บทที่ 2

ทฤษฎีการวัดค่าการปล่อยออกรังสีความร้อน

2.1 การวัดค่าการปล่อยออกรังสีความร้อน

เมื่อพลังงานการแผ่รังสีกระทบกับผิววัตถุ บางส่วนของการแผ่รังสีจะสะท้อนกลับ บางส่วนก็ดูดซับและบางส่วนก็ผ่านทะลุ ดังนั้น

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ ρ = ค่าสะท้อนกลับทั้งหมด = เศษส่วนของรังสีที่สะท้อนกลับจากวัตถุ

α = ค่าการดูดทั้งหมด = เศษส่วนของรังสีที่ถูกดูดเอาไว้ที่วัตถุ

τ = ค่าการผ่านทะลุทั้งหมด = เศษส่วนของรังสีที่ผ่านทะลุออกไปจากวัตถุ

โดยทั่วไปค่าของการดูดที่ผิววัตถุขึ้นอยู่กับทิศทางของรังสีที่มากระทบ ส่วนประกอบและโครงสร้างของผิววัตถุก็มีผลต่อค่าการสะท้อนกลับและการผ่านทะลุ นอกจากนี้ความยาวคลื่นของรังสียังมีส่วนด้วย (6)

ก๊าซส่วนมากมีค่าการผ่านทะลุสูง แต่ค่าการสะท้อนกลับและค่าการดูดต่ำ สำหรับของแข็งซึ่งส่วนมากเป็นวัตถุทึบแสงที่รังสีความร้อนผ่านทะลุไม่ได้ ดังนั้นค่าการดูดและค่าการสะท้อนกลับจึงรวมกันเท่ากับหนึ่ง

ในการแผ่รังสีหมายถึง การเดินทางของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านอวกาศด้วยความเร็วแสง และการแผ่รังสีความร้อนหมายถึง การที่วัตถุปล่อยรังสีความร้อนออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ ในช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 10^{-7} ถึง 10^{-4} เมตร หรือ 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร

เมื่อวัตถุดูดรังสีความร้อนไว้แล้วจะมีการปล่อยรังสีความร้อนออกจากผิววัตถุด้วย ในการปล่อยรังสีความร้อนทั้งหมดออกจากผิววัตถุต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่มีชื่อเรียกว่า กำลังส่งออกทั้งหมด ซึ่งหมายถึงการปล่อยรังสีเริ่มต้นจากผิวผ่านเข้าไปยังครึ่งทรงกลมสมมุติเหนือผิวนั้นโดยไม่คำนึงถึงทิศทางหรือความยาวคลื่น สำหรับผิวที่มีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

กำลังส่งออกจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกำลังที่สี่ของอุณหภูมิผิว (1) การดูดรังสีความร้อนของวัตถุยังไม่มีวัตถุใดที่ดูดรังสีความร้อนได้สมบูรณ์จะมีเพียงแผ่นคาร์บอนหนาที่ดูดรังสีความร้อนตกกระทบทั้งหมดได้ประมาณ 99 เปอร์เซนต์ จึงอาจถือว่าแผ่นคาร์บอนหนาเป็นวัตถุที่ดูดรังสีความร้อนได้สมบูรณ์หรือวัตถุดำ วัตถุดำนี้ยังเป็นตัวปล่อยรังสีความร้อนที่สมบูรณ์ด้วย ค่ากำลังส่งออกของวัตถุดำได้มาจากสูตรของสเตเฟน - บอลซ์มาน คือ

$$e_b = \sigma T^4 \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ e_b = กำลังส่งออกทั้งหมดของวัตถุดำ, W/m^2

σ = ค่าคงที่ของสเตเฟน - บอลซ์มาน = 5.6697×10^{-8} $W/m^2 - K^4$

T = อุณหภูมิสมบูรณ์, K

ถ้าวัตถุมิใช่วัตถุดำ ค่ากำลังส่งออกจะไม่ได้ตามสมการ (2-2) เพราะการปล่อยรังสีออกไม่สมบูรณ์ได้

$$\varepsilon = e/e_b \qquad (2\text{-}3)$$

เมื่อ ε = ค่าการปล่อยรังสีออก

e = กำลังส่งออกทั้งหมดของวัตถุ, W/m^2

เนื่องจากค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนเป็นอัตราส่วนของกำลังส่งออกทั้งหมดของวัตถุกับกำลังส่งออกทั้งหมดของวัตถุดำ ค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนจึงเป็นค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนทั้งหมด (Total hemispherical emissivity or total emissivity) การใช้คำว่าทั้งหมดและครึ่งทรงกลมขยายคำว่าค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนก็เพื่อแสดงว่า กำลังส่งออกทั้งหมดของวัตถุและวัตถุดำเป็นกำลังส่งออกทั้งหมดโดยไม่คำนึงถึงทิศทางและความยาวคลื่น

ผิววัตถุบางชนิดเป็นตัวปล่อยออกรังสีความร้อนมาบางช่วงความยาวคลื่น ดังนั้นรายละเอียดการปล่อยออกรังสีจึงจำเป็นต้องแสดงไว้ ดังเช่นค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนครึ่งทรงกลมที่ความยาวคลื่น หาได้จากสมการ

$$\varepsilon_\lambda = e_\lambda / e_{b\lambda} \qquad (2\text{-}4)$$

เมื่อ ε_λ = ค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนครึ่งทรงกลมที่ความยาวคลื่น λ

e_λ = กำลังส่งออกที่ความยาวคลื่นหนึ่งของวัตถุที่ความยาวคลื่น λ

$e_{b\lambda}$ = กำลังส่งออกที่ความยาวคลื่นหนึ่งของวัตถุดำที่ความยาวคลื่น λ และที่อุณหภูมิเดียวกับวัตถุ

ค่าของ ε_λ แตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของพลังงานส่งออก โดยทั่วไป ε_λ อาจเป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น λ อุณหภูมิผิว T ลักษณะผิว เป็นต้น ε_λ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เพราะคุณสมบัติทางกายภาพหรือทาง เคมี เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิ

วัตถุที่มิใช่ผิวดำบางชนิดที่ เรียกว่าวัตถุ เทาหมายถึง วัตถุที่มีค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนครึ่งทรงกลมที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ณ อุณหภูมิ เดียวกัน เท่ากันทุกความยาวคลื่น นั่นคือ อัตราส่วนของ e_λ ต่อ $e_{b\lambda}$ เท่ากันตลอดทุกความยาวคลื่นที่อุณหภูมิ เดียวกัน ดังนั้น $\varepsilon_{\text{เทา}} = \varepsilon_{\text{เทา}}(T)$ หรือกล่าวได้ว่า สำหรับวัตถุ เทาค่าการปล่อยออกรังสีความร้อนครึ่งทรงกลม เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิเพียงอย่าง เดียว

การแลก เปลี่ยนพลังงานระหว่างผิวซึ่งกันและกันของวัตถุดำซึ่งมีพื้นที่ A_1 และ A_2 และอุณหภูมิต่างกันต้องใช้แฟค เตอร์ เข้าช่วย

F_{1-2} หมายถึง เศษส่วนของพลังงานที่ออกจากผิว 1 สู่ผิว 2

F_{2-1} หมายถึง เศษส่วนของพลังงานที่ออกจากผิว 2 สู่ผิว 1

ดังนั้นพลังงานที่ออกจากผิว 1 สู่ผิว 2 คือ $e_{b1}A_1F_{12}$ และพลังงานที่ออกจากผิว 2 สู่ผิว 1 คือ $e_{b2}A_2F_{21}$ เนื่องจากวัตถุดำดูดรังสีได้หมดและพลังงานที่มีการแลก เปลี่ยนคือ

$Q_{1-2} = e_{b1}A_1F_{12} - e_{b2}A_2F_{21}$

ถ้าผิวทั้งสองมีอุณหภูมิ เท่ากัน ก็ไม่มีการ เปลี่ยนแปลงพลังงานหรือ $Q_{1-2} = 0$ ซึ่ง $e_{b1} = e_{b2}$ ดังนั้น $A_1F_{12} = A_2F_{21}$ ถ้า $F_{12} = 1$ ได้ $F_{21} = A_1/A_2$ เพราะฉะนั้นการแลก เปลี่ยนความร้อนสุทธิจึง เป็น

$$Q_{1-2} = A_1F_{12}(e_{b1} - e_{b2}) = A_2F_{21}(e_{b1} - e_{b2}) \qquad (2\text{-}5)$$

แต่วัตถุที่นำมาใช้มิใช่วัตถุดำแต่ เป็นวัตถุไม่ดำหรือวัตถุ เทา พลังงานที่ตกลงบนผิวจะไม่ดูดไว้ทั้งหมด มีบางส่วนที่สะท้อนกลับไป ในการคำนวณการแลก เปลี่ยนพลังงานให้สมมุติว่า (5)

ก. คุณสมบัติทางการแผ่รังสี เช่น การสะท้อนกลับ การปล่อยออก การดูดรังสี มีค่าสม่ำ เสมอและไม่คำนึงถึงทิศทางและความยาวคลื่น

ข. ผิวมีลักษณะ เป็นแบบปล่อยกระจายและสะท้อนกระจาย

ค. ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีที่ตกลงบนผิวมีค่าสม่ำ เสมอ

ง. ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีออกจากผิวมีค่าสม่ำเสมอ

จ. ผิวทึบแสง

ฉ. เป็นวัตถุเทา

การสมมุตินี้ก็เพื่อทำให้ปัญหาที่ยุ่งยากกลายเป็นง่ายขึ้น จากพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนที่ตกลงบนผิวโดยไม่มีรังสีผ่านทะลุออกไป ฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากผิวก็คือ ผลรวมของพลังงานที่ปล่อยออกไปกับพลังงานที่สะท้อนกลับ นั่นคือ

$$J = \varepsilon e_b + \rho G \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีที่ออกจากผิว

G = ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีที่ตกลงบนผิว

ε = ค่าการปล่อยออกรังสีความร้อน

e_b = กำลังส่งออกทั้งหมดของวัตถุดำ

ρ = ค่าการสะท้อนกลับ

เนื่องจากการผ่านทะลุไม่มี ดังนั้นการสะท้อนกลับจึงเป็น

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon \qquad (2\text{-}7)$$

ดังนั้น

$$J = \varepsilon\, e_b + (1 - \varepsilon)G \qquad (2\text{-}8)$$

พลังงานสุทธิที่ออกจากผิวคือ ผลต่างระหว่าง J กับ G

$$\begin{aligned} Q/A &= J - G \\ &= \varepsilon\, e_b + (1 - \varepsilon)G - G \\ &= \varepsilon\,(e_b - G) \qquad (2\text{-}9) \end{aligned}$$

แทน (2-8) ลงใน (2-9) ได้

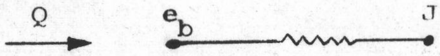
$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon A(e_b - (J - \varepsilon e_b)/(1 - \varepsilon)) \\ &= (e_b - J) \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon)/\varepsilon A} \qquad (2\text{-}10) \end{aligned}$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นเน็ตเวอร์คได้ดังรูปที่ 2.1 ถ้าการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างผิว A_1 และ A_2 จำนวนรังสีทั้งหมดที่ออกจากผิว 1 สู่ผิว 2 คือ $J_1 A_1 F_{12}$ และจากผิว 2 สู่ผิว 1

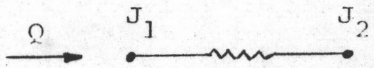
คือ $J_2A_2F_{21}$ เพราะฉะนั้น การแลกเปลี่ยนพลังงานสุทธิคือ $Q_{1-2} = J_1A_1F_{12} - J_2A_2F_{21}$ แต่ $A_1F_{12} = A_2F_{21}$ ดังนั้น $Q_{1-2} = (J_1 - J_2)A_1F_{12} = (J_1 - J_2)A_2F_{21}$ หรือ

$$Q_{1-2} = \frac{J_1 - J_2}{1/A_1F_{12}} \qquad (2\text{-}11)$$

สามารถเขียนเป็นเน็ตเวอร์คดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2

ดังนั้น การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างผิวสองผิวโดยไม่มีอย่างอื่นมาเกี่ยวข้อง จึงได้สมการเป็น

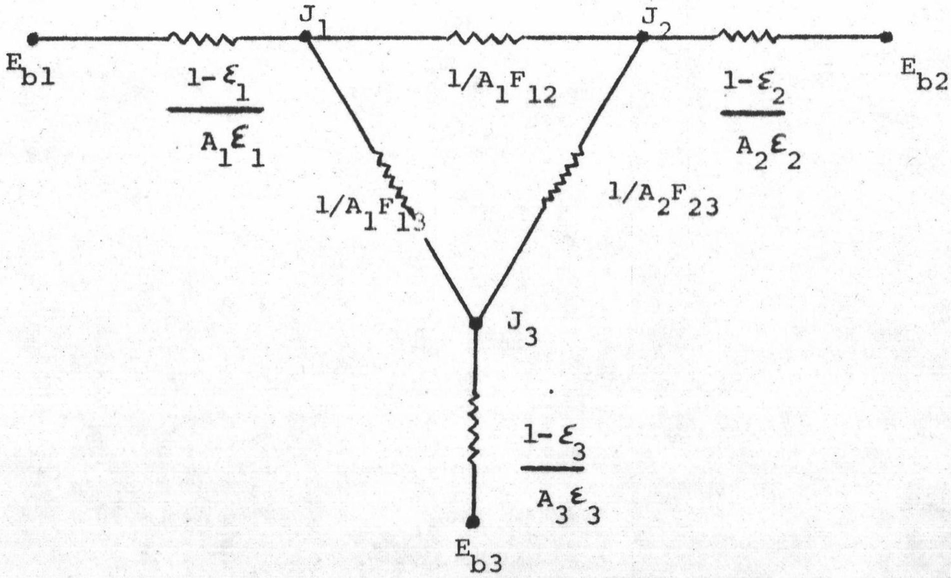
$$Q_{net} = \frac{e_{b1} - e_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

$$= \frac{\sigma A_1(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \qquad (2\text{-}12)$$

สำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานของผิวที่อยู่ในภาชนะปิด ค่า F_{12} มีค่าเป็นหนึ่ง สมการ (2-12) จึงเป็น

$$Q_{net} = \frac{\sigma A_1(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \qquad (2\text{-}13)$$

ถ้าการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวสามผิวซึ่งเขียนเป็นเน็ตเวอร์คได้ดังรูป 2.3 ในการหาสมการการแลกเปลี่ยนความร้อน ให้สมมุติว่าผิวทั้งหมดของวัตถุเมื่อได้รับรังสีความร้อนแล้วสะท้อนกลับแบบกระจายผิวของวัตถุมีอุณหภูมิสม่ำเสมอและคุณสมบัติของการสะท้อนกลับกับการปล่อยออกมีค่าคงที่ตลอดผิว อีกทั้งสมมุติว่า Radiosity และ Irradiation มีค่า



รูป 2.3 แสดงเน็ตเวอร์คการแลกเปลี่ยนความร้อนของผิว
จำนวน 3 ผิว

สม่ำเสมอตลอดผิว (Radiosity คือพลังงานรังสีความร้อนที่ส่งออกรวมถึงพลังงานที่ตกลงมาแล้วสะท้อนกลับออกไปด้วย หรือ $J = \varepsilon E_b + \rho G$ เมื่อ ε เป็นค่าการปล่อยออกรังสีความร้อน E_b เป็นกำลังส่งออกของวัตถุดำ ρ เป็นค่าสะท้อนกลับของรังสีความร้อน Irradiation หรือ G คือพลังงานรังสีทั้งหมดที่ตกลงบนผิววัตถุ) สำหรับวัตถุที่ไม่มีการผ่านทะลุเมื่ออยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) ได้ $\rho = 1 - \varepsilon$ พลังงานที่ออกจากผิววัตถุเป็นผลต่างระหว่าง Radiosity กับ Irradiation หรือ $Q_i = A_i(J_i - G_i)$ เมื่อสัญญลักษณ์ i หมายถึง ผิววัตถุที่ i ในที่สุดเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะเป็น $Q_i = (E_{bi} - J_i) A_i\varepsilon_i/(1 - \varepsilon_i)$ สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิววัตถุที่ i กับผิววัตถุที่ j คิดจากพลังงานที่ตกลงบนผิว i ซึ่งมีค่าเป็น $A_i G_i = \sum_{j=1}^{N} A_i F_{ij} J_j$ เมื่อนำสมการนี้ไปแทนค่าในสมการ $Q_i = A_i (J_i - G_i)$ และคิดในรูปของผลรวมได้ $Q_i = \sum_{j=1}^{N} A_i F_{ij} (J_i - J_j)$ ดังนั้นจึงได้

$$Q_i = (E_{bi} - J_i)A_i\varepsilon_i/(1-\varepsilon_i) = \sum_{j=1}^{N} A_i F_{ij}(J_i - J_j) \quad (2\text{-}14)$$

ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวทั้งสาม สมการ (2-14) จึงได้เป็น

$$(E_{bi} - J_1)A_1\varepsilon_1\Big/(1-\varepsilon_1) = (J_1-J_2)\ A_1F_{12}+\ (J_1-J_3)A_1F_{13} \qquad (2\text{-}15a)$$

$$(E_{b2} - J_2)A_2\varepsilon_2\Big/(1-\varepsilon_2) = (J_2-J_1)\ A_2F_{21}\ +\ (J_2-J_3)A_2F_{23} \qquad (2\text{-}15b)$$

$$(E_{b3} - J_3)A_3\varepsilon_3\Big/(1-\varepsilon_3) = (J_3-J_1)\ A_3F_{31}\ +\ (J_3-J_2)A_2F_{23} \qquad (2\text{-}15c)$$

ให้ $X_1 = A_1\varepsilon_1\Big/(1-\varepsilon_1)\ :\ X_2 = A_2\varepsilon_2\ (1-\varepsilon_2)$

$X_3 = A_3\varepsilon_3\Big/(1-\varepsilon_3)\ :\ Y_2 = A_1\ F_{12}$

$Y_2 = A_2\ F_{23}$

ในกรณีที่ผิวที่หนึ่งอยู่ระดับเดียวกับผิวที่สาม ได้ F_{13} เป็นศูนย์ เมื่อแก้สมการ (2-15) จะได้

$$J_3 = \{\left[X_1E_{b1}+ X_2E_{b2}+ X_3E_{b3} + X_1X_2E_{b1}/Y_1\right]\left[X_1+ X_2((X_1/Y_1)+1)\right]^{-1} + \left[(X_1/Y_1)+1\right]^{-1}\left[(X_3E_{b3}/Y_2)-(X_1E_{b1}/Y_1)\right]\}/\{X_3\left[X_1+X_2((X_1/Y_1)+1)\right]^{-1} + \left[(X_3/Y_2) + 1\right]\left[(X_1/Y_1) + 1\right]^{-1}\} \qquad (2\text{-}16)$$

$$J_1 = \left[X_1E_{b_1} + X_2E_{b_2} + X_3E_{b_3} + X_1X_2E_{b_1}/Y_1 - X_3J_3\right]\left[X_1+X_2((X_1/Y_1)+1)\right]^{-1} \qquad (2\text{-}17)$$

$$J_2 = (-\ X_1E_{b1}/Y_1) + \left[(X_1/Y_1) + 1\right] J_1 \qquad (2\text{-}18)$$

$$Q_1 = X_1 (E_{b_1} - J_1) \qquad (2\text{-}19)$$

$$Q_2 = X_2 (E_{b_2} - J_2) \qquad (2\text{-}20)$$

$$Q_3 = Y_2 (J_2 - J_3) \qquad (2\text{-}21)$$

การสมดุลย์ของการแลกเปลี่ยนพลังงาน ต้องได้

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \qquad (2\text{-}22)$$