

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนคือขบวนการเคลื่อนย้ายพลังงานความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

กลไกการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นใน 3 รูปแบบ

- 1 การนำความร้อน (Heat conduction)
- 2 การพาความร้อน (Heat convection)
- 3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

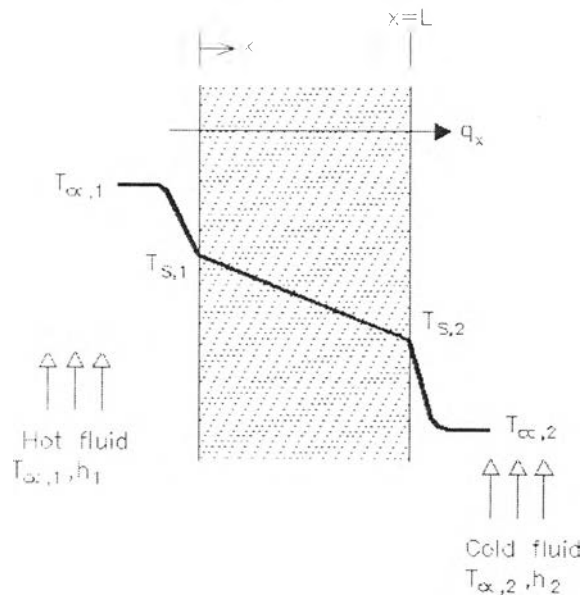
#### 2.1 การนำความร้อน

จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law)

$$\vec{q} = -kA \left( \frac{i\partial T}{\partial x} + \frac{j\partial T}{\partial y} + \frac{k\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

ในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาอาคารนั้น เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของด้านความหนาของหลังคากับความกว้างและความยาวตามพื้นที่ของหลังคาแล้ว พบว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาภายใต้กลไกการนำความร้อนจึงสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่าเป็นการนำความร้อนในทิศทางเดียว (One dimensional conduction) และคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่ จากสมมุติฐานข้างต้นจึงได้ว่า

$$q_x = -kA \left( \frac{T_{x+\Delta x} - T_x}{\Delta x} \right) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 แสดงการนำความร้อนในทิศทางเดียวที่สภาวะคงที่ผ่านวัสดุนำความร้อน

จากรูปที่ 2.1 ได้ว่า

$$q_x = \frac{-kA}{L}(T_{s,2} - T_{s,1}) \quad (2.3)$$

เมื่อ

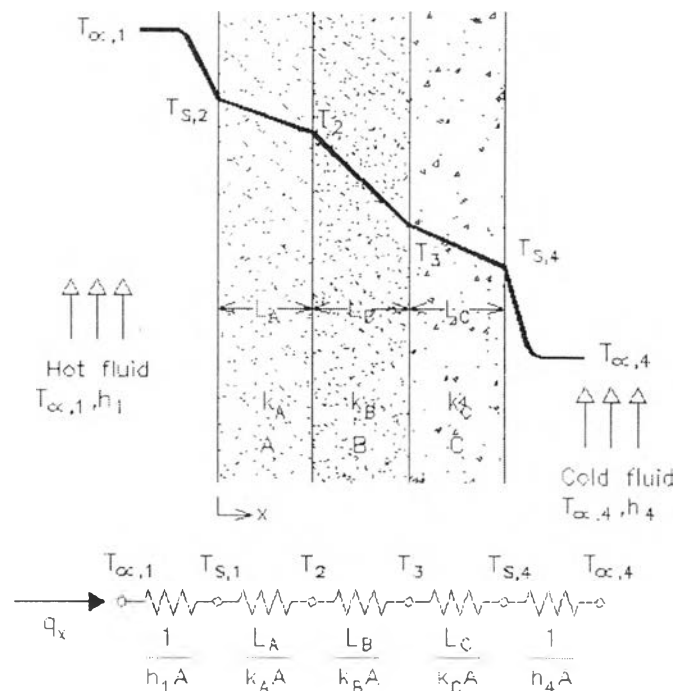
- $q_x$  : อัตราการนำความร้อนผ่านวัตถุ (W)
- $k$  : สภาพการนำความร้อนของวัตถุ (W/m.K)
- $A$  : พื้นที่ของวัตถุที่ตั้งฉากกับทิศการนำความร้อน ( $m^2$ )
- $L$  : ความหนาของวัตถุ (m.)
- $T_{s,1}$  : อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุด้านที่ 1 (K)
- $T_{s,2}$  : อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุด้านที่ 2 (K)

สำหรับการนำความร้อนผ่านวัสดุหลายชนิดซึ่งมีลักษณะเป็นผนังร่วม(Composite wall)

ดังรูปที่ 2.2 ได้ว่า

$$q_x = \frac{-(T_{s,4} - T_{s,1})}{\sum R_i} \quad (2.4)$$

$$\sum R_i = \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรการนำความร้อนผ่านวัสดุหลายชนิด

## 2.2 การพาความร้อน

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคานั้น กลไกการพาความร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณผิวด้านนอกของหลังคา และการพาความร้อนที่ผิวด้านในของหลังคาและฝ้าเพดาน อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอากาศในช่องฝ้า โดยอัตราการพาความร้อนมีค่าดังนี้

$$q = hA (T_s - T_{\infty}) \quad (2.6)$$

เมื่อ

$q$  : อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน (W)

$h$  : สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection heat transfer coefficient)  
( $W/m^2 \cdot K$ )

$A$  : พื้นที่ผิวของวัตถุ ( $m^2$ )

$T_s$  : อุณหภูมิที่ผิววัตถุ (K)

$T_{\infty}$  : อุณหภูมิของอากาศ (K)

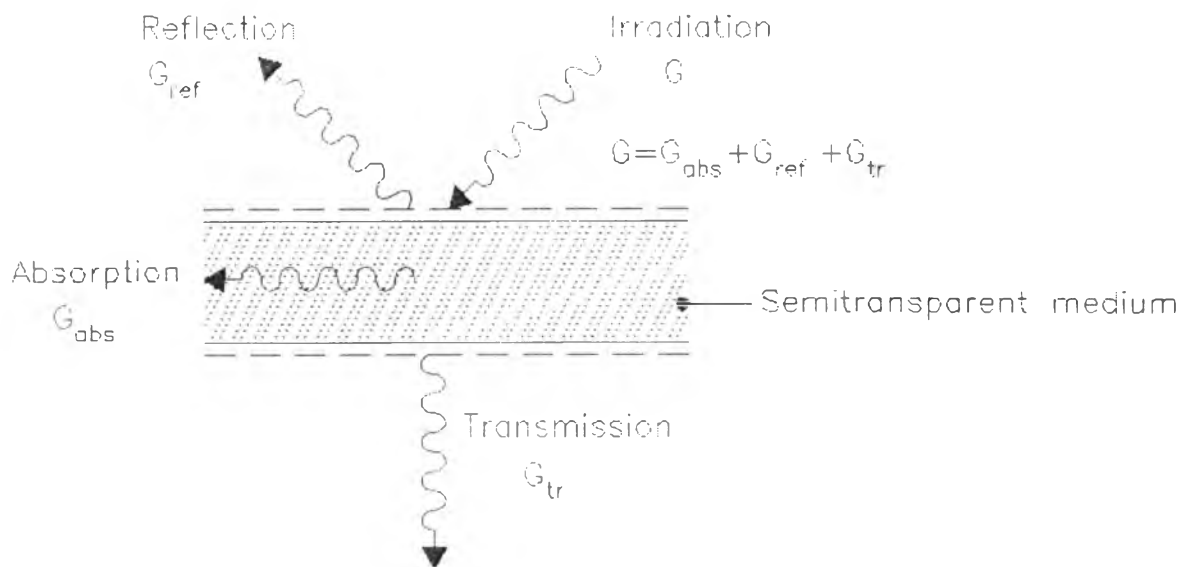
จากรูปที่ 2.2 หากพิจารณากลไกการถ่ายเทความร้อนเฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อนจะได้ว่า

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_t} \quad (2.7)$$

$$\sum R_t = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} + \frac{1}{h_4 A} \quad (2.8)$$

### 2.3 การแผ่รังสีความร้อน

รังสีความร้อนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของหลังคาเกิดจากแสงแดด ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มายังผิวโลก เมื่อแสงแดดตกกระทบบนวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์การดูดซับความร้อน (Absorption), การสะท้อนความร้อน (Reflection) และการส่งผ่านความร้อน (Transmission) (ดูรูปที่ 2.3) โดยมีสมการดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการดูดซับความร้อน การสะท้อนความร้อน และการส่งผ่านความร้อนของรังสีความร้อนที่ตกกระทบบนวัตถุ

$$G = G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} \quad (2.9)$$

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.10)$$

$$G_{ref} = \rho G \quad (2.11)$$

$$G_{tr} = \tau G \quad (2.12)$$

$$\alpha + \varphi + \tau = 1 \quad (2.13)$$

เมื่อ

- G : พลังงานความร้อนที่ตกกระทบบผิววัตถุ ( $W/m^2$ )
- $G_{abs}$  : พลังงานที่วัตถุดูดซับไว้ ( $W/m^2$ )
- $G_{ref}$  : พลังงานที่สะท้อนจากวัตถุ ( $W/m^2$ )
- $G_{tr}$  : พลังงานที่ส่งผ่านวัตถุ ( $W/m^2$ )
- $\alpha$  : สภาพการดูดซับรังสีความร้อน
- $\varphi$  : สภาพการสะท้อนรังสีความร้อน
- $\tau$  : สภาพการส่งผ่านรังสีความร้อน

สำหรับหลังคาซึ่งเป็นวัสดุที่ทึบแสงจะไม่มี การส่งผ่านความร้อน ดังนั้น

$$\tau = 0 \quad (2.14)$$

การแผ่รังสีความร้อน จากผิวของวัตถุทั่วไปสามารถคำนวณได้จาก

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.15)$$

เมื่อ

- E : อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุต่อหน่วยพื้นที่ ( $W/m^2$ )
- $\varepsilon$  : สภาพการแผ่รังสีความร้อน

เนื่องจากผิวของวัตถุทั่วไปเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบบ (Irradiation) จะมีพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งถูกสะท้อนออกจากผิว และเมื่อรวมพลังงานที่ถูกสะท้อน ออกจากผิวกับพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนรวมเรียกว่า อัตราการแผ่รังสีรวมจากผิว (Radiosity) โดยมีค่าสมการดังนี้

$$J = E + \varphi G \quad (2.16)$$

เมื่อ

- J : อัตราการแผ่รังสีความร้อนรวมจากผิววัตถุต่อหน่วยพื้นที่ ( $W/m^2$ )

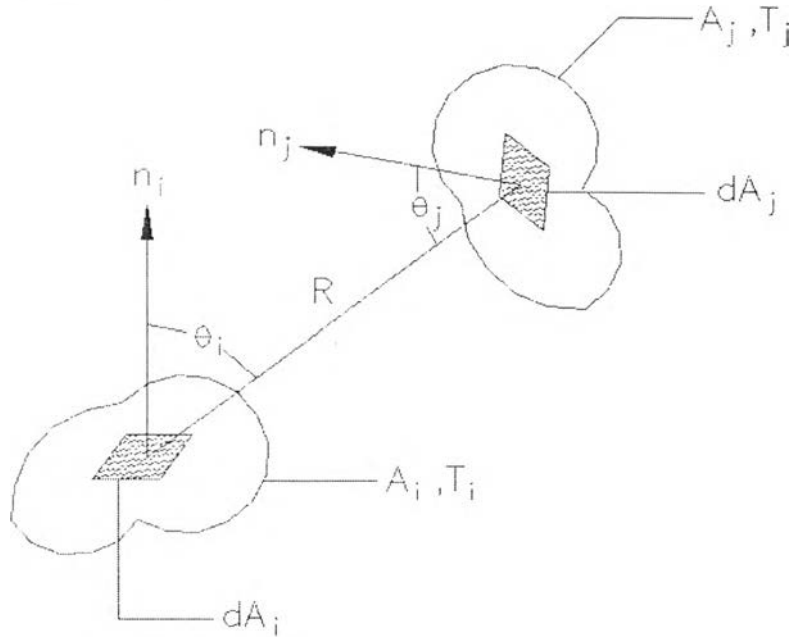
วัตถุที่มีค่าอุณหภูมิที่ผิวมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะมีการแผ่รังสีความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ได้รับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุอื่น ทำให้เกิดกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิววัตถุด้วยการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นกับอัตราความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวแล้วยังขึ้นกับค่าวิวแฟคเตอร์ (View factor) ด้วย ซึ่งค่าวิวแฟคเตอร์,  $F_{ij}$  หมายถึงค่าสัดส่วนของค่ารังสีความร้อนที่ตกกระทบบผิว j อันเนื่องมาจากการแผ่รังสีความร้อนจากผิว i ต่อค่ารังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากผิว i (ดูรูปที่ 2.4) ค่าวิวแฟคเตอร์,  $F_{ij}$  หาได้จากสมการ

[Incropera and Witt, 1990]

$$F_{ji} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2.17)$$

การหาค่า วิวแฟคเตอร์ สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Reciprocity Relation ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

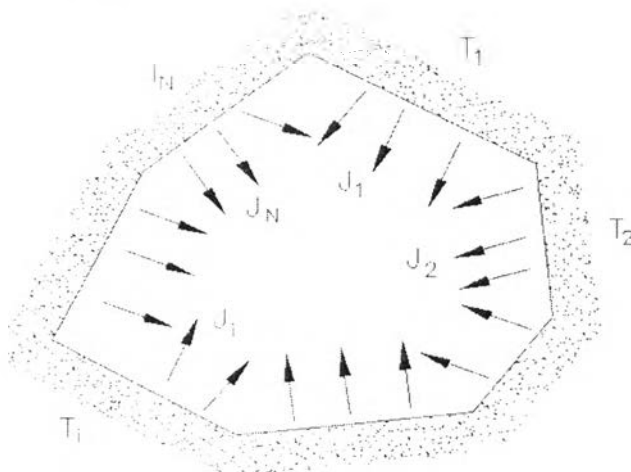
$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.4 รายละเอียดของ View Factor

และหากเป็นการหาค่าวิวแฟคเตอร์ระหว่างพื้นผิวในบริเวณปิดล้อมจำนวน n ด้าน สามารถใช้กฎ Summation Rule ช่วยคำนวณหาค่าได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum_{i=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีระหว่างผิวภายในบริเวณปิดล้อม

การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวในบริเวณปิดล้อมจำนวน  $n$  ด้าน ดังรูปที่ 2.5 เราได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ [Incropera and Witt, 1990]

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i} \quad (2.20)$$

และ

$$\frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (2.21)$$

กรณีการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวภายในช่องว่างของหลังคาแก้วฝ้าเพดานซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวปิดล้อมจำนวน  $n$  ด้าน สามารถคำนวณค่า  $J$  สำหรับด้านที่ 1 ได้ดังนี้

$$\frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1) / \epsilon_1 A_1} = A_1 F_{12} (J_1 - J_2) + \dots + A_1 F_{1n} (J_1 - J_n) \quad (2.22)$$

$$J_1 [(1 - \epsilon_1) (F_{12} + \dots + F_{1n}) + \epsilon_1] = \epsilon_1 E_{b1} + (1 - \epsilon_1) (F_{12} J_2 + \dots + F_{1n} J_n) \quad (2.23)$$

จากกฎ Summation Rule จะได้ค่า

$$\begin{aligned} F_{11} + F_{12} + \dots + F_{1n} &= 1 \\ \text{แต่ } F_{11} &= 0 \\ \text{ดังนั้น } F_{12} + \dots + F_{1n} &= 1 \end{aligned} \quad (2.24)$$

แทนค่าจากสมการ (2.24) ในสมการ (2.23)

$$J_1 [(1 - \epsilon_1) (1) + \epsilon_1] = \epsilon_1 E_{b1} + (1 - \epsilon_1) (F_{12} J_2 + \dots + F_{1n} J_n)$$

$$J_1 - (1 - \epsilon_1) F_{12} J_2 - \dots - (1 - \epsilon_1) F_{1n} J_n = \epsilon_1 E_{b1} \quad (2.25)$$

สำหรับด้านอื่นๆ ก็จะมีลักษณะเดียวกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่า  $J$  จึงเป็นการแก้สมการเชิงเส้นจำนวน  $n$  ตัวแปร และ  $n$  สมการ ดังนี้

$$J_1 - (1 - \epsilon_1) F_{12} J_2 - \dots - (1 - \epsilon_1) F_{1n} J_n = \epsilon_1 E_{b1} \quad (2.26.1)$$

$$(1 - \epsilon_2) F_{21} J_1 + J_2 - \dots - (1 - \epsilon_2) F_{2n} J_n = \epsilon_2 E_{b2} \quad (2.26.2)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$(1 - \epsilon_n) F_{n1} J_1 - \dots - (1 - \epsilon_{n-1}) F_{n,n-1} J_{n-1} + J_n = \epsilon_n E_{bn} \quad (2.26.n)$$

โดยที่ค่า  $E_{bn}$  ได้จากค่าประมาณของอุณหภูมิในช่วงเวลาก่อนการพิจารณาหนึ่งช่วงเวลา

สำหรับการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวด้านนอกของหลังคาแก้วฝ้าเพดานโดยพิจารณาให้เป็นการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวนขนาดเล็กไปสู่พื้นผิวปิดล้อมขนาดใหญ่ [Sukhatme, 1996]

$$q = \epsilon A \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$T_{\text{sky}} = T_a - 6 \quad (2.28)$$

$T_{\text{sky}}$  : อุณหภูมิท้องฟ้า (K)

$T_s$  : อุณหภูมิที่ผิวหลังคา (K)

$T_a$  : อุณหภูมิอากาศ (K)