

บทที่ 4

หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

(Principle of heat transfer)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา

การถ่ายเทความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการปรับอากาศ การเพิ่ม หรือลด อุณหภูมิในกระบวนการผลิต ต่างจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้จะมาจากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นทุกวัน นอกจากนั้นยังมีมลพิษที่ปล่อยออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ในการให้พลังงานอีกด้วย ดังนั้นถ้าสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้นอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังจะเป็นการลดมลพิษลงอีกด้วย จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาถึงเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อน เพื่อไปใช้ในการปรับปรุงอุปกรณ์ หรือกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน

วัตถุประสงค์ (Objective)

เพื่อให้เข้าใจหลักการของเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อน

บทนำ (Introduction)

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

- 1) การนำความร้อน
- 2) การพาความร้อน และ
- 3) การแผ่รังสี

การนำความร้อน หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถ่ายเทโดยอาศัยการเคลื่อนไหวยของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งไปตามลำดับ

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าของวัตถุกับของไหล ก็เรียกว่า การพาความร้อนในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุมักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบหลังจะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาว และความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุนั้นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในตำราเล่มนี้จะพูดถึงปรากฏการณ์ในสถานะคงที่เป็นหลัก ส่วนการนำความร้อนที่ไม่คงที่จะอธิบายง่ายๆ เกี่ยวกับสมการพื้นฐานของการนำความร้อนเท่านั้น

นอกจากนี้ในบทนี้จะกล่าวถึงการแลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆ และการนำไปใช้งาน ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อการอนุรักษ์พลังงาน ผนวกรวมความร้อนและการเลือกใช้

4.1 การนำความร้อน

4.1.1 สมการพื้นฐานของการนำความร้อน (สมการของ Fourier)

สมมติว่ามีพื้นที่ที่ติดฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งภายในตัววัตถุ และให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยนั้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา (ปริมาณนี้เรียกว่า ฟลักซ์ความร้อน มีหน่วยพื้นฐานเท่ากับ $[W/m^2]$) เท่ากับ q และ q จะแปรผันตามความชันของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้น กล่าวคือ ถ้าให้อุณหภูมิเท่ากับ T [K] ให้ระยะทางตามทิศทางการไหลของความร้อนเท่ากับ x [m] และให้ค่าคงที่ของการแปรผันเท่ากับ λ $[W/(m \cdot K)]$ แล้ว

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการความสัมพันธ์พื้นฐานของการนำความร้อน หรือ สมการของ Fourier โดยค่าคงที่ของการแปรผัน λ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว (สมบัติทางกายภาพ) ของวัตถุนั้นๆ ค่า q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ชี้ไปตามทิศทางการไหลของ x และเครื่องหมายลบทางด้านขวาของสมการ (4.1) แสดงว่า ความร้อนจะไหลไปในทิศทางที่มีอุณหภูมิต่ำลง ($(dT/dx) < 0$)

4.1.2 การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่น

สมมติว่ามีวัสดุรูปแผ่นมีความหนาสม่ำเสมอ ℓ ซึ่งมีอุณหภูมิผิวหน้าทั้งสองด้านเท่ากับ T_1 และ T_2 ในกรณีนี้เราจะสนใจเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามทิศทางความหนาเท่านั้น หากภายในแผ่นวัสดุไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ฟลักซ์ความร้อน q จะมีคงที่ ณ ตำแหน่ง x ใดๆ ภายในแผ่นวัสดุ ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ λ แล้ว จะสามารถอินทิเกรตสมการของ Fourier ได้อย่างง่ายดาย

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad dT = -\frac{q}{\lambda} dx, \quad T = -\frac{q}{\lambda} x + C$$

ในที่นี้ เมื่อ $x = 0$ แล้ว $T = T_1$ และเมื่อ $x = \ell$ แล้ว $T = T_2$ ดังนั้น เมื่อนำเงื่อนไขตั้งต้นไปแทนค่าเพื่อกำจัดค่าคงที่ C แล้วจะได้

$$q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{\ell} \quad (4.2)$$

และปริมาณความร้อน Q (W) ที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่หน้าตัด A จะเท่ากับ

$$Q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{\ell} A = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{\ell}{\lambda A}\right)} \quad (4.3)$$

ถ้าเราคิดว่าการนำความร้อนนั้น การที่ความร้อนถ่ายเทจะต้องมีแรงผลักดัน ซึ่งได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิแล้ว ด้านล่างของพจน์ขวาสุดในสมการ (4.3) จะมีความหมายคล้ายกับ “ความต้านทาน” ต่อการถ่ายเทความร้อน บางครั้งจึงเรียกว่า ความต้านทานการนำความร้อน

$$(\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการนำความร้อน}) = \frac{(\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ})}{(\text{ความต้านทานการนำความร้อน})}$$

ดังนั้น หากให้ความต้านทานการนำความร้อนเท่ากับ R_c แล้ว

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c}, \quad R_c = \frac{\ell}{\lambda A} \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามทิศทางความหนาของแผ่นวัสดุแล้ว อุณหภูมิ T ที่ระยะทาง x จะเท่ากับ

$$T(x) = -\frac{q}{\lambda} x + C$$

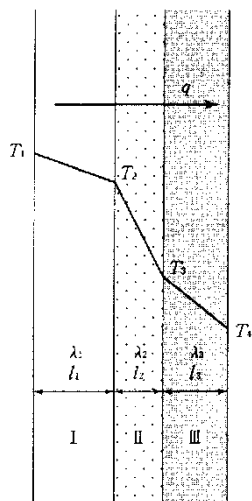
เมื่อแทนค่า q ด้วยสมการ (4.2) และแทนค่า C ด้วยค่าที่หาได้จากเงื่อนไขตั้งต้นแล้วจะได้

$$T(x) = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{x}{\ell} \quad (4.5)$$

แสดงว่า อุณหภูมิภายในแผ่นวัสดุจะมีการกระจายเป็นเส้นตรงตามทิศทาง x จาก T_1 ถึง T_2

4.1.3 การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น

ต่อไปจะพิจารณาการนำความร้อนของแผ่นวัสดุหลายชั้นซึ่งประกอบด้วยแผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่างกันมาประกบกันแน่น (รูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.1 การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น

ในที่นี้จะถือว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวของแต่ละชั้นมีการกระจายสม่ำเสมอ ไม่มีความร้อนไหลออกไปในทิศทางอื่นนอกเหนือจากตามความหนาของแผ่นวัสดุ และอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของแผ่นวัสดุแต่ละชั้นเท่ากัน (ไม่มีความต้านทานการนำความร้อนที่ผิวสัมผัส) ดังนั้น ฟลักซ์ความร้อน q ที่วิ่งผ่านแผ่นวัสดุ I, II และ III จึงมีค่าเท่ากัน จากสมการที่ (4.2)

$$q = \lambda_1 \frac{(T_1 - T_2)}{l_1}, \quad q = \lambda_2 \frac{(T_2 - T_3)}{l_2}, \quad q = \lambda_3 \frac{(T_3 - T_4)}{l_3}$$

แปลงรูปความสัมพันธ์เหล่านี้ได้เป็น

$$(T_1 - T_2) = \frac{l_1}{\lambda_1} q, \quad (T_2 - T_3) = \frac{l_2}{\lambda_2} q, \quad (T_3 - T_4) = \frac{l_3}{\lambda_3} q$$

เมื่อบวกทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของสมการเหล่านี้เหล้าด้วยกัน

$$(T_1 - T_4) = \left(\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} \right) q$$

ดังนั้น

$$q = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} \right)}, \quad Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} \right)} A = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{l_1}{\lambda_{1A}} + \frac{l_2}{\lambda_{2A}} + \frac{l_3}{\lambda_{3A}} \right)} \quad (4.6)$$

โดยทั่วไป ถ้าจำนวนชั้นของแผ่นวัสดุเท่ากับ n ก็สามารถคำนวณได้จากสมการ n สมการเช่นเดียวกับข้างต้น และผลลัพธ์จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$q = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i} \right)}, \quad Q = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i} \right)} A = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i A} \right)} \quad (4.7)$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท (Q) และความต้านทานการนำความร้อน (R_C) ในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$Q = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{R_C}, \quad R_C = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i A} \right) \quad (4.8)$$

กล่าวคือ ความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้นจะเท่ากับผลบวกของความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นวัสดุแต่ละชั้นนั่นเอง ดังนั้น เราจึงสามารถพิจารณาได้ว่าวัสดุนี้เป็นแผ่นวัสดุ 1 แผ่นที่มีอุณหภูมิที่ผิวหน้าทั้งสองด้านเท่ากับ T_1 และ T_{n+1} และมีความต้านทานการนำความร้อนเท่ากับ $\sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i A} \right)$ ได้

4.1.4 การนำความร้อนของทรงกระบอก

ในทรงกระบอกเช่นรูปที่ 4.2 การกระจายของอุณหภูมิตามแนวแกนกลางจะสม่ำเสมอ มีแต่การกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีเท่านั้น ในกรณีนี้ ความร้อนจะไหลจากผิวด้านในออกมาด้านนอก (หรือในทิศทางตรงข้าม) ตามแนวรัศมี

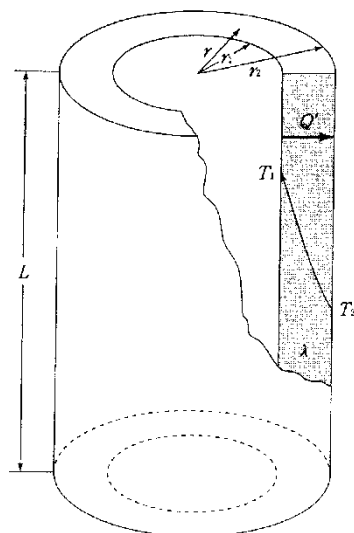
ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ มีค่าคงที่ และภายในทรงกระบอกไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวทรงกระบอกที่มีรัศมี r และมีความยาวหนึ่งหน่วยตลอดทั่วทั้งพื้นผิว Q' [W/m] จะมีค่าคงที่ตลอด ณ รัศมี r ใดๆ

$$q = \frac{Q'}{2\pi r}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปแทนค่าในสมการของ Fourier และอินทิเกรตแล้ว จะได้ว่า

$$q = \frac{Q'}{2\pi r} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (4.9)$$

$$dT = -\left(\frac{Q'}{2\pi r} \right) \left(\frac{1}{r} \right) dr, \quad T = \frac{Q'}{2\pi r} \ln r + C$$



รูปที่ 4.2 การนำความร้อนของทรงกระบอก

ในที่นี้ เมื่อแทนค่าเงื่อนไขตั้งต้นว่าเมื่อ $r = r_1$ แล้ว $T = T_1$ และเมื่อ $r = r_2$ แล้ว $T = T_2$ จะได้ว่า

$$T_1 - T_2 = \frac{Q'}{2\pi r} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q'}{2\pi r} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

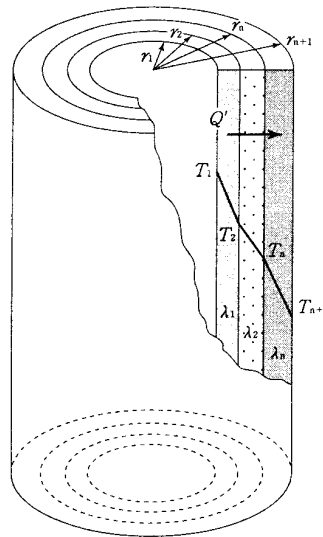
ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมด Q [W] ที่ถ่ายเทจากผิวด้านในสู่ผิวด้านนอกจะเท่ากับ

$$Q = Q' L = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c}, \quad R_c = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (4.10)$$

อุณหภูมิภายในทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ ซึ่งมีการกระจายแบบลอการิทึม

$$T(r) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln \left(\frac{r}{r_1} \right), \quad T(r) = T_2 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln \left(\frac{r_2}{r} \right) \quad (4.11)$$

เมื่อพิจารณาการนำความร้อนของทรงกระบอกหลายชั้นดังรูปที่ 4.3 ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านจะคำนวณได้ในทำนองเดียวกับวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น กล่าวคือ

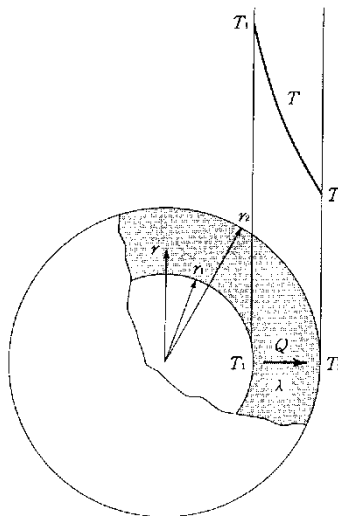


รูปที่ 4.3 การนำความร้อนของทรงกระบอกหลายชั้น

$$Q = Q' L = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{R_c}, \quad R_c = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2\pi\lambda_i L} \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \right\} \quad (4.12)$$

4.1.5 การนำความร้อนของเปลือกทรงกลม

ต่อไปนี้จะพิจารณาการนำความร้อนของเปลือกทรงกลมรัศมีภายใน r_1 รัศมีภายนอก r_2 ดังรูปที่ 4.4 ให้อุณหภูมิที่ผิวภายในเท่ากับ T_1 อุณหภูมิที่พื้นผิวภายนอกเท่ากับ T_2 โดยมีการกระจายสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว ให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ ของเปลือกทรงกลมมีค่าคงที่ทุกจุด และภายในตัวเปลือกทรงกลมไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อน ถ้าให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวทรงกลมรัศมี r เท่ากับ Q [W] แล้วค่า Q จะคงที่ไม่ขึ้นกับ r ดังนั้น สมการของ Fourier ในกรณีนี้จึงเท่ากับ



รูปที่ 4.4 การนำความร้อนของเปลือกทรงกลม

$$q = \frac{Q}{4\pi r^2} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (4.13)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการนี้ จะได้ว่า

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_C}, \quad R_C = \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.14)$$

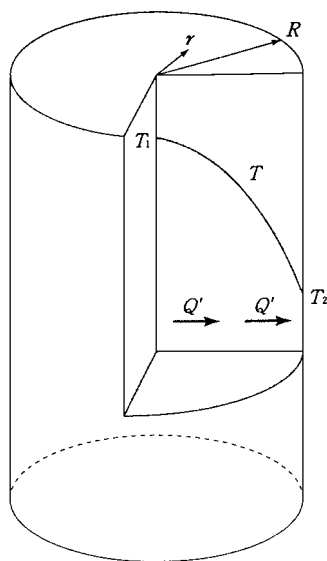
$$T(r) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right), \quad T(r) = T_2 - \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.15)$$

4.1.6 การนำความร้อนของทรงกระบอกที่กำเนิดความร้อนจากภายใน

ต่อไปนี้จะพิจารณาตัวกำเนิดความร้อนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกดังรูปที่ 4.5

กรณีนี้จะแตกต่างจากการนำความร้อนของทรงกระบอกข้างต้น เนื่องจากภายในทรงกระบอกมีการกำเนิดความร้อน ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทผ่านพื้นผิวทรงกระบอกสมมติภายในตัวทรงกระบอก จึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวทรงกระบอกนั้น ถ้าให้ปริมาณความร้อนที่กำเนิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของทรงกระบอกนี้เท่ากับ w [W/m³] แล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านพื้นผิวทรงกระบอกรัศมี r ต่อความยาวหนึ่งหน่วยของทรงกระบอก Q' [W/m] จะเท่ากับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จากด้านในพื้นผิวทรงกระบอกนั้น

$$Q' = \pi r^2 w$$



รูปที่ 4.5 การนำความร้อนของทรงกระบอกที่กำเนิดความร้อนจากภายใน

ดังนั้น สมการของ Fourier ในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$q = \frac{Q'}{2\pi r} = -\frac{r}{2} \frac{dT}{dr} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (4.16)$$

เมื่ออินทิเกรตแล้วจะได้

$$dT = -\frac{w}{2\lambda} r dr, \quad T(r) = -\frac{w}{2\lambda} \left(\frac{1}{2} r^2 \right) + C$$

ถ้าให้อุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกของทรงกระบอก ($r = R$) เท่ากับ T_2 แล้ว การแจกแจงอุณหภูมิภายในทรงกระบอกจะเป็น

$$T(r) = T_2 + \frac{w}{4\lambda} (R^2 - r^2) \quad (4.17)$$

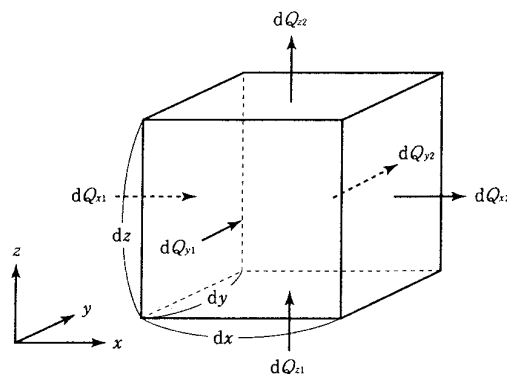
4.1.7 สมการพื้นฐานของการนำความร้อนไม่คงที่

ต่อไปนี้จะสมมติปริมาตรเล็กๆ ภายในตัววัตถุดังรูปที่ 4.6 และพิจารณาความร้อนที่ผ่านเข้าออกปริมาตรนี้ ถ้าให้ฟลักซ์ความร้อนที่พุ่งตั้งฉากผ่านพื้นผิวที่เกิดจาก dy และ dz เข้าไป (ตามทิศทางแกน x) เท่ากับ q_x แล้ว ผลต่างระหว่างปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้า-ออกผ่านพื้นที่ $dy \cdot dz$ ภายในเวลาสั้นๆ dt หรือ dQ_x จะเท่ากับ

$$dQ_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \cdot dy \cdot dz \cdot dt = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อคำนวณหาผลต่างระหว่างปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้า-ออกในทิศทางแกน y และ z หรือ (dQ_y, dQ_z) และให้ผลบวกของผลต่างเหล่านี้เท่ากับ dQ แล้ว dQ จะเท่ากับปริมาณความร้อนที่สะสมที่ปริมาตรนี้ในเวลาสั้นๆ dt

$$dQ = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$



รูปที่ 4.6 การนำความร้อนในปริมาตรเล็กๆ ภายในตัววัตถุ

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

นอกจากนี้ ถ้าในปริมาตรเล็กๆ นี้มีความร้อนเกิดขึ้น q' ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาแล้ว ปริมาณความร้อนที่สะสมในปริมาตรเล็กๆ นี้ในเวลา dt ยังต้องบวกด้วย

$$dQ' = q' \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

ถ้าให้วัตถุนี้มีความร้อนจำเพาะเท่ากับ c มีความหนาแน่น ρ และมีอุณหภูมิเท่ากับ T แล้ว การเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของความร้อน Q ที่มีอยู่ในปริมาตรเล็กๆ นี้จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} dt &= c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt + q' \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \\ c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q' \end{aligned}$$

จากสมการของ Fourier เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x, y และ z จะเท่ากับ

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

ดังนั้น ถ้าให้ λ มีค่าคงที่แล้ว

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q'}{c\rho} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q'}{c\rho} \quad (4.18)$$

สมการนี้เป็นสมการพื้นฐานในการอธิบายการนำความร้อนทั่วไปในวัตถุ ค่า $a = \lambda / c\rho$ ในสมการ (4.18) เรียกว่า Thermal diffusivity ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะตัว (สมบัติทางกายภาพ) ของวัสดุหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น $[m^2/S]$

ถ้าภายในตัววัตถุไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อน ($q' = 0$) และวัตถุอยู่ในสภาวะคงที่โดยที่การกระจายของอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$) และถ้ามีการกระจายของอุณหภูมิเพียงทิศทางเท่านั้น โดยสมมติว่าเป็นทิศทางแกน x แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ง่ายๆ ว่า

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (4.19)$$

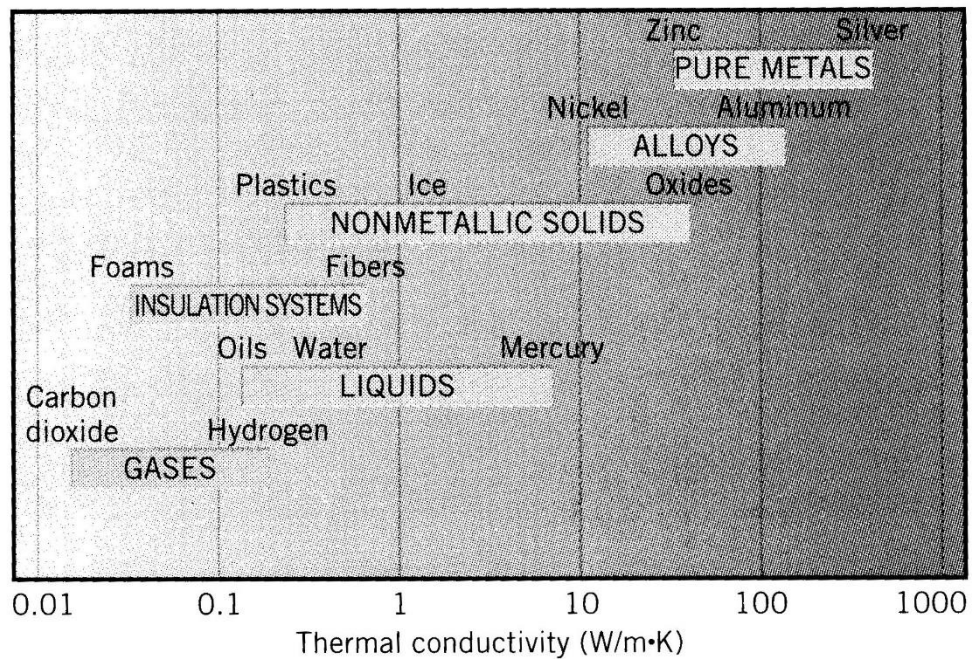
สมการที่ (4.19) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ในระบบพิกัดมุมฉากเหมือนกับรูปที่ 4.6 ส่วนในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates) ซึ่งใช้อธิบายทรงกระบอกเช่นในรูปที่ 4.2 จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (4.20)$$

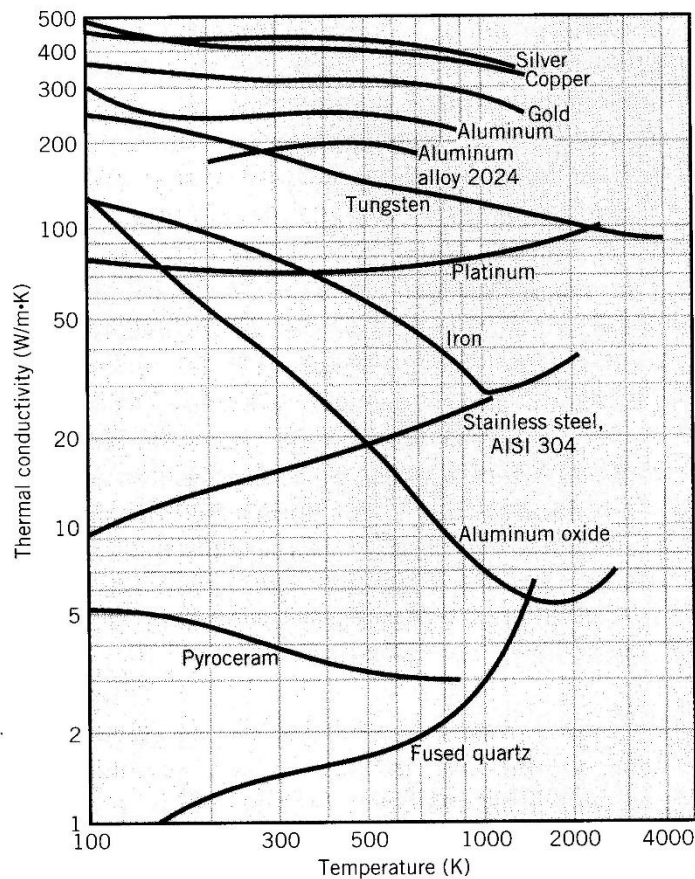
และในระบบพิกัดทรงกลม (Spherical coordinates) ซึ่งใช้อธิบายเปลือกทรงกลมเช่นรูปที่ 4.4 จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (4.21)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (4.19), (4.20) และ (4.21) จะได้การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุภายใต้สภาวะคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่คำนวณได้จากสมการของ Fourier (สมการที่ (4.5), (4.11) และ (4.15))



รูปที่ 4.7 ประมาณค่าการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของสารชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ

4.2 การพาความร้อน

4.2.1 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

เมื่อพิจารณาในเชิงจุลภาคเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ จะพบว่าที่จริงแล้วการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการนำความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลที่ผิวสัมผัสนั่นเอง โดยปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับการกระจายของอุณหภูมิของชั้นผิวสัมผัส (กล่าวคือ ขึ้นอยู่กับความชันของเส้นการแผ่กระจายของอุณหภูมิในตัวของไหลที่อยู่ใกล้ๆ กับผิวหน้าของวัตถุ) ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจึงไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของของไหล และรูปร่างของวัตถุเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นราบเรียบหรือปั่นป่วน และขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นอยู่ในช่วงเร่งความเร็วหรือมีความเร็วคงที่แล้ว ฯลฯ อีกด้วย ในที่นี้เราจะรวมเอาปัจจัยที่ซับซ้อนเหล่านี้ไว้ในค่าที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]) โดยฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$q = h(T_\infty - T_w) \quad (4.22)$$

T_w เป็นอุณหภูมิที่ผิวหน้าวัตถุ T_∞ เป็นอุณหภูมิของกระแสหลัก ณ จุดที่ห่างเพียงพอจากผิวหน้า มีสมการต่างๆ มากมายที่ใช้ในการคำนวณอัตราการพาความร้อน (h) ของวัตถุรูปร่างต่างๆ ที่อยู่ในการไหลแบบต่างๆ ซึ่งจะได้กล่าวในภายหลัง ตัวอย่างช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหล และการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่ได้เป็นสมบัติทางกายภาพของสสารเหมือนกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ดังนั้น ค่าของมันบางครั้งจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนผิวหน้าของวัตถุ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวหน้า เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (h_x) และค่าเฉลี่ยทั่วผิวหน้าเรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h_m) หากให้พื้นที่ที่มีความร้อนถ่ายเทเท่ากับ A แล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านในหนึ่งหน่วยเวลา Q จะเท่ากับ

$$Q = h_m (T_\infty - T_w) A \quad (4.23)$$

ตารางที่ 4.1 ช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

รูปแบบการถ่ายเทความร้อน	ช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$W/(m^2 \cdot K)$] และเงื่อนไข	
การพาความร้อนตามธรรมชาติ	5–10	แผ่นตะกั่วเรียบ $500^\circ C$ ในบรรยากาศ 0.1 MPa , $20^\circ C$
	500–550	แผ่นตะกั่วเรียบ $50^\circ C$ ในน้ำ $20^\circ C$
การพาความร้อนด้วยการบังคับ	40	ท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 m อุณหภูมิผิวด้านใน $130^\circ C$ มีอากาศ $40^\circ C$ ไหลผ่านด้วยความเร็ว 10 m/s
	5000	ท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 m อุณหภูมิผิวด้านใน $130^\circ C$ มีน้ำ $40^\circ C$ ไหลผ่านด้วยความเร็ว 1 m/s
การเดือด	ประมาณ 1500–60000	film boiling < nucleate boiling, ที่ใกล้กับ burnout point จะมีค่าประมาณ 60000
การควบแน่น	ประมาณ 10000–230000	film-wise condensation << drop-wise condensation

กล่าวคือคิดเสมือนว่า

$$(\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการพาความร้อน}) = \frac{(\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ})}{(\text{ความต้านทานการพาความร้อน})}$$

ถ้าให้ความต้านทานการพาความร้อนเท่ากับ R_t แล้ว จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{(T_\infty - T_w)}{R_t}, \quad R_t = \frac{1}{h_m A} \quad (4.24)$$

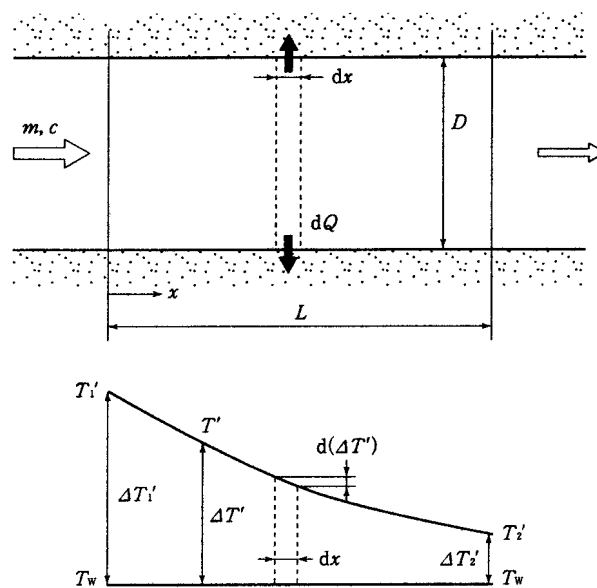
4.2.2 อุณหภูมิเฉลี่ยผสมในการไหลในท่อ กับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม

การคำนวณการพาความร้อนในกรณีที่ผิวหน้าของวัตถุห่อหุ้มการไหลอยู่ เช่น การไหลในท่อกลม จะต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากการไหลในท่อที่ไหลด้วยความเร็วคงที่นั้น ทุกจุดในท่อจะเสมือนเป็นผิวสัมผัส กล่าวคือ ไม่เพียงแต่อุณหภูมิของของไหล ณ จุดที่ห่างเพียงพอกจากผิวหน้าจะมีค่าไม่เท่ากันเท่านั้น แต่อุณหภูมิของของไหลตามทิศทางการไหลก็ไม่คงที่ด้วย ดังนั้นในกรณีนี้ จึงเกิดปัญหาว่าจะใช้ค่าใดเป็นอุณหภูมิของตัวของไหล

รูปที่ 4.8 แสดงของไหลกำลังไหลอยู่ภายในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D โดยที่ทางเข้า และทางออกซึ่งมีความยาวตามแนวแกนของท่อเท่ากับ L จะแทนด้วยตัวห้อย 1 และ 2 ในกรณีนี้ อุณหภูมิเฉลี่ยผสม T' ซึ่งใช้เป็นอุณหภูมิตัวแทนของของไหล ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกนของท่อภายในระหว่างช่วงดังกล่าวนี้ จะมีนิยามดังต่อไปนี้

$$T' = \frac{\int T u \, dS}{\int u \, dS} \quad (4.25)$$

ในที่นี้ T และ u หมายถึงอุณหภูมิ และความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่เล็กๆ dS ณ ตำแหน่งใดๆ บนพื้นที่หน้าตัดตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยผสม จะเป็นอุณหภูมิที่ใช้แสดงในกรณีที่ถือว่าของเหลวที่ไหลผ่านจะผสมกันอย่างสมบูรณ์ในอุดมคติ ณ ทุกๆ พื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 4.8 การพาความร้อนของการไหลในท่อ

ที่จุดนี้ ถ้าให้อุณหภูมิที่ผนังท่อด้านในระหว่างช่วงระยะทางนี้มีค่าคงที่เท่ากับ T_w และถือว่าสัมประสิทธิ์ความร้อน h_m จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งตามแนวแกนของท่อ และถือว่าความแตกต่างของอุณหภูมิ $\Delta T'$ เท่ากับผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยผสม T' กับ T_w เมื่อให้ความร้อนจำเพาะ และอัตราไหลโดยมวลของของไหลเท่ากับ c และ m ตามลำดับ และให้การเปลี่ยนแปลง $\Delta T'$ ในบริเวณเล็กๆ ภายในระยะทาง dx ตามทิศทางความยาวเท่ากับ $d(\Delta T')$ แล้ว ปริมาณความร้อน dQ ที่พาจากของไหลไปยังผนังท่อภายในช่วงระยะทางเล็กๆ นี้ จะเท่ากับความร้อนในของไหลที่ลดลงในช่วงระยะทางนี้ ดังนั้น

$$dQ = -m c \, d(\Delta T') = h_m (T' - T_w) \pi D \, dx = h_m \Delta T' \pi D \, dx$$

$$-m c \, d(\Delta T') = h_m \Delta T' \pi D \, dx, \quad \frac{1}{\Delta T'} d(\Delta T') = -\frac{h_m \pi D}{m c} dx$$

$$\ln (\Delta T') = -\frac{h_m \pi D}{m c} x + C$$

ในที่นี้ เมื่อ $x = 0$ แล้ว $\Delta T' = \Delta T_1'$ และเมื่อ $x = L$ แล้ว $\Delta T' = \Delta T_2'$ จะได้ว่า

$$\ln(\Delta T_2') = -\frac{h_m \pi D}{m c} L + \ln(\Delta T_1') \quad (a)$$

ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลไปยังผนังท่อตลอดช่วงระยะทางนี้จึงเท่ากับ

$$Q = m c (T_1' - T_2') = m c \{ (T_1' - T_w) - (T_2' - T_w) \} = m c (\Delta T_1' - \Delta T_2') \quad (b)$$

ถ้าให้อุณหภูมิที่เป็นตัวแทนของอุณหภูมิของของไหลตลอดช่วงระยะทางนี้เท่ากับ T_m และให้ผลต่างระหว่าง T_m กับอุณหภูมิผนังท่อ T_w เท่ากับ ΔT_m และให้

$$Q = h_m \Delta T_m \pi D L \quad (c)$$

แล้ว จากสมการ (a), (b) และ (c) จะคำนวณ ΔT_m ได้ดังนี้

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{\ln(\Delta T_1') - \ln(\Delta T_2')} = \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{\ln\left(\frac{\Delta T_1'}{\Delta T_2'}\right)} = \frac{(T_1' - T_w) - (T_2' - T_w)}{\ln\left(\frac{T_1' - T_w}{T_2' - T_w}\right)} \quad (4.26)$$

ค่า ΔT_m ที่มีนิยามตามข้างต้น เรียกว่า ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ถ้าใช้ ΔT_m นี้แล้ว ปริมาณการพาความร้อนจะเท่ากับ

ปริมาณการพาความร้อน = (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) $\times$ (ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม) $\times$ (พื้นที่ผิวด้านในท่อ)

4.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหล เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ประเภทของของไหล โครงสร้างของชั้นผิวสัมผัส ฯลฯ อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของฟังก์ชันของปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้

ในการพาความร้อนด้วยการบังคับ จะมีปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_x [W/(m²·K)] ความเร็วของกระแสหลัก u_∞ [m/s] ความยาวที่เป็นตัวแทนของวัตถุหรือระยะทาง x [m] (ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการไหลในท่อ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือในกรณีของการไหลบนแผ่นวัตถุ ได้แก่ ระยะทางจากขอบแผ่นวัตถุ เป็นต้น) สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล μ [Pa·s] ความหนาแน่น ρ [kg/m³] ความร้อนจำเพาะ c_p [J/(kg·K)] สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ [W/(m·K)] ซึ่งจากการทำ Dimensional analysis พบว่าปรากฏการณ์การพาความร้อนด้วยการบังคับสามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของปริมาณต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{h_x x}{\lambda}\right) = f\left\{\left(\frac{u_\infty x}{\mu/\rho}\right), \left(\frac{c_p \mu}{\lambda}\right)\right\} \quad (4.27)$$

พจน์ทั้ง 3 ในสมการข้างต้นเป็นปริมาณไม่มีหน่วยซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณทางฟิสิกส์หลายตัว มีชื่อเรียกว่า Nusselt number (Nu_x), Reynolds number (Re_x) และ Prandtl number (Pr) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} Nu_x &\equiv \frac{h_x x}{\lambda} \\ Re_x &\equiv \frac{u_\infty x}{\mu/\rho} = \frac{u_\infty x}{\nu} \\ Pr &\equiv \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{\mu/\rho}{\lambda/(c_p \mu)} = \frac{\nu}{a} \end{aligned} \quad (4.28)$$

ในที่นี้ ν เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ ($\nu = \mu/\rho$) และ a เป็น Thermal diffusivity ($a = \lambda / (c_p \mu)$) ดังนั้น สมการที่ (4.27) จึงเขียนได้ว่า

$$Nu_x = f(Re_x, Pr) \quad (4.29)$$

กล่าวคือ Nu_x สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ Re_x กับ Pr และจาก Nu_x จะสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_x ($h_x = Nu_x (\lambda / x)$) ได้

สำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติ ปริมาณที่เกี่ยวข้องได้แก่ h_x [W/(m²·K)], b [N/m³], x [m], μ [Pa·s], ρ [kg/m³], c_p [J/(kg·K)], λ [W/(m·K)] เป็นต้น และจากการทำ Dimensional analysis จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้ ทั้งนี้ b เป็นแรงลอยตัวที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่กระทำต่อของไหลหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$\left(\frac{h_x x}{\lambda}\right) = f\left\{\left(\frac{x^3 \rho b}{\mu^2}\right), \left(\frac{c_p \mu}{\lambda}\right)\right\} \quad (4.30)$$

ในที่นี้ พจน์แรกของด้านขวาของสมการ เรียกว่า Grashof number (Gr) โดยถ้าให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของของไหลเท่ากับ β และให้ความเร่งแรงโน้มถ่วงเท่ากับ g แล้ว $b = g(\rho_\infty - \rho_w) = g\beta\rho(T_\infty - T_w)$ และจะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

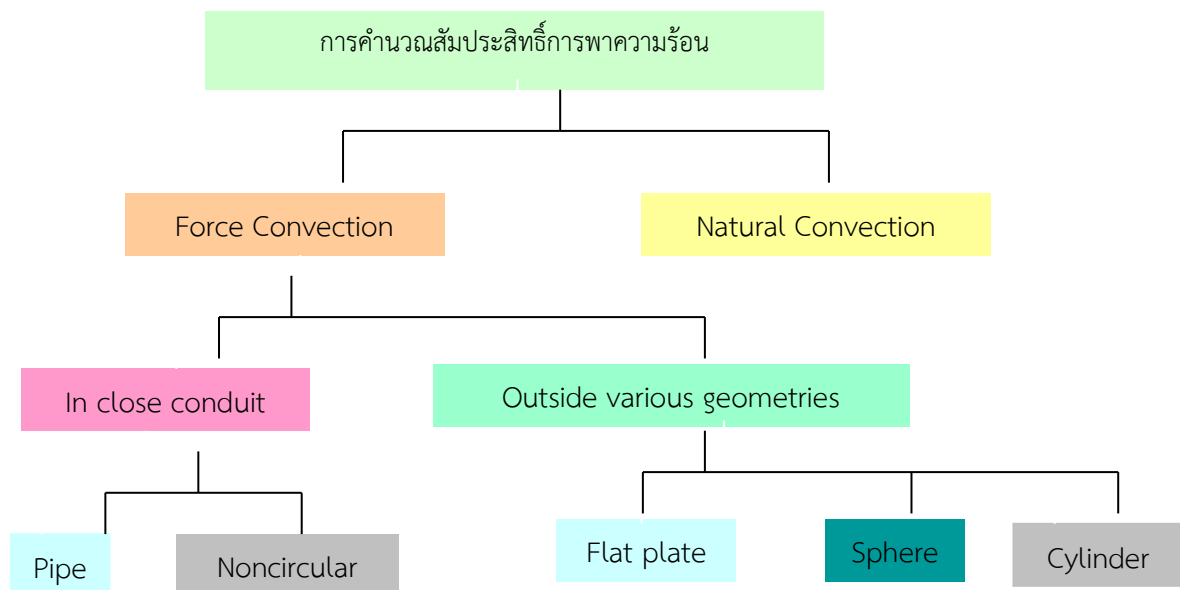
$$Gr \equiv \frac{x^3 \rho b}{\mu^2} = \frac{x^3 g (\rho_\infty - \rho_w)}{v^2 \rho} = \frac{x^3 g \beta (T_\infty - T_w)}{v^2} \quad (4.31)$$

ดังนั้น ในการพาความร้อนตามธรรมชาติ Nu_x จึงสามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ Gr กับ Pr

$$Nu_x = f(Gr, Pr) \quad (4.32)$$

4.2.4 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนที่สำคัญ

มีการค้นพบสมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนมากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ช่วงอุณหภูมิและความเร็วกระแส และประเภทของของไหล เป็นต้น ตารางที่ 4.2 แสดงสมการที่สำคัญเอาไว้ในการใช้สมการเหล่านี้ จำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขในสมการ เช่น “การไหลอยู่ในช่วงเร่งความเร็วหรือมีความเร็วคงที่แล้ว” “อุณหภูมิและความเร็วกระแสอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่” “จะใช้ค่าใดเป็นอุณหภูมิตัวแทนของของไหล” “สมบัติทางกายภาพต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์ความหนืด ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ฯลฯ จะใช้ค่าที่อุณหภูมิเท่าใด” เป็นต้น



รูปที่ 4.8 แสดงแผนผังการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

การไหลในท่อ, Flow in pipe

$$N_{Re} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Laminar flow in pipe, $N_{Re} < 2100$

$$(N_{Nu})_a = \frac{h_a D}{k} = 1.86 (N_{Re} N_{Pr} \frac{D}{L})^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

สมการบนจะให้ค่าที่ถูกต้องเมื่อ $N_{Re} N_{Pr} D/L > 100$ เราสามารถรู้ค่า μ , ρ , C_p , k ได้จากตาราง ในภาคผนวก
ค่า D มักจะมาจากโจทย์กำหนด ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของรัศมีท่อ และ L คือ ความยาวของท่อ

Turbulent flow in pipe, $N_{Re} > 6000$

$$N_{Re} = \frac{h_L D}{k} = 0.027 N_{Re}^{0.8} N_{Pr}^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

สมการข้างบนจะใช้ได้ดี เมื่อ $N_{Re} > 6000$, $0.7 < N_{Pr} < 16000$ และ $L/D > 60$

ถ้าท่อสั้น $L/D < 60$ เราจะมีการปรับค่า h_L ที่คำนวณได้เพื่อให้ได้ค่า h ที่แท้จริง

การปรับค่า h_L ที่คำนวณได้เพื่อให้ได้ค่า h ที่แท้จริง

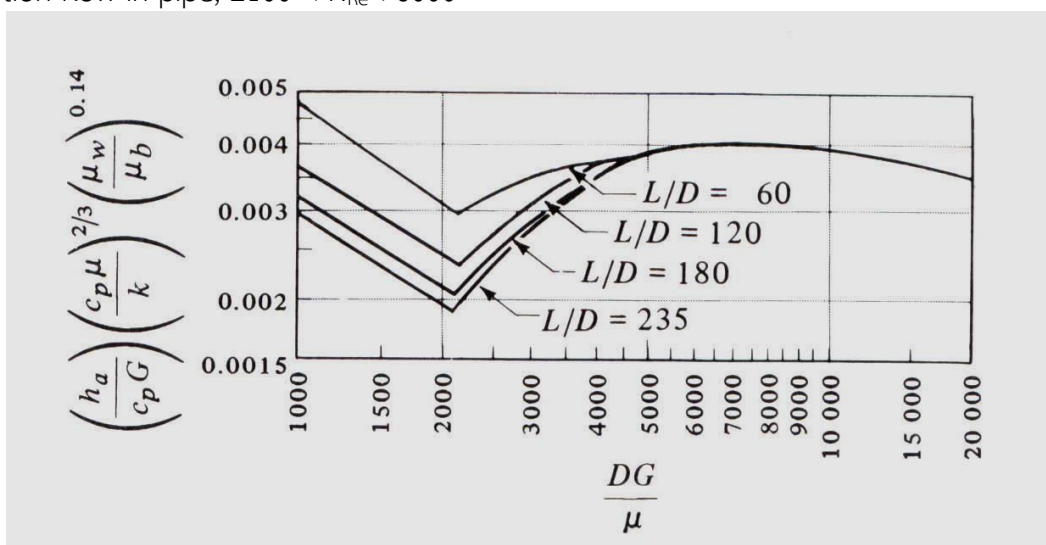
$$\frac{h}{h_L} = 1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{0.7} \quad 2 < \frac{L}{D} < 20$$

$$\frac{h}{h_L} = 1 + 6 \left(\frac{D}{L} \right) \quad 20 < \frac{L}{D} < 60$$

แล้วใช้ค่า h ในการคำนวณพลังงานความร้อน

ที่เราต้องเปลี่ยนค่า h เพราะว่าที่ทางเข้าท่อ Temperature profile จะมีค่าเปลี่ยนแปลงกับระยะทางไม่ Develop เต็มที่ ทำให้ค่า local h มีค่ามากกว่า h_L

Transition flow in pipe, $2100 < N_{Re} < 6000$



รูปที่ 4.9 การไหลนอกท่อ Flow past cylinder with axis perpendicular to flow

$$N_{Nu} = \frac{hD}{k} = C N_{Re}^m N_{Pr}^{1/3}$$

ค่า C และ m ใช้ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของสมการ

N_{Re}	m	C
1-4	0.330	0.989
4-40	0.385	0.911
40-4,000	0.466	0.683
4,000-40,000	0.618	0.193
40,000-250,000	0.805	0.0266

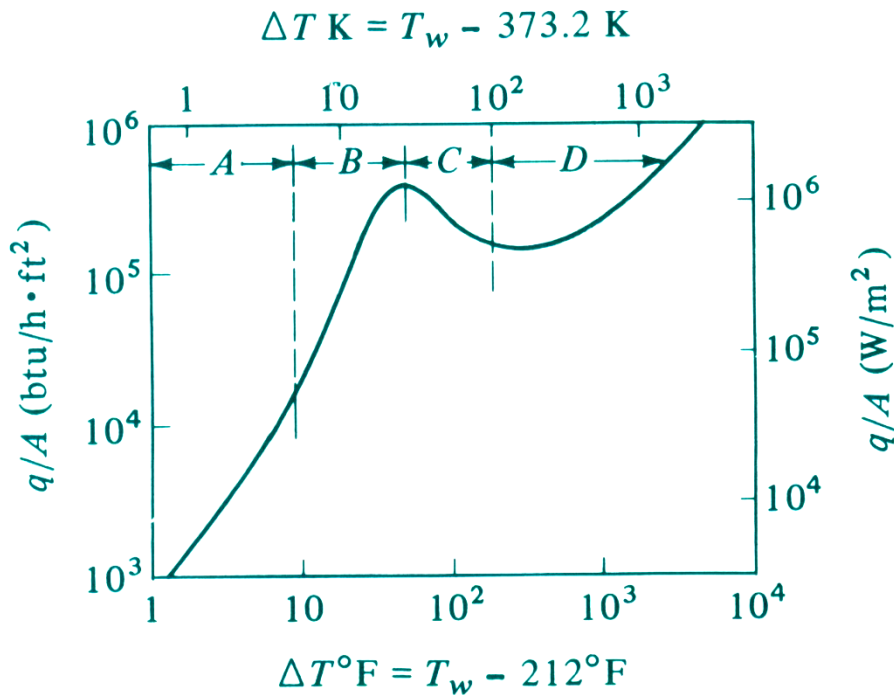
4.2.5 การพาความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ

การพาความร้อนในการเดือด

เมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวไปเรื่อยๆ จะเริ่มเกิดการกลายเป็นไอขึ้นที่ผิวหน้าของของเหลว และเมื่อของเหลวมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัวหรือสูงกว่า การกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นภายในตัวของเหลวด้วย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเดือด ซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดฟองก๊าซขึ้นบนผิวหน้าที่ได้รับความร้อน รูปที่ 4.11 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของเส้นลวดทองคำขาวกับอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ $T_w - T_s$ กับ ฟลักซ์ความร้อน q ที่พาความร้อนจากผิวหน้าเส้นลวดทองคำขาวไปสู่ น้ำ เมื่อใช้ลวดทองคำขาวที่แช่อยู่ในน้ำ ให้ความร้อน แก่น้ำภายใต้ความดัน 0.1 MPa เส้นกราฟที่แสดงลักษณะของการถ่ายเทความร้อนในการเดือดในลักษณะนี้ เรียกว่า เส้นกราฟการเดือดในรูปที่ 4.11 ก่อนที่อุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวพอสมควรนั้น การพาความร้อน โดยวิธีธรรมชาติที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจะมีสัดส่วนสูง (ช่วง A-B) เมื่อ Degree of superheat ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลว) มีค่าสูงขึ้นไปอีก ของเหลวจะเริ่มเดือด ทำให้เกิดฟองก๊าซ และจำนวนฟองดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตาม Degree of superheat ที่เพิ่มขึ้น (ช่วง B-C-D) สภาวะที่ฟองก๊าซแต่ละฟองเกิดขึ้นแล้วแยกตัวออกไป เรียกว่า Nucleate boiling ซึ่งในช่วง nucleate boiling ทั้งค่า Degree of superheat และฟลักซ์ความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะถึงจุดที่ฟลักซ์ความร้อนมีค่าสูงสุด D หลังจากนั้นหากเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ความร้อนเพื่อเพิ่ม Degree of superheat ขึ้นไปอีก อุณหภูมิที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันไปที่จุด F โดยทั่วไปจุด F จะมีอุณหภูมิสูง มักจะทำให้เส้นลวดความร้อนเองหลอมละลาย ดังนั้น จุด D จึงเรียกว่าจุด Burnout และค่าสูงสุดของฟลักซ์ความร้อนก่อนที่จะกระโดดไปที่จุด F เรียกว่า ฟลักซ์ความร้อน Burnout หากที่จุด F นี้เส้นลวดความร้อนยังไม่หลอมละลาย จะไม่เกิดปรากฏการณ์ที่ฟองก๊าซเกิดขึ้นที่พื้นผิวของเส้นลวดความร้อนแล้วแยกตัวออกไป แต่จะเกิดขึ้นฟิล์มของก๊าซที่บางมากๆ และมีเสถียรภาพห่อหุ้มอยู่รอบพื้นผิว และเกิดการกลายเป็นไอขึ้น ณ จุดที่อยู่ห่างออกไปจากพื้นผิวของเส้นลวดความร้อน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Film boiling และหากสามารถเพิ่ม degree of superheat ขึ้นไปอีก ฟลักซ์ความร้อนจะเพิ่มขึ้นในสภาพ Film boiling (ช่วง F-G) ในทางกลับกัน หากค่อยๆ ลดอุณหภูมิที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนจากจุด G ให้ Degree of superheat ลดลง เมื่อผ่านจุด F ลงมาของเหลวจะยังอยู่ในสภาวะ Film boiling ต่อไปจนถึงจุดที่ฟลักซ์ความร้อนมีค่าต่ำสุดที่จุด E ในช่วง D-E ชั้นฟิล์มของก๊าซที่ไม่มีเสถียรภาพบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน จะกลายเป็นฟองอากาศแยกตัวออกไป หลังจากนั้น

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

ของเหลวจะเข้ามาแทนที่ และเกิดขึ้นฟิล์มของก๊าซขึ้นใหม่อย่างรวดเร็ว วนเวียนไปเช่นนี้ต่อเนื่อง เรียกว่า ช่วง Transition boiling ในช่วง Nucleate boiling หรือ B-C-D เนื่องจากของเหลวซึ่งมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าก๊าซจะสัมผัสกับเส้นลวดความร้อนโดยตรง และเมื่อฟองก๊าซที่เกิดขึ้น แยกตัวออกไปจากพื้นผิวถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนที่นั้นจะทำให้ความชันของอุณหภูมิในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงมีค่าสูงมาก



กลไกการเดือดจะแบ่งออกเป็น 4 ช่วง

ช่วง A น้ำเริ่มได้รับความร้อนจากผิวหน้าโลหะที่ร้อนกว่า ฟองไอน้ำเล็กๆ เริ่มเกิด และลอยขึ้นจากผิวของโลหะสู่ผิวหน้าของน้ำ การถ่ายเทความร้อนจะเป็นแบบ Natural convection บนผิวของ slab วางแบนนอน ค่า h จะแปรตาม $\Delta T^{0.25}$

ช่วง B เริ่มเกิด Nucleate boiling เมื่อผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำกับผิวโลหะให้ความร้อนมีค่าประมาณ 5 – 25 K ที่ 1atm ฟองไอน้ำจะเกิดมากขึ้น และอัตราเร็วของฟองที่วิ่งขึ้นมาบนผิวหน้าจะเพิ่มขึ้น

Horizontal Surface (outside)

$$h = 1043 \Delta T^{1/3} \quad \frac{q}{A} < 16$$

$$h = 5.56 \Delta T^3 \quad 16 < \frac{q}{A} < 240$$

Vertical Surface (outside)

$$h = 537 \Delta T^{1/7} \quad \frac{q}{A} < 3$$

$$h = 7.95 \Delta T^3 \quad 3 < \frac{q}{A} < 63$$

แต่ถ้าในการเดือดนั้นมีการกววน หรือทำให้มี Force convection ค่า h ต้องคำนวณโดยใช้สมการ

$$h = 2.55 \Delta T^3 e^{p/1551}$$

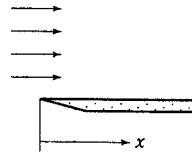
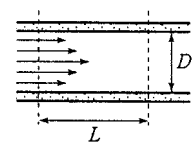
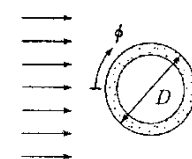
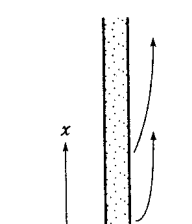
ช่วง C เป็นช่วง Transition boiling ฟองไอน้ำจะเกิดขึ้นรวดเร็วมาก และจะชนกันเอง ทำให้ฟองมีขนาดใหญ่ขึ้น บางครั้งจะใหญ่จนเกิดเป็นชั้นของไอน้ำในน้ำทำให้ขัดขวางการถ่ายเทความร้อน ยิ่งมาก จะเกิดชั้นของไอน้ำขึ้น ทำให้ q/A และ h ต่ำลง

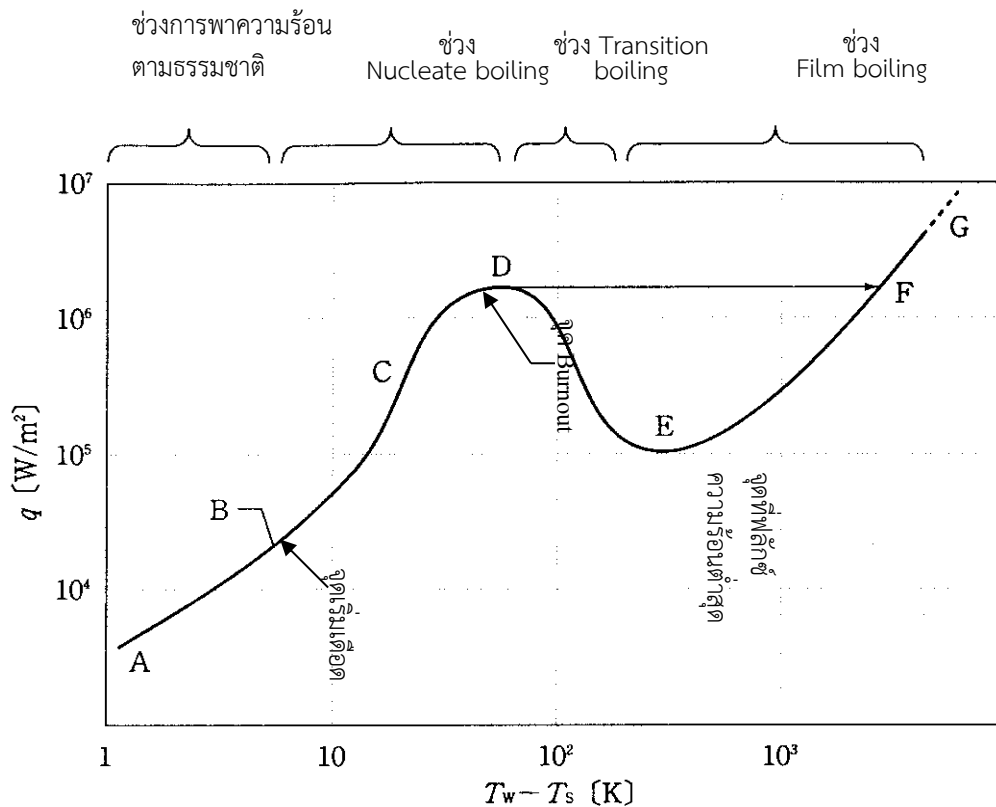
ช่วง D เป็นช่วงการเกิด Film boiling ฟองไอน้ำก้อนโตจากช่วงที่แล้ว จะเริ่มหลุดออกจากผิวเส้นลวด และลอยขึ้นสู่ผิวหน้าเร็วขึ้น และเมื่อ ΔT มากขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจากไอจะช่วยเพิ่มค่า q/A

ค่า h ในช่วง film boiling จะคำนวณได้จากสมการ

$$h = 0.62 \left[\frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0.4 c_{pv} \Delta T)}{D \mu_v \Delta T} \right]^{1/4}$$

ตารางที่ 4.3 รูปแบบการไหลที่สำคัญ และสมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อน

รูปแบบการไหล		สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อน		หมายเหตุ		
การไหลผ่านวัสดุแผ่นเรียบ 	การไหลราบเรียบ	$Nu_x = 0.332 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$	อุณหภูมิเฉลี่ย	$0.6 < Pr$	Nusselt number เฉลี่ยตั้งแต่ขอบนำของแผ่นวัตถุจนถึงระยะทาง x เท่ากับ $Nu_m = 2 Nu_x$	ในการคำนวณ Re_x จะใช้ความเร็วของกระแสหลัก สัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ และระยะทาง x จากขอบแผ่นวัตถุเป็นความยาวเฉลี่ย
		$Nu_x = \frac{0.564}{1 + 0.90 Pr^{\frac{1}{2}}} Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$		$0.006 < Pr < 0.03$		
	การไหล	$Nu_x = \frac{0.0296 Re_x^{0.8} Pr}{1 + B Re_x^{-0.1} (Pr - 1)}$	B เป็นฟังก์ชันของ Pr และถ้า $0.5 < Pr < 5.0$ แล้ว $B = 1.58 Pr^{-\frac{1}{5}}$			
การไหลภายในท่อกลม 	การไหลปั่นป่วน	$Nu_x = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}}$ (สมการของ Colburn)	อุณหภูมิที่ท่อด้านในสม่ำเสมอ	$10^4 < Re_d < 1.2 \times 10^5$ $0.7 < Pr < 120$	การไหลที่เร่งความเร็วมาแล้วจนมีความเร็วคงที่ $Re_d = (u_m \cdot D) / \nu$ u_m : ความเร็วเฉลี่ยหน้าตัด D : เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะสอดคล้องกับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม ΔT_m ที่ทางเข้า-ออกช่วงระยะทางที่สนใจ $q = h_m \Delta T_m$ $= \left(\frac{\lambda}{D} Nu_m \right) \Delta T_m$ $Q = \pi D L q$
		$Nu_x = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$ (สมการของ Sieder-Tate)		นำสมการของ Colburn มาชดเชยผลของความหนืด		
การไหลปะทะท่อกลม (เสากลม) 		$Nu_x = 1.14 Re_d^{\frac{1}{4}} Pr^{0.4} \left\{ 1 - \left(\frac{\phi}{90} \right)^3 \right\}$	อุณหภูมิที่ท่อด้านนอก	$0.5 < Pr < 5, \phi < 80^\circ$ ϕ เป็นมุมจากจุดยอดที่กวาดตามทิศทางการไหล $10^3 < Re_d < 5 \times 10^4$	สมบัติทางกายภาพใดๆ ของวัตถุให้ใช้ค่า ณ อุณหภูมิชั้นของไหล	$Re_d = (u_\infty \cdot D) / \nu$ u_∞ : ความเร็วกระแสหลัก D : เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
		$Nu_x = 0.27 Re_d^{0.6} Pr^{\frac{1}{3}}$				
การไหลตามวัสดุแผ่นเรียบวางตั้ง 	การไหลราบเรียบ	$Nu_x = 0.478 (Gr_x Pr)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{\frac{1}{4}}$	อุณหภูมิผนัง	$10^4 < Gr, Pr < 10^9$	สมบัติทางกายภาพใดๆ ของวัตถุให้ใช้ค่า ณ อุณหภูมิชั้นของไหล	Nusselt number เฉลี่ยตั้งแต่ขอบแผ่นวัตถุจนถึงระยะทาง x เท่ากับ $Nu_m = \frac{4}{3} Nu_x$
	การไหลปั่นป่วน	$Nu_x = 0.59 (Gr_x Pr)^{\frac{1}{4}}$				
		การไหลปั่นป่วน	$Nu_x = 0.0302 Gr_x^{\frac{1}{2}} \frac{Pr^{\frac{2}{5}}}{(1 + 0.494 Pr^{\frac{2}{5}})^{\frac{1}{4}}}$			



รูปที่ 4.11 เส้นกราฟการเดือด (ตัวอย่างในกรณีที่ของเหลวได้แก่น้ำ)

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในช่วง Nucleate boiling จะขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซอย่างมาก ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนจึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ อย่างซับซ้อน เช่น รูปร่างของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ลักษณะของพื้นผิว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการเดือดแบบ Nucleate boiling โดยทั่วไปส่วนมากแล้วความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อน q กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_b จะใกล้เคียงกับสมการต่อไปนี้โดยประมาณ

$$q \propto (T_w - T_s)^n, \quad h_b \propto (T_w - T_s)^{n-1}, \quad n = 3 \sim 4 \quad (4.33)$$

นอกจากนี้ ในกรณีของน้ำภายใต้ความดันบรรยากาศ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนใกล้ๆ กับจุด Burnout จะมีค่าประมาณ $60 \text{ [kW/(m}^2 \cdot \text{K)]}$ แต่ในการเดือดแบบ Film boiling เนื่องจากชั้นฟิล์มของไอน้ำที่ปกคลุมพื้นผิวถ่ายเทความร้อนจะกลายเป็นฉนวนความร้อนที่มีความต้านทานสูง ดังนั้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงมีค่าต่ำ ในกรณีของน้ำภายใต้ความดันบรรยากาศจะมีค่าประมาณ $1 \text{ [kW/(m}^2 \cdot \text{K)]}$ เท่านั้น

อนึ่ง ในกรณีที่ให้ความร้อนแก่ของเหลวในภาชนะที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ การเดือดในกรณีที่กระแสน้ำที่เกิดขึ้นในของเหลวเป็นการพาความร้อนตามธรรมชาติ จะเรียกว่า Pool boiling แต่ถ้ามีการบังคับให้ของเหลวให้ไหลตามพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้วยปั๊มหรืออุปกรณ์อื่นๆ จะเรียกว่า Forced convection boiling นอกจากนี้ การเดือดที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของของเหลวเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัว เรียกว่า Saturated boiling และการเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว เรียกว่า Sub-cooled boiling ในกรณีนี้ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลวกับอุณหภูมิจริงๆ ของของเหลว เรียกว่า Degree of sub-cool ในการเดือดแบบ Sub-cool boiling แม้ว่าจะเกิดฟองก๊าซขึ้นที่พื้นผิวให้ความร้อน แต่เนื่องจากอุณหภูมิของของเหลวรอบๆ มีค่าต่ำ

ฟองก๊าซจะไม่ขยายตัวใหญ่ขึ้น ส่วนมากระหว่างที่ฟองลอยขึ้นไปในของเหลว มักจะควบแน่นกลับเป็นของเหลวและหายไป

การพาความร้อนในการควบแน่น

เมื่อก๊าซสัมผัสกับพื้นผิวเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ก๊าซจะควบแน่นบนพื้นผิวนั้น หากพื้นผิวเย็นไม่ได้เป็นพื้นผิวราบ ของเหลวที่เกิดขึ้นจะไหลลงไปตามพื้นผิวเย็นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ในกรณีนี้เราสามารถแบ่งการถ่ายเทความร้อนออกได้เป็น 2 รูปแบบ รูปแบบแรกได้แก่กรณีที่ของเหลวควบแน่นเปียกกระจายทั่วพื้นผิวเย็น โดยของเหลวควบแน่นจะแผ่เป็นชั้นบางๆ บนพื้นผิวเย็น และไหลไปในทิศทางตามแรงโน้มถ่วงโลก ส่วนก๊าซที่เหลือก็อาจควบแน่นอยู่บนชั้นของเหลวบางๆ นั้นต่อไป รูปแบบนี้เรียกว่า Film-wise condensation รูปแบบที่สองได้แก่กรณีที่พื้นผิวเย็นเปียกได้ยาก ของเหลวควบแน่นจะไม่แผ่กระจายเป็นชั้นบางๆ แต่จะควบแน่นเป็นหยดของเหลวจำนวนมากด้วยแรงตึงผิว หยดของเหลวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ด้วยการควบแน่น หรือหยดเล็กๆ หลายๆ หยดอาจรวมกันเป็นหยดใหญ่ และเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นถึงระดับหนึ่งก็ไหลตกลงไปด้วยแรงโน้มถ่วง รูปแบบนี้เรียกว่า drop-wise condensation

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของทั้ง 2 รูปแบบข้างต้น Drop-wise condensation จะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่า film-wise condensation ค่อนข้างมาก กล่าวกันว่าสูงประมาณ 6 เท่า สำหรับ Drop-wise condensation เมื่อหยดของเหลวไหลตกลงไปนั้น จะทำให้พื้นผิวเย็นที่มันเคยอยู่กลายเป็นที่ว่าง และพื้นผิวเย็นจะสัมผัสกับก๊าซโดยตรง หรือเมื่อหยดเล็กๆ รวมตัวกัน พื้นผิวเย็นก็เล็กๆ หยดของเหลวจะเปิดโล่งสัมผัสกับก๊าซโดยตรง ไม่ว่าในกรณีใด พื้นผิวที่สัมผัสกับก๊าซโดยตรงหรือมีชั้นของเหลวที่บางมากๆ ปกคลุมอยู่ จะมีการถ่ายเทความร้อนเร็วกว่าพื้นผิวที่มีชั้นของเหลวปกคลุมอยู่หนา คาดว่านี่เป็นสาเหตุที่ทำให้ Drop-wise condensation มีอัตราการพาความร้อนสูงกว่า

4.3 การแผ่รังสี

4.3.1 การแผ่รังสีความร้อน การแผ่รังสีจากวัตถุดำ

การแผ่รังสีหมายถึงปรากฏการณ์ที่วัตถุปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่และดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุจะทำให้เกิดการสั่นเนื่องจากความร้อนของอะตอมหรือโมเลกุลภายในตัววัตถุ ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญในการแผ่รังสีความร้อนมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $0.3\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ กล่าวคืออยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ถึงช่วงรังสีอินฟราเรด โดยทั่วไปเมื่อรังสีความร้อนกระทบกับวัตถุ ส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านไป โดยสัดส่วนของแต่ละส่วนเรียกว่า ค่าการดูดกลืน (Absorptivity) α ค่าการสะท้อน (Reflectivity) ρ และค่าการทะลุผ่าน (Transmissivity) τ

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.34)$$

วัสดุที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมโดยมากมักจะมี τ เท่ากับศูนย์ ส่วนก๊าซจะมี α และ ρ ต่ำมาก แต่มี τ เกือบเท่ากับ 1 ในการพิจารณาการแผ่รังสี ถ้าเราสมมติว่ามีวัตถุในอุดมคติที่มี $\rho = \tau = 0$, $\alpha = 1$ กล่าวคือวัตถุนั้นจะดูดกลืนรังสีความร้อนที่เข้ามากระทบทุกความยาวคลื่นอย่างสมบูรณ์ ไม่สะท้อนหรือปล่อยให้ทะลุผ่านไป วัตถุนี้เรียกว่า วัตถุดำ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำเรียกว่า การแผ่รังสีจากวัตถุดำ ซึ่งเป็น

พื้นฐานในการพิจารณาการแผ่รังสีจากวัตถุต่างๆ โดยในจำนวนการแผ่รังสีจากวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิหนึ่งๆ การแผ่รังสีจากวัตถุดำจะมีพลังงานสูงที่สุด

พลังงานการแผ่รังสีทั้งหมด E ที่ปลดปล่อยออกมาจากวัตถุหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า Radioactivity ในจำนวนพลังงานเหล่านั้น พลังงานที่มีความยาวคลื่นระหว่าง λ ถึง $\lambda + d\lambda$ จะเขียนแทนด้วย $E_\lambda d\lambda$ โดย E_λ เรียกว่า Single color radioactivity โดย Single color radioactivity ของวัตถุดำ $E_{b\lambda}$ ที่อุณหภูมิ T [K] สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (กฎของ Plank)

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (4.35)$$

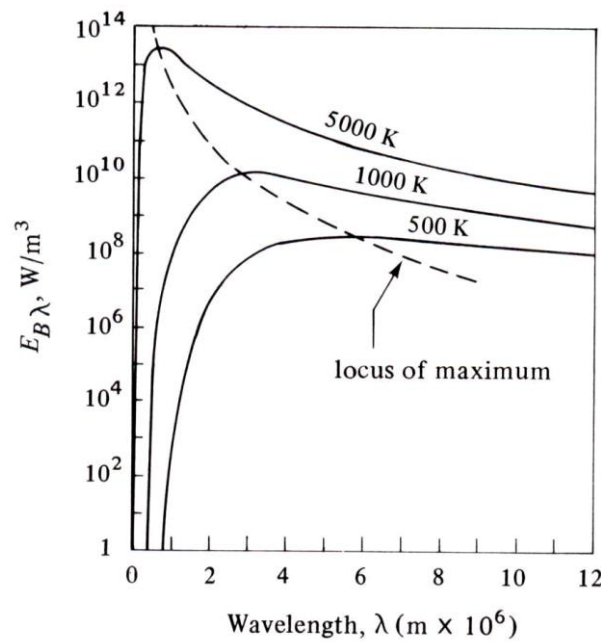
ในที่นี้ C_1 และ C_2 เรียกว่า ค่าคงที่ที่ 1 และที่ 2 ของ Plank ตามลำดับ ประเด็นสำคัญของกฎของ Plank คือ ในการแผ่รังสีจากวัตถุดำ “เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานของการแผ่รังสีความร้อนจะสูงขึ้นเป็นฟังก์ชันยกกำลัง” “เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความยาวคลื่น ($\lambda_{\max}$) ที่มี single color radioactivity จะมีความยาวคลื่นลดลง” ประเด็นหลังนี้ เรียกว่า Wien's displacement law ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้ (จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (4.35))

$$\lambda_{\max} T = C_3, \quad C_3 = 2.90 \times 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{K]} \quad (4.36)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.35) มาอินทิเกรตด้วยความยาวคลื่น λ จะได้พลังงานการแผ่รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุดำทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทาง E_b [W/m²] ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา (Total radioactivity) เท่ากับ

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W / (m}^2 \cdot \text{K}^4)] \quad (4.37)$$

กล่าวคือ Total radioactivity จากพื้นผิววัตถุดำ E_b จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น และจะแปรผันตามกำลัง 4 ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ สมการที่ (4.37) ข้างต้น เรียกว่า กฎของ Stefan-Boltzman ซึ่งเป็นสมการที่สำคัญมาก ค่าคงที่ของการแปรผัน σ เรียกว่า ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman



รูปที่ 4.12 พลังงานการแผ่รังสีของ Blackbody

4.3.2 Emissivity วัสดุสีเทา กฎของ Kirchhoff

การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุทั่วไปจะแตกต่างจากการแผ่รังสีจากวัตถุดำ โดย Single color radioactivity จะไม่เป็นไปตามกฎของ Plank ดังนั้น เพื่อให้สามารถพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุทั่วไปได้สะดวกขึ้น เราจึงใช้วิธีแสดงอัตราส่วนระหว่าง radioactivity ของวัตถุนั้นต่อ radioactivity ของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุนั้น

$$E_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} E_{b\lambda}, \quad E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (4.38)$$

ในที่นี้ ϵ_{λ} เรียกว่า Single color emissivity และ ϵ เรียกว่า Total emissivity (หรือ Emissivity) ในวัตถุทั่วไป ค่า ϵ_{λ} จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ ดังนั้น ϵ จึงไม่จำเป็นต้องคงที่เสมอไป นอกจากนี้ ความเข้มของรังสีความร้อนของแผ่รังสีจากวัตถุดำ ยังมีค่าคงที่สม่ำเสมอทุกทิศทาง (สมบัตินี้เรียกว่าพื้นผิวแผ่รังสีสม่ำเสมอทุกทิศทาง) แต่ในวัตถุทั่วไปความเข้มของการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับทิศทางของการแผ่รังสีด้วย ในที่นี้จะสมมติว่ามีวัตถุที่มีค่า ϵ_{λ} คงที่ทุกความยาวคลื่น และค่า ϵ ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และมีสมบัติพื้นผิวแผ่รังสีสม่ำเสมอทุกทิศทาง เรียกว่า วัสดุสีเทา หากเราสามารถถือว่าวัตถุใดๆ เป็นวัสดุสีเทาได้แล้ว ก็จะสามารถคำนวณ Total radioactivity ได้อย่างง่ายดายโดยใช้สมการ (4.38) ส่วนมากพื้นผิวออกไซด์ของโลหะหรือพื้นผิวของโลหะต่างๆ จะสามารถถือว่าเป็นวัสดุสีเทาได้ นอกจากนี้ วัตถุทั่วไปอื่นๆ หากใช้ค่าเฉลี่ยของ emissivity ในช่วงอุณหภูมิใดช่วงหนึ่ง ก็มักจะสมมติว่าเป็นวัสดุสีเทาโดยประมาณได้

Absorptivity ของพลังงานที่แผ่รังสีให้แก่วัตถุที่มีความยาวคลื่นระหว่าง λ ถึง $\lambda + d\lambda$ เรียกว่า Single color absorptivity α_{λ} สมบัติที่สำคัญระหว่าง Emissivity กับ Absorptivity ของวัตถุ ได้แก่ “ไม่ว่าในวัตถุใดๆ Single color radioactivity กับ Single color absorptivity จะมีค่าเท่ากันเสมอ” กฎนี้เรียกว่า กฎของ Kirchhoff กรณีที่วัตถุใดๆ สามารถพิจารณาว่าเป็นวัสดุสีเทาได้นั้น เนื่องจาก ϵ_{λ} ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น และ ϵ มีค่าคงที่ ดังนั้น $\epsilon = \alpha$

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการแผ่รังสีที่พื้นผิวแบบต่าง ๆ

Emissivity of Selected Surfaces Total, Normal (n) or Hemispherical (h)

TABLE A-18

Emissivities of surfaces

(a) Metals

Material	Temperature, K	Emissivity, ε	Material	Temperature, K	Emissivity, ε
Aluminum			Magnesium, polished	300–500	0.07–0.13
Polished	300–900	0.04–0.06	Mercury	300–400	0.09–0.12
Commercial sheet	400	0.09	Molybdenum		
Heavily oxidized	400–800	0.20–0.33	Polished	300–2000	0.05–0.21
Anodized	300	0.8	Oxidized	600–800	0.80–0.82
Bismuth, bright	350	0.34	Nickel		
Brass			Polished	500–1200	0.07–0.17
Highly polished	500–650	0.03–0.04	Oxidized	450–1000	0.37–0.57
Polished	350	0.09	Platinum, polished	500–1500	0.06–0.18
Dull plate	300–600	0.22	Silver, polished	300–1000	0.02–0.07
Oxidized	450–800	0.6	Stainless steel		
Chromium, polished	300–1400	0.08–0.40	Polished	300–1000	0.17–0.30
Copper			Lightly oxidized	600–1000	0.30–0.40
Highly polished	300	0.02	Highly oxidized	600–1000	0.70–0.80
Polished	300–500	0.04–0.05	Steel		
Commercial sheet	300	0.15	Polished sheet	300–500	0.08–0.14
Oxidized	600–1000	0.5–0.8	Commercial sheet	500–1200	0.20–0.32
Black oxidized	300	0.78	Heavily oxidized	300	0.81
Gold			Tin, polished	300	0.05
Highly polished	300–1000	0.03–0.06	Tungsten		
Bright foil	300	0.07	Polished	300–2500	0.03–0.29
Iron			Filament	3500	0.39
Highly polished	300–500	0.05–0.07	Zinc		
Case iron	300	0.44	Polished	300–800	0.02–0.05
Wrought iron	300–500	0.28	Oxidized	300	0.25
Rusted	300	0.61			
Oxidized	500–900	0.64–0.78			
Lead					
Polished	300–500	0.06–0.08			
Unoxidized, rough	300	0.43			
Oxidized	300	0.63			

TABLE A-18

Emissivities of surfaces (Concluded)

(b) Nonmetals

Material	Temperature, K	Emissivity, ε	Material	Temperature, K	Emissivity, ε
Alumina	800–1400	0.65–0.45	Paper, white	300	0.90
Aluminum oxide	600–1500	0.69–0.41	Plaster, white	300	0.93
Asbestos	300	0.96	Porcelain, glazed	300	0.92
Asphalt pavement	300	0.85–0.93	Quartz, rough, fused	300	0.93
Brick			Rubber		
Common	300	0.93–0.96	Hard	300	0.93
Fireclay	1200	0.75	Soft	300	0.86
Carbon filament	2000	0.53	Sand	300	0.90
Cloth	300	0.75–0.90	Silicon carbide	600–1500	0.87–0.85
Concrete	300	0.88–0.94	Skin, human	300	0.95
Glass			Snow	273	0.80–0.90
Window	300	0.90–0.95	Soil, earth	300	0.93–0.96
Pyrex	300–1200	0.82–0.62	Soot	300–500	0.95
Pyroceram	300–1500	0.85–0.57	Teflon	300–500	0.85–0.92
Ice	273	0.95–0.99	Water, deep	273–373	0.95–0.96
Magnesium oxide	400–800	0.69–0.55	Wood		
Masonry	300	0.80	Beech	300	0.94
Paints			Oak	300	0.90
Aluminum	300	0.40–0.50			
Black, lacquer, shiny	300	0.88			
Oils, all colors	300	0.92–0.96			
Red primer	300	0.93			
White acrylic	300	0.90			
White enamel	300	0.90			

4.3.3 การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุดำ

ต่อไปนี้จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุดำ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิ T_1 [K] มีพื้นที่ A_1 [m²] กับพื้นผิวของวัตถุดำ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิและพื้นที่เท่ากับ T_1 [K] และ A_2 [m²] ตามลำดับ พลังงานทั้งหมดจากการแผ่รังสีในทุกทิศทางจากพื้นผิว A_1 จะเท่ากับ $E_{b1}A_1 (= \sigma T_1^4 A_1)$ ในจำนวนนั้น ถ้าให้อัตราส่วนของพลังงานที่แผ่รังสีให้พื้นผิว A_2 โดยตรงเท่ากับ F_{12} แล้ว พลังงานที่แผ่รังสีให้แก่พื้นผิว A_2 จะเท่ากับ $E_{b1}A_1F_{12} (= \sigma T_1^4 A_1F_{12})$ ค่า F_{12} เรียกว่า View factor จาก A_1 ไปยัง A_2 ในทำนองเดียวกัน ถ้าให้ View factor จาก A_2 ไปยัง A_1 เท่ากับ F_{21} แล้ว พลังงานจากพื้นผิว A_2 ที่แผ่รังสีให้แก่พื้นผิว A_1 จะเท่ากับ $E_{b2}A_2F_{21} (= \sigma T_2^4 A_2F_{21})$ ดังนั้น ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสี Q_{12} จากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 (พลังงานสุทธิที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิวทั้งสอง) จะเท่ากับ

$$Q_{12} = E_{b1}A_1F_{12} - E_{b2}A_2F_{21} \quad (4.39)$$

สำหรับค่า View factor เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างพื้นผิวทั้งสอง และมีความสัมพันธ์

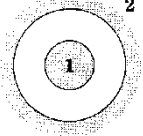
$$A_1F_{12} = A_2F_{21} \quad (4.40)$$

ดังนั้น ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสี Q_{12} จากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 จึงเท่ากับ

$$\begin{aligned} Q_{12} &= (E_{b1} - E_{b2}) A_1F_{12} = \sigma(T_1^4 - T_2^4) A_1F_{12} \\ &= (E_{b1} - E_{b2}) A_2F_{21} = \sigma(T_1^4 - T_2^4) A_2F_{21} \end{aligned} \quad (4.41)$$

นั่นเองตาราง 4.3 จะแสดง view factor ระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่สำคัญในการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี

ตารางที่ 4.5 View factor ระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่สำคัญ

	ลักษณะพื้นผิว	view factor
I	 1 2 แผ่นวัตถุเรียบ	$F_{12} = F_{21} = 1$
II	 2 1 มีวัตถุ 1 ซึ่งพื้นผิวไม่มีส่วนเว้า ถูกปิดล้อมไว้ด้วยวัตถุ 2 อย่างสมบูรณ์ พลังงานที่แผ่รังสีจาก 1 จะแผ่ไปถึง 2 ทั้งหมด $F_{21} = \frac{A_1}{A_2} F_{12} = \frac{A_1}{A_2}$	$F_{12} = 1$ $F_{21} = \frac{A_1}{A_2}$
II I	 2 1 มีเสากลม (หรือท่อกลม) 1 อยู่ในท่อ กลม 2 โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด เดียวกัน (เหมือน II ข้างต้น)	$F_{12} = 1$ $F_{21} = \frac{A_1}{A_2}$

4.3.4 การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุสีเทา 2 อัน

การแผ่รังสีจากพื้นผิวอื่นที่มาตกกระทบบางส่วนหนึ่ง และสะท้อนอีกส่วนหนึ่งอีกด้วย ดังนั้น พื้นผิวของวัตถุจึงไม่ได้ปลดปล่อยพลังงานการแผ่รังสีของตัวเองเท่านั้น แต่ยังปลดปล่อยพลังงานการแผ่รังสีจากพื้นผิวอื่นที่มาตกกระทบบ และถูกสะท้อนออกไปอีกด้วย (สำหรับวัตถุดำ เนื่องจากวัตถุดำจะดูดกลืนพลังงานที่แผ่รังสีจากพื้นผิวอื่นทั้งหมด พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีแต่พลังงานการแผ่รังสีความร้อนของตัวเองเท่านั้น) พื้นผิวอื่นจึงได้รับพลังงานการแผ่รังสีเหล่านี้ด้วย View factor ดังนั้น การคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุทั่วไปจึงมีความซับซ้อนกว่าในกรณีของวัตถุดำ อย่างไรก็ตาม กรณีที่พื้นผิวทั้งสองเป็นวัตถุสีเทานั้น View factor ระหว่างพื้นผิวทั้งสองจะเท่ากับกรณีของวัตถุดำทุกประการ (การแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิววัตถุสีเทาไม่มีทิศทางเฉพาะ แต่จะแผ่รังสีสม่ำเสมอทุกทิศทางเหมือนกับวัตถุดำ)

เนื่องจากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิววัตถุหลายอันมีความยุ่งยาก ดังนั้น จึงจะพิจารณาเฉพาะกรณีของพื้นผิววัตถุ 2 อันที่สอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้ และหาสมการในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวทั้งคู่นั้น

- * วัตถุ 1 และ 2 สามารถพิจารณาว่าเป็นวัตถุสีเทาได้ และวัตถุทั้งคู่มีอุณหภูมิที่พื้นผิวสม่ำเสมอ
- * พื้นผิววัตถุ 1 ไม่มีส่วนเว้า (กล่าวคือ พลังงานที่แผ่รังสีออกจากวัตถุ 1 จะไม่ตกกระทบบนวัตถุ 1 เองโดยตรง แต่ต้องไปสะท้อนที่พื้นผิว 2 ก่อนเสมอ)
- * การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี จะเกิดขึ้นระหว่างวัตถุ 1 และ 2 เท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก และไม่มีการดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสีความร้อนระหว่างช่องว่างระหว่างวัตถุ

กล่าวคือ เงื่อนไขที่สอดคล้องกับ I, II หรือ III ในตารางที่ 4.3 นั้นเอง

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่แผ่ออกจากและตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ 1 (อุณหภูมิ T_1 [K] พื้นที่ A_1 [m²] Emissivity ϵ_1) และพื้นผิวของวัตถุ 2 (อุณหภูมิ T_2 [K] พื้นที่ A_2 [m²] Emissivity ϵ_2) แล้ว จะได้สมการแสดงปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสี Q_{12} จากวัตถุ 1 ไปยังวัตถุ 2 ดังต่อไปนี้

$$Q_{12} = \frac{\sigma T_1^4 A_1 - \sigma T_2^4 A_2 F_{21}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) F_{21}} \quad [\text{W}], \quad \frac{Q_{21}}{A_1} = \frac{\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 \left(\frac{A_2}{A_1}\right) F_{21}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) F_{21}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.42)$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$$

ดังนั้น เนื่องจากในกรณี I ในตารางที่ 4.3 นั้น $A_1 = A_2$, $F_{21} = 1$ และในกรณี II และ III นั้น $F_{21} = A_1 / A_2$ ดังนั้น ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสี Q_{12} จากวัตถุ 1 ไปยังวัตถุ 2 ในแต่ละกรณีจึงเท่ากับ

(1) : กรณีของแผ่นวัตถุขนาดใหญ่ 2 แผ่น (มีพื้นที่เท่ากัน)

$$\frac{Q_{21}}{A_1} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad (4.43)$$

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

(2) : กรณีที่พื้นผิวไม่มีส่วนเว้า 1 ถูกปิดล้อมด้วยพื้นผิว 2 อย่างสมบูรณ์

$$\frac{Q_{21}}{A_1} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \frac{A_1}{A_2}} \quad (4.44)$$

(ทั้งนี้ กรณีที่ช่องว่างระหว่างพื้นผิวมีขนาดเล็กเพียงพอ ($A_1 = A_2$) จะเหมือนกับสมการที่ (4.43))

(3): กรณีที่พื้นผิวไม่มีส่วนเว้า 1 ถูกปิดล้อมด้วยพื้นผิว 2 ซึ่งมีขนาดใหญ่เพียงพอ ($A_1 < A_2$) อย่างสมบูรณ์

$$\frac{Q_{21}}{A_1} = \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.45)$$

นอกจากนี้ กรณีที่สามารถพิจารณาว่าทั้งวัตถุ 1 และ 2 เป็นวัตถุดำ ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$) ตั้งแต่ข้อ (1)–(3) จะกลายเป็น

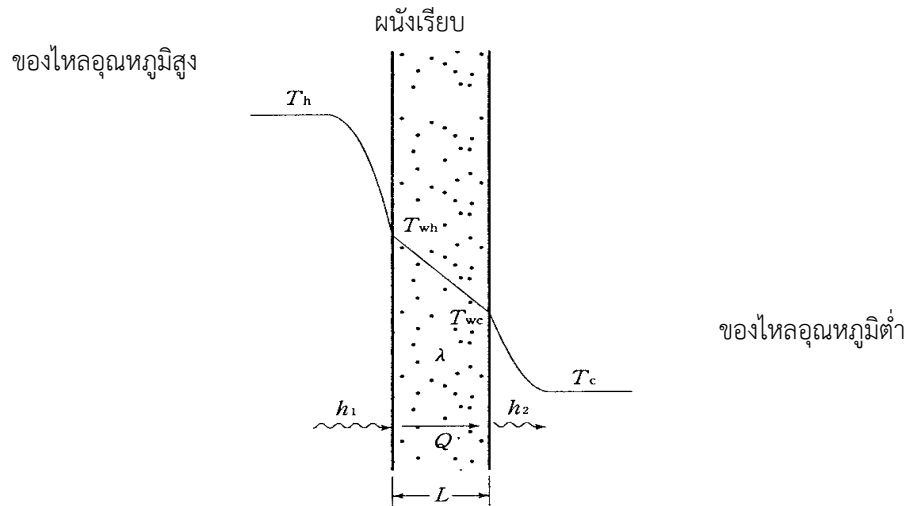
$$\frac{Q_{21}}{A_1} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.46)$$

4.4 การแลกเปลี่ยนความร้อน

ในจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อน อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้ และรับพลังงานความร้อน (แลกเปลี่ยนความร้อน) ระหว่างของไหลที่ทำหน้าที่ขนถ่ายความร้อน (ตัวกลางความร้อน) เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) โดยทั่วไป ความร้อนจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทเข้ามาสะสมอยู่ในผนังของแข็ง ด้วยการพาความร้อน และความร้อนจะถ่ายเทภายในผนังของแข็งด้วยการนำความร้อน และถ่ายเทสู่ตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำอีกด้านหนึ่งของผนังของแข็งด้วยการพาความร้อน การถ่ายเทของความร้อนนี้เมื่อพิจารณารวมทั้งหมดจะ เรียกว่า overall heat transmission

4.4.1 Overall heat transmission resistance และ Coefficient of overall heat transmission

ต่อไปนี้จะพิจารณารูปแบบที่พื้นฐานที่สุด ได้แก่ การถ่ายเทของความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงผ่านผนังเรียบไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.13 Overall heat transmission ของผนังเรียบ

ถ้าให้ของไหลอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิ T_h ของไหลอุณหภูมิต่ำมีอุณหภูมิ T_c ผนังด้านที่สัมผัสกับของไหลอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิ T_{wh} ผนังด้านที่สัมผัสกับของไหลอุณหภูมิต่ำมีอุณหภูมิ T_{wc} ให้สัมพันธ์การพาความร้อนระหว่างของไหลอุณหภูมิสูงกับพื้นผิวผนัง และระหว่างของไหลอุณหภูมิต่ำกับพื้นผิวผนังเท่ากับ h_1 และ h_2 ตามลำดับ และให้สัมพันธ์การนำความร้อนของผนังเท่ากับ λ ในกรณีนี้ ถ้าให้ความหนาของผนังเรียบเท่ากับ ℓ และให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังพื้นที่ A ต่อหนึ่งหน่วยเวลาเท่ากับ Q แล้ว

$$Q = h_1 A (T_h - T_{wh}), \quad Q = \frac{\lambda A}{\ell} (T_{wh} - T_{wc}), \quad Q = h_2 A (T_{wc} - T_c)$$

ดังนั้น จากสมการเหล่านี้

$$\begin{aligned} \frac{Q}{h_1 A} + \frac{Q}{\left(\frac{\lambda A}{\ell}\right)} + \frac{Q}{h_2 A} &= (T_h - T_{wh}) + (T_{wh} - T_{wc}) + (T_{wc} - T_c) = (T_h - T_c) \\ Q &= \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\ell}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}} \end{aligned}$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{T_h - T_c}{R}, \quad R = \frac{1}{h_1 A} + \frac{\ell}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (4.47)$$

กล่าวคือเราสามารถคิดได้ว่า Overall heat transmission เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ $(T_h - T_c)$ และมีความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (overall heat transmission resistance) เท่ากับ R นั้นเอง และค่า Overall heat transmission resistance ของทั้งระบบ จะเท่ากับผลบวกของความต้านทานการพาความร้อน และความต้านทานการนำความร้อนในแต่ละส่วน

$$(\text{Overall heat transmission}) = \frac{\{(\text{อุณหภูมิของไหลอุณหภูมิสูง}) - (\text{อุณหภูมิของไหลอุณหภูมิต่ำ})\}}{(\text{Overall heat transmission resistance})}$$

$$(\text{Overall heat transmission resistance}) = \sum (\text{ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนแต่ละส่วน})$$

ส่วนกลับของผลคูณของ Overall heat transmission resistance กับพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน A เรียกว่า coefficient of overall heat transmission K ซึ่งจากสมการ (4.47) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$(\text{Overall heat transmission}) = (\text{coefficient of overall heat transmission}) \times (\text{พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน}) \times \{(\text{อุณหภูมิของไหลอุณหภูมิสูง}) - (\text{อุณหภูมิของไหลอุณหภูมิต่ำ})\}$$

$$Q = KA (T_h - T_c), \quad K = \frac{1}{RA} \quad (4.48)$$

ในกรณีที่ผนังระหว่างของไหลอุณหภูมิสูงกับของไหลอุณหภูมิต่ำเป็นแผ่นวัสดุหลายชั้น เนื่องจากความต้านทานการนำความร้อน $R_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i A} \right)$ ดังนั้น Overall heat transmission resistance R จึงเท่ากับ

$$R = \frac{1}{h_1 A} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\ell_i}{\lambda_i A} \right) + \frac{1}{h_2 A} \quad (4.49)$$

นอกจากนี้ Overall heat transmission resistance R ในกรณีที่ผนังกันเป็นท่อกลมหลายชั้นที่มีความยาว L จะเท่ากับ

$$R = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2\pi \lambda_i L} \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \right\} + \frac{1}{2\pi r_{n+1} L h_2} \quad (4.50)$$

(กรณีที่ผนังเป็นท่อกลมชั้นเดียว ให้แทนค่าในสมการข้างต้นด้วย $n = 1$)

4.4.2 พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนที่มีพื้นที่เพิ่มขึ้น (พื้นผิวมีครีบ)

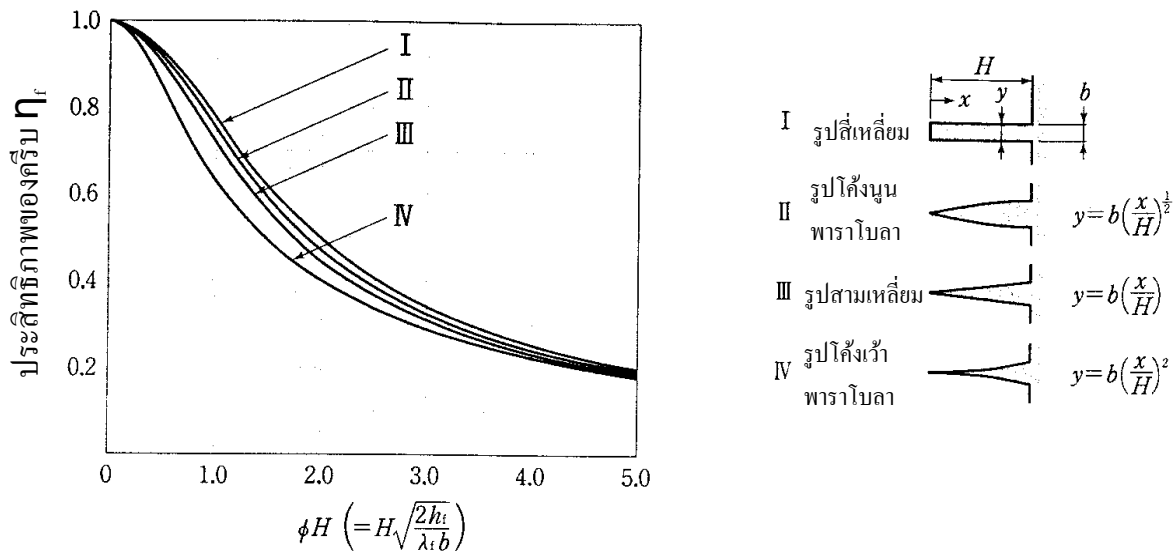
กรณีที่ของไหลด้านหนึ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นก๊าซ และอีกด้านหนึ่งเป็นของเหลว โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านก๊าซจะมีค่าต่ำกว่าด้านของเหลวมาก ในกรณีเช่นนี้ เรามักจะติดตั้งครีบบานจำนวนมากที่ผนังด้านที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำกว่า เพื่อเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อน และลดความต้านทานการถ่ายเทความร้อน พื้นผิวแบบนี้เรียกว่า พื้นผิวมีครีบ ซึ่งหากอุณหภูมิพื้นผิวของครีบบานมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของผนังที่ติดตั้งครีบแล้ว ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนก็จะลดลงในสัดส่วนเดียวกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว ภายในครีบบานจะมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน ความต้านทานจึงไม่ลดลงเช่นนั้น ดังนั้น จึงกำหนดประสิทธิภาพของครีบ η_f เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการติดตั้งครีบ

$$\eta_f = \frac{Q_f}{Q'_f}$$

ในที่นี้ Q_f เป็นปริมาณการพาความร้อนจริงๆ ระหว่างครีบบานกับของไหล Q'_f เป็นปริมาณการพาความร้อนในกรณีที่สมมติว่าพื้นผิวทั้งหมดของครีบบานจะมีอุณหภูมิเท่ากับที่โคนครีบ ในกรณีนี้ เมื่อสมมติว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ณ ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวครีบบาน มีค่าเท่ากันทุกจุดแล้ว ประสิทธิภาพของครีบ η_f จะแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

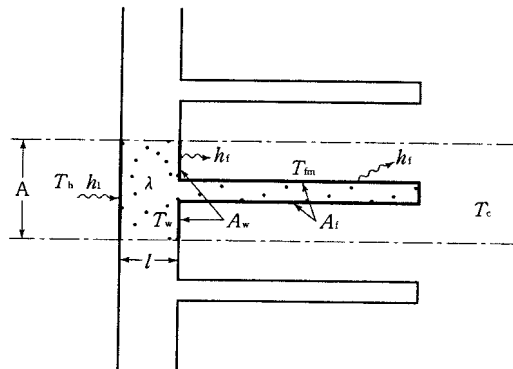
$$\eta_f = \frac{h_f \int (T_f - T_\infty) dA_f}{h_f (T_w - T_\infty) A_f} = \frac{1}{(T_w - T_\infty)} \left(\frac{\int T_f dA_f}{A_f} - T_\infty \right) = \frac{T_{fm} - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (4.51)$$

ในที่นี้ T_f เป็นอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ บนครี T_w เป็นอุณหภูมิของพื้นผิวที่ติดตั้งครี (โคนครี) T_∞ เป็นอุณหภูมิของของไหลภายนอก A_f เป็นพื้นที่ทั้งหมดของครี T_{fm} เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั่วพื้นผิวของครี ($T_{fm} = \int T_f dA_f / A_f$) ประสิทธิภาพของครี η_f จะขึ้นอยู่กับความสูงของครี H ความหนา b สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ_f สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวครี h_f เป็นต้น η_f ของครีรูปต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 โดยใช้ ϕH (ในที่นี้ $\phi = \sqrt{2h_f / (\lambda_f b)}$) เป็นพารามิเตอร์



รูปที่ 4.14 รูปร่างพื้นผิวหน้าตัดของครี (ครีตั้งฉากกับแผ่นเรียบ) กับประสิทธิภาพของครี

ต่อไปจะพิจารณา Overall heat transmission ในผนังกันที่มีครีข้างหนึ่งดังรูปที่ 4.11 โดยถือว่ารู้ค่า η_f อยู่แล้ว และให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของด้านที่ไม่มีครีเท่ากับ A ให้พื้นที่ผิวทั้งหมดของครีทางด้านพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีครีเท่ากับ A_f และพื้นที่ผิวของส่วนที่ไม่มีครีเท่ากับ A_w และให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของด้านที่ไม่มีครีเท่ากับ h_1 ให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของด้านที่มีครีเท่ากับ h_f คงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่ง



รูปที่ 4.15 overall heat transmission ของพื้นผิวมีครี

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

ถ้าให้อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวครีบท่ำกับ T_{fm} ให้อุณหภูมิที่โคนครีบท่ำกับ T_w แล้ว ปริมาณความร้อน Q ที่ถ่ายเทจากพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้านมีครีบท่ำไปยังของไหลภายนอกจะเท่ากับ

$$Q = h_f A_f (T_{fm} - T_c) + h_f A_w (T_w - T_c)$$

ในที่นี้ เนื่องจาก $T_{fm} = T_c + \eta_f (T_w - T_c)$ ดังนั้น

$$Q = \frac{T_w - T_c}{R_f}, \quad R_f = \frac{1}{h_f (A_w - \eta_f A_f)} \quad (4.52)$$

หาก $\eta_f A_f$ มีค่าสูงแล้ว ความต้านทานการพาความร้อนของพื้นผิวมีครีบท่ำ $R_f (= 1 / \{h_f / (A_w - \eta_f A_f)\})$ จะมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานการพาความร้อนในกรณีที่ไม่มีครีบท่ำ $(= 1 / (h_f A_w))$ ถ้าเทียบกับพื้นที่ A ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้านที่ไม่มีครีบท่ำแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถูกแลกเปลี่ยนระหว่างของไหลกับ Overall heat transmission resistance R ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนรวมจะเป็นดังนี้

$$Q = \frac{T_h - T_c}{R}, \quad R = \frac{1}{h_i A} + \frac{1}{\lambda A} + \frac{1}{h_f (A_w - \eta_f A_f)} \quad (4.53)$$

4.4.3 ผลกระทบของสิ่งสกปรกที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน

เมื่อใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปเป็นเวลานาน บางครั้งสนิม ฝุ่นผงต่างๆ จะสะสมอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ทำให้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ถ้าสมมติว่าที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน มีชั้นสิ่งสกปรกความหนา ℓ_s (สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ_s) เกาะอยู่ ผลกระทบของสิ่งสกปรกที่มีต่อ Overall heat transmission จะประเมินได้จาก Scale factor ดังต่อไปนี้

$$r_s = \frac{\ell_s}{\lambda_s} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}] \quad (4.54)$$

ค่าโดยประมาณของ Scale factor จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

เนื่องจากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของชั้นสิ่งสกปรกพื้นที่ A สามารถแสดงได้ด้วย r_s / A ดังนั้น กรณีที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนรูปแผ่นเรียบหรือท่อกลมมีชั้นสิ่งสกปรกที่มี Scale factor เท่ากับ r_{s1} และ r_{s2} เกาะอยู่ที่แต่ละด้าน Overall heat transmission resistance ในแต่ละกรณีจะเท่ากับ

$$R = \frac{1}{h_i A} + \frac{r_{s1}}{A} + \frac{\ell}{\lambda A} + \frac{r_{s2}}{A} + \frac{1}{h_o A} \quad (4.55)$$

$$\text{และ} \quad R = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{r_{s1}}{2\pi r_1 L} + \frac{1}{2\pi \lambda L} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{r_{s2}}{2\pi r_2 L} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} \quad (4.56)$$

ตารางที่ 4.5 Scale factor ของของไหลชนิดต่างๆ (ค่าโดยประมาณ)

ชนิดของของไหล	Scale factor [(m ² ·K)/W]
น้ำประปา	0.0002–0.0004
น้ำคลอง	0.0004–0.0007
น้ำทะเล	0.0001–0.0002
น้ำอุ่นในหม้อไอน้ำ	0.0002
อากาศอัด	0.0004
ตัวกลางความร้อน (ของเหลว) อินทรีย์สำหรับงานอุตสาหกรรม	0.0002
น้ำมันเชื้อเพลิง	0.001

4.4.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม

หัวข้อนี้จะเน้นที่ความเข้าใจพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และจะอธิบายกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน และสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีโครงสร้างง่ายๆ ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Concurrent flow และ Countercurrent flow แบบท่อสองชั้น รูปที่ 4.16 แสดงทิศทางการไหล และการกระจายอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Concurrent flow และ Countercurrent flow โดยในแบบ Concurrent flow อุณหภูมิขาออกของของไหลอุณหภูมิต่ำจะไม่มีทางสูงกว่าอุณหภูมิขาออกของของไหลอุณหภูมิสูง แต่แบบ Countercurrent flow อุณหภูมิขาออกของของไหลอุณหภูมิต่ำอาจทำให้สูงได้เกือบเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าของของไหลอุณหภูมิสูง ทำให้โดยทั่วไปจะสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยประสิทธิภาพสูงได้

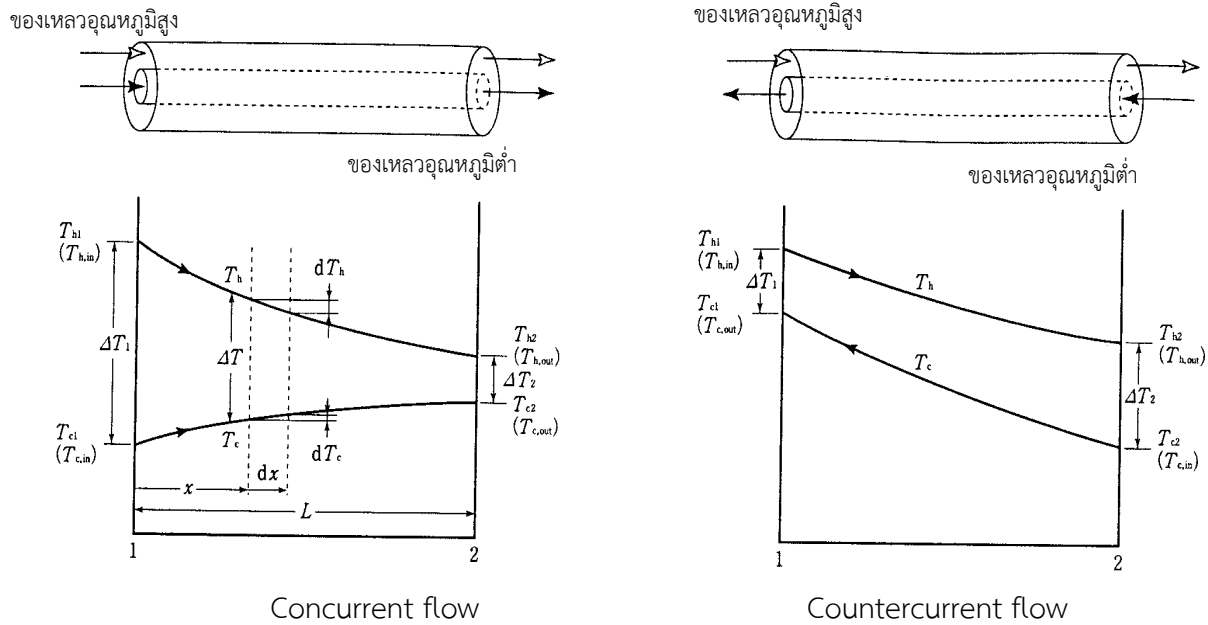
ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นในรูปที่ 4.16 อุณหภูมิของของไหลจะเท่ากับ T [K] อัตราไหลโดยมวลเท่ากับ m [kg/s] ความร้อนจำเพาะเท่ากับ c_p [J/(kg·K)] และค่าของของไหลอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำจะมีตัวห้อย h และ c ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าที่ด้านหนึ่ง (ทางเข้าของไหลอุณหภูมิสูง) จะมีตัวห้อย 1 อีกด้านหนึ่ง (ทางออกของไหลอุณหภูมิสูง) จะมีตัวห้อย 2 และถือว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอก ในกรณีนี้ปริมาณความร้อน Q ที่ถูกแลกเปลี่ยนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเท่ากับ

$$Q = m_h c_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out}) = m_c c_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (4.57)$$

อย่างไรก็ตาม ในขณะนี้

(ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยน) = (Coefficient of overall heat transmission) × (พื้นที่ถ่ายเทความร้อน) × ΔT_m (ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยน) = ΔT_m / (Overall heat transmission resistance)

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.16 การกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

อย่างไรก็ตาม ในขณะนี้

(ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยน) = (Coefficient of overall heat transmission) × (พื้นที่ถ่ายเทความร้อน) × ΔT_m (ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยน) = ΔT_m / (Overall heat transmission resistance)

เมื่อเราพิจารณาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย ΔT_m ระหว่างของไหลอุณหภูมิสูง-ต่ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์ตามข้างต้นแล้ว จะได้ว่า

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1) - \ln(\Delta T_2)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (4.58)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h,in} - T_{c,in}) - (T_{h,out} - T_{c,out})}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_{c,in}}{T_{h,out} - T_{c,out}}\right)} \quad (\text{Concurrent flow}) \quad (4.59)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}}\right)} \quad (\text{Countercurrent flow}) \quad (4.60)$$

ค่า ΔT_m เรียกว่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม และให้ Coefficient of overall heat transmission เท่ากับ K ให้ Overall heat transmission resistance เท่ากับ R และพื้นที่ถ่ายเทความร้อนเท่ากับ A แล้วจะสามารถแสดงปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยน Q ได้ด้วยสมการง่ายๆ ดังต่อไปนี้

$$Q = KA\Delta T_m, \quad Q = \frac{\Delta T_m}{R} \quad (4.61)$$

สมการที่ (4.58)-(4.60) เป็นสมการที่มีสมมติฐานว่าเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆ เช่น แบบ Cross-flow หรือแบบ Multi-pass ก็สามารถนำสัมประสิทธิ์ชดเชย ψ มาคูณกับ ΔT_m และใช้สมการแบบเดียวกับสมการที่ (4.61) ได้

$$Q = KA(\psi\Delta T_m), \quad Q = \frac{\psi\Delta T_m}{R} \quad (4.62)$$

ค่าของสัมประสิทธิ์ชดเชย ψ สามารถหาได้จากหนังสือคู่มือ ซึ่งจะมีข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่างๆ และมีพารามิเตอร์เป็นอุณหภูมิ อัตราไหลของของไหล หรืออื่นๆ

จากสมการที่ (4.61) และ (4.62) เมื่อกำหนดเงื่อนไขขาเข้า และขาออกของของไหลอุณหภูมิสูง และต่ำมาให้อยู่ จะสามารถหาพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ได้ ตัวอย่างเช่น คำนวณหาพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ เมื่อใช้ของไหลอุณหภูมิสูงที่มีอัตราไหล m_h มีอุณหภูมิ $T_{h,in}$ ในการให้ความร้อนของไหลอุณหภูมิต่ำที่มีอัตราไหล m_c มีอุณหภูมิ $T_{c,in}$ ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น $T_{c,out}$ เป็นต้นในกรณีนี้ เนื่องจากเราจะหา $T_{h,out}$ ได้จากสมการที่ (4.57) ดังนั้น จึงสามารถหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ΔT_m ได้ และสามารถหา Coefficient of overall heat transmission K ได้จากรูปร่างของผนังกัน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองกับผนังกัน และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนังกัน เป็นต้น ดังนั้น จากสมการที่ (4.61) และ (4.62) ซึ่ง $A = Q / (K\Delta T_m)$ จะสามารถหาพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ได้

4.4.5 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เราจะใช้ประสิทธิภาพอุณหภูมิ η และประสิทธิภาพพลังงาน (Effectiveness of overall heat transmission) ϵ เป็นตัวชี้วัด

ประสิทธิภาพอุณหภูมิ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิของของไหลอุณหภูมิสูงที่ลดลง ($T_{h,in} - T_{h,out}$) หรืออุณหภูมิของของไหลอุณหภูมิต่ำที่เพิ่มขึ้น ($T_{c,out} - T_{c,in}$) ต่อค่าสูงสุดของผลต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลอุณหภูมิสูงกับต่ำ (กล่าวคือ $T_{h,in} - T_{c,in}$) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยประสิทธิภาพอุณหภูมิของของไหลอุณหภูมิสูง η_h และประสิทธิภาพอุณหภูมิของของไหลอุณหภูมิต่ำ η_c สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\eta_h = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}}, \quad \eta_c = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad (4.63)$$

ประสิทธิภาพพลังงาน (Effectiveness of overall heat transmission) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่เกิดการแลกเปลี่ยนจริงๆ ต่อปริมาณความร้อนสูงสุดที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ตามทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ ถ้าให้ความจุความร้อน (เทียบเท่าน้ำหนักน้ำ) ของของไหลอุณหภูมิสูงเท่ากับ C_h ($C_h = m_h c_{ph}$) และให้ของของไหลอุณหภูมิต่ำเท่ากับ C_c ($C_c = m_c c_{pc}$) และให้ความจุความร้อนที่น้อยกว่าในสองค่านี้เท่ากับ C_{min} แล้ว ปริมาณความร้อนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้สูงสุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเท่ากับ $C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})$ และเนื่องจากปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนจริงๆ จะเท่ากับ $C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) (= C_h (T_{h,in} - T_{h,out}))$ ดังนั้น ประสิทธิภาพพลังงาน ϵ จึงเท่ากับ

$$\epsilon = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (4.64)$$

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

ถ้าให้ความจุความร้อนที่มากกว่าของของไหลอุณหภูมิสูงกับต่ำเท่ากับ $C_{\max}$ และที่น้อยกว่าเท่ากับ $C_{\min}$ และให้อัตราส่วนความจุความร้อน Λ เท่ากับ

$$\Lambda = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (4.65)$$

แล้วประสิทธิภาพพลังงาน ϵ จะสามารถแสดงได้ด้วยประสิทธิภาพอุณหภูมิ และอัตราส่วนความจุความร้อนดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } C_{\min} = C_h \text{ แล้ว } \epsilon = \eta_h = \frac{\eta_c}{\Lambda}, \quad \text{เมื่อ } C_{\min} = C_c \text{ แล้ว } \epsilon = \frac{\eta_h}{\Lambda} = \eta_c \quad (4.66)$$

ค่า ϵ จะขึ้นอยู่กับประเภท และพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเข้าของของไหลต่างๆ เป็นต้น แต่พารามิเตอร์ที่มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ ϵ ได้แก่

$$NTU = \frac{KA}{C_{\min}} \quad (4.67)$$

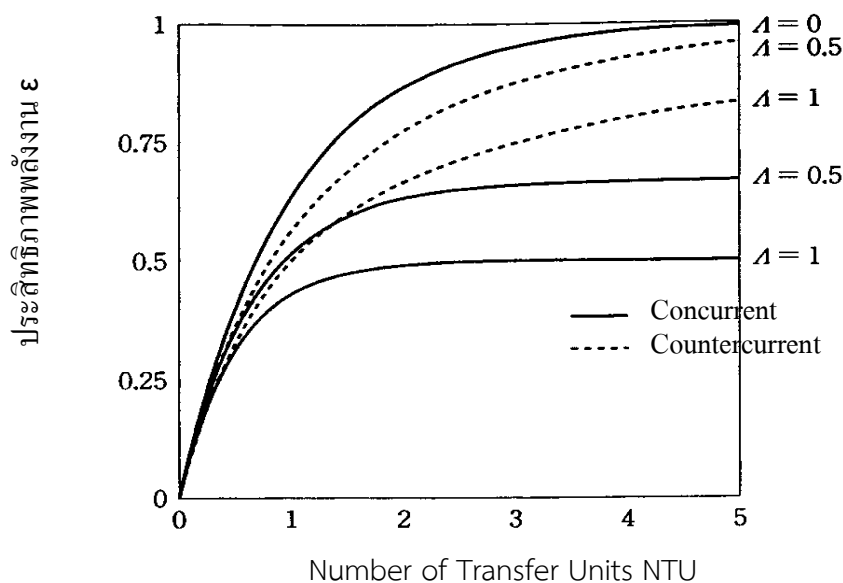
ค่า NTU (Number of Transfer Units) เป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย โดยระหว่าง NTU และประสิทธิภาพพลังงาน ϵ จะมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

[ท่อดึงขึ้น Concurrent flow]

$$\epsilon = \frac{1 - \exp \{ -(1 + \Lambda) \cdot NTU \}}{1 + \Lambda} \quad (4.67)$$

[ท่อดึงขึ้น Countercurrent flow]

$$\epsilon = \frac{1 - \exp \{ -(1 + \Lambda) \cdot NTU \}}{1 - \Lambda \exp \{ -(1 + \Lambda) \cdot NTU \}}, \quad \epsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (\text{กรณีที่ } \Lambda = 1) \quad (4.68)$$



กรณีที่ $\Lambda = 0$ ($C_{\min} \ll C_{\max}$) แล้ว เส้นกราฟของ concurrent กับ countercurrent จะเป็นเส้นเดียวกัน

รูปที่ 4.17 กราฟ $\epsilon - NTU$ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อดึงขึ้น

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ – NTU ตามสมการที่ (4.67) และ (4.68) มาเขียนกราฟ จะได้รูปที่ 4.13 สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่นๆ นอกเหนือจากแบบท่อสองชั้น ก็สามารถเปิดคู่มือซึ่งแสดงสมการความสัมพันธ์ และเส้นกราฟระหว่าง ϵ – NTU ได้ ถ้าใช้ความสัมพันธ์ ϵ – NTU แล้ว กรณีที่กำหนดให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาให้ เราจะสามารถหาอุณหภูมิขาออกของของไหล และปริมาณความร้อนที่เกิดการแลกเปลี่ยน ที่อัตราไหลของตัวกลางความร้อน และเงื่อนไขอุณหภูมิขาเข้าใดๆ ได้ กล่าวคือเมื่อกำหนดค่า A ให้ จะสามารถคำนวณ coefficient of overall heat transmission K จากประเภท วัสดุ เงื่อนไขขาเข้าของของไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฯลฯ ได้ ดังนั้น จากสมการที่ (4.67) จึงสามารถหาค่า NTU ได้ และจากความสัมพันธ์ ϵ – NTU เราสามารถหาประสิทธิภาพพลังงาน ϵ ได้ จากสมการ (4.64) จะหาค่า $T_{h,out}$ และ $T_{c,out}$ ได้ และจากสมการที่ (4.57) จะคำนวณปริมาณความร้อนที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ นอกจากนี้ กรณีที่จะปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเดิม (ปรับปรุงค่า NTU เช่น เพิ่มค่า K หรือติดตั้งครีบบเพื่อเพิ่มค่า A เป็นต้น) หากใช้วิธีการที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ก็สามารถพยากรณ์ และประเมินได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

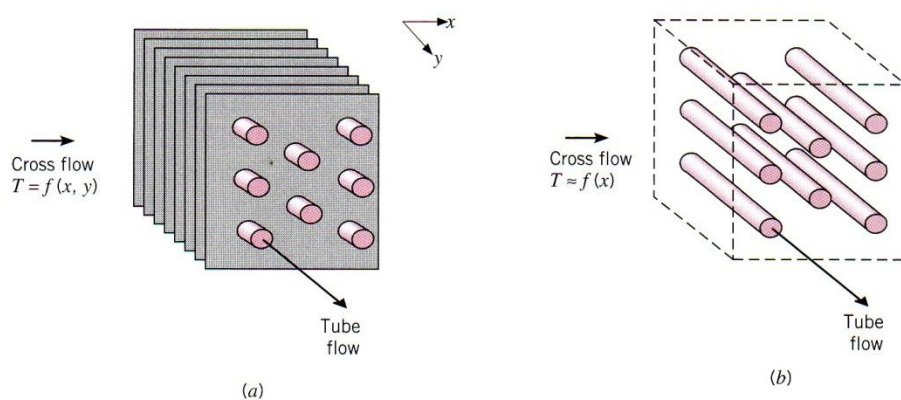
4.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆ และการนำไปใช้งาน

4.5.1 Cross – flow heat exchangers

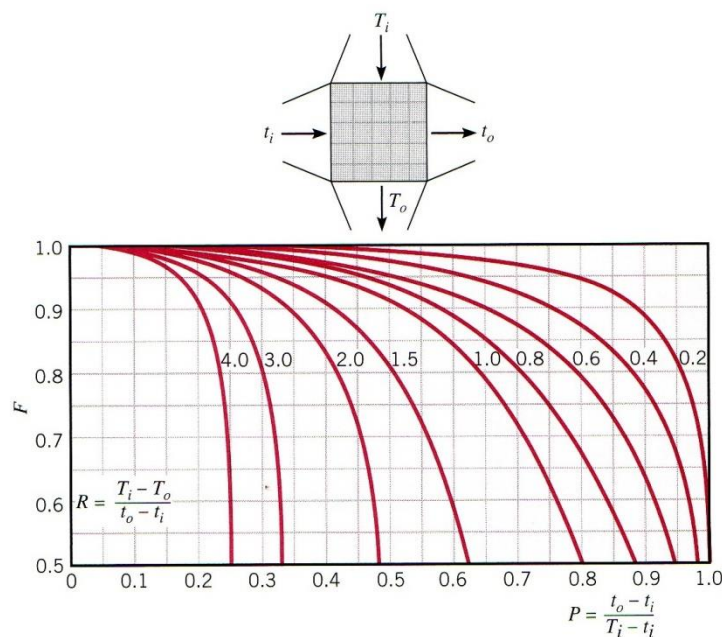
เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหล 2 ชนิดไหลตัดกัน ตามรูปที่ 4.18 โดยในการคำนวณใช้หลักการเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4 แต่จะมีเพิ่มเรื่องของการปรับปรุงสมการในการคำนวณ ซึ่งจะมีการปรับปรุงค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม (ΔT_m) ในสมการที่ 4.60 โดยเพิ่มตัวปรับปรุงค่าเข้ามดั่งสมการที่ (4.69)

$$\Delta T_m = F \Delta T_{m,4.60} \quad (4.69)$$

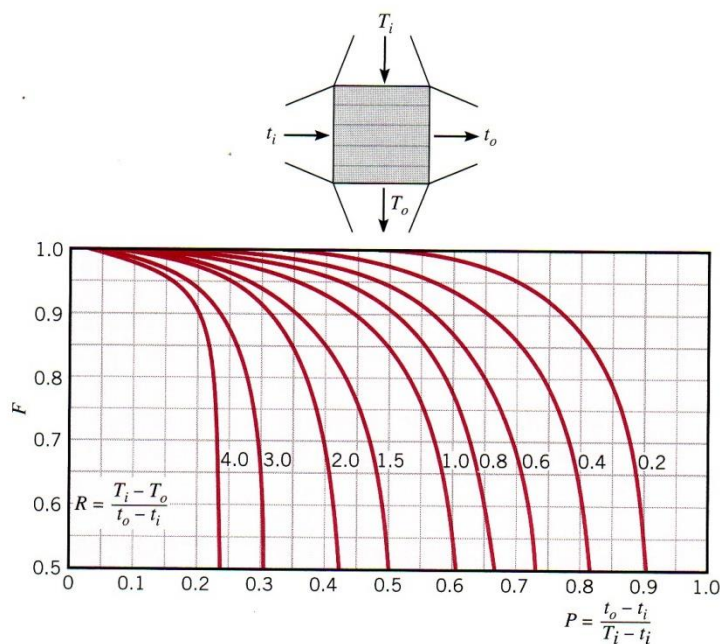
ค่า F หาได้จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 ต่างกันตรงที่ของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนกันนั้นจะไหลในช่องทางไหลที่แบ่งให้ทั้ง 2 สาร เรียกว่าไหลแบบไม่ผสม หรือเป็นแบบ ที่ของไหลสารใดสารหนึ่งไหลผ่านโดยไม่มีช่องแบ่งการไหลให้ เรียกว่าไหลแบบผสม ตามลำดับของรูปทั้ง 2



รูปที่ 4.18 Cross – flow heat exchangers



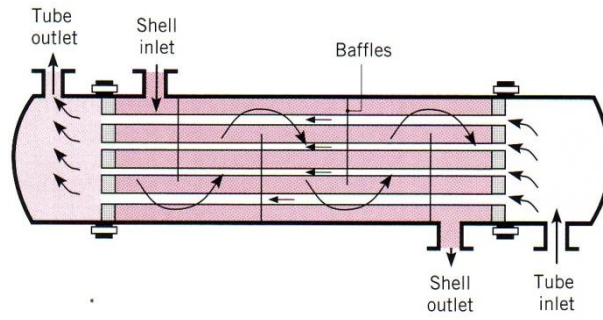
รูปที่ 4.19 Cross – flow heat exchangers กรณีของไหลไม่ผสมกัน



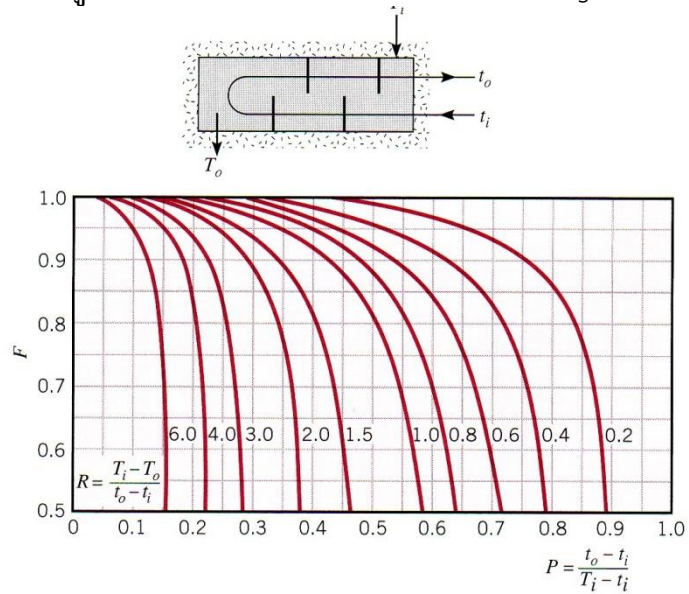
รูปที่ 4.20 Cross – flow heat exchangers กรณีของไหลผสมกัน

4.5.2 Shell and tube heat exchangers

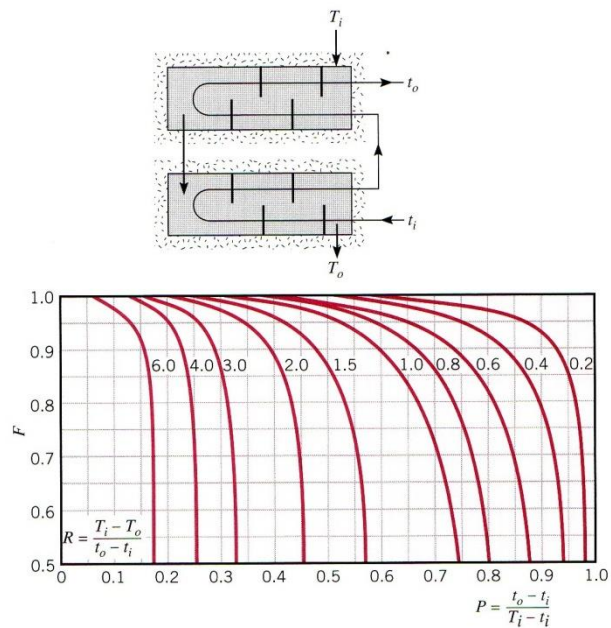
เป็นอุปกรณ์ที่ของไหล 2 ชนิดแลกเปลี่ยนความร้อนกัน โดยมีสารหนึ่งไหลในท่อ (Tube) ส่วนอีกสารไหลอยู่ภายนอกท่อ แต่อยู่ในเปลือก (Shell) ตามรูปที่ 4.21 วิธีคำนวณนั้นเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.5.1 ที่ผ่านมาโดยใช้สมการที่ 4.69 ในการปรับปรุงค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม (ΔT_m) ส่วนค่า \$F\$ หาได้จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 โดยจะแบ่งออกเป็น มี 1 เปลือกหุ้ม และมี 2 เปลือกหุ้มตามลำดับ



รูปที่ 4.21 Shell and tube heat exchangers



รูปที่ 4.22 Shell and tube heat exchangers ประเภท 1 เปลือก



รูปที่ 4.23 Shell and tube heat exchangers ประเภท 2 เปลือก

4.6 ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อการอนุรักษ์พลังงาน

ประเด็นสำคัญในหัวข้อนี้คือการบำรุงรักษาประจำวัน ได้แก่การป้องกัน ช่องระบายความร้อน หรือ ส่วนสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่ให้อุดตัน หรือขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการสะสมของฝุ่นละออง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่อากาศภายนอกที่นำเข้ามามีฝุ่นมาก หรือกรณีที่ฝุ่นจะสะสมได้ง่ายเนื่องจากมีสารที่ทำหน้าที่เหมือนกาว เช่น ละออง น้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น หากเว้นช่วงทำความสะอาดนานเกินไปทำให้ช่องระบายความร้อน หรือส่วนสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดการอุดตัน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และเกิดความดันสูญเสียทำให้ต้องใช้กำลังในการขับเพิ่มขึ้น หรือสูญเสียพลังงานในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าที่ควรจะเป็น โดยทั่วไปจะมีการติดตั้งฟิลเตอร์ หรือระบบที่จะป้องกันไม่ให้ฝุ่น เกาะ ช่องระบายความร้อน หรือส่วนสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อน

4.7 ฉนวนความร้อนและการเลือกใช้

4.7.1 ความหมายของฉนวน

ฉนวนโดยทั่วไปหมายถึง วัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย การส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัสดุใดๆ หรือการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ระหว่างวัตถุสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองมีความแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการถ่ายเทความร้อนนั้นมี 3 วิธี โดยอาจเกิดขึ้นจากวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือหลายๆ วิธีพร้อมกัน ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสี (Radiation)

การเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนให้ถูกต้องจำเป็นต้องเข้าใจถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายในฉนวนกันความร้อนประเภทต่างๆ ก่อน ฉนวนกันความร้อนโดยทั่วไปแล้ว เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยช่องโพรงเล็กๆ และช่องอากาศภายในวัสดุที่มีลักษณะเป็นแบบปิดทึบ (Totally Enclosed) เรียกว่า ฉนวนมวลสาร (Mass Insulation) นั้นเอง ช่องเล็ก ๆ เหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากเกล็ด (Flakes) เส้นใย (Fibers) ปมแข็ง (Nodules of Solids) หรือเซลล์ของตัววัสดุนั้นเอง ยกเว้นฉนวนสะท้อนความร้อน (Reflective Insulation)

กลไกที่เกิดขึ้นภายในฉนวนมวลสาร เกิดขึ้นได้โดยอาศัยช่องเล็ก ๆ ที่อยู่ภายในวัสดุ และลักษณะของการเป็นโพรงอากาศนี้เองที่ทำหน้าที่ต้านทานการไหล ของอากาศ หรือก๊าซ ทำให้มีความร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่จะสามารถถ่ายเทผ่านจากด้านหนึ่งของวัสดุไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยกระบวนการพาความร้อนได้เมื่อพิจารณากระบวนการ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในฉนวนที่ค่าความหนาแน่นค่าหนึ่งของวัสดุที่นำมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนใดๆ นั้น สภาพการนำความร้อนปรากฏ (Apparent Thermal Conductivity) ที่เกิดขึ้นจะลดลงได้ เนื่องจากการพาความร้อน โดยอากาศภายในฉนวนกันความร้อนนั้นลดลง เพราะการลดขนาดของช่องอากาศระหว่างเซลล์ของเส้นใยที่ทำให้อากาศภายในฉนวนกันความร้อนหยุดนิ่งไม่เคลื่อนที่จนมีสภาพเป็นฉนวนกันความร้อนอย่างดี ถึงแม้ว่าภายในเซลล์บางส่วนจะเกิดการแผ่รังสีความร้อนระหว่างเส้นใยแต่ละเส้นภายในฉนวนนั้นก็ตาม

เมื่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ การแผ่รังสีความร้อนระหว่างเส้นใยสู่เส้นใย และพื้นผิวสู่พื้นผิวจะลดลงทำให้สภาพการนำความร้อนปรากฏลดลงด้วย จนกระทั่งเมื่อเส้นใย หรือเซลล์ต่อเชื่อมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดการนำความร้อนขึ้นภายในวัสดุจนถึงจุดที่การแผ่รังสีความร้อนที่ลดลงมีค่าน้อยกว่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น (จากผลของการเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุที่ทำให้เส้นใยชิดกันมากขึ้น) สภาพการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มมีค่ามากกว่าการแผ่รังสีความร้อนที่ลดลง ดังนั้น ฉนวนกันความร้อนที่ดี จึงควรเป็นฉนวนกันความร้อนที่มีค่าสภาพการนำความร้อนปรากฏรวมต่ำสุด

ฉนวนกันความร้อนประเภทสะท้อนความร้อนประกอบด้วยช่องว่างสำหรับการสะท้อนความร้อนกลับ อยู่ระหว่างแผ่นสะท้อนรังสีความร้อน โดยมีกระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งวัสดุที่ใช้

ทำฉนวนประเภทนี้ส่วนมากทำจากอลูมิเนียม หรือเหล็กปลอดสนิม การออกแบบ และใช้งานวัสดุประเภทสะท้อนความร้อนมักไปประยุกต์ใช้ในระบบร่วมกับการก่อสร้างมากกว่าการแยกใช้เป็นชั้นเดียวโดยเฉพาะ และด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้คุณสมบัติของฉนวนสะท้อนความร้อนถูกแยกออกจากฉนวนประเภทอื่นๆ หรือฉนวนมวลสารที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.7.2 ข้อดี และข้อจำกัดของฉนวนบางประเภท

ใยแก้ว (Glass Fiber)

- | | |
|-----------------|---|
| ข้อดี | <ul style="list-style-type: none"> - สภาพการนำความร้อนต่ำ - ไม่เป็นพิษ - อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 700°C |
| ข้อจำกัด | <ul style="list-style-type: none"> - ไม่กันไฟ - ตัวประสาน (Binder) ลุกไหม้ได้ - การแทรกซึมของไอน้ำสูง ควรมีวัสดุหุ้มกันไอน้ำ |

ใยแร่ หรือใยหิน (Mineral Fiber or Rock Wool)

- | | |
|-----------------|--|
| ข้อดี | <ul style="list-style-type: none"> - สภาพการนำความร้อนต่ำ - ไม่ติดไฟ - ไม่เป็นพิษ - อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 1,300 °C |
| ข้อจำกัด | <ul style="list-style-type: none"> - ตัวประสาน (Binder) ลุกไหม้ได้ - การแทรกซึมของไอน้ำสูง |

ใยเซลลูโลส (Cellulose)

- | | |
|-----------------|---|
| ข้อดี | <ul style="list-style-type: none"> - สภาพการนำความร้อนต่ำ - ไม่เป็นพิษ |
| ข้อจำกัด | <ul style="list-style-type: none"> - ติดไฟได้ - การดูดซึมน้ำสูง - อาจมีการยุบตัวตามอายุการใช้งาน |

โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene Foam)

- | | |
|-----------------|--|
| ข้อดี | <ul style="list-style-type: none"> - ค่าการนำความร้อนต่ำ - ใช้เป็นตัวฉนวน หรือกันซึมได้ - การแทรกซึมของไอน้ำ และการดูดซึมน้ำต่ำ - ไม่เป็นพิษ |
| ข้อจำกัด | <ul style="list-style-type: none"> - ติดไฟได้ - อุณหภูมิใช้งานสูงสุดประมาณ 82 °C |

โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane Foam)

- | | |
|-----------------|---|
| ข้อดี | <ul style="list-style-type: none"> - สภาพการนำความร้อนต่ำที่สุด - ใช้เป็นตัวฉนวน หรือกันซึมได้ - การแทรกซึมของไอน้ำ และการดูดซึมน้ำต่ำ |
| ข้อจำกัด | <ul style="list-style-type: none"> - ติดไฟได้ - เกิดควันที่เป็นพิษ ขณะลุกไหม้ แก้ไขโดยใส่สารกันไฟลาม |

โฟมชนิดยืดหยุ่น (Electrometric Foam)

- ข้อดี**
 - สภาพการนำความร้อนต่ำ
 - ติดตั้งง่าย
 - ไม่เป็นพิษ
- ข้อจำกัด**
 - ติดไฟได้ และเกิดควันมาก
 - ไวต่อรังสีอัลตราไวโอเลต
 - อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 105°C

แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

- ข้อดี**
 - ไม่ติดไฟ
 - อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 650°C
- ข้อจำกัด**
 - สภาพการนำความร้อนปานกลาง
 - ใอน้ำแทรกซึมได้ง่าย

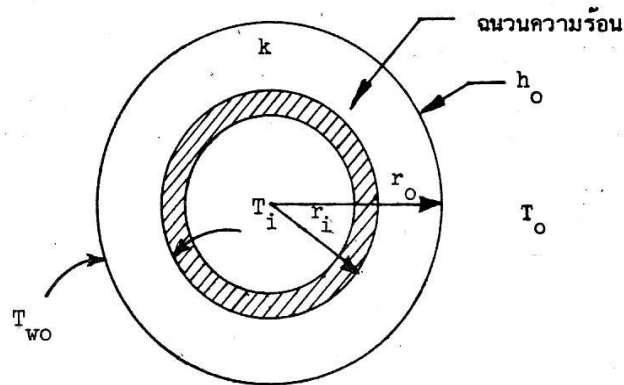
เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite)

- ข้อดี**
 - ไม่ติดไฟ
 - ไม่เป็นพิษ
- ข้อจำกัด**
 - สภาพการนำความร้อนสูง
 - การดูดซึมน้ำสูง
 - อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 650°C

4.7.3 ความหนาวิกฤติของฉนวน (Critical Thickness of Insulation)

การศึกษาเรื่องการนำความร้อนนี้ทำให้เรามีความรู้ว่า ถ้าเราต้องการลดอัตราการสูญเสียความร้อน เราก็เพิ่มความหนาของฉนวนความร้อนให้มากขึ้น (ฉนวนความร้อน คือ สารที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ) นั่นก็คือ เพิ่มค่าของ r_o ในรูปที่ 4.20 แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ แล้ว หาได้เป็นเช่นนั้นเสมอไปไม่ ดังจะแสดงให้เห็นในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

พิจารณาการไหลของความร้อนจากผิวท่อที่มีอุณหภูมิ T_i มาสู่อากาศภายนอกที่อุณหภูมิ T_o



รูปที่ 4.24 ท่อที่มีรัศมี r_i หุ้มด้วยฉนวนความร้อนที่มีรัศมี r_o

การนำความร้อนจากรัศมี r_i ถึง r_o เราเขียนสมการได้ดังนี้ คือ

$$Q = \frac{2\pi \lambda L (T_i - T_w)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad \text{หรือ} \quad T_i - T_w = \frac{Q \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda L}$$

การพาความร้อนจากผิวออกสู่อากาศภายนอก

$$Q = 2\pi r_o L h (T_w - T_o) \quad \text{หรือ} \quad (T_w - T_o) = \frac{Q}{2\pi r_o h L}$$

รวมสมการทั้งสองเข้าด้วยกัน แล้วแก้สมการหา Q จะได้ว่า

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_o L h} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda L}} \quad (4.70)$$

ในกรณีนี้ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนของผนังท่อมีค่าต่ำมาก T_i จึงมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของของไหลภายในท่อ และ $T_i - T_o$ มีค่าคงที่

จะเห็นได้ว่า การเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อน หรือค่าของ r_o จะทำให้ค่า $\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}$ เพิ่มขึ้น แต่ก็ทำให้

ค่าของ $\frac{1}{(2\pi r_o L h)}$ ลดลง ดังนั้น $\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}$ จึงอาจไม่เพิ่มขึ้น และค่าของ Q จึงอาจจะไม่ลดลงก็ได้ เมื่อ

เราเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อน หรือค่าของ r_o ขึ้นจากสมการที่ (4.70) แสดงว่า Q จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ

$\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}$ มีค่าน้อยที่สุดต้องดิฟเฟอเรนเชียล $\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}$ แล้วให้ผลที่ได้เท่ากับศูนย์ จะ

ทำได้เงื่อนไขที่จะให้ $\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}$ มีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L} \right] = 0$$

$$-\left[\frac{1}{(2\pi l r_o^2 h)} + \frac{1}{(2\pi l \lambda r_o)} \right] = 0$$

ให้ r_o ที่ได้ในกรณีพิเศษนี้ เป็น $r_{o, cr}$

$$r_{o, cr} = \frac{\lambda}{h} \quad (4.71)$$

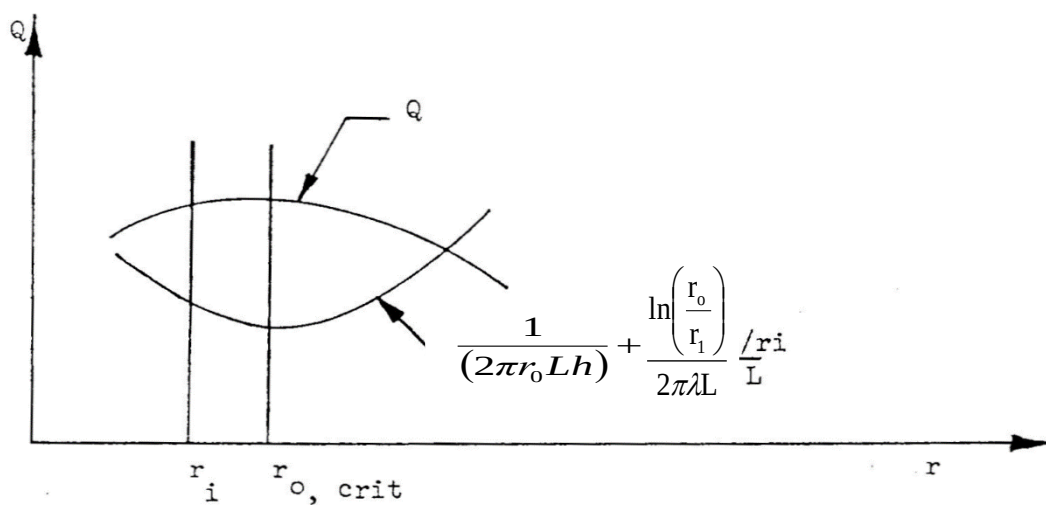
เพื่อให้แน่ใจว่า เมื่อ $r_o = \frac{\lambda}{h}$ แล้ว $\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}$ จะมีค่าน้อยที่สุด เราหาค่า

$$\frac{d^2}{dr_o^2} \left[\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L} \right] \text{ ที่ } r = \frac{\lambda}{h}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d^2}{dr_0^2} \left[\frac{1}{(2\pi r_0 L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda L} \right] \bigg|_{r_0 = \frac{\lambda}{h}} \\
&= \frac{d^2}{dr_0^2} \left[-\frac{1}{(2\pi r_0 L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda L} \right] \bigg|_{r_0 = \frac{\lambda}{h}} \\
&= \frac{d}{dr_0} \left[\frac{1}{(2\pi r_0^2 L h)} + \frac{1}{(2\pi \lambda r_0 L)} \right] \bigg|_{r_0 = \frac{\lambda}{h}} \\
&= \left[\frac{1}{(\pi r_0^3 h L)} - \frac{1}{(2\pi \lambda r_0^2 L)} \right] \bigg|_{r_0 = \frac{\lambda}{h}} \\
&= \frac{h^2}{2\pi \lambda^3 L}
\end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่า $\frac{h^2}{2\pi \lambda^3 L}$ มีค่าเป็นบวกเสมอ เพราะ h และ λ มีค่าเป็น บวกเสมอ ดังนั้น

$$\frac{1}{(2\pi r_0 L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda L} \text{ มีค่าน้อยที่สุดที่ } r_o = \frac{\lambda}{h}$$



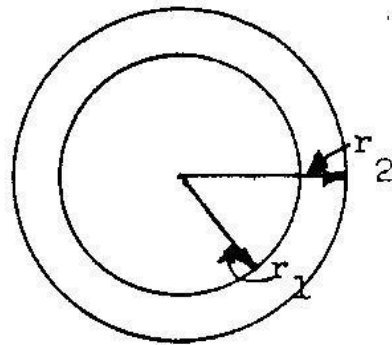
รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงของ Q และ $\frac{1}{(2\pi r_o L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda L}$ กับ r_o

เมื่อเราพลอตค่าของ Q และ $\frac{1}{(2\pi r_0 L h)} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_1}\right)}{2\pi\lambda L}$ กับ r_o จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อนขึ้น (เพิ่ม r_o) จะไม่ทำให้ค่าของ Q ลดลงเสมอไป ในบางกรณี Q อาจเพิ่มขึ้นก็ได้ ดังนั้น เราจะต้องแน่ใจว่า ฉนวนความร้อนที่เราใช้หนามากกว่า $\frac{\lambda}{h}$ เมื่อ $r_o > \frac{\lambda}{h}$ แล้ว Q จะลดลงเสมอ

แต่อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งเราจะพบว่า ค่าของ $\frac{\lambda}{h}$ ที่ได้ น้อยกว่า r_1 ซึ่งแสดงว่าในกรณีนี้ จะไม่มีค่าของ $r_{o, cr}$ ค่าของการถ่ายเทความร้อนจะลดลงทันที เมื่อเราเริ่มใช้ฉนวนความร้อน

ตัวอย่างที่ 1

ลวดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.183 ซม. ถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อนซึ่งมีค่าการนำความร้อน 0.118 W/mK ถ้าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวมีค่า 34.1 W/m²K ให้หาค่าความหนาวิกฤติของฉนวนความร้อน



รูปที่ 4.26 ภาพตัวอย่างข้อที่ 1

$$\begin{aligned} \text{จาก } r_{o, cr} &= \frac{\lambda}{h} \\ &= \frac{0.118}{34.1} = 0.00346 \text{ ม.} = 0.346 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

ความหนาวิกฤติของฉนวนความร้อนจะมีค่า = 0.346 – 0.183/2 = 0.255 ซม.

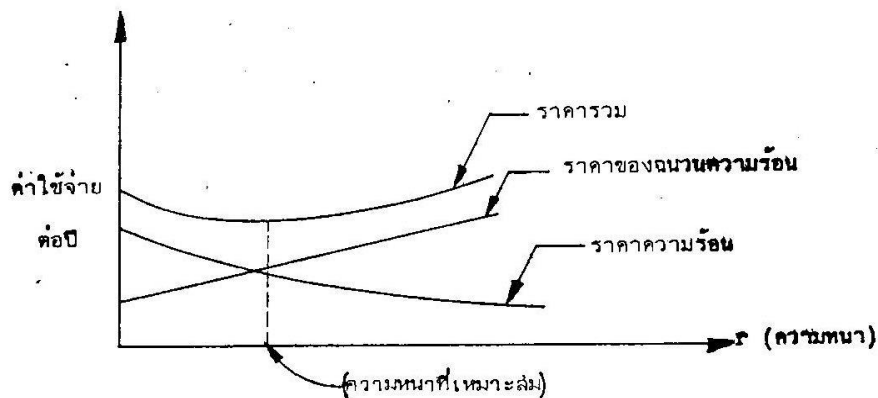
4.7.4 ความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสม

จะเห็นได้จากใน (4.7.3) ว่า เรายิ่งเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อนขึ้น (ให้หนามากกว่า $\frac{\lambda}{h}$) เราจะสามารถสูญเสียความร้อนน้อยลง ในทางปฏิบัติจริงๆ แล้ว การสูญเสียความร้อนมากขึ้น ทำให้เราต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น เพราะเราสามารถคิดราคาของความร้อนที่เสียไปได้ แต่ถ้าลดความสูญเสียความร้อนโดยการเพิ่มความหนาของฉนวน เราก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับค่าฉนวนความร้อนเพิ่มขึ้น เราจึงไม่แน่ใจนักว่า จะใช้ฉนวนความร้อนหนาเท่าใดจึงจะเหมาะสม และเสียค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด

วิธีที่จะหาความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสมที่สุดนั้น เราจะต้องคำนึงถึงราคาของฉนวนความร้อน และราคาของความร้อนถ้าเราสามารถแปลงค่าใช้จ่าย 2 อย่างนี้ ให้อยู่ในฐานเดียวกัน เช่น เป็น

ค่าใช้จ่ายต่อปี (ราคาฉนวนความร้อน ซึ่งค่าใช้จ่ายเริ่มต้นอาจแปลงให้อยู่ในลักษณะของค่าใช้จ่ายต่อปีได้ ถ้าเรานำอายุการใช้งานของฉนวนมาคิด) ความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสมที่สุดก็คือ ความหนาที่ให้ค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22

ความหนาที่เหมาะสมสำหรับระบบแบบเดียวกัน ในแต่ละแห่ง หรือแต่ละเมืองอาจจะไม่เท่ากันเท่านี้เพราะว่าราคาของฉนวนและความร้อนอาจจะมีความต่างกัน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการหาค่าของความหนาที่เหมาะสมใหม่อยู่เสมอ เมื่อราคาของฉนวน และความร้อนเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงราคาของฉนวนความร้อนและราคาของความร้อนที่สูญเสียไปกับความหนาของฉนวนความร้อนความหนาที่เหมาะสม

4.7.5 อุณหภูมิของการใช้งานที่เหมาะสม (Suitability for Service Temperature)

อุณหภูมิของการใช้งานที่เหมาะสมเป็นข้อพิจารณาที่สำคัญในการเลือกใช้ฉนวน เนื่องจากฉนวนแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิในการใช้งานที่แตกต่างกัน หากเลือกใช้ไม่เหมาะสมอาจเกิดปัญหาการเสื่อมสภาพของฉนวนได้ การแบ่งระดับของอุณหภูมิในการใช้งานของฉนวนอาจทำได้ดังนี้

- ฉนวนสำหรับช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -270°C ถึง 100°C ได้แก่ กลาสโฟม (Glass Foam) เซลลูโลสโฟม (Cellulose Foam) เป็นต้น
- ฉนวนสำหรับช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 100°C ถึง 500°C ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) กลาสโฟม ไยแร่ ฟอยล์ เป็นต้น
- ฉนวนสำหรับช่วงอุณหภูมิมากกว่า 500°C ได้แก่ ฉนวนสารอินทรีย์ประเภทคาร์บอน หรือโลหะ เช่น ฟอยล์ เซรามิกโฟม (Ceramics Foam) ไยเซรามิก (Ceramic Fiber) ไยคาร์บอน (Carbon Fiber) เป็นต้น

4.7.6 ความต้านทานต่อความชื้น (Resistance to Water Penetration)

ความต้านทานต่อความชื้นเป็นวัตถุประสงค์อีกข้อหนึ่งของการใช้ฉนวน เนื่องจากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ซึ่งมีความชื้นสูงเกือบตลอดเวลา พบว่าการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศจะสูญเสียไปกับการลดความชื้น ดังนั้น การกันความชื้นให้กับฉนวนจึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรมองข้าม เพราะหากเกิดความชื้นในฉนวนจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ หรือสูญเสียคุณสมบัติความเป็นฉนวนไป หากฉนวนที่ใช้ไม่มีการกันความชื้นควรป้องกันความชื้นให้กับฉนวน โดยการใช้วัสดุสำหรับกันความชื้น เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แผ่นโพลีเอทิลีน แผ่นพีวีซี หรือแผ่นโพลีเอสเตอร์ ฉนวนมาستيك แอสฟัลต์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติกันความชื้นได้แตกต่างกัน

4.7.7 การเลือกใช้

ควรพิจารณาเลือกฉนวนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสูงสุดสำหรับการใช้งาน หรืออาจใช้ฉนวนหลายๆ ชนิดประกอบกันเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น

- ควรเลือกใช้ใยแก้ว หรือใยแร่ เมื่อต้องการกันความร้อน และกันเสียง
- ควรเลือกใช้แคลเซียมซิลิเกต หรือเวอร์มิคูไลท์ เมื่อต้องการกันความร้อน และกันไฟ
- ควรเลือกใช้ฉนวนประเภทโฟม เมื่อต้องการกันความร้อน และกันความชื้น

4.7.8 ฉนวนท่อ และอุปกรณ์

ฉนวนสำหรับท่อ และอุปกรณ์ เช่น ระบบท่อน้ำร้อน ท่อไอน้ำ ท่อของระบบปรับอากาศ เตา เป็นต้น มีข้อควรพิจารณาในการใช้งานดังนี้ คือ ต้องเลือกฉนวนที่เหมาะสมกับอุณหภูมิในการใช้งานเป็นสำคัญ นอกจากนั้นแล้ว ยังต้องพิจารณาการขยายตัว หรือหดตัวของท่อ และอุปกรณ์จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะใช้งาน หรือติดตั้ง ซึ่งการขยายตัว หรือหดตัวดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวน และวัสดุหุ้มฉนวนได้ นอกจากนี้แล้วยังอาจมีการบุฉนวนภายในท่อด้วย ซึ่งนอกจากจะให้ผลทางด้านการป้องกันเสียงแล้ว การบุฉนวนภายในท่อยังให้ผลดีในการลดการถ่ายเทความร้อนด้วย

4.8 สรุปหลักการเบื้องต้นของเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อน

หลักการเบื้องต้นของเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อน จะเป็นการศึกษาถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุที่มีอุณหภูมิต่างกันซึ่งจะมีหัวข้อ และเนื้อหาโดยสรุปดังนี้

การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนของสาร จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะอาศัยคุณสมบัติของสารตัวกลางคือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารนั้นๆ เป็นตัวกลางที่ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านไป ซึ่งถ้าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าสูง ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิสูงกับอุณหภูมิต่ำ ก็จะมีค่าน้อยกว่า ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ รวมถึงความหนา หรือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านสารตัวกลาง ยิ่งมีระยะทางที่กว้างผลต่างของอุณหภูมิ ก็จะยิ่งมาก ซึ่งในการคำนวณการนำความร้อนจะแบ่งออกเป็นกรณีต่างๆ ดังนี้ สมการพื้นฐานของการนำความร้อน (สมการของ Fourier) การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่น การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น การนำความร้อนของทรงกระบอก การนำความร้อนของเปลือกทรงกลม การนำความร้อนของทรงกระบอกที่กำเนิดความร้อนจากภายใน สมการพื้นฐานของการนำความร้อนไม่คงที่

การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อน ระหว่างของไหลกับผนังของวัตถุ จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะอาศัยคุณสมบัติ และลักษณะของของไหลที่สัมผัสกับผนังวัตถุซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วของของไหล คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล ลักษณะการไหลของของไหล เป็นต้น ซึ่งในการคำนวณการพาความร้อนจะแบ่งออกเป็นกรณีต่างๆ ดังนี้ ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน อุณหภูมิเฉลี่ยผสมในการไหลในท่อ กับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนที่สำคัญ การพาความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ ประกอบไปด้วยการเดือด และการควบแน่น

การแผ่รังสีหมายถึงปรากฏการณ์ที่วัตถุปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่และดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสั่นเนื่องจากความร้อนของอะตอมหรือโมเลกุลภายในตัววัตถุ เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญในการแผ่รังสีความร้อน มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $0.3-10\text{ }\mu\text{m}$ กล่าวคืออยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ถึงช่วงรังสีอินฟราเรด โดยทั่วไปเมื่อรังสีความร้อนกระทบกับวัตถุ ส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านไป ซึ่งในการคำนวณการแผ่รังสี

ความร้อนจะแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้ การแผ่รังสีจากวัตถุดำ Emissivity วัตถุธาตุ กฎของ Kirchhoff การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุดำ และการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุธาตุ 2 อัน

การแลกเปลี่ยนความร้อนในจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อน อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้และรับพลังงานความร้อน (แลกเปลี่ยนความร้อน) ระหว่างของไหลที่ทำหน้าที่ขนถ่ายความร้อน (ตัวกลางความร้อน) เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) โดยทั่วไป ความร้อนจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทเข้ามาสะสมอยู่ในผนังของแข็งด้วยการพาความร้อน และความร้อนจะถ่ายเทภายในผนังของแข็งด้วยการนำความร้อน และถ่ายเทสู่ตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำอีกด้านหนึ่งของผนังของแข็งด้วยการพาความร้อน การถ่ายเทของความร้อนนี้ เรียกว่า Overall heat transmission ซึ่งในการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้ Overall heat transmission resistance และ Coefficient of overall heat transmission พื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีพื้นที่เพิ่มขึ้น (พื้นผิวมีครีบ) ผลกระทบของสิ่งสกปรกที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆ และการนำไปใช้งาน ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Cross – flow heat exchangers และ Shell and tube heat exchangers

ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อการอนุรักษ์พลังงาน ประเด็นสำคัญในหัวข้อนี้คือการบำรุงรักษาประจำวัน ได้แก่การป้องกัน ช่องระบายความร้อน หรือส่วนสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อน

ฉนวนความร้อน และการเลือกใช้ ฉนวนโดยทั่วไปหมายถึง วัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย หัวข้อที่พูดถึงคือ ข้อดี และข้อจำกัดของฉนวนบางประเภท อุณหภูมิของการใช้งานที่เหมาะสม (Suitability for Service Temperature) ความต้านทานต่อความชื้น (Resistance to Water Penetration) การเลือกใช้ ฉนวนท่อ และอุปกรณ์

4.9 กรณีศึกษา

ตัวอย่างที่ 4.1

ท่อน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 50 mm. ยาว (L) 6 m. ที่ผนังท่อนี้อุณหภูมิ (Ts) 100°C น้ำไหลผ่านท่อเข้า และออกมีอุณหภูมิ (T_{m,i}) 15°C และ (T_{m,o}) 57°C ตามลำดับ มีมวลการไหล (ṁ) 0.25 kg/s ให้หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) ของน้ำที่ไหลผ่าน

จากโจทย์กำหนดให้ ค่าความร้อนเฉพาะที่ความดันคงที่ (C_p) ของน้ำที่ไหลในท่อนี้อาจเท่ากับ 4.178 kJ/kg.K (อุณหภูมิเฉลี่ย 36°C)

วิธีทำ : สมการสมดุลความร้อน

$$Q = \dot{m} C_p (T_o - T_i) = \pi D L h \Delta T_m$$

ดังนั้นค่า

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{\pi D L \Delta T_m}$$

โดยค่า

ตอนที่ 2 บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

$$\Delta T_m = \frac{(T_s - T_o) - (T_s - T_i)}{\ln[(T_s - T_o) - (T_s - T_i)]}$$

$$= \frac{(100 - 57) - (100 - 15)}{\ln[(100 - 57) - (100 - 15)]} = 61.6^\circ \text{C}$$

ดังนั้น

$$h = \frac{0.25 \times 4178 \times (57 - 15)}{\pi \times 0.05 \times 6}$$

$$= 756 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ตัวอย่างที่ 4.2

Shell & tube heat exchanger มี 1 shell และ 10 tubes มีน้ำไหลเข้ามาด้วยมวลการไหล ($\dot{m}_c$) 2.5 kg/s อุณหภูมิน้ำเข้า ($T_{c,i}$) 15°C และออก ($T_{c,o}$) 85°C แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำมันที่ไหลเข้ามีอุณหภูมิ ($T_{h,i}$) 160°C และต้องการให้น้ำมันไหลออกมีอุณหภูมิ ($T_{h,o}$) 100°C ให้หาอัตราการไหลของน้ำมัน ($\dot{m}_h$) และความยาวของท่อที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (L) ที่ใช้อยู่ใน Shell & tube heat exchanger นี้

จากโจทย์กำหนดให้ ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนรวมของทั้งระบบ (U) เท่ากับ $354 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ คุณสมบัติของน้ำมัน $C_p = 2.350 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ คุณสมบัติของน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 50°C) $C_p = 4.181 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $k = 0.643 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

วิธีทำ : สมการหามวลการไหลของน้ำมัน ($\dot{m}_h$)

$$Q = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) = 731.7 \text{ kW}$$

$$= \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,o} - T_{h,i})$$

$$\dot{m}_h = \frac{\dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{p,h} (T_{h,o} - T_{h,i})}$$

$$= 5.19 \text{ kg/s}$$

หาความยาวของท่อที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (L)

$$Q = U \pi D L F \Delta T_m$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]}$$

$$= \frac{(160 - 85) - (100 - 15)}{\ln[(160 - 85) - (100 - 15)]} = 79.9^\circ \text{C}$$

จากรูปที่ 4.18

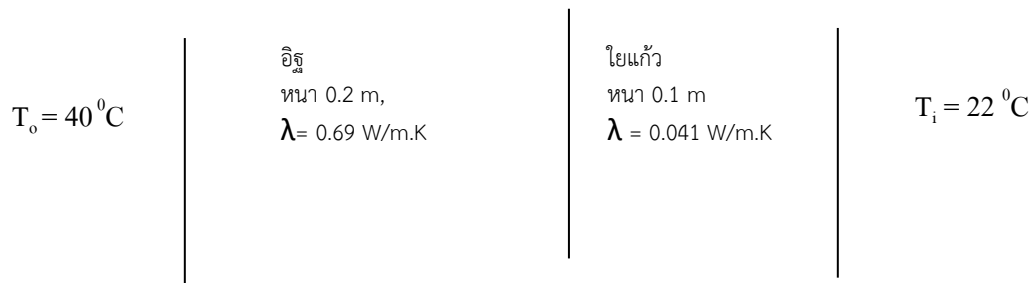
$$R = \frac{160 - 100}{85 - 15} = 0.86 \quad P = \frac{85 - 15}{160 - 15} = 0.48$$

จะได้ค่า $F = 0.87$

$$L = \frac{Q}{U\pi DF\Delta T_m} = \frac{7.317 \times 10^5}{354 \times 10\pi(0.025)0.87(79.9)} = 37.9 \text{ m.}$$

4.10 กิจกรรม (Activity)

4.1 ผนังของอาคารที่สร้างด้วยอิฐ และบุฉนวนด้วยใยแก้ว มีคุณสมบัติดังรูปที่ 4.20 อุณหภูมิภายนอก (T_o) 40°C และอุณหภูมิภายใน (T_i) 22°C ให้หาปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารต่อหน่วยพื้นที่ของผนัง (q , W/m^2)



รูปที่ 4.28 ภาพโจทย์ข้อที่ 4.1

เฉลยกิจกรรม

4.1 จากสมการที่ 4.6

$$q = \frac{(T_o - T_i)}{\left(\frac{\ell_1}{\lambda_1} + \frac{\ell_2}{\lambda_2}\right)} = \frac{(40 - 22)}{\left(\frac{0.2}{0.69} + \frac{0.1}{0.041}\right)} = 6.7 \text{ W}/\text{m}^2$$

ภาคผนวก ตอนที่ 2 บทที่ 4

TABLE A-3

Properties of solid metals

Composition	Melting Point, K	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1000
Aluminum:											
Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218	
						482	798	949	1033	1146	
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	65	163	186	186		
						473	787	925	1042		
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2			174	185		
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8
						203	1114	2191	2604	2823	3018
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			
						112	120	127			
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85
						128	600	1463	1892	2160	2338
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7			
						198	222	242			
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4
						192	384	484	542	581	616
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1
						236	379	450	503	550	628
Copper:											
Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352
						252	356	397	417	433	451
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14		42	52	59		
							785	160	545		
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		41	65	74		
							—	—	—		
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149		
							360	395	425		
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19				
						237	362				
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4
						190	290	337	348	357	375
Gold	1336	19,300	129	317	127	327	323	311	298	284	270
						109	124	131	135	140	145
Iridium	2720	22,500	130	147	50.3	172	153	144	138	132	126
						90	122	133	138	144	153
Iron:											
Pure	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8
						216	384	490	574	680	975
Armco (99.75% pure)		7870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3
						215	384	490	574	680	975
Carbon steels:											
Plain carbon (Mn ≤ 1% Si ≤ 0.1%)		7854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0
								487	559	685	1169
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3
							487	559	685	1168	
Carbon-silicon (Mn ≤ 1% 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3
								501	582	699	971

TABLE A-3

Properties of solid metals (Continued)

Composition	Melting Point, K	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1000
Carbon-manganese-silicon (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%)		8131	434	41.0	11.6			42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1090
Chromium (low) steels: $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9
1 Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7858	442	42.3	12.2			492 42.0	575 39.1	688 34.5	969 27.4
1 Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7836	443	48.9	14.1			492 46.8	575 42.1	688 36.3	969 28.2
Stainless steels:								492	575	688	969
AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3 512	20.0 559	22.8 585	25.4 606
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2 272	12.6 402	16.6 515	19.8 557	22.6 582	25.4 611
AISI 316		8238	468	13.4	3.48			15.2 504	18.3 550	21.3 576	24.2 602
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			15.8 513	18.9 559	21.9 585	24.7 606
Lead	601	11,340	129	35.3	24.1	39.7 118	36.7 125	34.0 132	31.4 142		
Magnesium	923	1740	1024	156	87.6	169 649	159 934	153 1074	149 1170	146 1267	
Molybdenum	2894	10,240	251	138	53.7	179 141	143 224	134 261	126 275	118 285	112 295
Nickel: Pure	1728	8900	444	90.7	23.0 232	164 383	107 485	80.2 592	65.6 530	67.6 562	71.8 562
Nichrome (80% Ni, 20% Cr)	1672	8400	420	12	3.4			14 480	16 525	21 545	
Inconel X-750 (73% Ni, 15% Cr, 6.7% Fe)	1665	8510	439	11.7	3.1	8.7	10.3	13.5	17.0	20.5	24.0
Niobium	2741	8570	265	53.7	23.6	55.2 188	52.6 249	55.2 274	58.2 283	61.3 292	64.4 301
Palladium	1827	12,020	244	71.8	24.5	76.5 168	71.6 227	73.6 251	79.7 261	86.9 271	94.2 281
Platinum: Pure	2045	21,450	133	71.6	25.1	77.5 100	72.6 125	71.8 136	73.2 141	75.6 146	78.7 152
Alloy 60Pt-40Rh (60% Pt, 40% Rh)	1800	16,630	162	47	17.4			52 —	59 —	65 —	69 —
Rhenium	3453	21,100	136	47.9	16.7	58.9 97	51.0 127	46.1 139	44.2 145	44.1 151	44.6 156
Rhodium	2236	12,450	243	150	49.6	186 147	154 220	146 253	136 274	127 293	121 311

TABLE A-3

Properties of solid metals (Concluded)

Composition	Melting Point, K	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1000
Silicon	1685	2330	712	148	89.2	884	264	98.9	61.9	42.4	31.2
Silver	1235	10,500	235	429	174	259	556	790	867	913	946
						444	430	425	412	396	379
Tantalum	3269	16,600	140	57.5	24.7	187	225	239	250	262	277
						59.2	57.5	57.8	58.6	59.4	60.2
Thorium	2023	11,700	118	54.0	39.1	110	133	144	146	149	152
						59.8	54.6	54.5	55.8	56.9	56.9
Tin	505	7310	227	66.6	40.1	99	112	124	134	145	156
						85.2	73.3	62.2			
Titanium	1953	4500	522	21.9	9.32	188	215	243			
						30.5	24.5	20.4	19.4	19.7	20.7
Tungsten	3660	19,300	132	174	68.3	300	465	551	591	633	675
						208	186	159	137	125	118
Uranium	1406	19,070	116	27.6	12.5	87	122	137	142	146	148
						21.7	25.1	29.6	34.0	38.8	43.9
Vanadium	2192	6100	489	30.7	10.3	94	108	125	146	176	180
						35.8	31.3	31.3	33.3	35.7	38.2
Zinc	693	7140	389	116	41.8	258	430	515	540	563	597
						117	118	111	103		
Zirconium	2125	6570	278	22.7	12.4	297	367	402	436		
						33.2	25.2	21.6	20.7	21.6	23.7
						205	264	300	332	342	362

From Frank P. Incropera and David P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., 1990. This material is used by permission of John Wiley & Sons, Inc.