก่อให้เกิดการสะสมและพอกตัวที่ผิวท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนลดลง ซึ่งรูปแบบของการเกิดสิ่งสกปรกบนผิวท่อเทอร์โมไซฟอนจะเริ่มพิจารณาตั้งแต่ผิวท่อยังมีสภาพที่ใหม่ และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงในการเกาะตัวของฟาวลิงกับเวลา โดยพิจารณาตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายการสะสมของเขม่า Kern and Seaton (1959) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของเขม่าหรือความต้านทานฟาวลิง ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

- การเกาะตัวของฟาวลิงมีความหนาสม่ำเสมอ
- สมมุติว่าฟาวลิงที่เกาะเป็นชนิดเดียวกัน
- ไม่คำนึงถึงสภาพไม่เรียบของพื้นผิวฟาวลิง
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายของไหล
- ที่เวลาเริ่มต้นการใช้งานพื้นผิวสะอาดไม่มีฟาวลิงเกาะที่ผิว

จากการทดลอง Kern and Seaton พบว่าการเติบโตของเขม่าหรือตะกอนจะเป็นไปในลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้นแล้วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เรียกลักษณะนี้ว่าแอสิมโทติก (Asymptotic) ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะกราฟเขม่าแบบทั่วไป

ที่มา : Kern and Seaton (1959)

ซึ่งอัตราการเปลี่ยนสุทธิของฟาวลิง (Net fouling rate, $\frac{dR_f}{dt}$) จะมีผลมาจากอัตราการก่อตัวของฟาวลิง

(Deposition rate, Φ_d) และอัตราการหลุดร่วงของฟาวลิง (Removal rate, Φ_r) สามารถเขียนในรูปของสมการคือ

$$\frac{dR_f}{dt} = \Phi_d - \Phi_r \quad (2.23)$$

โดยพิจารณาว่าค่า Φ_d จะไม่ขึ้นกับเวลาในขณะที่ Φ_r จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าที่แท้จริงของ R_f นั่นคือ

$$\Phi_d = \left(\frac{dR_f}{dt} \right)_{t=0} \quad (2.24)$$

$$\Phi_r = \beta R_f \quad (2.25)$$

เมื่อ β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการหลุดร่วงของเขม่า
แทนค่า (2.25) ลงใน (2.23) จะได้ว่า

$$\frac{dR_f}{dt} + \beta R_f = \Phi_d \quad (2.26)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (2.26) จะได้

$$R_f = -\frac{\Phi_d}{\beta} e^{-\beta t} + \frac{\Phi_d}{\beta} \quad (2.27)$$

หรือ

$$R_f = \frac{\Phi_d}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (2.28)$$

จากแบบจำลองเวลาที่ค่าความหนาฟาวลิ่งเริ่มคงที่ สามารถใช้เป็นเวลาในการทำความสะอาดผิวท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนได้ แต่เวลาในการทำความสะอาดที่เหมาะสมจริงต้องเป็นเวลาในการทำความสะอาดที่จุดคุ้มค่าที่สุดในทางเศรษฐศาสตร์ คือ มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำที่สุด

จากสมการ (2.28) สามารถนำมาใช้หาค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของฟาวลิ่งที่เกาะบนผิวท่อคังนั้นจะได้

$$Z_{\text{fouling}} = \frac{\Phi}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (2.29)$$

ทำการ Differential สมการ (2.29) ทั้งสองข้างเทียบกับเวลาจะได้

$$\frac{dZ_{\text{fouling}}}{dt} = \Phi_d e^{-\beta t} \quad (2.30)$$

และสมมติให้

$$Z_{\text{fouling}} = Z_{\text{total},t} - Z_{\text{total},t=0} \quad (2.31)$$

ทำการ Differential เทียบกับเวลาเช่นเดียวกันจะได้

$$\frac{dZ_{\text{fouling}}}{dt} = \frac{dZ_{\text{total}}}{dt} \quad (2.32)$$

จากสมการ(2.30) และ(2.32)จะได้

$$\frac{dZ_{\text{total}}}{dt} = \phi_d e^{-\beta t} \quad (2.33)$$

หรือ

$$\ln\left(\frac{dZ_{\text{total}}}{dt}\right) = \ln \phi_d - \beta t \quad (2.34)$$

เมื่อเวลาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น จากสมการ (2.1) ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนต้องรวมค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงด้วยดังนี้

$$Q = \frac{\Delta z}{Z_{\text{total}} + Z_{\text{Fouling}}} \quad (2.35)$$